

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO NA TENACIDADE E NA RESISTÊNCIA DE AÇOS APLICADOS EM BAIXAS TEMPERATURAS*

Carolina Conter Elgert¹
Jader Daniel de Brito²
Afonso Reguly³

Resumo

O objetivo deste trabalho foi definir composições químicas e parâmetros de tratamento térmico mais adequados para atendimento às rígidas especificações de fixadores utilizados na indústria de energia eólica, visando à minimização dos custos de produção. Para tal, foram realizados testes em escala laboratorial variando-se as temperaturas de austenitização e de revenimento para três composições químicas diferentes, tendo como base o aço SAE 4140 com variações nos teores de carbono, cromo e vanádio. A influência destes parâmetros sobre a microestrutura, tenacidade e resistência mecânica foi avaliada por meio de análises em microscópio eletrônico de varredura, ensaios de dureza, resistência à tração e ao impacto. Os resultados possibilitaram encontrar uma relação de compromisso entre a resistência mecânica e a tenacidade, tanto em relação ao desempenho do produto final quanto em relação aos custos de produção.

Palavras-chave: Tenacidade; Resistência; SAE 4140; Vanádio.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT PARAMETERS ON TOUGHNESS AND STRENGTH OF STEELS WITH APPLICATIONS IN LOW TEMPERATURES

Abstract

The aim of this study was to determine chemical composition and heat treatment parameters most suitable for meeting the strict specifications required for fasteners used in wind energy industries, in order to minimize production costs. For this, laboratory tests were performed varying the austenitizing and tempering temperatures for three different chemical compositions based on SAE 4140 with variations on carbon, chromium and vanadium contents. The influence of this parameters on microstructure, toughness and strength was evaluated through scanning electron microscope analysis and hardness, tensile and impact tests. The results had shown an optimal trade-off between the strength and toughness in relation to the final product performance as well as production costs.

Keywords: Toughness; Strength; SAE 4140; Vanadium.

¹ Engenheira de Materiais, M.Sc., Assessora Técnica de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerdau Aços Especiais, Charqueadas, Rio Grande do Sul Brasil

² Estudante de Engenharia Mecânica, Assistente de Processos Laboratórios Metalúrgico e Químico, Gerdau Aços Especiais, Charqueadas, Rio Grande do Sul, Brasil

³ Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor Departamento de Metalurgia e Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil vem figurando como um dos países mais promissores para o mercado de energia eólica, em função de possuir diversas áreas com enorme potencial de ventos, além da demanda crescente por energia no país. Dentro deste contexto, vislumbra-se um crescimento expressivo no consumo de aço neste segmento, incluindo aços com aplicação em fixadores, que são o foco deste trabalho. Estes fixadores trabalham em baixas temperaturas e devem apresentar alta resistência e alta tenacidade. Alcançar esta combinação tem sido uma meta frequente nas pesquisas na área da metalurgia.

Historicamente, o aço SAE 4340 vem sendo utilizado para esta aplicação. No entanto, o elevado percentual de Níquel aumenta muito o custo de produção desta liga. Em função disso, a utilização de outros aços tem sido avaliada. Uma das alternativas é a utilização do aço SAE 4140 e suas variações. Estes aços alcançam elevados valores de resistência mecânica após tratamento térmico de têmpera e revenimento. Para se associar os altos valores de resistência mecânica com altos valores de resistência ao impacto, especialmente em temperaturas negativas, geralmente se restringe o percentual de elementos residuais do aço, tais como fósforo e enxofre. Além disso, adições de elementos de liga podem ser realizadas com este objetivo.

1.1 Tratamento Térmico

Projetar ligas e/ou processos que resultem em propriedades mecânicas superiores, incluindo resistência mecânica, tenacidade e ductilidade tem sido um desafio constante na engenharia. Praticamente todas as técnicas de aumento de resistência, de uma dada liga, estão baseadas em dificultar ou impedir o movimento das discordâncias, através dos cinco mecanismos: diminuição do tamanho de grão, solução sólida, encruamento, precipitação e transformação de fase.

Um dos principais tratamentos térmicos existentes é o beneficiamento, que é composto pelas etapas de austenitização, têmpera e revenido. A microestrutura objetivada no final do processo é a martensita revenida, que corresponde a uma estrutura de finos carbonetos de ferro e de elementos de liga precipitados na ferrita. Callister [1] cita que a quantidade e o tamanho das partículas de cementita influenciam o comportamento mecânico da martensita revenida:

- Quanto maior a quantidade de carbonetos presentes no aço, maior é a sua dureza. Quanto maior o percentual de carbono do aço, maior é sua quantidade de carbonetos.
- O aumento do tamanho das partículas diminui a área de contornos entre as fases ferrita e cementita e, conseqüentemente, resulta em um material com menor dureza e mais tenaz. Quanto maior o tempo e a temperatura de revenimento, maior o tamanho das partículas de cementita, pois se favorece o processo de difusão, e menor é a dureza do aço.

1.2 Efeito dos Elementos de Liga

Krauss [2] cita que além do efeito de aumento da temperabilidade, alguns elementos de liga também ajudam a diminuir a taxa de amaciamento durante o revenimento, dificultando o processo de difusão do carbono e do ferro necessário para que ocorra o coalescimento das partículas de cementita. Os elementos mais efetivos nesta

relação são elementos fortemente formadores de carbonetos como, por exemplo, cromo, molibdênio e vanádio. O aumento do percentual de carbono tem o mesmo efeito.

O efeito dos elementos de liga nas mudanças de dureza produzidas pelo revenimento foi resumido na investigação de Grange, Hribal e Porter [3]. Foram obtidos gráficos das diferenças relativas de dureza em função do percentual de elementos de liga, em temperaturas de revenimento entre 200 e 700 °C. A Figura 1 e a Figura 2 mostram os gráficos para as temperaturas de 540 e 649 °C.

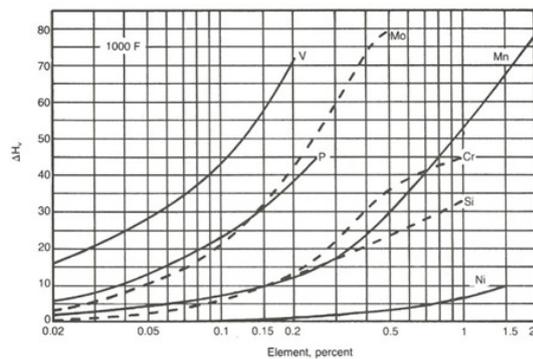


Figura 1: Efeito dos elementos de liga na diminuição da taxa de amaciamento durante revenimento realizado a 540 °C.

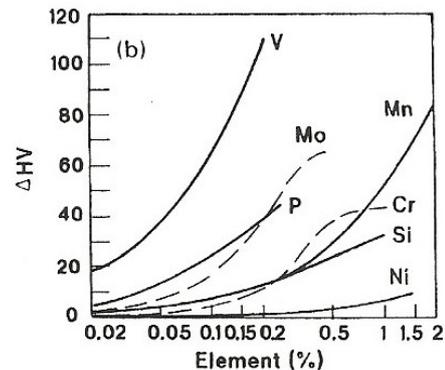


Figura 2: Efeito dos elementos de liga na diminuição da taxa de amaciamento durante revenimento realizado a 649 °C.

Para o vanádio, além do efeito de diminuição da taxa de amaciamento, também ocorre um aumento na resistência mecânica devido à precipitação de finas partículas de carbonitretos de vanádio durante o resfriamento ou revenimento. No entanto, Lagneborg [4] cita várias investigações que mostram que aços microligados ao vanádio têm temperaturas de transição de impacto maiores com o aumento do teor de nitrogênio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com relação à composição química, foi avaliada a influência dos teores dos elementos carbono, cromo e vanádio sobre a microestrutura, tenacidade e resistência mecânica, utilizando-se amostras dos aços SAE 4140, SAE 41V40 e SAE 4140 MOD.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, estão descritas as faixas de composição química das amostras.

Tabela 1: Faixa de composição química das amostras do estudo

| Corrida | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V |
|--------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| SAE 4140 | 0,38 | 0,15 | 0,75 | - | - | 0,80 | - | 0,15 | - |
| | 0,43 | 0,35 | 1,00 | 0,030 | 0,040 | 1,10 | 0,25 | 0,25 | - |
| SAE 41V40 | 0,38 | 0,15 | 0,75 | - | - | 0,80 | - | 0,15 | 0,01 |
| | 0,43 | 0,35 | 1,00 | 0,030 | 0,040 | 1,10 | 0,25 | 0,25 | 0,20 |
| SAE 4140 MOD | 0,42 | 0,15 | 0,75 | - | - | 1,00 | - | 0,15 | - |
| | 0,48 | 0,35 | 1,00 | 0,030 | 0,040 | 1,40 | 0,25 | 0,25 | - |

Buscando-se evitar a influência nos resultados, trabalhou-se com teores de fósforo e enxofre restritos. Além disso, foram escolhidas amostras de bitolas finas para se minimizar a influência de microsegregações e presença de outras fases nos resultados. Também foram realizadas análises de tamanho de grão, conforme

norma ASTM E112, e nível de microinclusões, conforme norma ASTM-E45 Método A.

Os tratamentos térmicos foram realizados em forno laboratorial Sanches. Primeiramente, foram realizadas curvas de revenimento para os três aços, avaliando-se a dureza em função da temperatura de revenimento. A faixa de temperaturas estudada foi de 575 a 675 °C, com intervalos de 25 °C. As amostras utilizadas para confecção das curvas de revenimento foram austenitizadas à temperatura de 880 °C. Os tempos de austenitização e de revenimento utilizados foram de 126 e 102 minutos, respectivamente, e são baseados na prática laboratorial. Em função da elevada temperabilidade dos aços em estudo, o meio de resfriamento foi o óleo.

Após a obtenção e análise das curvas de revenimento, foram escolhidas duas temperaturas específicas para avaliação mais detalhada das propriedades mecânicas, com a realização de ensaios de resistência à tração e de resistência ao impacto (- 40 °C), conforme norma ASTM A370. Também foi avaliada a influência da temperatura de austenitização nos resultados dos ensaios.

Na Tabela 2 está a configuração dos ensaios e identificação das amostras. Segundo o código de identificação de amostras utilizado.

Tabela 2: Planejamento dos ensaios para estudo

| Aço | Temperatura Austenitização (°C) | Temperatura Revenimento (°C) | Identificação da Amostra: |
|------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 - SAE 4140 | 1 – 880 | 1 – 575 | 111 |
| | | 2 – 650 | 112 |
| | 2 – 920 | 1 – 575 | 121 |
| | | 2 – 650 | 122 |
| 2 - SAE 41V40 | 1 – 880 | 1 – 575 | 211 |
| | | 2 – 650 | 212 |
| | 2 – 920 | 1 – 575 | 221 |
| | | 2 – 650 | 222 |
| 3 - SAE 4140 MOD | 1 – 880 | 1 – 575 | 311 |
| | | 2 – 650 | 312 |
| | 2 – 920 | 1 – 575 | 321 |
| | | 2 – 650 | 322 |

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises Preliminares

Os resultados das análises de tamanho de grão austenítico e nível de inclusões estão descritos na Tabela 3:

Tabela 3: Resultados das análises de tamanho de grão e nível de microinclusões

| Aço | TG Austenítico | Microinclusões |
|--------------|----------------|----------------------------|
| SAE 4140 | 8 ASTM | A1,5F; B1,0F; B0,5G; D1,0F |
| SAE 41V40 | 8 ASTM | A2,0F; A0,5G; D1,0F; D0,5G |
| SAE 4140 MOD | 8 ASTM | A1,5F; B1,0F; D1,0F |

Os resultados de tamanho de grão austenítico foram iguais para os três aços. O resultado da análise de microinclusões mostra resultados bastante semelhantes. Desta forma, pode-se afirmar que estes parâmetros não terão influência significativa nos resultados deste estudo.

3.2 Curvas de Revenimento

As curvas de revenimento para os aços SAE 4140, SAE 41V40 e SAE 4140 MOD podem ser visualizadas na Figura 3.

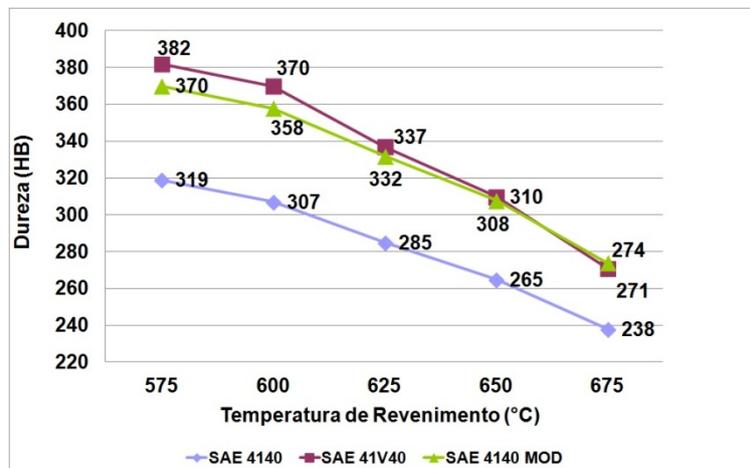


Figura 3: Curvas de revenimento dos aços em estudo.

Constata-se que os valores de dureza para os três aços decaem com o aumento da temperatura de revenimento, conforme Jha, Dutta e Ray [5]. Para todas as temperaturas de revenimento, os valores de dureza do SAE 41V40 e SAE 4140 MOD são bastante semelhantes entre si e superiores aos resultados obtidos para o aço SAE 4140. As maiores diferenças entre os aços SAE 41V40 e SAE 4140 MOD são verificadas em temperaturas mais baixas. A diferença de dureza entre o SAE 41V40 e o SAE 4140 chega a 63 HB para o revenimento realizado a 575 °C.

3.3 Resultados de Propriedades Mecânicas

Com base nos resultados de dureza expostos na Figura 3, escolheram-se as amostras revenidas nas temperaturas de 575 °C e 650 °C para avaliação mais detalhada das propriedades mecânicas. Estas temperaturas foram escolhidas porque nelas foram encontrados resultados de dureza próximos aos valores limite das especificações. Os resultados de limite de resistência (LR) e de escoamento (LE) são mostrados nas Figuras 4, 5, 6 e 7. Os resultados do ensaio de impacto são mostrados nas Figuras 8 e 9.

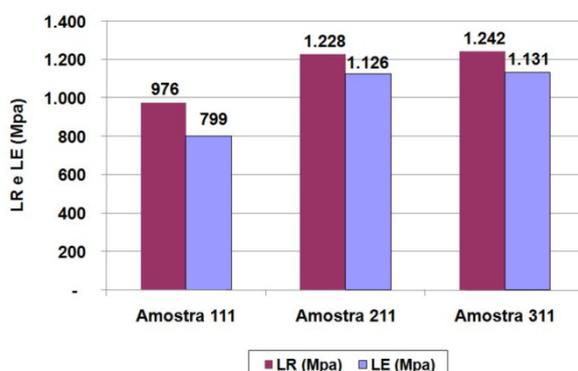


Figura 4: LR e LE com austenitização a 880°C e revenimento a 575 °C.

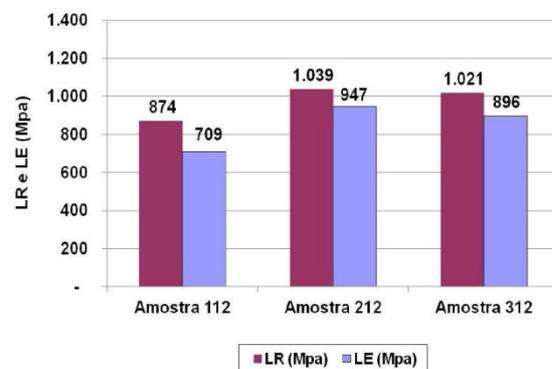


Figura 5: LR e LE com austenitização a 880°C e revenimento a 650 °C.

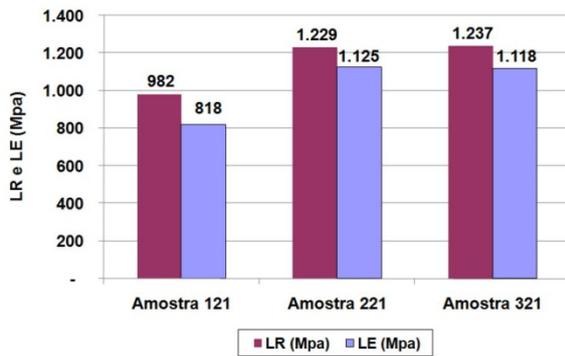


Figura 6: LR e LE com austenitização a 920 °C e revenimento a 575 °C.

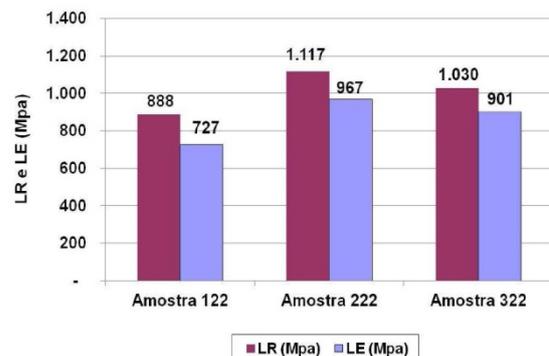


Figura 7: LR e LE com austenitização a 920 °C e revenimento a 650 °C.

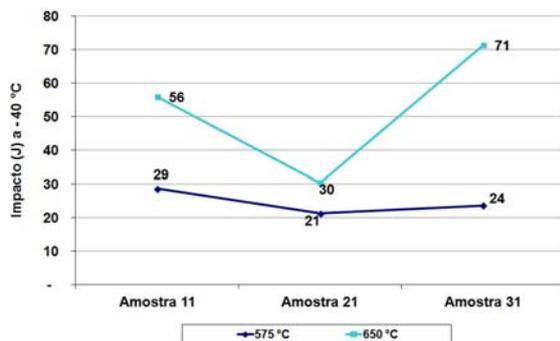


Figura 8: Impacto com austenitização a 880 °C e revenimento a 575 e 650 °C.

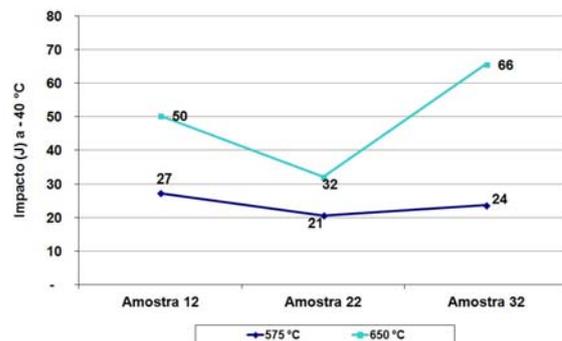


Figura 9: Impacto com austenitização a 920 °C e revenimento a 575 e 650 °C.

3.4 Influência da Temperatura de Revenimento

Observando-se as figuras acima, verifica-se que, com o aumento da temperatura de revenimento:

- Há uma queda nos valores dos limites de resistência e de escoamento para os três aços;
- Ocorre um incremento nos valores de resistência ao impacto para os três aços.

Estes resultados estão associados ao aumento do tamanho das partículas de cementita. Após o revenimento, a microestrutura é composta de finos carbonetos de ferro e de elementos de liga precipitados na ferrita, pois o carbono que estava preso nos sítios octaédricos da martensita não revenida consegue difundir, formando estes carbonetos. Quanto maior a temperatura de revenimento, maior será a taxa de difusão, maiores serão as partículas de carboneto e menor a área de contorno entre as fases ferrita e cementita e, conseqüentemente, menor a dureza e maior a tenacidade do aço.

Brooks [6] cita que para se analisar detalhadamente as mudanças microestruturais desenvolvidas durante o revenimento, não é recomendada a utilização de microscópio ótico, pois os carbonetos formados durante o revenimento são muito finos para serem resolvidos nas grandezas de aumento possíveis de ser alcançados por este método de análise. O ideal é se examinar a microestrutura no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Nas Figuras 10 e 11 são mostradas as imagens da microestrutura, via MEV, das amostras 111 e 112, respectivamente.

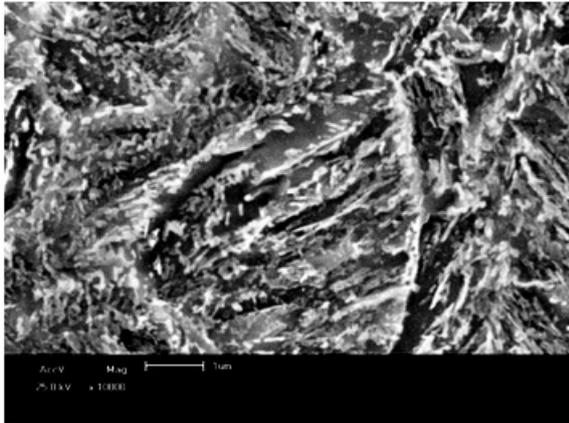


Figura 10: MEV SAE 4140, com austenitização a 880 °C e revenimento a 575 °C.

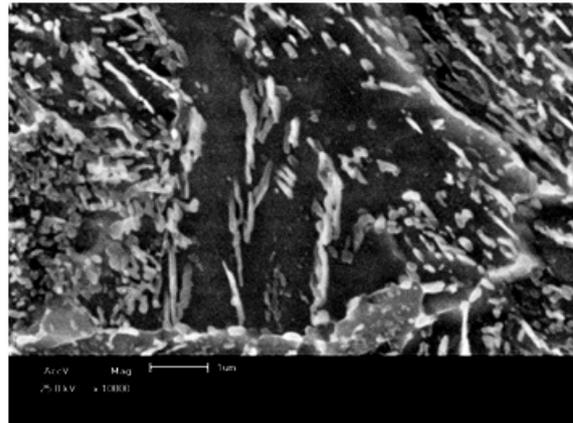


Figura 11: MEV SAE 4140, com austenitização a 880 °C e revenimento a 650 °C.

Comparando-se a Figura 10 e a Figura 11, observa-se o coalescimento das partículas de cementita com a maior temperatura de revenimento. Este coalescimento é favorecido pelo aumento da temperatura de revenimento que aumenta a taxa de difusão do carbono e do ferro. A microestrutura em pacotes com subunidades paralelas ainda é claramente visível nas duas temperaturas de revenimento testadas para os três aços. Os principais efeitos do revenimento são eliminar várias pequenas ripas e produzir partículas de cementita coalescidas nos contornos de grão prévios da austenita e dentro dos pacotes.

3.5 Influência da Composição Química

As principais diferenças entre as composições químicas dos aços SAE 4140 e SAE 4140 MOD em estudo são os percentuais de carbono e de cromo. Comparando-se a Figuras 11 e a Figura 12, pode-se observar que o aço SAE 4140 MOD possui precipitados menos coalescidos e em maior quantidade do que o aço SAE 4140. Desta forma, os resultados superiores do aço SAE 4140 MOD podem ser explicados pelos mecanismos de diminuição da taxa de amaciamento, além do aumento de dureza por solução sólida.

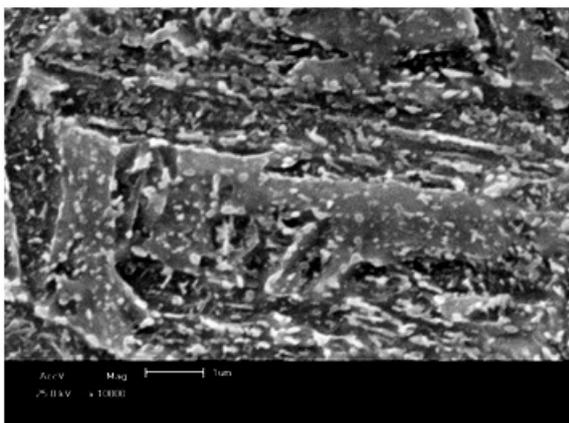


Figura 12: MEV SAE 4140 MOD, austenitizado a 880 °C e revenimento a 650 °C.

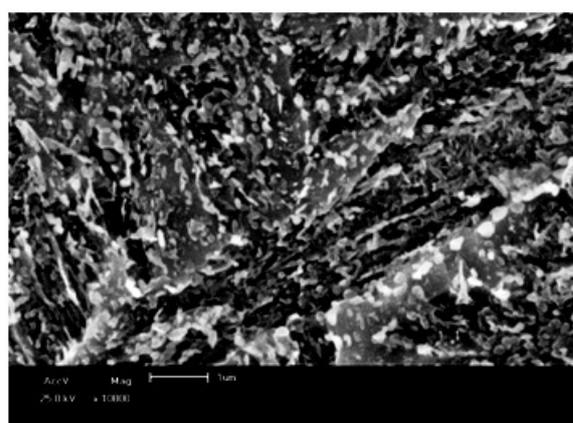


Figura 13: MEV SAE 41V40, austenitizado a 880 °C e revenido a 650 °C.

Já para os aços SAE 4140 e SAE 41V40 em estudo, a principal diferença é o percentual de vanádio. Observando-se a Figura 1 e a Figura 2, verifica-se que, tanto a 540°C, quanto a 649°C, o efeito do vanádio na diminuição da taxa de

amaciamento durante o revenimento é bastante pronunciado. Este mecanismo pode ser observado comparando-se a Figura 11 e a Figura 13. Além disso, durante o revenimento, temos o efeito adicional da precipitação de partículas de carbonitretos de vanádio, com dimensões na ordem de nanômetros, que não podem ser visualizadas pela análise no microscópio eletrônico de varredura.

Observando-se na Figura 8, os resultados de impacto para temperatura de revenimento de 650°C, verifica-se um excelente resultado para o aço SAE 4140 MOD. Para o SAE 4140 o resultado é um pouco inferior, mas ainda bastante acima da especificação, ≥ 27 J. Já para o SAE 41V40, o resultado é bastante inferior e está bem próximo à especificação. O resultado de impacto do SAE 41V40 austenitizado a 920°C é um pouco superior e esta é a única condição que atende ao mesmo tempo a especificação de impacto e de limite de resistência (Mínimo 1040 MPa).

Conforme Dieter [7] era esperado que os resultados do aço SAE 4140 fossem superiores ao do SAE 4140 MOD, já que o cromo não tem efeito significativo sobre a tenacidade dos aços e o carbono tem efeito deletério sobre esta propriedade, pois aumenta a temperatura de transição dúctil-frágil. No entanto, o níquel é aceito como sendo um elemento benéfico à tenacidade, pois diminui a temperatura de transição dúctil-frágil. Desta forma, esta diferença pode ser atribuída ao maior percentual residual de Níquel do aço SAE 4140 MOD. Já o baixo valor de resistência ao impacto do aço SAE 41V40 pode ser atribuído, principalmente, ao seu aumento da temperatura de transição dúctil-frágil, para temperaturas próximas a 0 °C, em função do Vanádio. Esse fenômeno ocorre basicamente em função dos precipitados de vanádio atuarem como fragilizantes do aço.

3.6 Influência da Temperatura de Austenitização

Não são observadas diferenças significativas nas propriedades de tração dos aços SAE 4140 e SAE 4140 MOD com o aumento na temperatura de austenitização, em nenhuma das duas temperaturas de revenimento.

Já para o aço SAE 41V40 revenido a 650 °C, observa-se um aumento de 78 MPa para temperatura de austenitização de 920 °C. Não foi possível explicar esta diferença uma vez que, utilizando-se as informações de diagramas de solubilidade, os precipitados de vanádio estarão dissolvidos nestas duas temperaturas.

Não foram observadas diferenças significativas nas propriedades de resistência ao impacto dos três aços com o aumento na temperatura de austenitização em nenhuma das duas temperaturas de revenimento.

4 CONCLUSÃO

- A temperatura de revenimento exerceu forte influência sobre a tenacidade e a resistência mecânica dos aços estudados. Quanto mais alta a temperatura de revenimento, menor a resistência mecânica e maior a tenacidade destes aços.
- Os percentuais de carbono, cromo e vanádio exerceram forte influência sobre a resistência mecânica dos aços estudados. Quanto maiores os percentuais destes elementos, maior a resistência mecânica destes aços.
- Não foi possível avaliar a influência do carbono sobre a tenacidade dos aços estudados em função do diferente percentual de níquel entre eles, o que pode ter influenciado os resultados=

- A adição de vanádio resultou em redução da energia absorvida durante o teste de impacto, fato que pode estar associado ao aumento da temperatura de transição dúctil-frágil.
- A faixa de temperatura de austenitização utilizada exerceu baixa influência sobre a resistência mecânica e não exerceu influência sobre a tenacidade dos aços estudados.
- Pelos resultados obtidos neste trabalho, quanto ao aço e à temperatura de revenimento para aplicação em fixadores para energia eólica, o recomendado é utilizar-se o SAE 41V40 revenido a 650 °C que atende às especificações de resistência mecânica e ao impacto com menor custo em elemento de liga.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Gerdau pelo apoio na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Callister Jr., W. D., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª Edição. Rio de Janeiro. LTC; 2000;
- 2 Krauss, G., Steels: Heat Treatment and Processing Principles. OHIO, USA. ASM International. 1989.
- 3 Grange, R.A., Hribal, C.R., Porter, L.F., Hardness of Tempered Martensite in Carbon and Low-Alloy Steel. Met Trans A. 1977; 8A: 1775-1785
- 4 Lagneborg, R., Siwecki, T., Zajac, S., Hutchinson, D., The Role of Vanadium in Microalloyed Steel. Stocolmo. Swedish Institute for Metals Research; 1999.
- 5 Jha, R. N., Dutta, K., Ray, K. K., Effect of Tempering on Mechanical Properties of V-added AISI 4335 Steel, ISIJ International, 2010; 50 (4): 607 – 612.
- 6 Brooks, C. R., Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels. Ohio. ASM International; 1996.
- 7 Dieter, G. E., Metalurgia Mecânica, Segunda Edição, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois