

# **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA MICROESTRUTURA DE UM AÇO PARA TRABALHO A FRIO PRODUZIDO POR METALURGIA CONVENCIONAL**

E. Soares Jr. <sup>(1)</sup>; J. Vatauvuk<sup>(2)</sup>; R. Panelli<sup>(3)</sup>; M. F. Pillis<sup>(1)</sup>

(1) Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares; (2) Escola de Engenharia Mackenzie; (3) Consultor independente

## **Resumo**

Um aço-ferramenta comercial foi austenitizado a 1040°C, e submetido ao revenimento em temperaturas na faixa de 300°C a 580°C. Foram realizados ensaios de tração, impacto Charpy, flexão e dureza. A avaliação microestrutural foi feita por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura acoplada a análises químicas de micro-regiões por energia dispersiva. Observou-se que a dureza decresce com o aumento da temperatura de revenimento, porém apresenta pico de endurecimento a aproximadamente 550°C, devido ao efeito da precipitação de carbonetos complexos e que a dureza atingida no revenimento a 475°C está associada a um melhor desempenho em todos os ensaios mecânicos, com particular atenção aos resultados de energia absorvida em ensaio de impacto charpy.

Palavras-chave: aço-ferramenta, tratamento térmico, tenacidade.

## **INTRODUÇÃO**

Os aços-ferramenta têm uma participação importante no mercado mundial dos aços. São amplamente utilizados pela indústria metal-mecânica como punções, machos, matrizes, ferramentas de corte e outros componentes estruturais, principalmente em aplicações que requeiram altas solicitações de resistência ao desgaste. Mesmo com aplicações de grande responsabilidade, há pouca informação disponível a respeito da correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas. Assim, dados extremamente importantes para o projeto de componentes, tais como limite de

escoamento, limite de resistência à tração, limite de fadiga, etc são escassos. Além disso, é prática comum na indústria a especificação de tratamentos térmicos com base exclusivamente na dureza final da peça. Entretanto, para uma mesma dureza, o aço pode apresentar variações nos limites de escoamento, na resistência à tração e fadiga, e na tenacidade, dependendo do ciclo térmico aplicado. Conseqüentemente, é possível ter-se duas peças fabricadas com o mesmo aço e apresentando a mesma dureza, mas com desempenho em uso completamente diferente. A seleção do tratamento térmico é um aspecto tecnologicamente relevante na aplicação desses aços. Neste trabalho um aço-ferramenta comercial foi austenitizado a 1040°C, e submetido ao revenimento em temperaturas na faixa de 300°C a 580°C. Foram realizados ensaios de tração, impacto Charpy, flexão e dureza. A avaliação microestrutural foi feita por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura acoplada a análises químicas de micro-regiões por energia dispersiva.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi selecionado para este estudo um aço-ferramenta muito utilizado comercialmente, obtido por metalurgia convencional, cuja composição química obtida por fluorescência de raios-X é: (%em peso) 0,82%C; 7,4%Cr; 0,86%Si; 0,37%V; 0,37%Mn; 1,94%Mo e balanço em Fe.

Amostras do aço-ferramenta foram submetidas à têmpera conforme o ciclo indicado na tabela 1.

Tabela 1 – As condições de tempera do aço estudado <sup>(1)</sup>

| <b>Condições de Têmpera</b>      |                   |               |
|----------------------------------|-------------------|---------------|
| Aquecimento                      | Austenitização    | Resfriamento  |
| 2h a 400°C<br>+ 15min a<br>850°C | 15min a<br>1040°C | 10min a 520°C |

Após a têmpera as amostras foram submetidas a tratamentos térmicos de revenimento. Os ciclos adotados constaram de um primeiro revenimento a 530°C para todas as amostras. Em seguida, foi feito um segundo revenimento nas temperaturas de 300°C, 475°C, 540°C, 550°C e 580°C, como mostra a tabela 2. Os tratamentos térmicos foram concebidos com base no conceito de que para uma mesma dureza, um aço-ferramenta pode apresentar variações na resistência, fadiga e tenacidade, dependendo do ciclo térmico aplicado.

Tabela 2: Ciclos térmicos de revenimento

| Condições   | 1° revenimento (°C) | 2° revenimento (°C) |
|-------------|---------------------|---------------------|
| 1° condição | 530                 | 300                 |
| 2° condição |                     | 475                 |
| 3° condição |                     | 540                 |
| 4° condição |                     | 550                 |
| 5° condição |                     | 580                 |

Os corpos de prova dos aços-ferramenta apenas temperados, bem como aqueles temperados e revenidos, foram observados em microscópio óptico e eletrônico de varredura (MEV) acoplado a análise química de micro-regiões por energia dispersiva (EDS) para caracterização da microestrutura. A revelação da microestrutura para microscopia óptica foi obtida através da utilização de ataque químico com nital a 3%. Observações em MEV foram realizadas em corpos de prova atacados com reativo de Marble (10g CuSO<sub>4</sub>, 50ml HCl, 50ml H<sub>2</sub>O).

As medidas de dureza em escala Brinell e Rockwell C foram realizadas tanto no material como recebido quanto após tratamento térmico.

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina universal de ensaios Instron, utilizando-se corpos de prova conforme ASTM E 8M<sup>(2)</sup>.

Os ensaios de impacto Charpy sem entalhe foram realizados em máquina de impacto WPM, martelo 18,750 Kgf, padrão RBC (Rede Brasileira de Calibração) e os corpos de prova confeccionados conforme normas ASTM E –23<sup>(2)</sup> e NBR 6157<sup>(2)</sup>. As superfícies de fratura obtidas nesses ensaios foram observadas em MEV.

Os ensaios de flexão 4-pontos, recomendado para aços-ferramenta para trabalho a frio, foram realizados em máquina universal de ensaios Amsler, 30 toneladas, padrão RBC (Rede Brasileira de Calibração), e os corpos-de-prova confeccionados conforme norma ASTM A-438<sup>(2)</sup>.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dureza do material na condição como recebido estava em torno de 218HB.

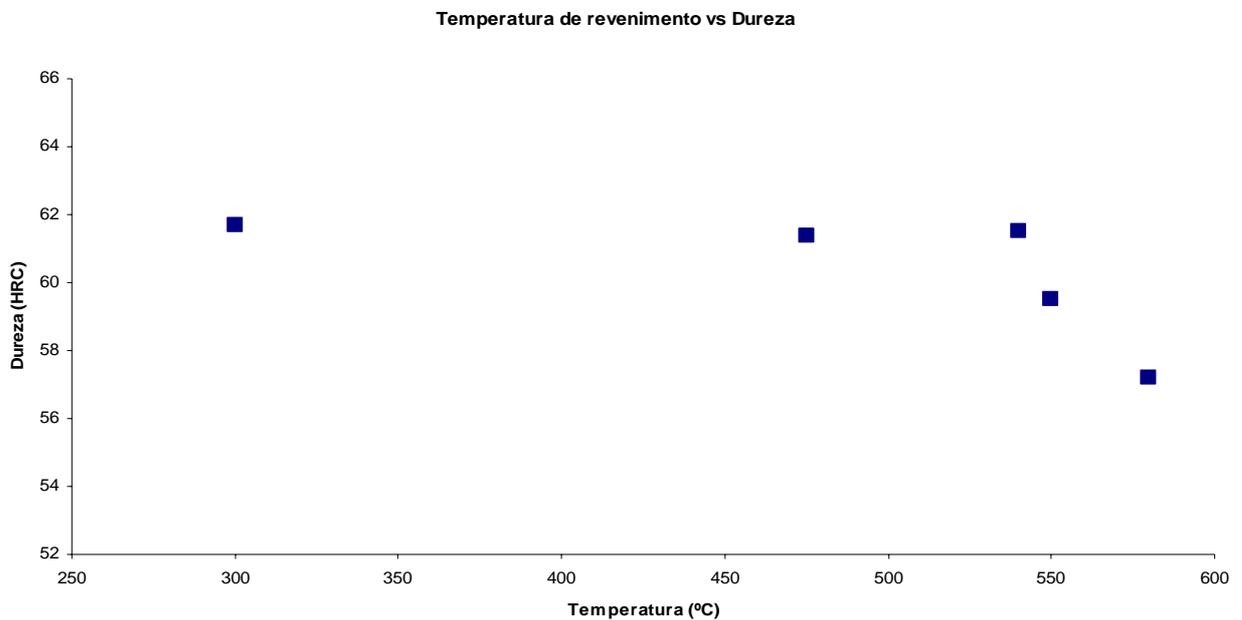


Figura 1: Dureza obtida após tratamentos térmicos.

Na figura 1 observam-se os valores de dureza obtidos após tratamentos térmicos, em função da temperatura do 2º revenimento. Na figura 2 está apresentada as micrografias do material nas condições de somente temperado e de temperado e revenido conforme indicado na tabela 2.

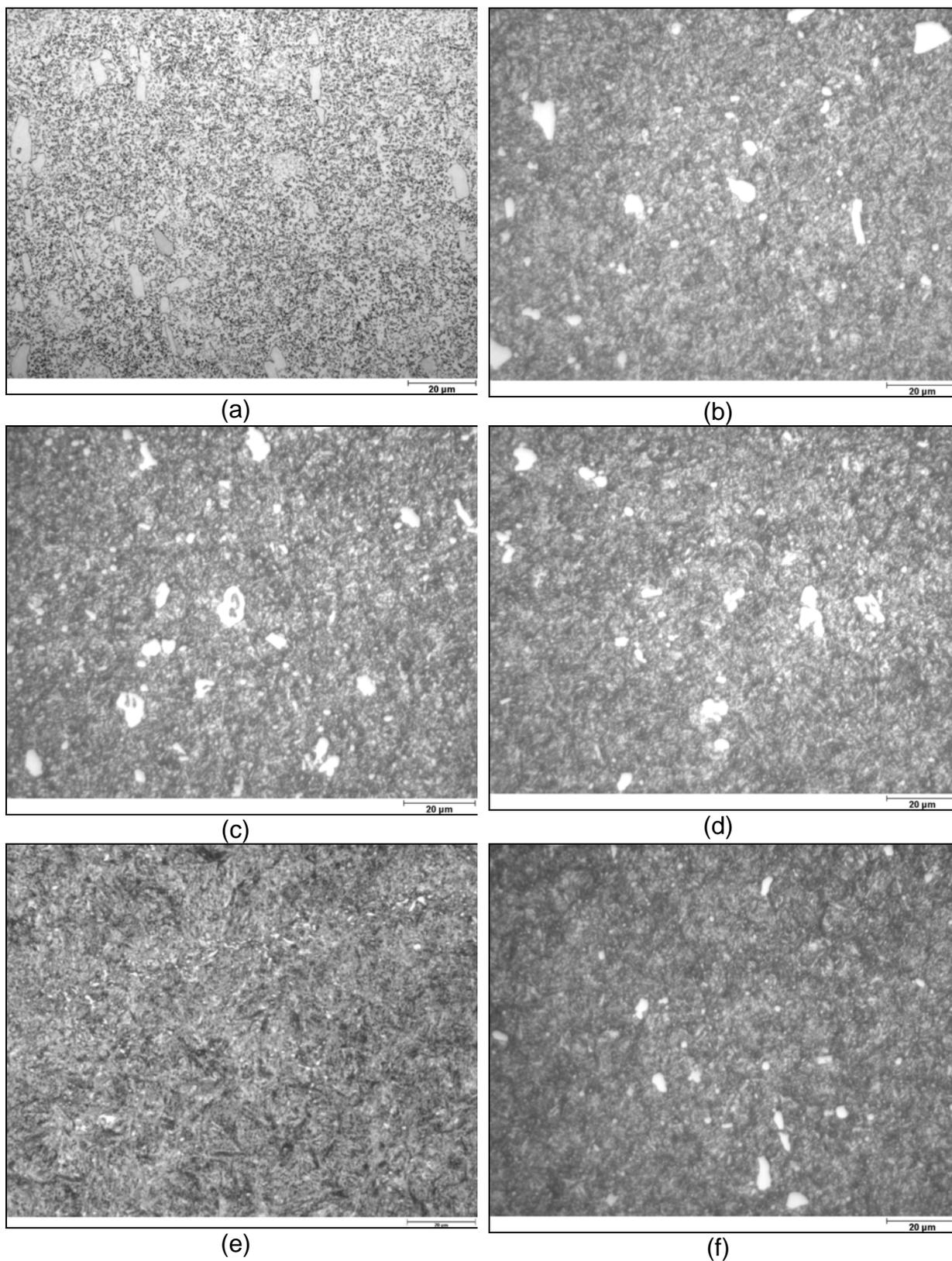
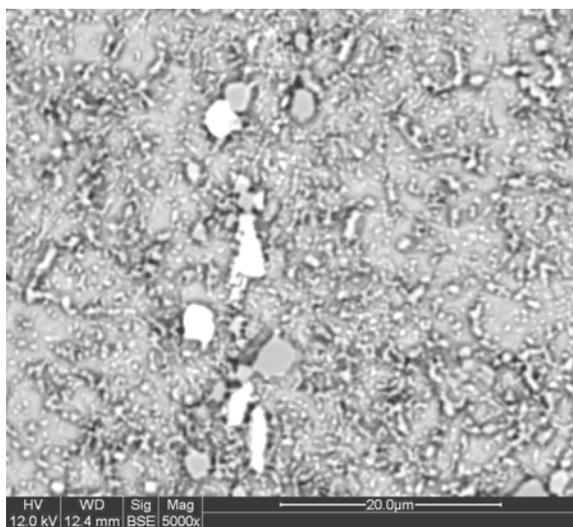
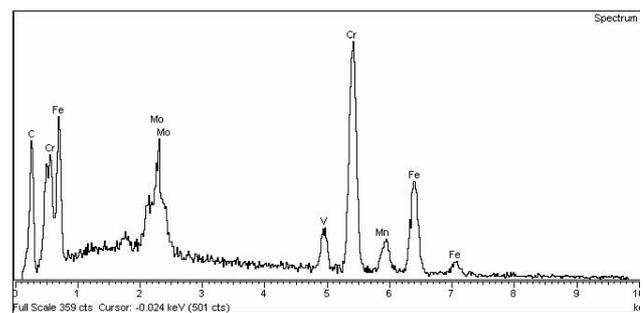


Figura 2: Seções transversais do aço-ferramenta. (a) temperado; (b) temperado e revenido a 300°C; (c) temperado e revenido a 475°C; (d) temperado e revenido a 540°C; (e) temperado e revenido a 550°C; (f) temperado e revenido a 580°C.

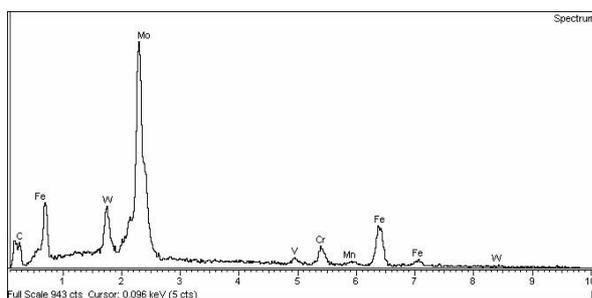
O exame da figura 2a indica que na condição como temperado, a microestrutura consiste de matriz martensítica com carbonetos primários e secundários (remanescentes da austenitização que precede a tempera). As figuras 6b-f mostram a microestrutura do aço-ferramenta temperado e revenido nas temperaturas de 300°C, 475°C, 540°C, 550°C e 580°C, respectivamente. A microestrutura consiste de martensita revenida e carbonetos primários e secundários. Os carbonetos primários dispersos de maneira uniforme; já os secundários, que são carbonetos de recozimento não dissolvidos na austenitização que precede a têmpera, estão uniformemente dispersos na matriz. A figura 3 mostra a microestrutura do aço somente temperado, obtida em microscópio eletrônico de varredura.



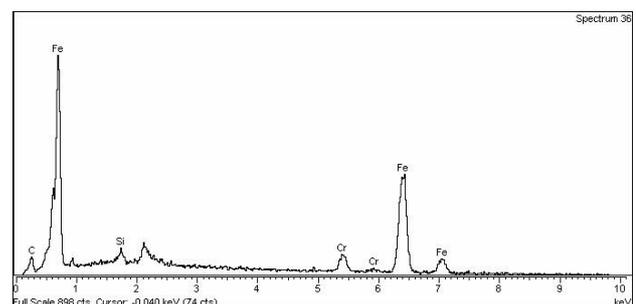
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3: (a) Seção transversal do aço temperado. Ataque marble; (b) Espectro de EDS dos carbonetos ricos em cromo, possivelmente do tipo  $M_7C_3$ ; (c) Espectro de EDS dos carbonetos ricos em molibdênio, possivelmente do tipo  $M_2C$ ; (d) Espectro de EDS da matriz.

Na figura 3a observa-se a estrutura martensítica. Os carbonetos de cor clara são ricos em Mo. Nas figuras 3b-c, estão apresentados os espectros de EDS de carbonetos em uma matriz martensítica através de análise pontual por EDS. Estes carbonetos se constituem em fases primárias (ocorrem por ocasião da solidificação), e indicam carbonetos ricos em cromo (figura 3b) e molibdênio (figura 3c). A figura 3d corresponde à análise da matriz ferrosa, apresentando os elementos típicos constituintes da matriz, indicando o cromo ainda em considerável quantidade na matriz deste aço-ferramenta após a têmpera. Após o tratamento térmico de revenido, baixa porcentagem deste elemento permanece na matriz.

A figura 4 mostra a microestrutura do aço temperado e revenido obtida em microscópio eletrônico de varredura.

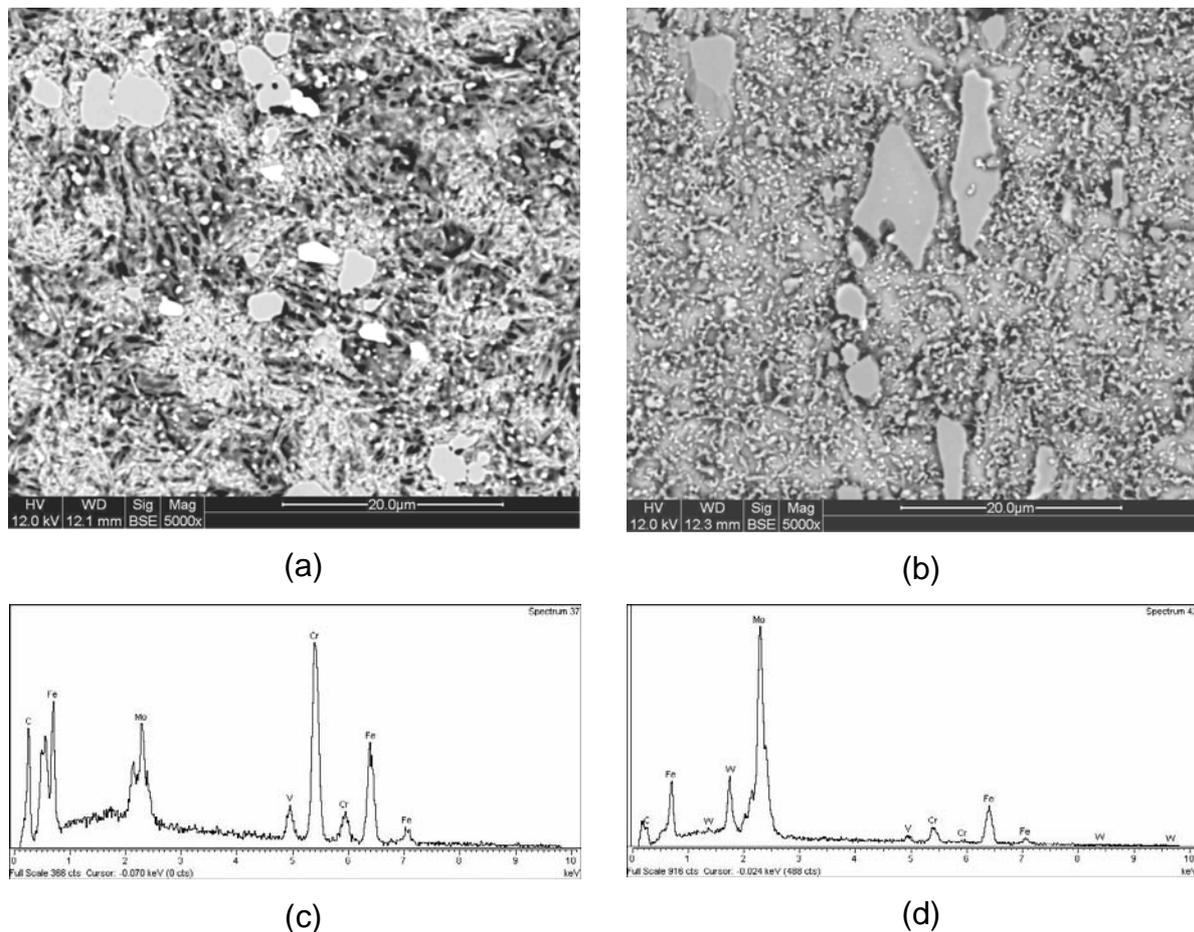


Figura 4: (a) Seção transversal do aço temperado e revenido, ataque Marble; (b) detalhe carbonetos de cromo (c) EDS de carbonetos ricos em cromo, possivelmente do tipo  $M_7C_3$ ; (d) EDS de carbonetos ricos em molibdênio, possivelmente do tipo  $M_2C$ .

A figura 4 mostra a microestrutura do aço temperado e revenido. Observa-se a matriz de martensita revenida. Na figura 4a os carbonetos de cor clara são ricos em Mo. Na figura 4b os carbonetos de cor cinza são ricos em Cr. No caso específico de aços-ferramenta de alto carbono, a seqüência de formação de carbonetos durante o revenido é dada por  $M_3C$ ,  $M_7C_3$  e  $M_{23}C_6$  <sup>(3)</sup>, sendo a seqüência em relação ao molibdênio de  $M_3C$ ,  $M_2C$  e  $M_6C$  <sup>(3)</sup>.

O efeito da temperatura de revenimento na precipitação dos carbonetos pode ser notada no endurecimento secundário deste aço (figura 4a), próximo à temperatura de 525°C. A maior precipitação dos carbonetos tipo MC (vanádio) deve ocorrer em temperaturas acima da temperatura em que precipitam carbonetos tipo  $M_2C$ , ricos em molibdênio. Assim, em função das diferentes temperaturas de revenimento utilizadas, os aços em estudo podem apresentar um mesmo valor de dureza e apresentarem diferentes comportamentos mecânicos.

Nas figura 5, 6 e 7 estão apresentados os resultados de testes mecânicos de tração, impacto e flexão, respectivamente, após tratamentos térmicos realizados a diferentes temperaturas.

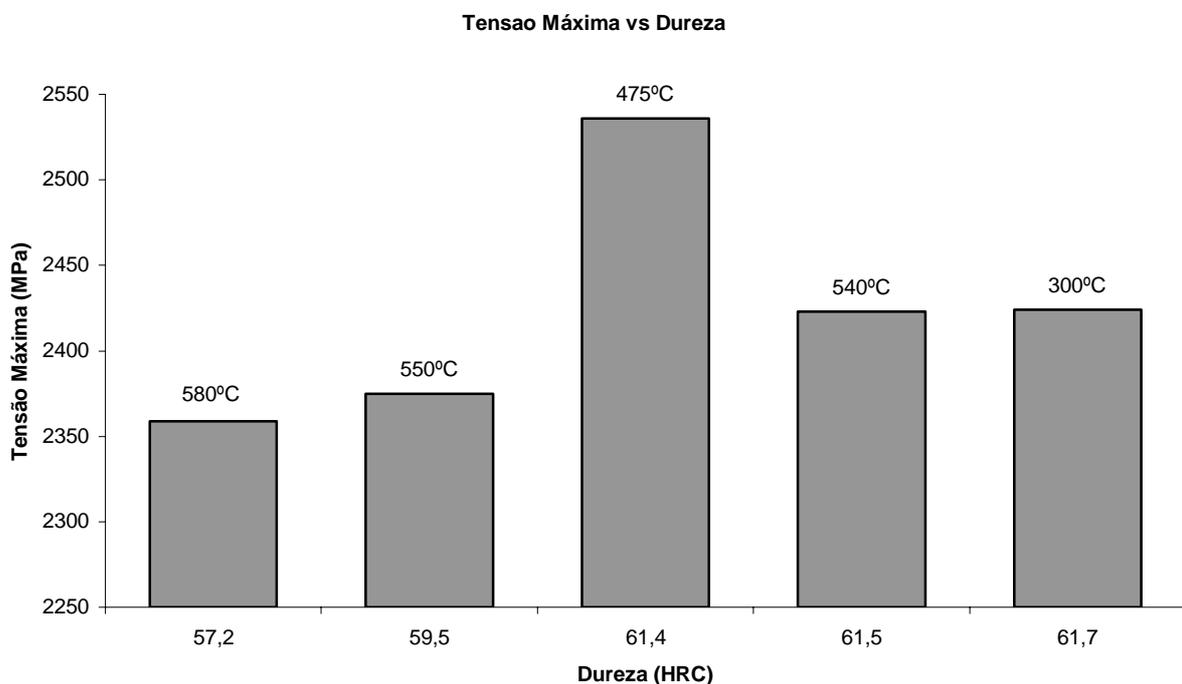


Figura 5: Tensão máxima de ruptura em função da dureza.

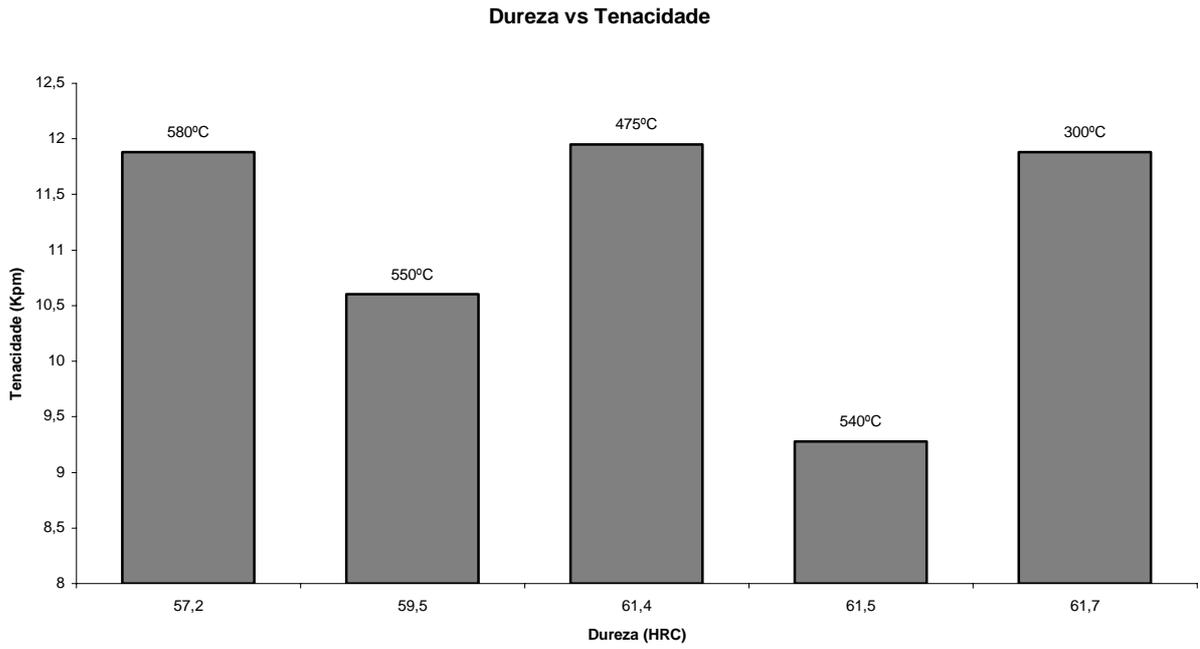


Figura 6: Tenacidade em função da dureza.

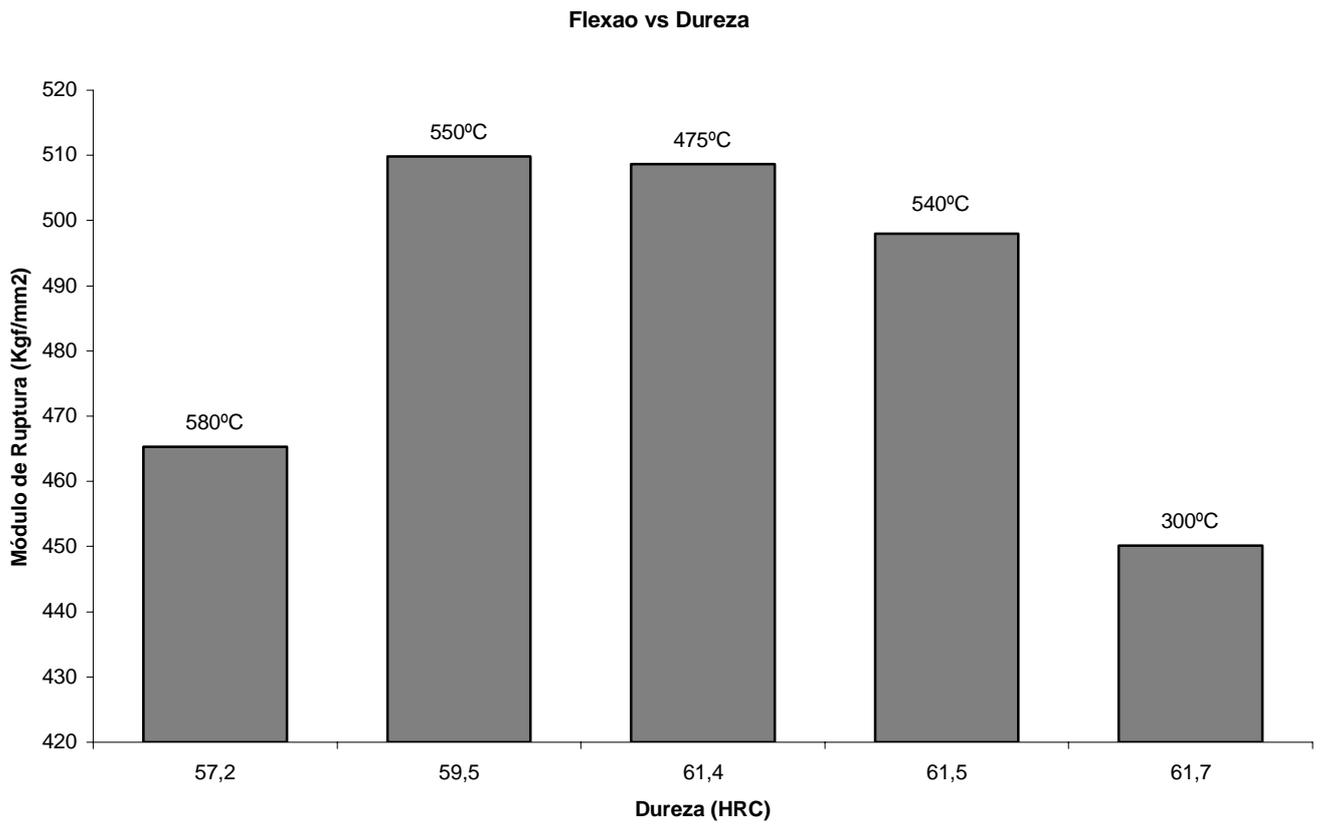


Figura 7: Flexão em função da dureza.

Nas figuras 8 e 9 estão apresentadas as fractografias dos corpos de prova de ensaio de impacto Charpy. Não foram colocadas todas as fractografias, visto que apresentavam o mesmo aspecto.

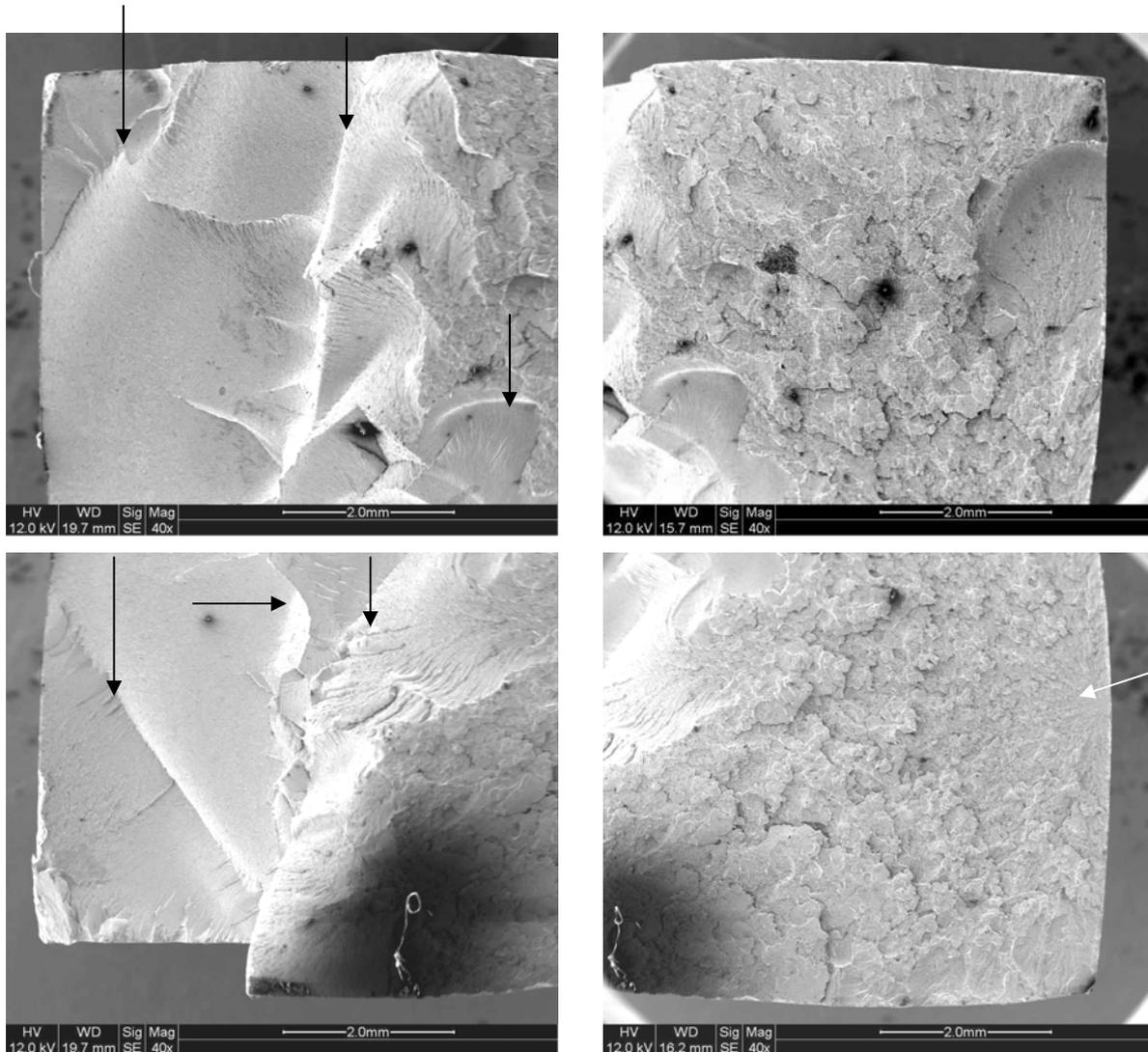


Figura 8: Fractografia mostrando a superfície de fratura do corpo de prova.

É possível observar na figura 8 um mecanismo de fratura de quasi clivagem, típico para matriz ferrosa na condição temperada e revenida, em fratura correspondente à trinca já nucleada. A seta branca indicando provável região de início de fratura. A superfície de fratura da liga apresenta caráter frágil, indicando uma propagação descontínua, com re-nucleações, conforme indicam as setas pretas.

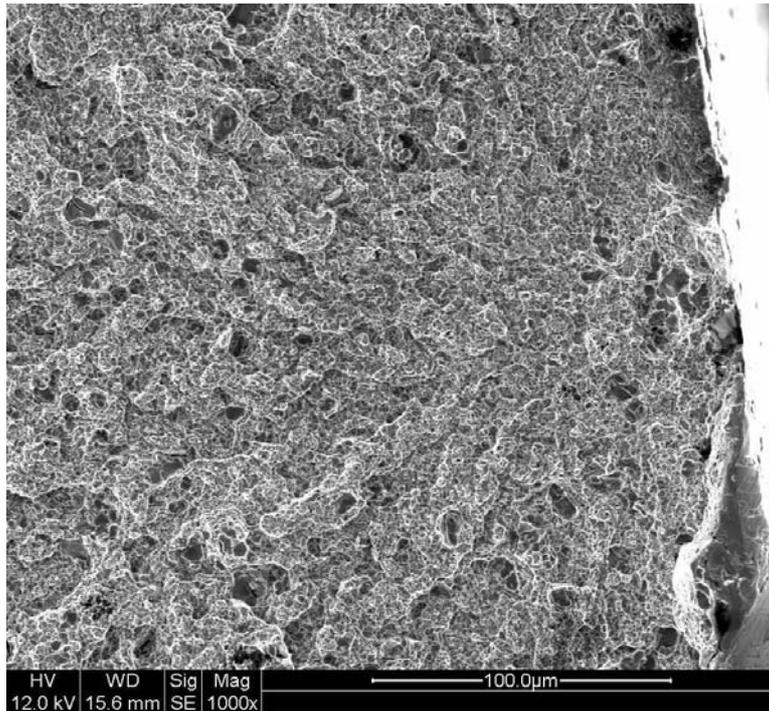


Figura 9: Aumento em região da figura 8, mostrando a região próxima à borda, região de provável início da fratura.

Observou-se que o mesmo mecanismo de fratura ocorreu para as diferentes condições de revenimento. Trata-se de mecanismos complexos, ocorrendo em microestruturas compostas por grande fração volumétrica de partículas frágeis em uma matriz de martensita revenida.

## CONCLUSÕES

- 1) A dureza decresce com o aumento da temperatura de revenimento, porém apresenta pico de endurecimento a aproximadamente 550°C, devido ao efeito da precipitação de carbonetos de liga complexos;
- 2) A tensão de ruptura apresenta um máximo a 475°C;
- 3) A tenacidade varia com a dureza, apresentando melhores índices em 475°C e 300°C;
- 4) A resistência à carga máxima de flexão (modulo de ruptura) varia em função da dureza, apresentando bons índices em 550°C e 475°C.
- 5) A dureza atingida no revenimento a 475°C está associada a um melhor desempenho em todos os ensaios mecânicos, com particular atenção aos resultados de energia absorvida em ensaio de impacto charpy.

- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
1. VATAVUK, J. **Introdução a metalografia e análise de falhas** - TMS - Tecnologia de Materiais e de Superfícies – 2000.
  2. SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de Materiais Metálicos**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.
  3. ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool Steels**. 5. ed., American Society for Metals, Metals Park, OH., 1998.

## **EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF A TOOL STEEL PRODUCED BY CONVENTIONAL METALLURGY**

### **Abstract**

Commercial tool steel was austenitized at 1040°C, and submitted to tempering in the range of 300°C to 580°C. Tension, Charpy impact, bending and hardness tests were performed. The microstructure evaluation was carried out by optical microscopy and scanning electronic microscopy coupled with chemical analyses of micro-regions by energy dispersive. It was observed that the hardness decreases with the increase of the tempering temperature, however it presents a hardening peak near 550°C, due to the precipitation of complex carbides, and that the steel tempered at 475°C showed a better performance in all of the mechanical tests, with special attention to the results of absorbed energy in Charpy impact test.

Key words: tool steel, heat treatment, toughness.