

CARACTERIZAÇÃO DE AÇOS FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO EM CILINDROS DE LAMINAÇÃO A FRIO*

Mariana Carla Mendes Rodrigues¹
Maria Celeste Monteiro de Souza Costa²
Wellington Lopes³
Elaine Carballo Siqueira Corrêa⁴

Resumo

Os aços ferramenta para trabalho a frio são utilizados em diversas aplicações em decorrência de propriedades como elevada estabilidade dimensional, alta resistência ao desgaste e elevada temperabilidade. Tais características estão diretamente associadas à microestrutura do material, isto é, à quantidade, à distribuição, ao tipo e à morfologia dos carbonetos presentes e à quantidade de martensita revenida e austenita retida. Neste contexto, no presente trabalho foram caracterizados mecanicamente e microestruturalmente quatro aços ferramenta para trabalho a frio empregados na fabricação de cilindros de laminação a frio. Para isso, amostras foram retiradas dos próprios cilindros e foram realizadas análises de dureza, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia por energia dispersiva e espectroscopia de emissão atômica por plasma. De acordo com resultados, uma comparação entre as propriedades dos aços foi conduzida visando concluir qual deles é o mais adequado para a referida aplicação.

Palavras-chave: Aços ferramenta para trabalho a frio; Dureza; Microestrutura, Cilindro de laminação.

CHARACTERIZATION OF TOOL STEELS FOR ROLLING MILL ROLLS

Abstract

Cold work tool steels are widely used in various applications due to properties such as high dimensional stability, high wear resistance and high hardenability. These characteristics are associated with their microstructure, involving the quantity, the distribution, the type and the morphology of the carbides, as well as the quantity of retained austenite and martensite. The aim of this work was to analyze four cold work tool steels used in rolling mill rolls. Samples were taken from the own rolling mill rolls and hardness tests, optical microscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy and atomic emission spectroscopy were carried out. According to the results, a comparison of the properties of steels was conducted in order to conclude which one is more suitable for such application.

Keywords: Cold work tool steel; Hardness; Microstructure; Rolling mill roll.

¹ Aluna, Graduação em Engenharia de Materiais, DEMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheira Mecânica, Dra., Professora, DEMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Dr., Professora, DEMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheira Mecânica, Dra., Professora, DEMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços ferramenta para trabalho a frio são ligas utilizadas principalmente em operações de conformação mecânica, em temperaturas próximas da temperatura ambiente, cujas condições requerem elevada dureza, alta resistência ao desgaste e boa tenacidade [1,2]. São materiais caracterizados por uma menor tendência a distorções e trincas no tratamento térmico de têmpera sendo, por isso, eventualmente denominados aços indeformáveis, indicados para aplicações nas quais um cuidadoso controle dimensional é exigido [3]. Nesse contexto, comparando com os demais grupos de aços ferramenta, as ligas para trabalho a frio são muitas vezes apontadas como as mais importantes dessa classe de materiais metálicos [4]. As propriedades mencionadas são relacionadas à microestrutura do material, constituída por uma matriz de martensita revenida, de alto teor de carbono, dura e relativamente tenaz, e carbonetos, também duros e estáveis, podendo ser de dimensões reduzidas e finamente dispersos ou exibir características opostas [5,6]. Essa estrutura típica é desenvolvida durante a solidificação e durante tratamentos térmicos ou trabalho a quente, sendo fortemente influenciada pela composição química da liga, pela taxa de solidificação e pelas condições de têmpera e revenimento [7]. Em relação aos carbonetos presentes, além da fração volumétrica, o tipo, a distribuição e a morfologia são os fatores apontados como os mais significativos para as propriedades dos aços ferramenta para trabalho a frio [5,8]. Já a elevação da quantidade de carbonetos depende tanto do teor de carbono como da quantidade de elementos de liga. A ocorrência de uma dispersão uniforme desses carbonetos, por outro lado, depende do estágio do processo de fabricação em que eles se formam [6].

Nos aços ferramenta em geral, os principais carbonetos presentes são: MC, M_2C , M_3C , M_6C , M_7C_3 e $M_{23}C_6$ [5,9,10]. Durante a solidificação, dependendo da composição química da liga, os carbonetos formados usualmente são o MC, o M_2C , o M_3C , o M_6C , o M_7C_3 e, eventualmente, o $M_{23}C_6$ [10,11]. Por outro lado, durante o tratamento térmico, com a austenitização da liga, o carboneto eutético metaestável $M_{23}C_6$ entra em solução sólida, assim como os carbonetos M_3C e M_7C_3 (dependendo da temperatura de tratamento térmico), enquanto o M_2C se transforma em MC e M_6C , que por sua vez são mais estáveis. Esses tipos de carbonetos podem ser identificados por sua morfologia, sua composição química e sua localização ou distribuição no aço [7].

Dentro desse contexto, neste trabalho foram caracterizados mecanicamente e microestruturalmente quatro aços ferramenta para trabalho a frio empregados na fabricação de cilindros de laminação a frio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A caracterização realizada foi conduzida por meio da avaliação da composição química, da dureza e da microestrutura de quatro aços ferramenta para trabalho a frio distintos, empregados em cilindros de laminação a frio de perfis. Esses materiais são mencionados ao longo do presente trabalho como aços 1 a 4.

Todas as amostras foram obtidas a partir dos próprios cilindros de laminação, ao longo da seção transversal dos mesmos, considerando desde a superfície até uma distância de 78mm. Inicialmente, foi retirada uma porção maior de cada cilindro, com

20mm de largura, 78mm de comprimento e 5mm de espessura, que em seguida foi dividida em quatro amostras de mesmo tamanho. Dessa forma, foram analisadas quatro amostras de cada cilindro de laminação, organizadas ao longo da seção transversal dos mesmos.

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros de tratamentos térmicos previamente realizados nos cilindros de laminação, anteriores à retirada das amostras.

Tabela 1. Parâmetros de tratamentos térmicos utilizados nos aços investigados

Aços	Pré Aquecimento	Têmpera		Revenimento
	temperatura	temperatura/tempo	resfriamento	temperatura/tempo
Aço 1	1º 600°C 2º 800°C	1030°C / 30min	banho de sal 500°C a 550°C	dois a 190°C 120min
Aço 2	1º: 600°C 2º: 800°C	1030°C / 30min	banho de sal 500°C	dois a 520°C 120min
Aço 3	700°C	1030°C / 30min	banho de sala 500°C	dois a 530°C 120min
Aço 4	600°C	1030°C / 30min	banho de sal 500°C a 550°C	dois a 530°C 120min

2.2 Composição Química

A composição química dos aços empregados nos cilindros de laminação foi obtida por espectroscopia de emissão atômica, em um equipamento Varian modelo 725-ES, em uma solução de 50% de HCl e 50% de HNO₃.

2.3 Ensaios de Dureza

Ensaios de dureza Rockwell C (HRC) foram realizados nas amostras desde a região próxima à superfície dos cilindros de laminação até uma região mais próxima ao centro, a uma distância de aproximadamente 78mm da superfície. Dessa forma, foram determinados perfis de dureza ao longo da seção transversal dos cilindros. Os ensaios, conduzidos em triplicata, foram realizados em um durômetro IGV modelo RM401/A.

O objetivo dessa análise, além de comparar a propriedade mecânica dos quatro aços utilizados na fabricação dos cilindros, foi de verificar a temperabilidade, uma vez que tais cilindros podem ser reusinados sendo, portanto, importante a manutenção da dureza ao longo da seção transversal.

2.4 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural dos aços para trabalho a frio foi realizada por meio de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), essa última com o auxílio ainda de espectroscopia por energia dispersiva (EDS),

A preparação das amostras seguiu o procedimento convencional, envolvendo embutimento a frio com acrílico autopolimerizável, lixamento com granulometrias distintas (#180, #240, #320, #400, #600 e #1000), polimento com pasta de diamante (9µm, 3µm e 1µm) e ataque químico com reagente Nital 5%.

As análises por microscopia óptica foram conduzidas com o auxílio de um microscópio Fortel com sistema de digitalização Kontrol. Já as análises por microscopia eletrônica de varredura, empregando elétrons secundários, foram

realizadas em um microscópio Shimadzu modelo SSX 550 Superscan, com um acessório para análise por espectroscopia dispersiva em energia (EDS) acoplado. Tanto as imagens de MO quanto as de MEV foram feitas na região central das amostras próximas à superfície externa e à superfície interna dos cilindros, utilizando-se então apenas duas das quatro amostras de cada aço.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentadas as composições químicas dos quatro aços empregados nos cilindros. Observa-se que as diferenças mais significativas estão associadas ao teor de carbono, ao teor de molibdênio e ao teor de vanádio.

Tabela 2. Composição química dos aços investigados no trabalho

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Aço 1	1,470%	0,406%	0,294%	6,380%	0,520%	0,258%
Aço 2	0,736%	0,591%	0,362%	6,770%	1,230%	0,334%
Aço 3	0,981%	0,845%	0,470%	6,080%	2,190%	0,187%
Aço 4	0,853%	0,876%	0,423%	6,810%	1,980%	0,239%

Na Figura 1 são mostradas as curvas de dureza média (HRC) em função da seção transversal do cilindro de laminação para os quatro aços. Verifica-se que, para todas as ligas, não há uma diminuição significativa da dureza com o aumento da distância da superfície externa dos cilindros. Esse comportamento está associado à presença dos elementos Mn, Mo, Cr, e V, que aumentam a temperabilidade do material [3]. Dessa forma, os resultados indicam que os cilindros poderiam ser usinados após um período de uso sem, a princípio, comprometer a propriedade mecânica e, portanto, o desempenho.

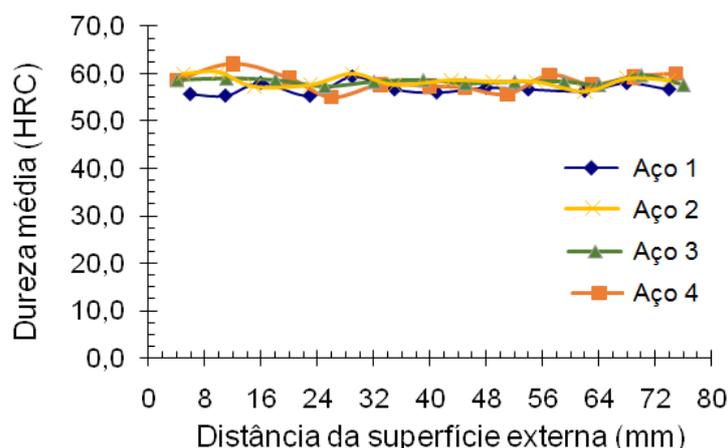


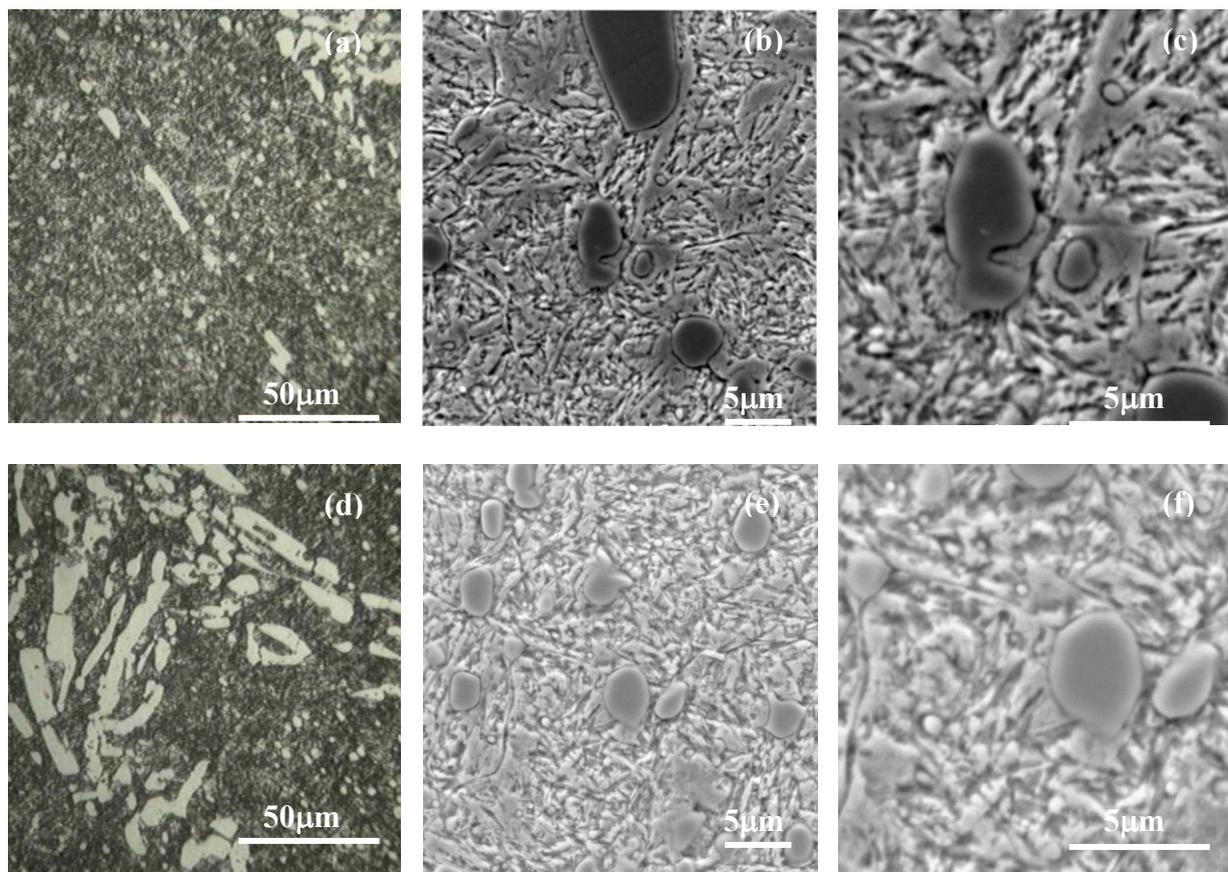
Figura 1. Comparação dos perfis de dureza dos aços investigados.

Em termos de uniformidade, observa-se que o aço 3 foi aquele que exibiu uma distribuição de dureza mais homogênea, oposto do comportamento do aço 4. Sabe-se que a dureza do aço ferramenta depende das características da martensita revenida, da quantidade de austenita retida e do tipo, da quantidade, do tamanho e da distribuição de carbonetos primários e secundários [12]. Os resultados exibidos na Figura 1 sugerem que as microestruturas dos aços 3 e 4 sejam mais homogênea e heterogênea, respectivamente.

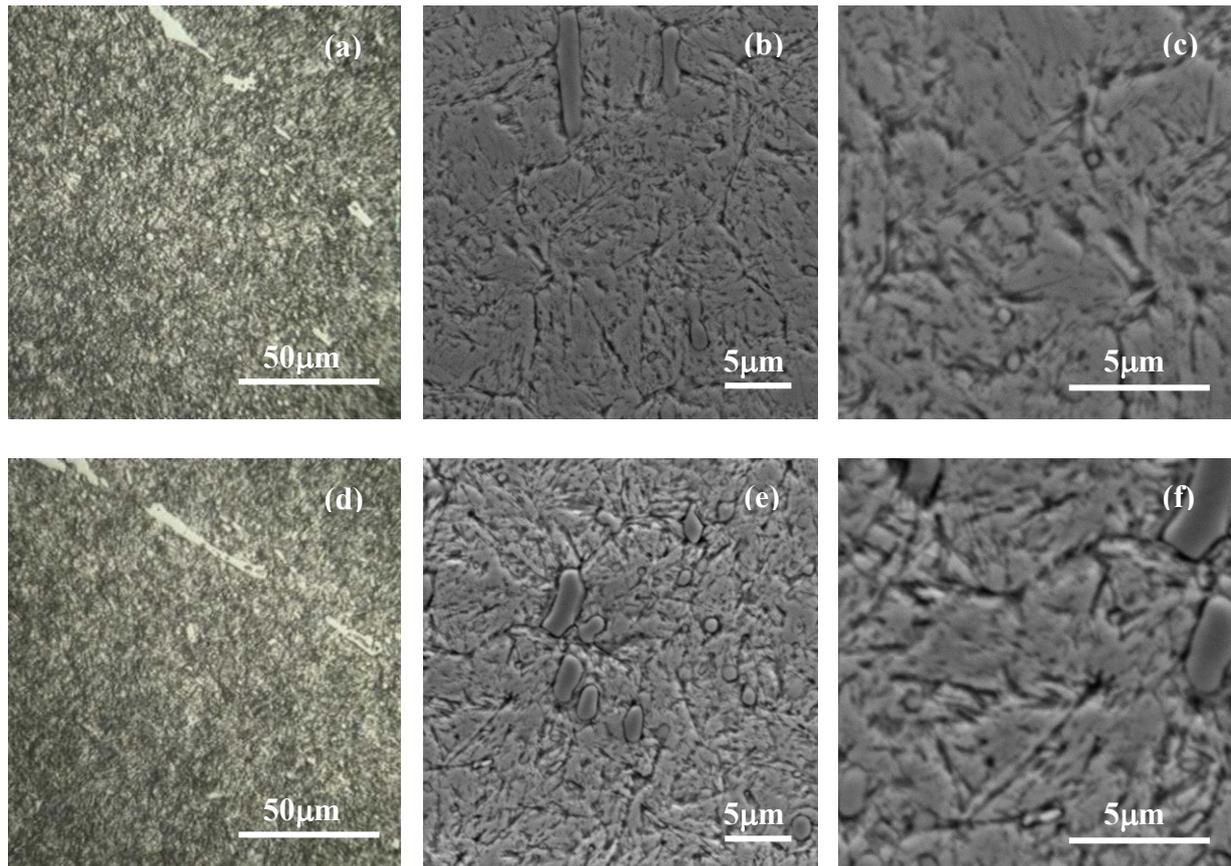
Considerando ainda os resultados de dureza, verifica-se que os valores ficaram, em geral, entre 55HRC e 62HRC. Das et al. [12] alcançaram uma dureza de aproximadamente 61HRC para um aço para trabalho a frio (aço AISI D2) utilizando uma temperatura de aquecimento de 1024°C e tempo de encharque de 30 minutos na têmpera, seguida de revenimento a 210°C por 120 minutos. Resultados similares foram obtidos por Bourithis et al. [4], também para o aço AISI D2, porém com parâmetros de revenimento distintos: aquecimento 1020°C e encharque de 30 minutos na têmpera seguida de dois revenimentos, a 500°C e 480°C por 120 minutos cada, atingindo uma dureza média de 60HRC.

Nas Figuras 2 a 5 são mostradas as imagens obtidas por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (com duas ampliações) dos aços 1 a 4. Para cada material são exibidas as fotomicrografias referentes à região central da amostra mais próxima da superfície e à região central da amostra mais próxima do centro dos cilindros de laminação. Ressalta-se que foram obtidas diversas imagens de cada situação e que as mostradas no presente trabalho representam/mostram as características gerais dos materiais investigados.

Em geral, observa-se que, conforme esperado para aços ferramenta para trabalho a frio, a microestrutura das quatro ligas é composta por matriz de martensita revenida e carbonetos, de dimensões relativamente elevadas e reduzidas. Em relação aos carbonetos, acredita-se que aqueles de dimensões mais elevadas sejam os chamados carbonetos primários, formados durante o processo de solidificação dos aços.



(a), (b) e (c) Amostra próxima à superfície externa; (d), (e) e (f) Amostra próxima à superfície interna
Figura 2. Micrografias (MO e MEV) do aço 1

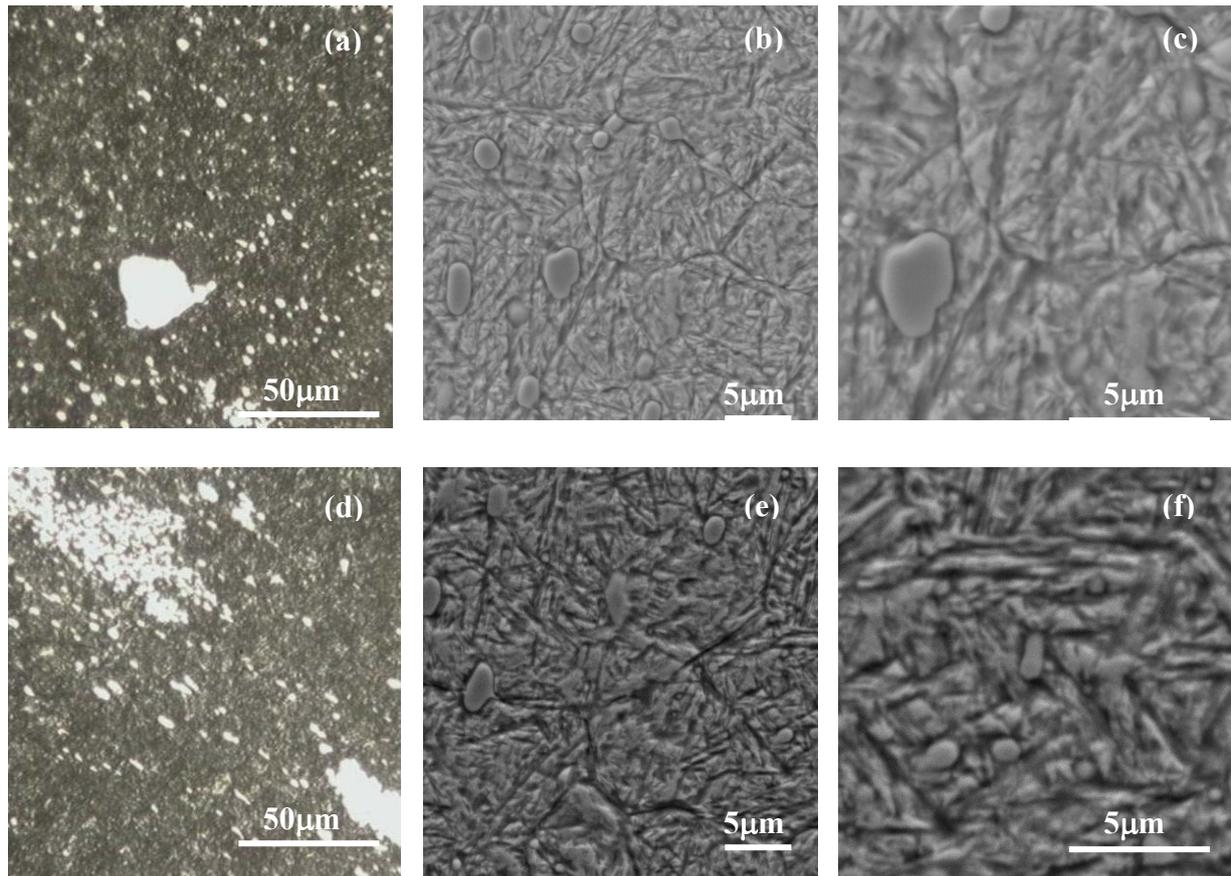


(a), (b) e (c) Amostra próxima à superfície externa; (d), (e) e (f) Amostra próxima à superfície interna
Figura 3. Micrografias (MO e MEV) do aço 2

Os carbonetos de dimensões reduzidas, por outro lado, podem ser provenientes tanto do resfriamento da liga a partir do estado líquido como dos tratamentos térmicos subsequentes, esses últimos denominados secundários. Dessa forma, esses precipitados são mencionados no presente trabalho como “carbonetos maiores” e “carbonetos menores”. Além disso, destaca-se que a classificação do tipo de carboneto presente nos aços estudados, mostrada a seguir, foi conduzida de acordo com sua morfologia e confirmada a partir dos resultados de EDS.

Considerando inicialmente a Figura 2, o aço 1 é o que parece exibir maior proporção de carbonetos quando comparado aos demais, resultado possivelmente associado ao seu maior teor de carbono. Segundo Rong et al. [11], o principal efeito de elevar o teor de carbono e dos elementos formadores de carbonetos é aumentar a fração volumétrica de carbonetos primários, de dimensões elevadas, o que parece ser o comportamento do aço mencionado. Nesse caso, de acordo com as morfologias [7], as imagens sugerem a presença de carbonetos dos tipos MC (Figura 2a,b), M_7C_3 (Figura 2d) e $M_{23}C_6$ (Figura 2e). Esses carbonetos apresentam como principais elementos formadores o vanádio e o molibdênio (MC) e o cromo (M_7C_3 e $M_{23}C_6$) [7], o que está de acordo com a composição química apresentada na Tabela 2.

Das et al. [12] encontraram para o aço AISI D2 microestrutura similar à exibida pelo aço 1 no presente trabalho, com distribuição não uniforme de carbonetos primários do tipo M_7C_3 e distribuição relativamente homogênea de carbonetos secundários do tipo $M_{23}C_6$. Bourithis et al. [4] também detectaram a presença de carbonetos do tipo $(Fe,Cr)_7C_3$ (M_7C_3) no aço AISI D2, que confirmaram se tratar de carbonetos primários.

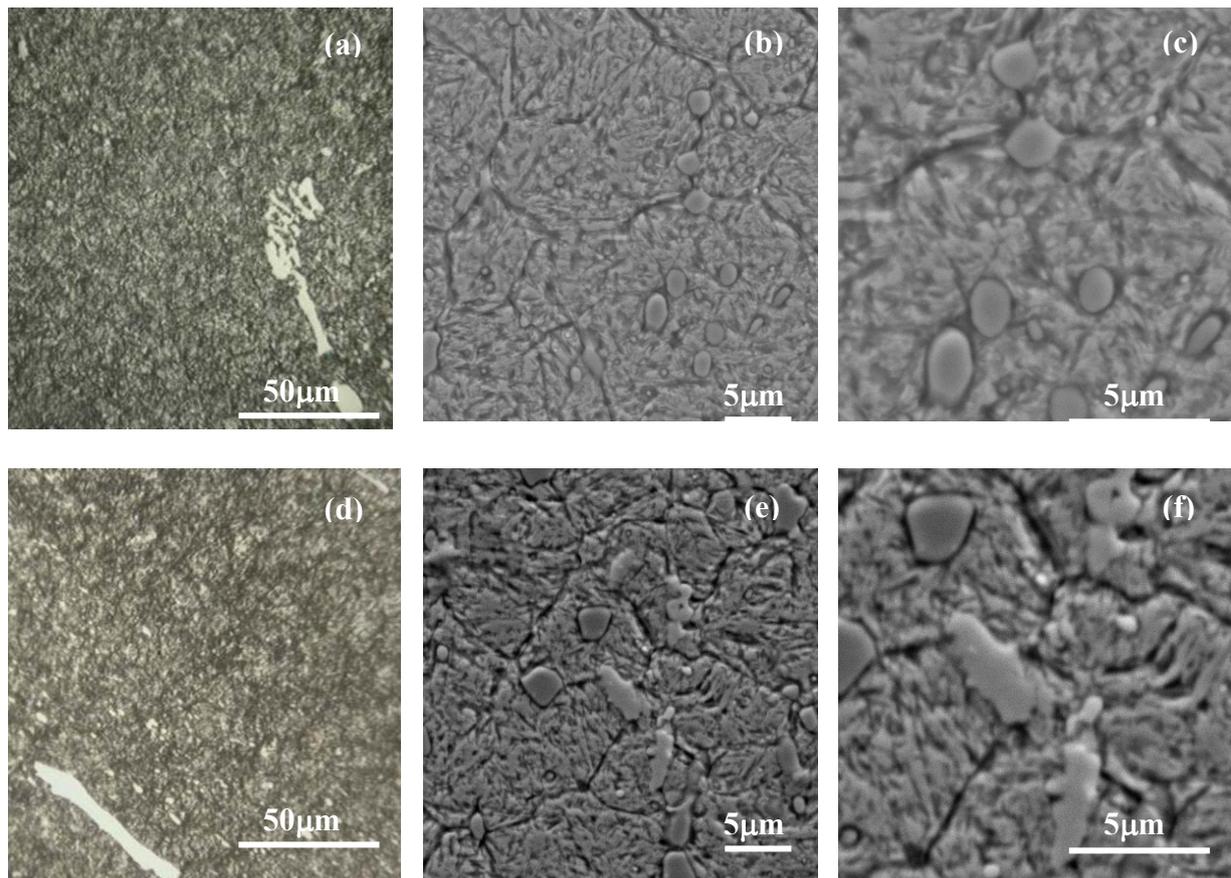


(a), (b) e (c) Amostra próxima à superfície externa; (d), (e) e (f) Amostra próxima à superfície interna
Figura 4. Micrografias (MO e MEV) do aço 3

O aço 2 (Figura 3) apresentou predominantemente carbonetos do tipo MC (Figura 3a,d,e) e $M_{23}C_6$ (Figura 3a,c,e). Os carbonetos MC, identificados como sendo os maiores, mostraram uma distribuição não homogênea ao longo das duas amostras analisadas. Ressalta-se que, dentre os quatro aços analisados, o aço 2 foi o que pareceu exibir uma menor proporção de carbonetos, em concordância com o seu teor de carbono, inferior aos demais.

Observando a Figura 4, relativa ao aço 3, percebe-se a presença de carbonetos do tipo MC (Figura 4d) e $M_{23}C_6$ (Figura 4a,b,d,e). Os carbonetos de dimensões mais reduzidas ($M_{23}C_6$) exibiram uma distribuição relativamente uniforme, com dimensões superiores àquelas apresentadas pelo aço 2 e similares às do aço 1.

O aço 4 (Figura 5), similarmente ao aço 2, apresentou proporção de carbonetos inferior aos aços 1 e 3. Nesse caso, foi constatada a predominância de carbonetos do tipo MC (Figura 5a,d) e $M_{23}C_6$ (Figura 5b,c). Os precipitados do tipo MC se mostraram distribuídos heterogeneamente pela matriz, enquanto os do tipo $M_{23}C_6$, de tamanho comparável aos do aço 2 e menores do que os dos aços 1 e 3, apresentaram distribuição mais uniforme. O maior refinamento desses carbonetos nos aços 2 e 4 sugere que a taxa de resfriamento na solidificação da liga foi maior nesses aços, uma vez que a análise dos parâmetros de tratamentos térmicos empregados posteriormente (Tabela 1) não permite tal avaliação.



(a), (b) e (c) Amostra próxima à superfície externa; (d), (e) e (f) Amostra próxima à superfície interna
Figura 5. Micrografias (MO e MEV) do aço 4

Considerando os quatro aços avaliados, não foram observadas diferenças significativas entre as microestruturas das duas amostras em cada um dos aços, ou seja, entre a região próxima à superfície do cilindro de laminação e a região próxima ao centro. Esses resultados estão de acordo com os resultados de dureza mostrados na Figura 1, na qual pode ser verificada a manutenção da dureza à medida que se afasta da superfície externa do material. Tendo em vista a aplicação desses aços para trabalho a frio em cilindros de laminação, esse fato permite que haja uma recuperação (usinagem superficial) após uma eventual falha dos mesmos, pois mesmo com uma diminuição no diâmetro externo, as propriedades seriam mantidas.

Segundo Pippel et al. [13], os carbonetos primários e sua distribuição têm uma grande influência na resistência ao desgaste e tenacidade do aço ferramenta. Esses precipitados, de dimensões elevadas, são primeiramente responsáveis pela resistência ao desgaste do aço. Por outro lado, os carbonetos secundários também podem promover uma importante contribuição na resistência ao desgaste e dureza total, pois levam ao endurecimento secundário do material.

Carbonetos primários, principalmente MC e M_6C , são mais duros do que a matriz, o que contribui para o aumento da resistência ao desgaste abrasivo de aços contendo elevada proporção desses precipitados [14]. Diante disso, acredita-se que o aço 1 analisado no presente trabalho, por ter apresentado maior proporção de carbonetos maiores, principalmente do tipo MC, é o que tende a possuir maior resistência ao desgaste abrasivo frente aos demais

Por outro lado, os carbonetos primários no aço AISI D2, que é similar ao aço 1 investigado, são aglomerados em regiões interdendríticas e sua distribuição não

uniforme facilita o surgimento e a propagação de trincas na matriz em um baixo nível de tensões [12]. Ainda segundo Das et al. [12], os carbonetos do tipo M_7C_3 são conhecidos por serem muito frágeis, o que para a aplicação em cilindros de laminação é uma desvantagem, comparado aos demais aços (2 a 4) que não apresentaram esse tipo de carboneto.

A princípio, em se tratando de aço ferramenta para trabalho a frio, um aço ideal para os cilindros de laminação seria aquele que proporcionasse alta dureza, para dar resistência ao desgaste, aliada à alta tenacidade, para suportar os esforços mecânicos e aumentar a resistência ao impacto. Em adição a essas características, devido à ocorrência de esforços cíclicos, uma microestrutura ideal seria aquela que proporcionasse também maior vida em fadiga, propiciando maior vida útil aos mesmos.

O refinamento de carbonetos, em conjunto com uma elevada densidade, pode melhorar a dureza e a tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio, pois a formação de grande quantidade de carbonetos secundários aumenta a ductilidade pela redução da quantidade de carbono presente na matriz, assim como os elementos de liga [8,12]. Além disso, para Torkamani et al. [8], uma grande quantidade de carbonetos finos melhora a tenacidade, pois esses precipitados podem agir como barreiras às falhas. Os carbonetos de dimensões elevadas, por outro lado, podem atuar como concentradores de tensão, representando regiões para início e propagação de trincas.

Dentro desse contexto, verifica-se que os aços analisados no presente trabalho exibiram algumas características favoráveis à aplicação como cilindro de laminação e outras não.

4 CONCLUSÃO

- De modo geral, a dureza se manteve relativamente constante com o aumento da distância da superfície em todos os aços investigados, sendo o aço 3 aquele que apresentou maior homogeneidade no perfil.
- Em geral, foi observado que a microestrutura dos quatro aços é composta por matriz de martensita revenida e carbonetos, de dimensões diversas.
- O aço 1 exibiu maior proporção de carbonetos quando comparado aos demais e as imagens sugeriram a presença dos tipos MC, M_7C_3 e $M_{23}C_6$.
- Os aços 2 e 4 mostraram microestrutura relativamente similar, com os mesmos tipos (MC e $M_{23}C_6$) e tamanhos de carbonetos, de dimensões inferiores aos dos demais aços.
- O aço 3 apresentou, aparentemente, maior homogeneidade na distribuição dos carbonetos de dimensões reduzidas.
- Considerando os quatro aços avaliados, não foram observadas diferenças significativas entre as microestruturas da região próxima à superfície do cilindro de laminação e da região próxima ao centro.
- Os aços analisados no presente trabalho exibiram algumas características favoráveis à aplicação como cilindro de laminação a frio e outras não.

REFERÊNCIAS

- 1 Krauss, G. Steel: heat treating and processing principles. Ohio: American Society for Metals – ASM International, 1990.

- 2 Arslan, F. K.; Altinsoy, I.; Hatman, A.; Ipek, M.; Zeytin, S.; Bindal, C. Characterization of cryogenic heat treated vanadis 4 OM cold work tool steel. *Vacuum*. 2011, 86:370-373.
- 3 Chiaverini, V. *Aços e ferros fundidos*. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2005.
- 4 Bourithis, L.; Papadimitriou, G. D.; Sideris, J. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. *Tribology International*. 2006, 39: 479-489.
- 5 Kheirandish, S.; Saghafian, H.; Hedjazi, J.; Momeni, M. Effect of heat treatment on microstructure of modified cast AISI D13 cold work steel. *Journal of Iron and Steel Research*. 2010, 17(9):40-45.
- 6 Silva, A. L. V. C.; Mei, P. R. *Aços e ligas especiais*. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.
- 7 Vitry, V.; Nardone, S.; Breyer, J.P.; Sinnaeve, M.; Delaunois, F. Microstructure of two centrifugal cast high speed steels for hot strip mills applications. *Materials and Design*. 2012, 34:372-378.
- 8 Torkamani, H.; Raygan, S.; Rassizadehghani, J. Comparing microstructure and mechanical properties of AISI D2 steel after bright hardening and oil quenching. *Materials and Design*. 2014, 54:1049-1055.
- 9 Hetzner, D. W.; Geertruyden, W. V. Crystallography and metallography of carbides in high alloy steels. *Materials Characterization*. 2008, 59:825-841.
- 10 Momeni, M.; Kheirandish, S.; Saghafian, H.; Hedjazi, J. Effects of heat treatment on mechanical properties of modified cast AISI D3 tool steel. *Materials and Design*. 2014, 54:742-747.
- 11 Rong, W. et al. The role of alloy composition in the precipitation behavior of high speed steels. *Acta Metallurgica et Materialia*. 1992, 40:1727-1738.
- 12 Das, D.; Dutta, A. K.; Ray, K. K. Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness. *Materials Science and Engineering A*. 2010, 527:2182-2193.
- 13 Pippel, E. et al. Microstructure and nanochemistry of carbide precipitates in high-speed steel S 6-5-2-5. *Materials Characterization*. 1999, 43:41-55.
- 14 Badish, E.; Mitterer, C. Abrasive wear of high speed steels: influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance. *International Tribology*. 2003, 36:765-770.