

Caracterização microestrutural através de microscopia óptica e eletrônica do aço ferramenta sinterizado 2,3%C -12,5%Cr -1,1%Mo - 4,0%V

Adayr Bôrro Junior¹, Waldemar A. Monteiro¹, Américo de Almeida F.¹, Jan Vataavuk^{1,2}

(1) Departamento de Engenharia de Materiais, IPEN – MMM, São Paulo.
Cid. Universitária “Armando de Salles Oliveira”, travessa R, n.400, CP 11049, São Paulo, Brasil.

wamonte@baitaca.ipen.br

(2) Universidade Mackenzie, Departamento de Pós-Graduação- Eng. Materiais
R. Itambé 45, CEP 01239-902, São Paulo, Brasil.

wamonte@baitaca.ipen.br

Resumo

O avanço dos processos relacionados à Metalurgia do Pó (M/P), vem viabilizando a produção de aços com microestruturas complexas, como os aços ferramenta, objetivando uma microestrutura final isotrópica, otimizando assim suas propriedades tribológicas. Dentre os modernos aços ferramenta sinterizados, o aço 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, classificado como aço para trabalho a frio, possui aplicações típicas em situações onde se deseja maximizar a resistência ao desgaste como estampas e ferramentas em geral.

O presente trabalho apresenta as características microestruturais do aço sinterizado acima citado, no estado recozido, utilizando técnicas de microscopia óptica e eletrônica. Observa-se que mesmo apresentando uma composição química complexa, o aço sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, revela uma microestrutura isotrópica, com distribuição de carbonetos finos e morfologia homogênea, tanto no sentido transversal como longitudinal das amostras. As análises qualitativas por EDS realizadas nos carbonetos maiores, indicam alta presença de V, assim como traços de Mo e Cr. O aparecimento do V, também nos chamados carbonetos secundários, bem como Mo e Cr, indica que durante a consolidação pressurizada do aço sinterizado, ocorre crescimento de carbonetos, por mecanismo de coalescimento, fato sugerido pela não separação entre elementos de liga nos carbonetos maiores e menores, verificada na análise por dispersão de energia.

Abstract

Recent Powder Metallurgy (P/M) developments, lead to complex microstructures tool steels production, as 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, used in wear resistance applications. Current work presents microstructure characteristics of annealed P/M tool steel above mentioned, using optical and electronic microscopy techniques. Even presenting chemical composition with high carbon and carbides formers elements, P/M tool steel 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, shows a final isotropic structure with fine carbides, characterized by homogeneous distribution and morphology, either traverse or longitudinal samples direction. Large carbides in EDS qualitative analysis present high V contents, Mo and Cr. Even secondary carbides, present V, Mo and Cr, probably because carbides grown takes place during HIP process, leading to a situation where large and small carbides have no clear separation between alloy elements, as seen in conventional tool steels.

Introdução e Objetivo

De uma forma geral, os aços ferramenta são aplicados apresentando uma microestrutura constituída de martensita revenida e carbonetos complexos. A matriz martensítica deve conter os carbonetos aos quais são atribuídos a grande resistência ao desgaste destes aços. A dureza da martensita garante a permanência dos carbonetos, evitando que os mesmos sejam arrancados desta matriz. Aços ferramenta produzidos pela metalurgia convencional apresentam, durante a passagem do estado líquido para o sólido, uma grande redistribuição do soluto, o que resulta na segregação de fases, gerando desse modo uma estrutura dita “bruta de fusão”. Após operações como o forjamento ou laminação, por exemplo, ocorre um direcionamento dos carbonetos primários, formando estrias longitudinais, caracterizando assim as chamadas estruturas bandeadas. Tais estrias permanecem na microestrutura mesmo após o tratamento de recozimento que apesar de promover a decomposição da estrutura dendrítica, mantém os carbonetos primários, com inicial tamanho, morfologia e distribuição heterogênea, o que leva os aços ferramenta produzidos por metalurgia convencional a uma heterogeneidade das propriedades mecânicas e tribológicas.

Aços produzidos a partir da Metalurgia do Pó (M/P) são denominados aços sinterizados. O atual avanço dos processos envolvendo a M/P, viabilizou até mesmo a produção de aços ferramentas sinterizados complexos. Com a utilização de processos de atomização de pós metálicos, cada partícula se solidifica de forma rápida, gerando distribuição fina de carbonetos. Quando este pó é consolidado pelo processo de prensagem isostática à quente (Hot Isostatic Pressing), ocorre um total fechamento dos poros, além do crescimento dos carbonetos, gerado pela redução de energia de superfície que mesmo assim, mantém a estrutura com fina distribuição dos mesmos (1). Tais aços sinterizados, mesmo após operações como forjamento ou laminação, apresentam uma microestrutura resultante isotrópica. A microestrutura de aços ferramenta, fabricados por M/P, contrariamente aos fabricados pelos processos convencionais, não apresenta estrias ou bandeamento, revelando melhor distribuição de carbonetos com tamanho e forma bastante homogêneos, o que aumenta a resistência ao desgaste, a tenacidade, a capacidade de corte e a usinabilidade (2). Dentre os modernos aços ferramenta sinterizados, o aço 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, classificado como aço para trabalho a frio, possui aplicações típicas em situações onde se deseja maximizar a resistência ao desgaste como punções, estampas, ferramentas de extrusão, laminadores de rosca, ferramentas de corte, facas e ferramentas para calibração (3).

O objetivo do presente trabalho está em, através de técnicas de microscopia óptica e eletrônica, caracterizar a microestrutura do referido aço ferramenta sinterizado, no estado recozido, dada a atual relevância da M/P e da Engenharia de Superfície. Avalia-se a distribuição, morfologia e tamanho dos carbonetos, tanto na direção longitudinal como transversal das amostras. Para tanto, analisa-se em paralelo amostras de AISI M2 (0,88%C-4,1%Cr-4,9%Mo-6,12%W-1,8%V), aço ferramenta produzido pela metalurgia convencional, que mesmo apresentando composição química diferenciada, possibilita uma relação entre a microestrutura do aço sinterizado e o convencional. Também se avalia, via EDS, a presença dos elementos de liga nos carbonetos presentes na estrutura do aço sinterizado.

Aço Ferramenta Sinterizado: Aspectos Microestruturais e de Fabricação

A microestrutura dos aços ferramenta em geral, se caracteriza pela presença de uma matriz e carbonetos complexos, dentre eles, MC , M_2C , M_6C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, onde 'M' representa os elementos metálicos. De uma maneira geral a composição química destes aços consistem em ferro, carbono e elementos formadores de carbonetos como o vanádio, o tungstênio, o molibdênio e o cromo (4). No estado recozido, o carbono está quase que totalmente sob a forma de carbonetos, isto é, a estrutura destes materiais é basicamente formada por carbonetos primários, carbonetos secundários e uma matriz. Os chamados carbonetos primários são aqueles precipitados a partir do líquido durante a solidificação da liga, altamente estáveis, apresentando baixa solubilidade na matriz, possuindo entre outras funções, proteger a matriz quanto ao desgaste abrasivo, além de dificultar a cinética do crescimento de grão. No caso do aço sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, os altos teores de carbono e vanádio, tendem a aumentar a presença de carbonetos do tipo VC, altamente estáveis. Já os carbonetos secundários se precipitam da matriz por reações no estado sólido, ocorridas durante recozimento ou pela elevação da temperatura pelo trabalho a quente. Os teores de cromo e molibdênio da liga estudada, do ponto de vista teórico, seriam responsáveis pelo chamado endurecimento secundário, característico nos aços ferramentas, onde o molibdênio em parte se encontra dissolvido na matriz, em parte precipitado na forma de carbonetos secundários, principalmente do tipo M_6C . O cromo também se apresenta dissolvido em teores próximo a 4% na matriz, promovendo aumento da temperabilidade, além de precipitar carbonetos secundários do tipo $Cr_{23}C_6$ que elevam o pico de dureza secundária (5). A figura 1 traz a dureza Vickers que os carbonetos apresentam em aços ferramenta. (4)

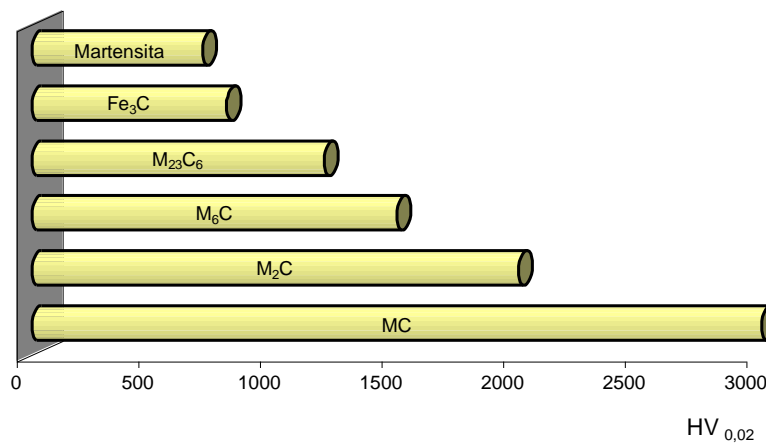


Figura 1: Dureza Vickers de alguns carbonetos presentes em aços ferramenta. (4)

Uma vez que a dureza dos carbonetos primários do tipo MC apresentam praticamente o dobro da dureza de carbonetos do tipo M_6C , altos teores de carbono e vanádio tendem a potencializar a resistência ao desgaste destes materiais. No caso de aços

produzidos por metalurgia convencional, teores elevados de carbono e / ou vanádio acabam por gerar estruturas com grandes carbonetos primários, heterogêneos e alinhados, fato este que causa defeitos superficiais durante a laminação a quente ou forjamento (4), além de reduzir as propriedades mecânicas e tribológicas. A figura 2 traz um aço 2,1%C-11,5%Cr - 0,7%W - 0,2%V, produzido a partir da metalurgia convencional. (6):

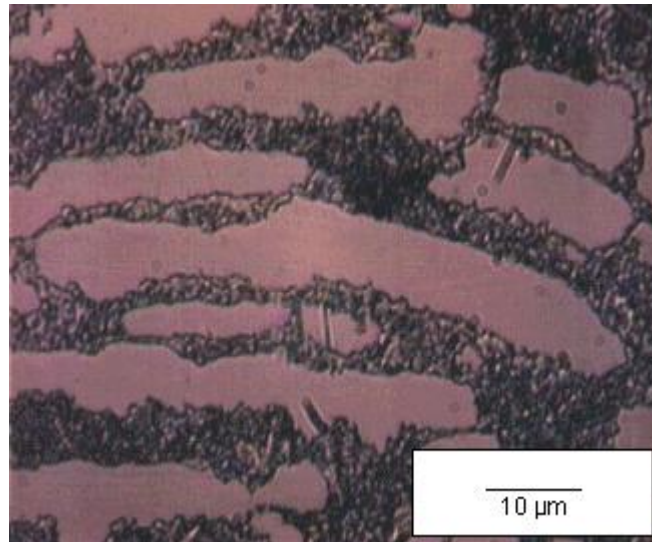


Figura 2: Estrutura a partir de microscopia óptica do aço 2,1%C – 11,5%Cr – 0,7%W – 0,2%V, produzido a partir da metalurgia convencional. Nota-se grandes carbonetos primários, alinhados e heterogêneos. Ataque Nital . (6)

Os carbonetos primários em rede, grosseiros e heterogêneos, apresentados na figura 2, são responsáveis por sensível diminuição da resistência ao desgaste, da tenacidade, além dos problemas superficiais anteriormente citados. Tal fato confirma que a metalurgia convencional apresenta limitações para a fabricação de aços ferramenta com alto teor de carbono, ligados a formadores de carbonetos.

Por outro lado, aços ferramenta produzidos por M/P, devido as altas taxas de extração de calor, característica do processo de atomização, promovem uma dispersão uniforme de carbonetos finos, bem distribuídos na microestrutura, eliminando a segregação dos mesmos. O processo de atomização, responsável pela produção de pó de aço ferramenta, consiste na fusão de metais e ligas, normalmente através de fornos de fusão a vácuo, seguido de vazamento em panela tipo “tundish”, que fornece um filete contínuo de metal, o qual alimenta diretamente o bocal de atomização. O mesmo filete é desintegrado em pequenas gotas através da incidência de um fluido (gás ou água), emitido em alta velocidade. O metal atomizado é retido na chamada câmara de atomização e coletado após a solidificação. Após esta etapa, ocorre um encapsulamento do pó, seguindo então para o processo de compactação ou prensagem isostática a quente (Hot Isostatic Pressing – HIP),

processo este que se utiliza de pressão e temperatura simultaneamente, com o objetivo de se obter a densificação plena do material (5). Segue-se então processos usuais de laminação ou extrusão a quente. O primeiro tratamento térmico é o de recozimento que visa aliviar tensões, promovendo condições ideais de usinagem ou corte. A partir deste ponto, o aço ferramenta sinterizado segue para os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, tratamentos estes que serão responsáveis pela maximização das propriedades tribológicas desta família.

Materiais e Métodos

A partir de uma barra de diâmetro 31,10 mm do aço ferramenta sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, estado recozido, procedência Böhler, foram retiradas amostras para análise de composição química via úmida, realizada no laboratório de análises química da Cofap, unidade São Bernardo.

A barra diâmetro 31,10 mm do aço AISI M2 utilizado foi de procedência Villares com composição química 0,88%C - 0,35%Si - 0,31%Mn - 4,10 %Mo - 6,12%W - 1,8%V, certificado 8785 / 97.

Os valores de dureza Brinell foram obtidos através de durômetro WPM, carga 187,5 Kg, esfera 2,5 mm, 15 segundos.

Para microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura, as amostras utilizadas neste trabalho foram cortadas em “cut-off” Panambra / Mesoton, preparadas em embutidora Panambra / Tempopress 2, lixadeira e politriz Panambra / DP-10. As análises via microscópio óptico foram realizadas nas seções transversais e longitudinais das amostras. Os ataques das amostras foram com Nital 5%, 15 segundos (ataque profundo).

As análises de microestruturas de aços sinterizados e convencionais via microscopia óptica foram realizadas em microscópio Olympus BX 60M, monitor Sony Trinitron PVM 1353 MD, Vídeo Printer Sony UP 1800 MD. Para microscopia eletrônica de varredura foi utilizado microscópio Leica Stereoscan 440 com EDS Oxford Link EXL 2, acoplado.

Resultados e Discussões

A composição química do aço sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, apresentou os valores apresentados na tabela 1:

<u>DESIGNAÇÃO</u>	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V
Nominal	2,30	0,40	0,40	12,5	1,10	4,0
Análise	2,10	0,36	0,38	11,6	1,00	3,9

Tabela 1: Composição nominal e experimental do aço sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V

A análise metalográfica, via microscopia óptica, revelou que o aço AISI M2 recozido, produzido a partir da Metalurgia convencional, mesmo com um teor de carbono muito inferior ao aço sinterizado, apresenta carbonetos primários heterogêneos na direção transversal (figura 3), e estrutura bandeada na direção longitudinal (figura 4).

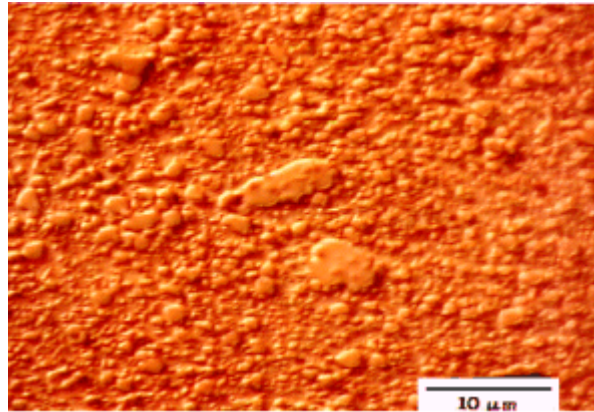


Figura 3: Estrutura AISI M2 transversal. Carbonetos primários heterogêneos. Ataque profundo, Nital 5%.

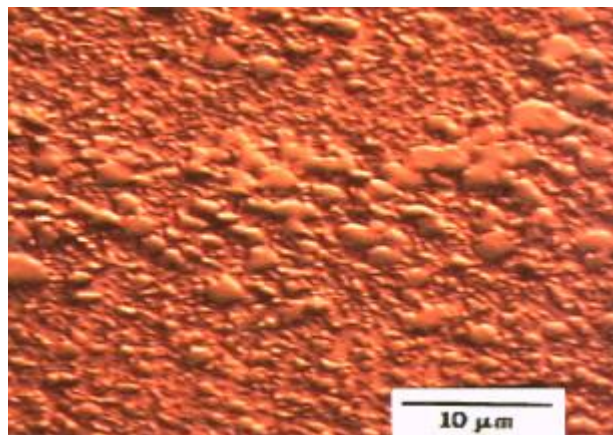


Figura 4: Estrutura AISI M2 longitudinal. Carbonetos primários heterogêneos em rede, caracterizando bandeamento. Ataque profundo. Nital 5%.

Por outro lado, o aço ferramenta sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, recozido, conforme se observa nas figuras 5, 6, 7 e 8, apresenta uma microestrutura isotrópica com homogênea distribuição de finos carbonetos, nas duas direções.



Figura 5: Estrutura do aço sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, direção transversal. Carbonetos primários finos e distribuídos de forma homogênea. Ataque profundo, Nital 5%.

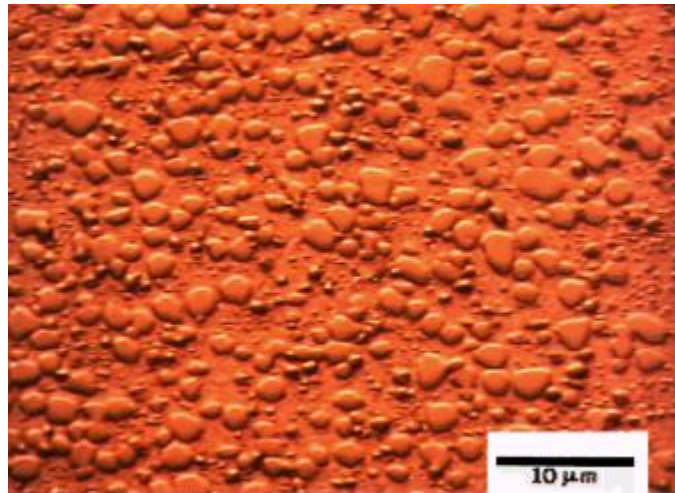


Figura 6 : Detalhe da estrutura isotrópica da figura 5. Ataque profundo, Nital 5%.

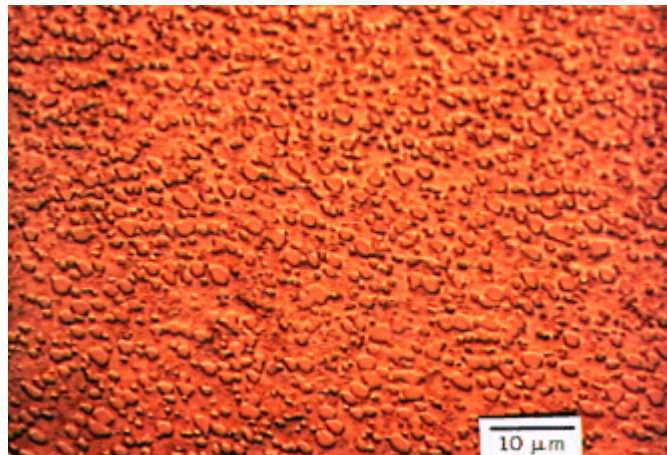


Figura 7 : Estrutura do aço ferramenta sinterizado, longitudinal. Carbonetos primários finos e homogêneos, não se notando fenômeno do bandeamento. Ataque profundo, Nital 5%.

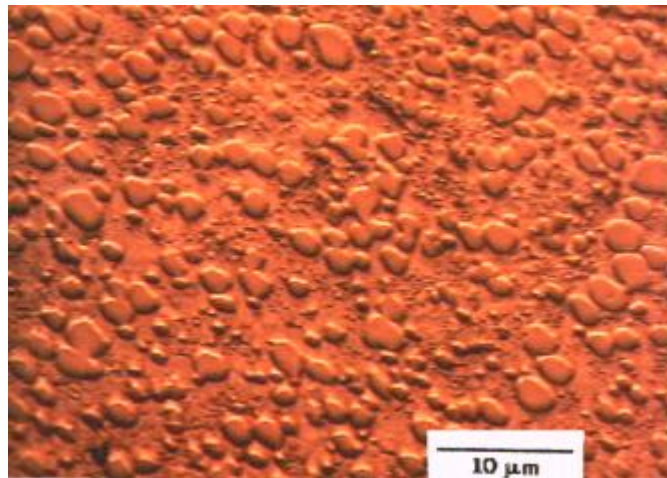


Figura 8 : Detalhe da isotropia da estrutura da figura 7. Ataque profundo, Nital 5%.

Apesar da composição química do aço sinterizado apresentar 2,3% de carbono e 4% de vanádio, o mesmo revela uma estrutura homogênea com carbonetos primários com morfologia bem definida, de tamanho estável variando entre 2,0 e 3,0 μm , tanto na direção transversal da amostra como na longitudinal, conforme se observa em detalhes nas figuras 5 a 8. O aço AISI M2, produzido pela Metalurgia convencional apresentou heterogeneidade na morfologia e distribuição dos carbonetos primários, além de caracterizar uma estrutura bandeada na direção longitudinal. Vale ressaltar que aços ferramenta de uma maneira geral, no estado recozido apresentam também fina dispersão de carbonetos secundários, observados em grandes quantidades tanto no AISI M2 como no aço ferramenta sinterizado.

A figura 9 apresenta os valores de dureza Brinell obtidos no aço sinterizado, tanto na direção longitudinal, como transversal.

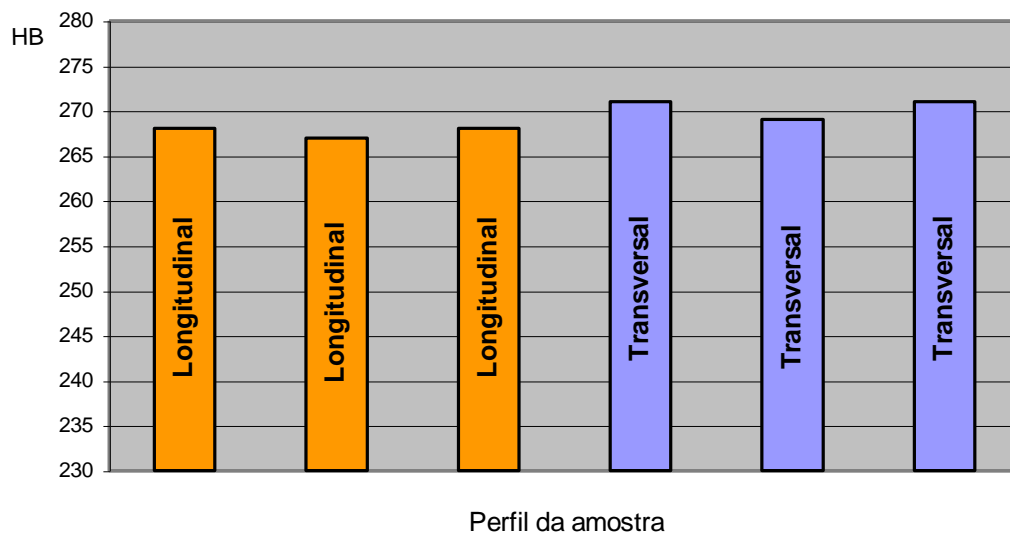


Figura 9: Medidas de dureza Brinell no aço ferramenta sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, na direção longitudinal e transversal.

Observa-se que não existe variação significativa nos valores de dureza das amostras do aço sinterizado, fato justificado pela isotropia apresentada tanto na direção transversal como na longitudinal.

Com o objetivo de se estabelecer uma análise qualitativa nos carbonetos existentes no aço sinterizado recozido, realizou-se caracterização via microscopia eletrônica de varredura, seguida de análise por dispersão EDS, conforme mostram as figuras 10 e 11 respectivamente:

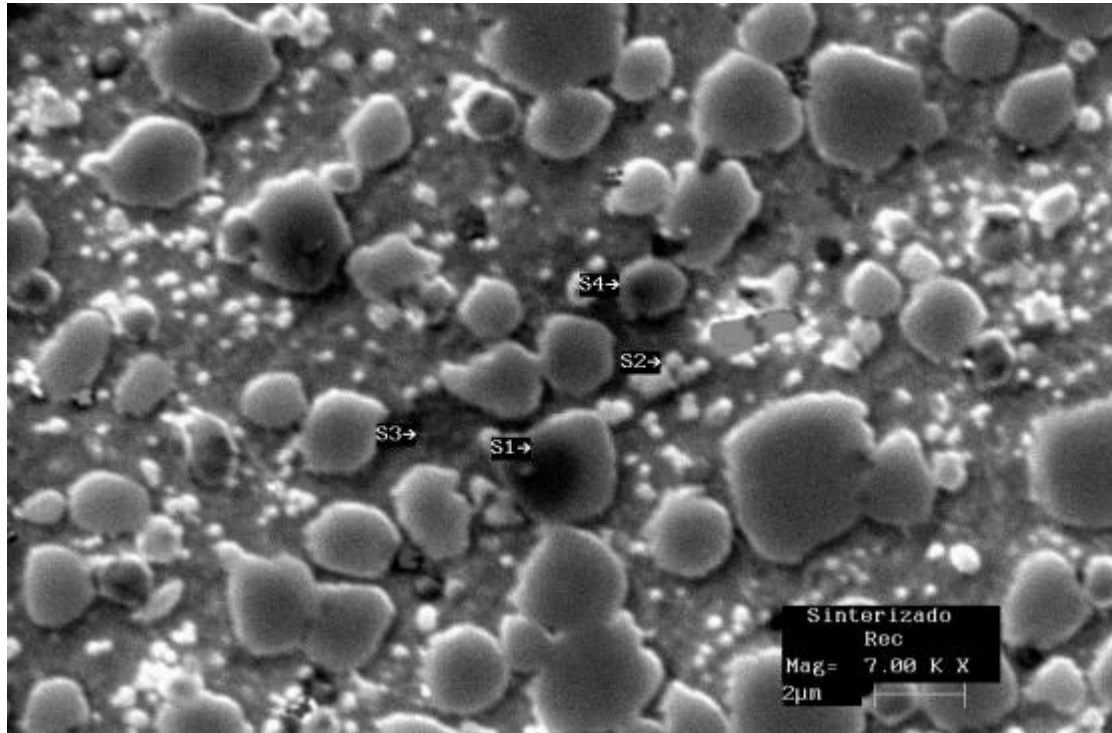


Figura 10: Aço sinterizado apresentando carbonetos primários esferoidizados e homogêneos (seta 1), colônias de carbonetos secundários (seta 2), matriz (seta 3) e carbonetos primários esferoidizados menores (seta 4). MEV - Imagem de elétrons secundários.

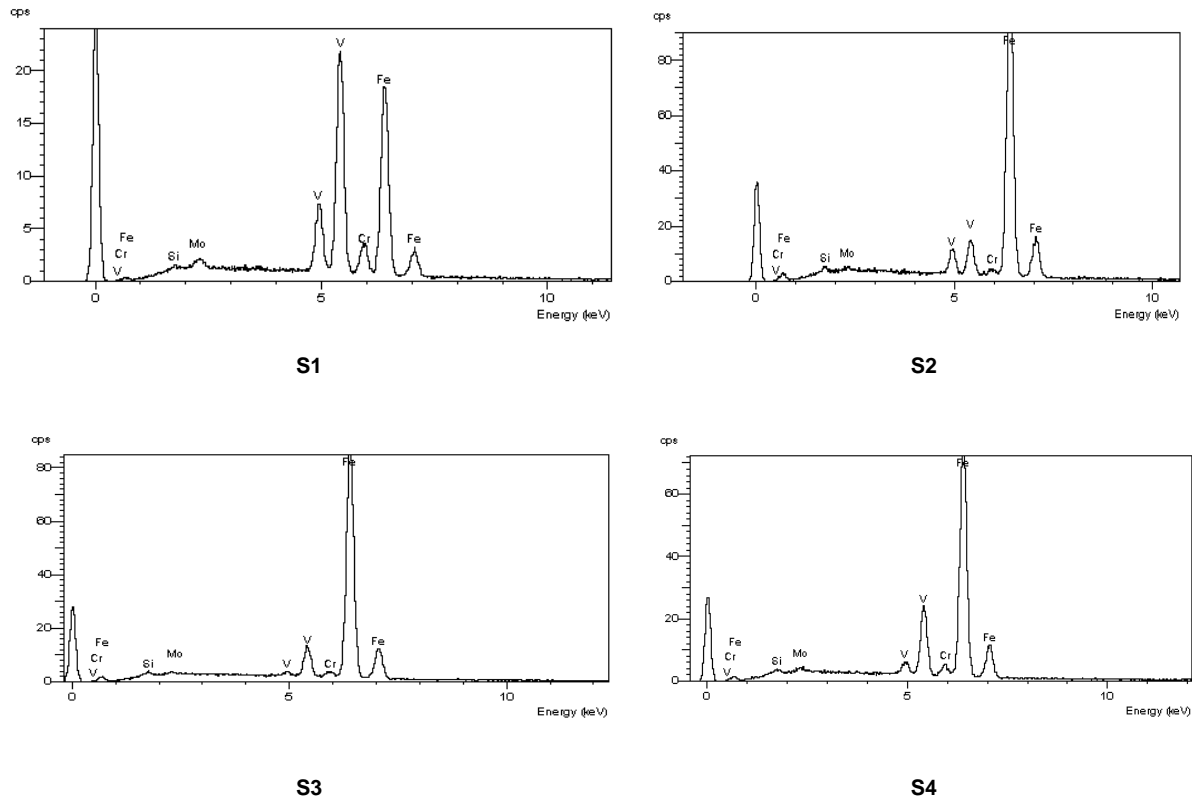


Figura 11: Espectros referentes às setas 1, 2, 3 e 4 da figura 10. Espectrometria de raios-X por dispersão de energia (EDS).

Nota-se o pico de vanádio no espectro da seta 1 e seta 4, ratificando a presença de carbonetos deste elemento (VC), responsáveis pela alta resistência ao desgaste destas ligas alto carbono, alto vanádio. É importante ressaltar que picos de Mo e Cr são também notados no espectro da seta 1, em níveis até maiores que no espectro da seta 2, referentes a colônia de carbonetos menores. Tal fato indica que durante a consolidação pressurizada, ocorre crescimento de carbonetos, originados na realidade, por reações no estado sólido, o que é confirmado pela não separação clara entre os elementos de liga na análise por dispersão de energia realizada nos carbonetos. O espectro da seta 3, referente à matriz ferrítica, apresentou além do pico do elemento Fe, pequenas indicações de V, Cr, Mo.

Conclusões

- O aço ferramenta sinterizado 2,3%C-12,5%Cr-1,1%Mo-4,0%V, mesmo apresentando composição química complexa, apresenta uma microestrutura com finos carbonetos primários e secundários, com distribuição e morfologia homogênea, tanto no sentido transversal como longitudinal da amostra. Tais aços tendem a apresentar resistência ao desgaste superior ao aços ferramenta produzidos a partir da Metalurgia convencional.
- A isotropia do aço sinterizado, observada ao microscópio, é ratificada pelos valores homogêneos de dureza Brinell aferidos nas duas direções
- A análise por dispersão de energia (EDS), realizada nos carbonetos primários, apresenta picos de vanádio ratificando a presença de VC, responsáveis pela alta resistência ao desgaste destas ligas. Picos de Mo e Cr são também notados nestes carbonetos, em níveis até maiores que na colônia de carbonetos secundários. Na consolidação pressurizada, ocorre crescimento de carbonetos, originados na realidade por reações no estado sólido, através de mecanismo de crescimento do tipo coalescimento, o que é confirmado pela não separação clara entre os elementos de liga na análise por dispersão de energia realizada nos carbonetos de maior e menor dimensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Eng. Renato Ricchione da Aços Böhler pela amostras concedidas do aço sinterizado, ao Sr. Rogério Aparecido Lopes da Silva do Laboratório de Metalurgia da Escola de Engenharia Mackenzie pela utilização e atenção junto ao microscópio óptico e a Srta. Eliana Satiko Mano do Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas - Escola Politécnica da USP pela utilização do microscópio eletrônico de varredura e acessórios.

Referências Bibliográficas

1. AMBRÓSIO, F. F. ; GENTILE, E. F. ; ROSSI, J. L. ; VATAVUK, J. - Tecnologia de pós metálicos e cerâmicos aplicada ao setor automotivo. - 5º Congresso e Exposição Internacional de Tecnologia da Mobilidade, SAE Brasil, São Paulo, Set. 1997.
2. IGHARO, M. ; WOOD, J. V. - Effects of consolidation parameter on properties of sintered high speed steels. - Powder Metallurgy, v.23, p.70 -76, 1990.
3. AÇOS BOHELER - Catálogo Técnico, - Aços Sinterizados obtidos através da Metalurgia do Pó. - Set. 1997.
4. BRANDIS, H. ; HABBERLING, E. ; ORTMANN, R. ; WEIGAND, H. H. - Metallurgical aspects of carbides in high speed steels. - 109 th. AIME Annual Meeting Symposium on Processing and Properties of High Speed Tool Steels Proceedings. Las Vegas, EUA, p. 91 - 102, fev. 1980
5. ARAÚJO, E. G. - Influência das adições de NbC e ligas a base de fósforo na sinterização do aço rápido M2 - São Paulo, 1993, Dissertação (Mestrado), IPEN - USP.
6. VATAVUK, J. - Acervo pessoal.