



QUANTIFICAÇÃO DOS CARBONETOS NO AÇO PARA TRABALHO A FRIO VC131 VIA METALOGRAFIA QUANTITATIVA¹

Fabio Alves da Silva²
Thiago Michel de Brito Farias³
Rafael Agnelli Mesquita⁴

Resumo

A maior fração dos carbonetos primários e eutéticos dos aços para trabalho a frio permanece não dissolvida após a têmpera e revenimento, tornando-se importante para a resistência ao desgaste destes materiais. Porém, os dados quantitativos destes carbonetos e, principalmente, a relação quantitativa com as propriedades ainda são pouco explorados pela literatura. O presente trabalho, portanto, está focado em avaliar carbonetos eutéticos tipo M_7C_3 em aço D6 (nome comercial VC131), a partir da técnica de metalografia quantitativa. Para metalografia, amostras foram preparadas por lixamento e polimento e, após ataque metalográfico, avaliadas em software automático de quantificação. Futuramente, os resultados dos carbonetos analisados no aço do presente trabalho serão comparados às propriedades do material, por exemplo, em relação ao seu comportamento em usinagem ou às propriedades mecânicas como resistência e tenacidade.

Palavras-chave: Carbonetos; Aços para trabalho a frio; Metalografia; AISI D6.

QUANTIFICATION OF CARBIDES IN THE STEEL FOR WORK TO COLD THROUGH QUANTITATIVE METALLOGRAPHY¹

Abstract

The largest fraction of primary and eutectic carbides in cold work tool steels remain undissolved after the hardening, becoming important to the wear resistance of these materials. However, the quantitative data of these carbides and, mainly, the quantitative relationship with the properties is still little explored by the literature. The present work, therefore, it is focused in evaluating carbides eutectics type M_7C_3 in steel D6 steel (commercial name VC131), starting from the technique of quantitative metallography. For metallography, samples were prepared for to grinding and polishing and, after metallographic etching, appraised in automatic software of quantification. Hereafter, the results of the carbides analyzed in the steel of the present work will be compared to properties of the material, for instance, in relation to its behavior in machining or to mechanical properties as wear resistance and toughness.

Key words: Carbides; Cold work tool steels; Metallography; AISI D6.

¹ Contribuição técnica ao 9º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 10 e 11 de agosto de 2011, São Paulo, SP.

² Engenheiro de Produção Mecânica, Mestrando em Engenharia de Produção, Engenheiro Coordenador da Qualidade da empresa Telar Engenharia, Brasil, São Paulo, SP, e-mail: fabio_alves2_1@hotmail.com.

³ Físico, Doutor em Ciências, Pós-Doutor em Ciências dos Materiais, Professor Doutor, Universidade Nove de Julho, Brasil, São Paulo, SP, e-mail: tfarias@uninove.br.

⁴ Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Pós-doutorando em Engenharia de Materiais e Metalurgia, Professor Doutor, Universidade Nove de Julho, Brasil, São Paulo, SP, e-mail: rafael.mesquita@uninove.br.



1 INTRODUÇÃO

O termo “ferramentas de trabalho a frio” é aplicado para um grande número de ferramentas, empregadas em trabalho e moldagem de metais em temperaturas abaixo de 200°C, tipicamente na temperatura ambiente. Nessas condições, as ferramentas são submetidas a elevados esforços mecânicos.⁽¹⁾

A indústria metal-mecânica é a principal envolvida em conformação a frio, especialmente na conformação de aço. Por exemplo, destacam-se operações de: furação de longarinas de caminhões e chassis de automóveis, corte de chapas, furação e dobra para fabricação de fechaduras e móveis de aço, para fazer roscas em parafusos, pentes e rolos laminadores de roscas, facas industriais, ferramentas de cunhagem, punções e matrizes de corte e repuxe.⁽²⁾

Matrizes otimizadas, portanto, devem partir de aços ferramenta com qualidade metalúrgica e propriedades adequadas para a operação de conformação em questão. Além de aços com qualidade, a correta seleção do tipo de aço e do tratamento térmico é fundamental para o ótimo desempenho das ferramentas. Os aços ferramenta estão dispostos em um vasto intervalo de composições, sendo classificadas por diferentes normas em diversos países. Muitos fabricantes também possuem suas próprias composições. O resultado é a existência de um grande número de composições e denominações de aço ferramenta.^(1,2)

Grande parte dos aços empregados para produção de ferramentas tem elevados teores de elementos de liga. Além disso, aços de alto teor de carbono são, também, frequentemente aplicados na produção de ferramentas. Uma classe típica, neste sentido, são os aços da série D - alto cromo – alto carbono, classificação da American Iron and Steel Institute (AISI). Foram inicialmente desenvolvidos durante a Primeira Guerra mundial para substituir aços rápidos.⁽²⁾ Não apresentaram bons resultados porque sua dureza a quente se mostrou insuficiente para tal fim. Notou-se, entretanto, que a alta resistência ao desgaste obtida pela presença de carbonetos duros de cromo e a notável indeformabilidade desses aços tornam-nos extremamente úteis para aplicações em matrizes. Tais propriedades são inteiramente dependentes dos carbonetos ricos em Cr, formados na solidificação dos aços da série D. Tais carbonetos são partículas de natureza cerâmica, com dureza muito superior à da matriz microestrutural, obtida por têmpera e revenimento. Por exemplo, a matriz microestrutural atinge cerca de 60 HRC (aproximadamente 800 HV),⁽³⁾ enquanto os carbonetos tipo M_7C_3 apresentam dureza da ordem de 1.700 HV.⁽²⁾

Apesar de importantes em termos das propriedades, os aços da série D (~1,5 a 2,20% C e 12% Cr) são extremamente suscetíveis à segregação durante a solidificação dos lingotes, resultando em estruturas de carbonetos pouco favoráveis. Conseqüentemente, a tecnologia para o forjamento e laminação desses materiais, além de conferir a forma final, visa também obter um grau de refinamento na microestrutura bruta de solidificação. Devido à natureza da solidificação em lingotes, esta estrutura tende a ser muito mais refinada na superfície (região próxima aos moldes de solidificação, também conhecidos como lingoteiras) do que nas regiões centrais. E tais diferenças persistem mesmo após conformação mecânica.⁽⁴⁾

Portanto, a capacidade de se obter peças com composição química homogênea e, conseqüentemente, microestrutura uniforme, nesses aços, está intimamente ligada aos processos de fabricação empregados: no caso da fabricação convencional, a ocorrência de segregação de solidificação é o principal fator limitador da obtenção de produtos uniformes. A segregação pode ser reduzida significativamente pela



aplicação de processos de refusão ou mitigada pela conformação a quente. A metalurgia do pó tem excelente potencial para reduzir ou eliminar tais heterogeneidades,⁽⁴⁾ porém normalmente implica em custo consideravelmente superior.

Deste modo, a utilização de materiais convencionais, fundidos em lingotes e laminados a quente, ainda corresponde a grande maioria de uso na indústria. Como comentado, tais materiais possuem heterogeneidades de microestrutura ao longo da seção, conseqüentemente afetando as propriedades ou o comportamento do material durante a usinagem. Entretanto, este aspecto foi pouco avaliado na literatura, especialmente utilizando dados quantitativos e estatísticos da microestrutura dos materiais.

O presente trabalho, portanto, está focado em avaliar carbonetos eutéticos tipo M_7C_3 em aço VC131 não dissolvidos durante a austenitização, a partir da técnica de metalografia quantitativa. Futuramente, os resultados advindos deste trabalho serão utilizados na comparação às propriedades do material em relação ao seu comportamento em usinagem ou às propriedades mecânicas como resistência ao desgaste e tenacidade. Devido ao foco deste primeiro trabalho ser na avaliação quantitativa da microestrutura, detalhes sobre técnicas de metalografia quantitativa são descritos a seguir.

1.1 Técnica de Metalografia Quantitativa

A avaliação metalográfica é uma importante ferramenta na caracterização dos metais, em especial dos aços e ferros fundidos. Para que resultados confiáveis e muito mais úteis possam ser obtidos com esta técnica, entretanto, é necessário um planejamento cuidadoso e uma execução metódica. Da mesma forma, o cuidado e atenção no modo de apresentar os resultados obtidos são essenciais para que os resultados possam ser corretamente compreendidos e utilizados.

De uma forma geral a avaliação metalográfica de um produto siderúrgico é realizada com um dos seguintes objetivos:⁽⁵⁾

- medir alguma característica micro ou macroestrutural de um item de aço ou ferro fundido;
- testar uma hipótese relacionada ao comportamento ou desempenho de um item de aço ou ferro fundido; e
- investigar as eventuais causas estruturais de determinado comportamento ou desempenho de um item de aço ou ferro fundido.

A compreensão clara das diferenças entre os três objetivos é extremamente importante para que a avaliação metalográfica seja realizada e relatada correta e satisfatoriamente. Embora em todos os casos medidas sejam realizadas, é importante distinguir se o objetivo final de avaliação é realizar a medida de uma característica, apenas, ou testar determinada hipótese sobre esta característica. Além disto, embora as investigações metalográficas terminem por testar hipóteses, não devem começar com uma hipótese definida para teste, uma vez que tal definição a priori limita, drasticamente, as possibilidades da investigação.⁽⁵⁾

A Metalografia Quantitativa, aplicada às Ciências dos Materiais, é utilizada para encontrar uma relação simples entre as propriedades de um metal e a sua microestrutura que procure exprimir, em termos precisos, determinados fatores ou parâmetros estruturais. Sem tal possibilidade a apreciação desses parâmetros não pode ser senão qualitativa e, conseqüentemente, de interesse limitado. Neste contexto, a metalografia quantitativa fornece meios de quantificar a microestrutura,



cujo objetivo é determinar a quantidade, a forma, o tamanho e a distribuição dos constituintes, fases e defeitos. As medidas de Metalografia Quantitativa são em superfícies opacas e destas medidas devem ser obtidas relações que caracterizem tridimensionalmente a microestrutura. Muitos dos parâmetros em terceira dimensão podem ser obtidos de maneira exata, por meio de medidas em duas dimensões, mas estas relações exatas não são disponíveis em todos os casos. Algumas vezes, a Metalografia Quantitativa utiliza parâmetros que não representam os valores reais em terceira dimensão, mas que caracterizam a microestrutura.

A Metalografia Quantitativa tem utilização na avaliação de parâmetros estruturais não só para interpretação de mecanismos nos fenômenos metalúrgicos, mas também nas determinações de rotina para controle de qualidade ou estudo de suas imagens. Por outro lado, há determinações especiais que só esporadicamente são efetuadas quando necessárias em pesquisas específicas, como a orientação de cristais ou a análise de linhas de escorregamento ou, ainda, relações angulares.⁽⁶⁾

Dentre as diversas técnicas de observação da microestrutura dos aços e ferros fundidos, a mais comum é a microscopia ótica. Neste caso, emprega-se a luz visível que incide sobre a amostra e é refletida até o observador. A resolução que pode ser obtida em uma imagem depende do comprimento de onda da radiação empregada. Para a luz visível de cor verde, isto resulta em uma resolução de 200s 250nm que corresponde a um aumento máximo da ordem de 1.400 vezes (1.400 x). Embora existam microscópios óticos capazes de fornecer aumentos superiores a este valor, tais aumentos são chamados aumentos “vazios” por não fornecerem informação adicional àquela obtida com o aumento máximo de cerca de 1.400 x, sendo comum nos laboratórios equipamentos com aumentos de máximo 1.000 x.⁽⁵⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aço Ferramenta Estudado

Dentro da gama dos aços ferramenta para trabalho a frio, foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho o aço VC131 (nomenclatura Villares Metals), por ser um dos principais aços para trabalho a frio utilizado na indústria metal-mecânica, porém futuramente serão estudados outros aços ferramentas para trabalho a frio. Este material é usado especialmente em ferramentas que exigem alta resistência à abrasão como: matrizes para estampar e cunhar, laminar roscas, repuxamento, centros para tornos, punções e calibres. Sua composição química é detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço VC131 avaliado no presente estudo

Aço	AISI	DIN	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V
VC131	D6	1.2379	2,09	0,31	0,35	12,5	0,05	0,10	0,15

A escolha do aço VC131 para o presente estudo foi baseada no alto teor de C e Cr em relação aos demais aços para trabalho a frio,^(7,8) o que promove a maior quantidade de carbonetos observada em aços ferramenta de uso na indústria (a relação entre o teor de C e Cr e a quantidade de carbonetos é explicada adiante (Figura 3).

Foram avaliadas três amostras do aço VC131, a partir de um bloco produzido industrialmente com secção de 200 mm x 300 mm. Uma para análise da superfície, uma para meio raio e outra para núcleo. A denominação meio-raio é empregada

apenas por simplicidade (uma vez que não se trata de material de seção circular), representando a meia-distância entre as regiões superficiais (superfície) e centrais (núcleo) dos materiais. O principal intuito foi de avaliar a diferença de carbonetos nestas diferentes regiões do material, bem como efetuar a análise da média da área e perímetro dos carbonetos por metalografia quantitativa.

2.2 Experimentos Metalográficos

O procedimento de preparação metalográfica foi o padrão para os aços. Após o corte, as amostras foram lavadas, lixadas e polidas. Foi efetuado lixamento das amostras com lixas d'água de granulometria 120, 240 e 600 por cerca de 10 minutos em cada uma das lixas. Para o polimento foi utilizado discos de diamantes para polimento de 3 microns a 6 microns e de 1 micron, onde também foi desprendido cerca de 10 minutos de polimento em cada um dos discos de diamante. Na sequência as amostras foram atacadas com uma solução de Nital a 4% durante 3 a 5 minutos.

Para a aquisição e análises das imagens, foi utilizado um microscópio óptico Zeiss, modelo Axiovert 40 MAT, com analisador de imagens acoplado, salienta-se que para cada imagem foi realizada a aquisição de quatro campos com aumento de 50 vezes, totalizando uma avaliação de 4 mm².

A Figura 1 mostra o método de quantificação realizado. Após ataque, a microestrutura pode ser obtida com elevado contraste entre carbonetos (partículas claras) e matriz (escura). O *Software Analysis* foi, então, empregado para a quantificação da microestrutura. Uma análise de histograma de tons de cinza é realizada, na qual o pesquisador define quais os tons referentes às partículas e quais referentes à matriz. Na presente situação, devido ao elevado contraste, tal diferenciação foi muito simples. Portanto, a imagem binária (preto e branco) é obtida, sendo região branca a qual será avaliada pelo *software*. Para ilustração, as regiões a serem avaliadas são coloridas em verde. A seguir, o software realiza a contagem individual das partículas (neste caso os carbonetos), apresentando o resultado na tela e, também, numa planilha eletrônica.

3 RESULTADOS

A partir da aquisição das imagens pode se realizar uma análise quantitativa e estatística do comportamento dos carbonetos nas amostras. A Tabela 2 apresenta os resultados da média das áreas e perímetro, sendo os resultados mais detalhados mostrados na Figura 2.

Pode-se observar por meio de análise óptica na Figura 2 que a variação da quantidade de números de aglomerados de carbonetos é proporcional a localização da amostra, isto é, existe a tendência a um agrupamento das partículas e estes aglomerados tornam-se mais uniformes, da superfície para o núcleo. Além disso, tal redução de tamanho parece mais forte da superfície para o núcleo e torna-se menos intensa da região do meio raio para o núcleo da amostra. Isto pode ser observada tanto em termos da quantidade de carbonetos maiores que 10 microns (Figura 2) quanto nas imagens representativas de cada região.

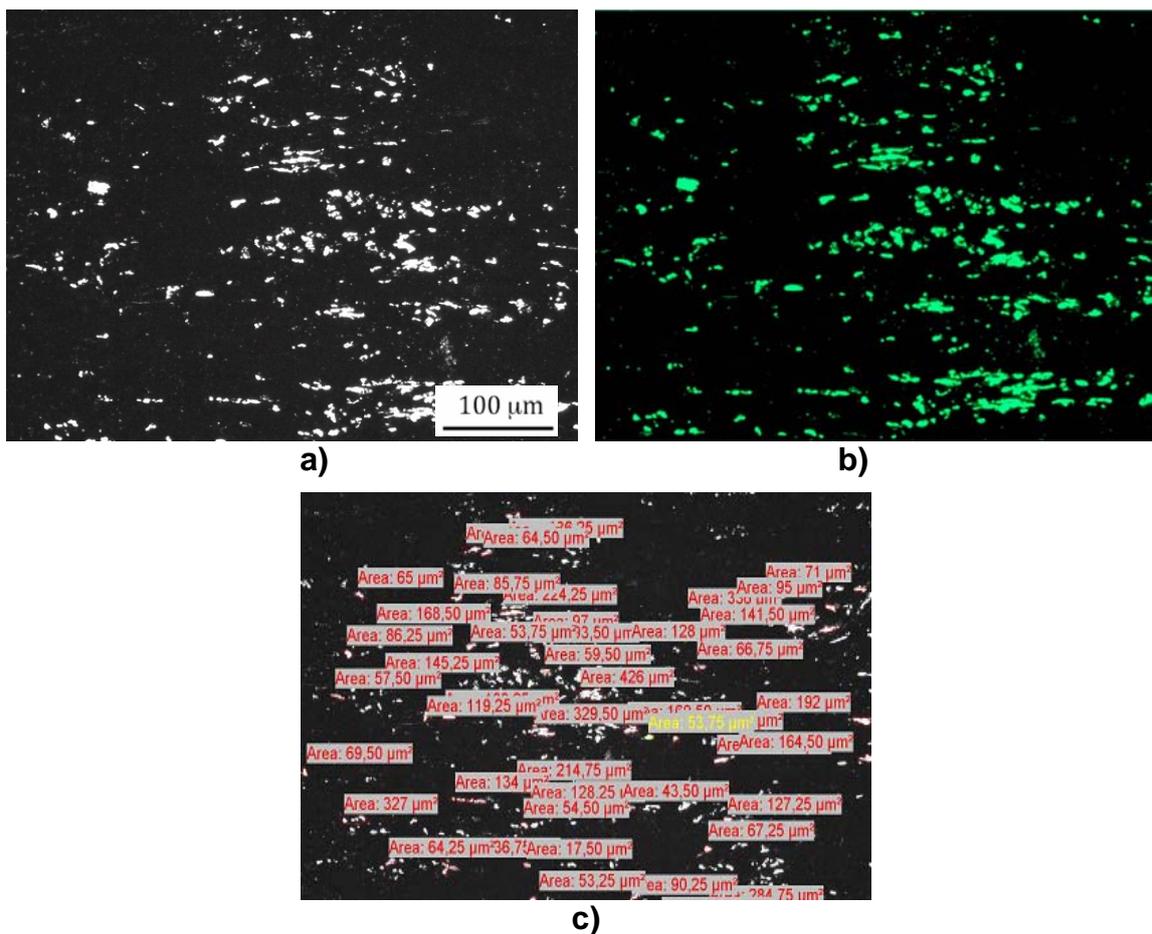


Figura 1. Princípio das determinações realizadas pelo software de quantificação: a) obtenção da imagem em tons de cinza, com contraste entre a fase que será medida e as demais; b) seleção (manual) de qual o tom do espectro de cinza será considerado. Neste caso, a região escolhida foi destacada em verde. c) resultado da quantificação, colocado sobre a imagem. O foco deste estudo foram partículas grandes e, assim, apenas carbonetos maiores que 10 microns foram considerados.

Tabela 2. Levantamento estatístico do valor médio da área e perímetro dos carbonetos do aço ferramenta para trabalho a frio VC131 nas regiões: superfície, meio raio e núcleo

Região	Área média (μm^2)	Perímetro médio (μm)
Superfície	205	70
Meio Raio	220	77
Núcleo	270	81

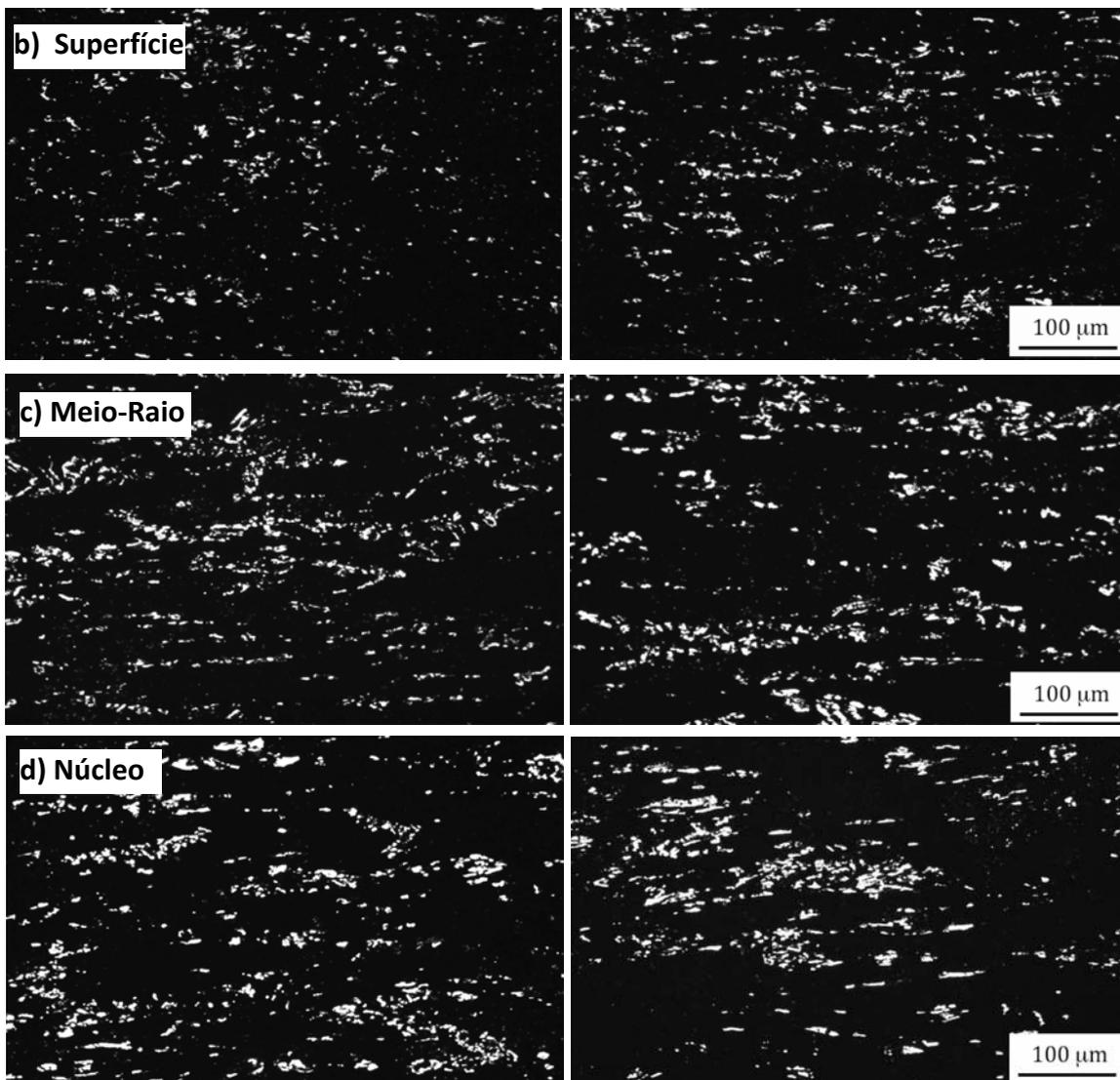
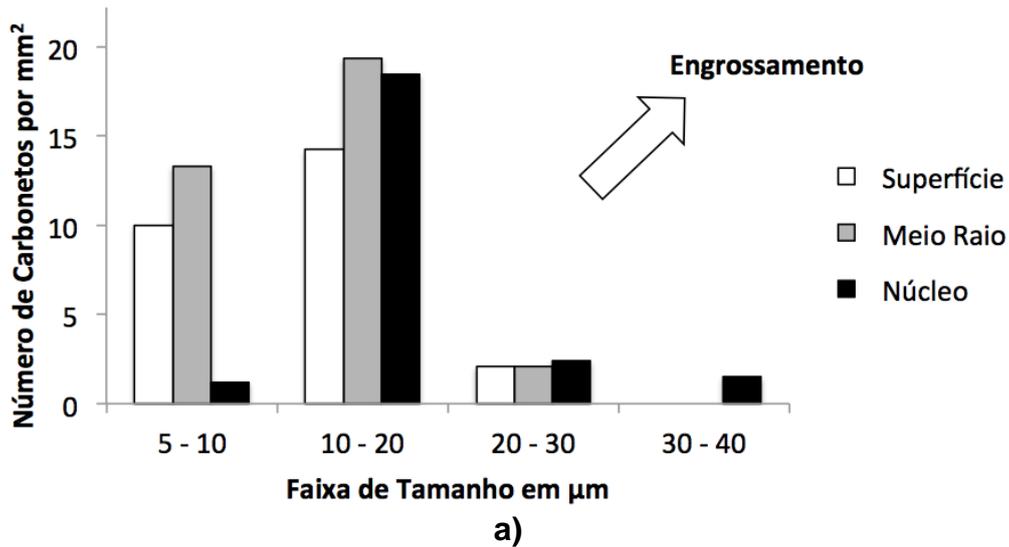


Figura 2. Quantificação da quantidade de carbonetos por milímetro quadrado nas amostras avaliadas na superfície (5 mm da face), meio raio (50 mm da face) e núcleo (100 mm da face) de um bloco de aço VC131. Observar que a seta aponta o sentido de engrossamento dos carbonetos, seja ele pelo aumento da quantidade de carbonetos grosseiros (para cima, vertical) ou aumento do tamanho dos carbonetos (para direita, horizontal).

4 DISCUSSÕES

A quantidade de carbonetos dos aços ledeburíticos de alto Cr, dos quais os aços da série D fazem parte, é determinada pela composição química, especialmente pelos teores de Cr e C. Um exemplo é mostrado no diagrama de equilíbrio da Figura 3. Portanto, em qualquer processo, a quantidade de carbonetos será definida pelo balanço entre C e Cr da liga, sendo a maior parte destes elementos dedicada à formação de carbonetos eutéticos nos aços da série D.

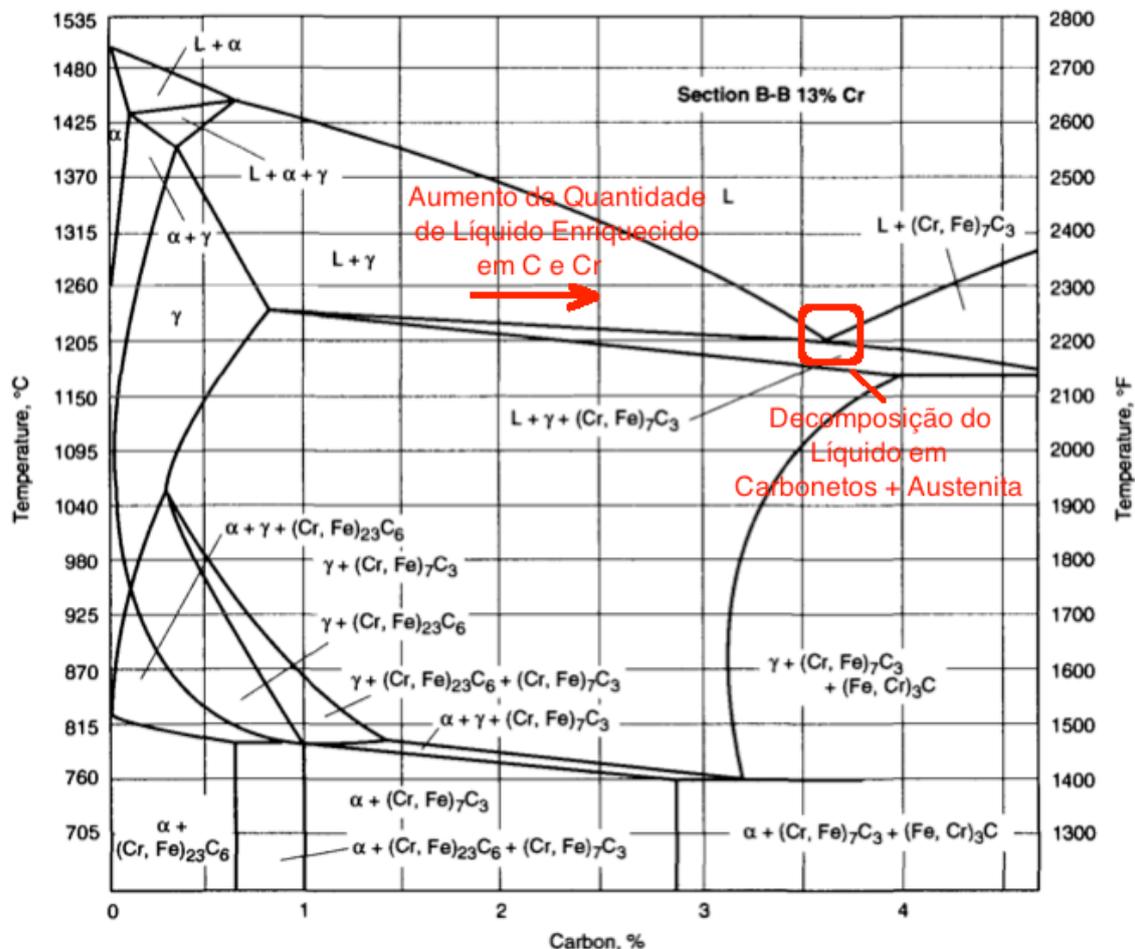


Figura 3: seção vertical do diagrama pseudo-binário Fe-C-Cr, para teor fixo de 13% de Cr. Observar que o aumento da quantidade de carbono leva para um aumento da quantidade de líquido que solidifica no ponto eutético, significando que uma maior fração de carbonetos eutéticos será obtida. Adaptado a partir da referencia.⁽⁹⁾

Apesar da quantidade dos carbonetos ser definida pela composição química, a morfologia obtida será intimamente dependente do processo de solidificação e das subsequentes operações de conformação. Como mostrado quantitativamente por Delgado, Mesquita e Barbosa⁽¹⁰⁾ em aços ligados de alto carbono, a solidificação em lingotes promove um refino contínuo da superfície ao núcleo, porém não linear. A relação é exponencial, mostrando que as regiões próximas da parede do molde (superfície) tendem a ser muito mais refinadas e regiões do meio-raio e núcleo são semelhantes. Portanto, os resultados do presente trabalho mostram-se coerentes neste aspecto, apenas salientando que a conformação mecânica tende a diminuir a diferença na microestrutura, devido a fragmentação dos carbonetos. Este aspecto



também foi mostrado por Delgado,⁽¹¹⁾ resultando novamente em maior diferença entre a superfície e núcleo do que entre o meio-raio e núcleo.

Uma vez definido o método de quantificação, a sequência do presente trabalho envolverá a correlação de resultados microestruturais as propriedades mecânicas, principalmente tenacidade e resistência ao desgaste. Também, serão avaliados os efeitos na usinabilidade do material, uma vez que os carbonetos M_7C_3 são de alta dureza e devem influir negativamente na usinabilidade. Estudos do efeito de partículas duras na usinabilidade de materiais são amplamente difundidos na literatura (exemplos as referências),⁽¹²⁻¹⁴⁾ porém a quantificação da quantidade de carbonetos e sua relação a vida de ferramentas é pouco conhecida em aços ferramenta. Tal relação será levantada em trabalhos futuros, por meio da comparação do comportamento em usinagem das diferentes regiões e, também, pela comparação de aços da série D com diferentes teores de C e Cr.

Além disso, estudos posteriores de impedância elétrica⁽¹⁵⁾ e sua correlação com metalografia serão relevantes para a conclusão sobre a formação dos aglomerados em aços ferramentas para trabalho a frio. Esta técnica baseia-se na diferença de comportamento em resistência e capacitância dos carbonetos (de natureza cerâmica) e da matriz (metálica). Assim, podem ser levantados métodos alternativos de quantificação da microestrutura, com a vantagem de serem ensaios não destrutivos, sendo assim interessantes para o controle de qualidade do produtor e do usuário do aço ferramenta.

5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho teve como objetivo quantificar e conseqüentemente avaliar a distribuição dos carbonetos em diferentes regiões da amostra de forma que pudesse ser evidenciado que há uma variação na distribuição dos aglomerados de carbonetos da superfície para o núcleo. Os resultados do presente trabalho podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- a metodologia apresentada é eficaz na quantificação dos carbonetos, por meio de metalografia e análise computacional de imagens;
- os resultados apontam um refinamento expressivo das regiões da superfície da amostra, sendo este refinamento menos intenso entre o meio-raio e núcleo; e
- a comparação dos dados obtidos com resultados de literatura mostra-se coerente, sendo assim importante para a relação entre microestrutura e propriedades que será realizada em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa de produtividade em desenvolvimento tecnológico do Prof. Rafael Mesquita e a Villares Metals pela contribuição com o aço ferramenta para este estudo.



REFERÊNCIAS

- 1 MESQUITA, R. A. **Aços especiais para moldes e matrizes – Uma abordagem voltada à indústria de conformação de metais, cerâmicas e polímeros**. 2º encontro da cadeia de ferramentas, moldes e matrizes. São Paulo, 2004.
- 2 ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool steels**. 5. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998. p. 203-217.
- 3 JUNIOR, E.S. **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aços-ferramenta para trabalho a frio**. Dissertação (Mestrado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.
- 4 SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Editora Blucher, 3ª edição, 2010, p. 366 – 367; p. 372.
- 5 SILVA, A.L.V.C. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Editora Blucher, 4ª edição, 2008, p. 67 – 68; p.624.
- 6 SEABRA, A.V. **Correlação das Propriedades Mecânicas dos Aços com a Microestrutura**, Lisboa, Memória Inec. p.522, 1979.
- 7 Norma ABNT NBR 6189. **Aços ferramenta**, Out./1982.
- 8 Norma ASTM A681-2008. **Standard specification for tool steels alloy**, Out./2008.
- 9 Bungardt, K.; Kunze, E.; HORN, E. Investigation of the Structure of the Iron-Chromium-Carbon System, **Arch. Eisenhüttenwes.**, Vol 29, 1958, p 193.
- 10 DELGADO, M. P.; MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Estudo da Solidificação do Aço Rápido M2 em Diferentes Lingotes. In: 64 Congresso Anual da ABM, 2009, Belo Horizonte. **Anais do 64 Congresso Anual da ABM**, 2009. v. 1. p. CD-ROM.
- 11 DELGADO, M. P. **Efeito do Perfil de Resfriamento na Solidificação do Aço Rápido M2 e na Microestrutura Bruta de Fusão**. São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, 2010. 120p. Dissertação (Mestrado).
- 12 ASLAN, E. Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). **Materials and Design**, v. 26, n.1, p. 21-27, 2005.
- 13 BOURITHIS, L.; PAPADIMITRIOU, G.D.; SIDERIS, J. Comparison of wear properties of tool steels AISI D2 and O1 with the same hardness. **Tribology International**, v. 59, n.1, p. 479-481, 2006.
- 14 OLIVEIRA, A.J. **Análise do desgaste de ferramentas no Fresamento com Alta Velocidade de aços endurecidos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 205 p. Tese (Doutorado).
- 15 BARSOUKOV, E. **Impedance spectroscopy theory, experiment, and applications**. Second Edition. New Jersey, 2005. p.15-21.