

Tratamento térmico de moldes e matrizes e os aspectos de qualidade relevantes

Heat treatment of molds and dies and relevant quality issues

Rafael Agnelli Mesquita

Professor Doutor do curso de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE.
São Paulo, SP – Brasil.
rafael.mesquita@uninove.br

Priscilla Moraes

Mestranda em Engenharia de Produção pela Universidade Nove de Julho – UNINOVE.
São Paulo, SP – Brasil.
prieng@uninove.edu.br

Resumo

Neste artigo, discute-se a problemática do controle de tratamentos térmicos de ferramentas, moldes e matrizes. Diversos aspectos metalúrgicos específicos dos aços ferramenta são apontados, ilustrando quão crítica é a qualidade do tratamento térmico para o desempenho final das ferramentas. Apesar dessa relevância, os mecanismos tradicionais de controle são mostrados como ineficazes para garantir um desempenho adequado. Assim, uma metodologia baseada no controle do processo é proposta.

Palavras-chave: Controle de qualidade. Controle do processo. NADCA. Tratamento térmico.

Abstract

In this paper, we discuss the situation of quality control in the heat treatment of tools, molds and dies. Several specific aspects of tool steels metallurgy are considered, enabling the understanding of how critical is the heat treatment quality to the final performance of tools. In spite of this fact, the traditional controls in tool steels heat treatment are considered to be ineffective in warranting a proper performance. Therefore, a methodology based on the process control is presented.

Key words: Heat treatment. Quality control. NADCA. Process control.

1 Introdução

Os aços ferramenta constituem uma classe de ligas ferrosas, empregadas em diversas situações na indústria. Como linha geral, são materiais utilizados em moldes, matrizes, dispositivos e demais componentes mecânicos designados de maneira genérica por “ferramentas”, empregada em processos de corte ou conformação de outros materiais. Apesar de comumente aplicados no setor metal mecânico – em ferramentas de corte ou conformação de metais –, os aços ferramenta também são utilizados em demais setores, como na indústria de moldes para processamento de polímeros (plásticos e borrachas) ou produção de peças a partir de pós de materiais cerâmicos (ROBERTS et al., 1998). Assim, praticamente todos os processos industriais possuem, pelo menos em alguma de suas etapas, o envolvimento direto ou indireto de aços ferramenta.

Para entender com maior profundidade os aços ferramenta, é interessante observar sua definição, segundo a seção de *tool steels* do manual da Iron and Steel Society (STEEL PRODUCTS MANUAL, 1988, p. 4):

Aços ferramenta são aços ao carbono, aços liga ou aços rápido, capazes de serem temperados e revenidos. Geralmente são fundidos em fornos elétricos e produzidos sob certas práticas para corresponder a especificações especiais. Podem ser usados em certas ferramentas manuais ou de fixação mecânica em corte e conformação de materiais na temperatura ambiente ou em elevadas temperaturas. Aços ferramenta são também empregados numa vasta variedade de outras aplicações onde a resistência ao desgaste, tenacidade, resistência mecânica e outras

propriedades são selecionadas para ótimo desempenho.

Pela definição, além da aplicação, os aços ferramenta são considerados especiais por suas características de tratamento térmico e manufatura. Portanto, a própria definição dos aços ferramenta conduz a este binômio entre as características intrínsecas dos materiais (composição química) e seu processo de fabricação, incluindo nele os tratamentos térmicos. Com efeito, a literatura é extensa em apontar o tratamento térmico como em uma das questões mais críticas em termos da qualidade final da ferramenta, especialmente em relação às falhas (MESQUITA; BARBOSA, 2008).

Diante do exposto, neste trabalho, objetiva-se discutir a questão da qualidade no setor de tratamentos térmicos. Assim, diversos resultados metalúrgicos são envolvidos, para colocar claramente a questão, além de informações de como o tratamento térmico do setor de ferramentas é considerado em recomendações internacionais. O foco principal é colocado sobre aços ferramenta de trabalho a quente, especificamente para matrizes de fundição sob pressão. Entretanto, conclusões equivalentes e alguns exemplos são apontados para outras aplicações, como aços para trabalho a frio e aços rápidos.

2 Importância do tratamento térmico para as ferramentas

O fator de tratamento térmico também se torna mais crítico se analisado o setor industrial nele envolvido. Enquanto as empresas produtoras de aços ferramenta são poucas e grandes (no Brasil, apenas a Villares Metals e a Aços Gerdau), mais de uma centena de pequenas empresas realizam tratamentos térmicos de aços ferramenta. Isto torna complexa, por exemplo, a difusão das in-

formações necessárias (em termos de variáveis metalúrgicas) e, também, a especialização do setor. Com efeito, pouquíssimas empresas são especializadas no tratamento térmico de aços ferramenta no Brasil – a maioria atua no tratamento térmico de diversos materiais diferentes.

Dessa forma, trabalhos anteriores (MESQUITA; BARBOSA, 2008; MESQUITA et al., 2009) mostraram que dentre as causas de diversas falhas envolvidas o principal motivo de falhas prematuras de ferramentas está relacionado ao tratamento térmico. Tomando um exemplo em fundição sob pressão, o custo final dessas falhas pode ser mais bem entendido. Com base em informações do setor (alguns desses dados fornecidos por Mesquita et al. (2009)), de 10% a 30% dos gastos são relacionados ao tratamento térmico. A maior parte dos custos de produção de moldes e matrizes destina-se à compra do material e aos custos da manufatura do molde, principalmente a usinagem e o acabamento da superfície. Aliando esse aspecto à alta produtividade exigida – uma matriz produz mais de 100 mil peças em condições agressivas de trabalho (alta temperatura e muitos choques térmicos), pode ser percebida quão crítica é a questão do tratamento térmico. Ou seja, se a vida útil de uma matriz reduzir das 100 mil peças esperadas para 10 mil, por uma falha de tratamento térmico, todo o custo estará comprometido por uma pequena etapa do custo total. Colocando em números, se o custo total da matriz for de 1 milhão de reais, seria previsto um custo de cerca de 100 mil reais de tratamento térmico. Contudo, se a vida útil da matriz reduzir de 100 para 10 mil peças, ocorreria uma perda de 90% do desempenho da matriz (e, portanto, aumento do custo por peça produzida), causado por um fator correspondente a, apenas, 10% do seu custo total.

Isso reverte a uma situação interessante quanto aos aspectos da cadeia de fabricação de moldes e matrizes. Apesar de os elos dessa cadeia

estarem em empresas diferentes, o sucesso da cadeia apenas será obtido quando todos os elos estiverem funcionando corretamente. De uma maneira diferente, pode ser definido que os itens devem ser considerados não como uma soma, mas como uma multiplicação, assim sendo feliz o emprego do termo “fatores”. Se todos os fatores forem corretos e somente um fator for zero, todo o conjunto é prejudicado, conforme mostra o exemplo anterior.

Assim, essa discussão remete a uma importante conclusão: que a competitividade das indústrias de moldes e matrizes, com toda a sua importância para o setor industrial, está intimamente relacionada à qualidade do setor de tratamento térmico do país. Com efeito, essa constatação é notória nas recomendações de tratamentos térmicos existentes para moldes e matrizes. A mais relevante delas – a recomendação da *North American Die Casting Association* (NADCA) – surgiu em 1990, apenas para a avaliação da qualidade dos aços ferramenta empregados nas matrizes de fundição sob pressão. Entretanto, mais recentemente, a importância do tratamento térmico levou a NADCA a colocar este item na versão de 2003, que hoje (última versão, 2006) constitui a maior parte do texto (Tabela 1).

Tabela 1: Evolução da NADCA nas questões de tratamento térmico

Ano	Páginas dedicadas às questões de qualidade dos aços ferramenta	Páginas dedicadas às questões de tratamento térmico
1990	11	0
2006	5	21

Dada essa crescente importância dos tratamentos térmicos, os próximos itens se dedicam a discutir os ensaios comumente empregados, principalmente o ensaio de dureza. Posteriormente, são sugeridos mecanismos mais eficazes de controle.

3 O controle da qualidade pela dureza

As medidas de dureza podem ser consideradas as maneiras mais rápidas e simples de se avaliar a resistência mecânica dos materiais (CALLISTER, 2002). Contudo, como definido em diversas fontes de literatura (MESQUITA; HADDAD, 2009; MESQUITA, BARBOSA, 2008), a resistência mecânica não é a principal propriedade dos aços ferramentas. Especialmente em situações de trabalho submetidas a trincas, a dureza (ou seja, a resistência mecânica) pode ser considerada até mesmo secundária, sendo principal a propriedade de tenacidade (MESQUITA; HADDAD, 2009). Além da resistência mecânica e dureza, outras propriedades também podem ser definidas, como a resistência a quente e ao revenido, estabilidade dimensional, usinabilidade e adequação a aplicação de tratamentos superficiais, como nitretação ou PVC. Todas essas propriedades são importantes e, em muitas aplicações, essenciais ao bom desempenho das ferramentas (ROBERTS, 1998). Entretanto, não podem ser avaliadas pelo ensaio de dureza.

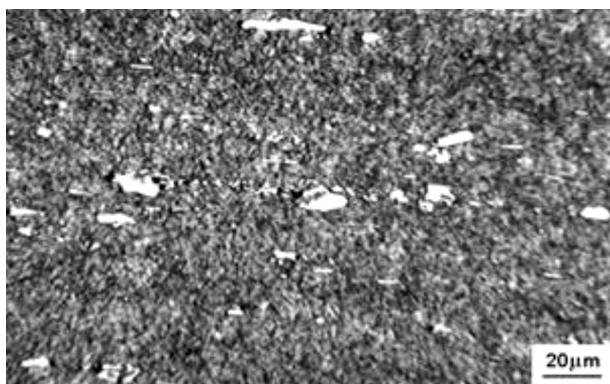
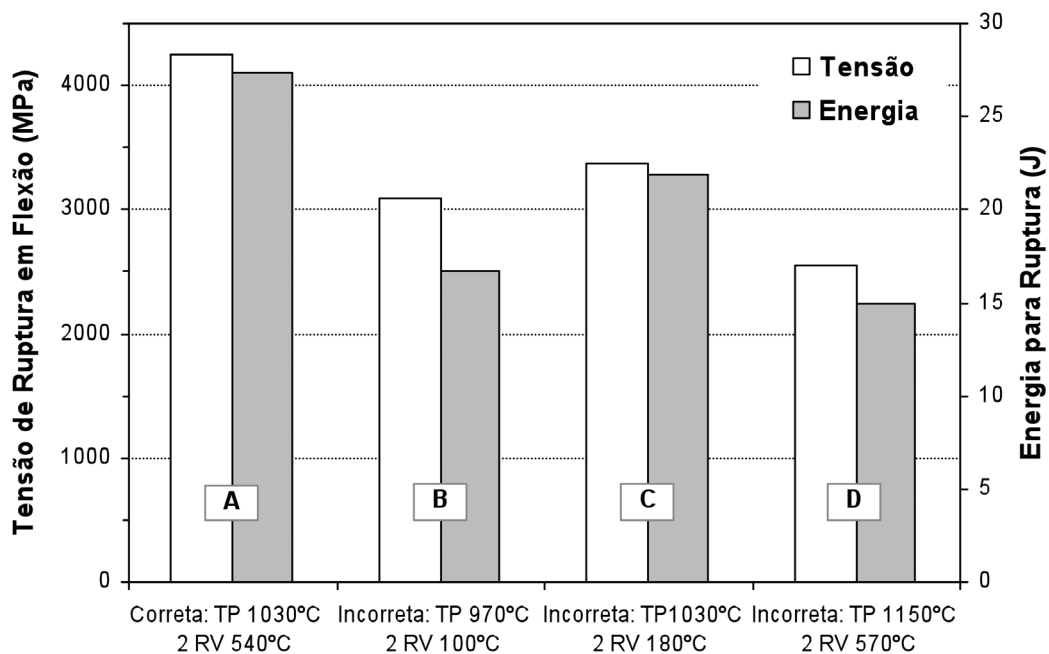
Apesar desse contexto, a principal – e na maioria dos casos a única – forma de controle da qualidade dos tratamentos térmicos em aços ferramenta é o ensaio de dureza. Ou seja, é comum ouvir de tratadores térmicos: “o tratamento térmico está absolutamente correto, pois obtivemos a dureza exatamente no valor especificado”. Mais crítico ainda é que esse raciocínio pode ser válido para aços baixa liga, em que o atendimento da faixa de dureza é realmente dependente de um tratamento correto, devido à baixa temperabilidade desses materiais (THELNING, 1984). No entanto, em aços ferramenta, os elementos de liga presentes fazem com que, mesmo tratamentos térmicos realizados de maneira sofrível, levem a valores de dureza dentro do especificado. Para fornecer mais

um exemplo, é ainda comum observar operadores que realizam, eles mesmos, o tratamento térmico de pequenas peças, apenas aproximando as peças de um maçarico. E em vários casos a dureza obtida está correta, apesar de uma microestrutura totalmente heterogênea.

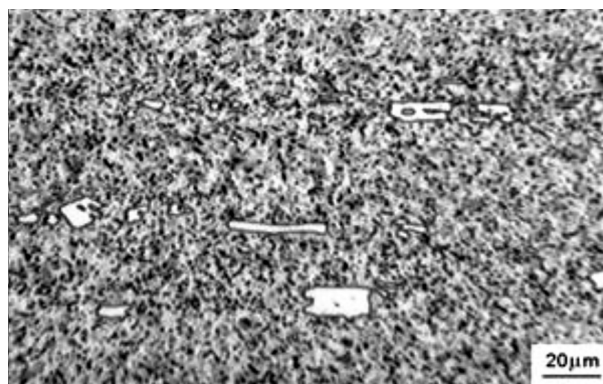
Para fornecer dados corretos da não adequação da dureza no controle da qualidade de tratamentos térmicos, vários exemplos são mostrados neste item, conforme as Figuras 1 a 3. Em todos eles é importante observar que a propriedade de tenacidade foi avaliada, por diferentes métodos, mas a dureza estava exatamente no mesmo valor.

Na Figura 1, são considerados resultados equivalentes, em um aço ferramenta para trabalho a frio, da classe dos 8% Cr: nomenclatura comercial VF800AT, com 8% Cr, 0,8% C, 2% Mo e 0,8% V. Este aço material não é um material *commodity*, mas um novo desenvolvido pela empresa Villares Metals. Apesar de suas propriedades superiores, diversas dificuldades no emprego foram apontadas no mercado (o material foi lançado em 2001), devido à dificuldade de conhecimento e convencimento dos tratadores térmicos, em termos de quais condições deveriam ser empregadas (porque, a tendência era empregar os mesmos parâmetros dos aços tradicionais). Exemplos dessa discussão são descritos em recomendação específica definida pela empresa (MESQUITA; BARBOSA, 2004). A Figura 2 mostra a tenacidade em impacto e as microestruturas características do aço H13, representativo dos aços ferramenta para trabalho a quente (composição 0,4% C, 5% Cr, 0,9% V, 1,2% Mo). Amostras do material foram tratadas termicamente de várias maneiras, utilizando diferentes temperaturas ou diferentes condições de resfriamento (taxa de resfriamento).

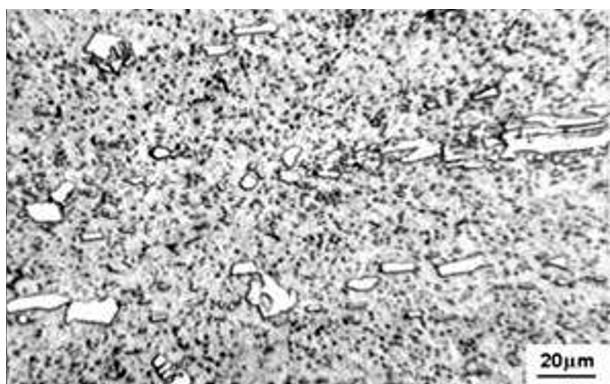
Discussões mais aprofundadas das Figuras 1 a 2 podem ser encontradas em trabalho específico (MESQUITA et al., 2005), mas uma conclusão importantíssima pode ser destacada: as amostras



condição A



condição B



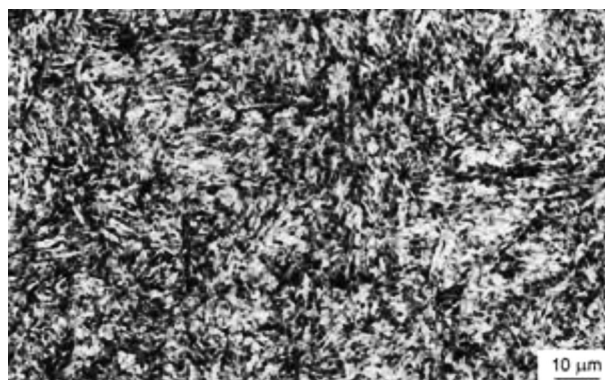
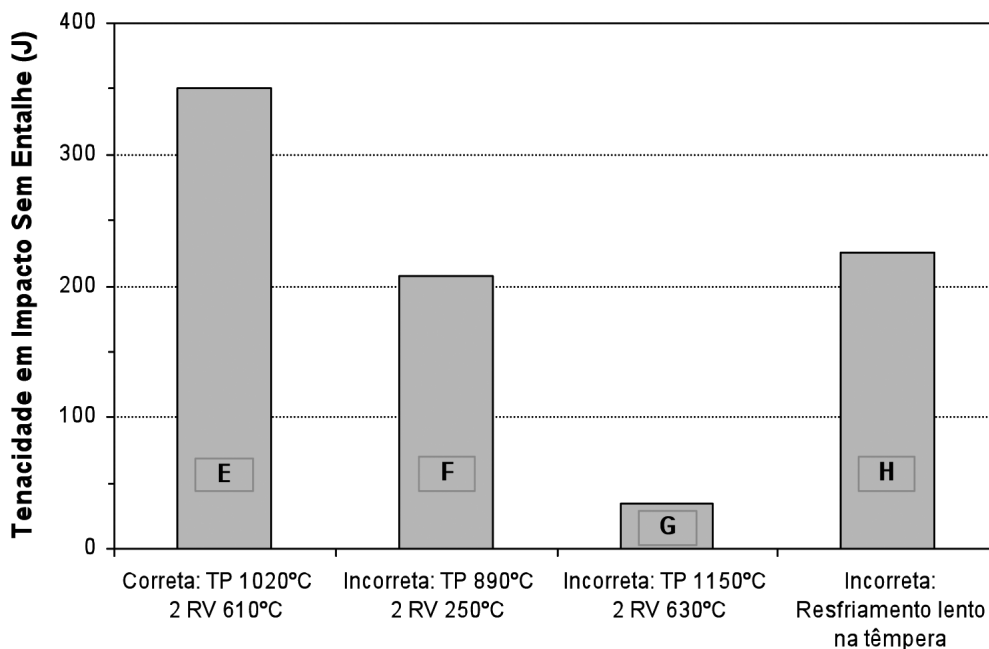
condição C



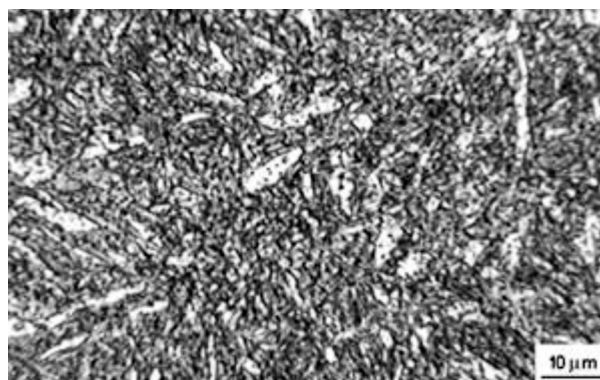
condição D

Figura 1: a) Resistência em flexão e energia para ruptura, para o aço VF800AT tratado para diversas condições, todas com 60 HRC. As condições, de A a D, são descritas no texto. b) Microestruturas do aço VF800AT, resultantes dos tratamentos térmicos nas condições A a D, descritas no item a Aumento 350x, ataque Villela, por 10s. TP indica a temperatura de têmpera e RV a de revenimento

Fonte: Mesquita et al., 2005.



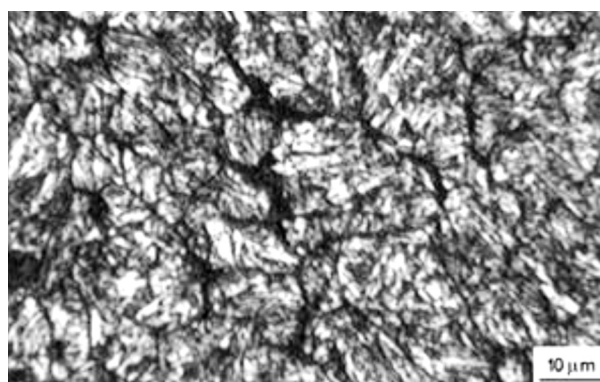
condição E



condição F



condição G



condição H

Figura 2: a) Energia de impacto sem entalhe, para ensaio conforme NADCA (1990), para aço VH13 ISO tratado para diversas condições, todas com 45 HRC. As condições de A a D são descritas no texto. b) Microestruturas do aço VH13 ISO, resultantes dos tratamentos térmicos nas condições E e H, descritas no item a Aumento 1000x, ataque nital 4%. TP indica a temperatura de têmpera e RV a de revenimento

Fonte: Mesquita et al., 2005.

em todas as situações possuíam, exatamente, a mesma dureza (45 HRC no aço H13 e 60 HRC no aço VF800AT), porém as propriedades de tenacidade variaram profundamente entre cada condição. Por exemplo, a Figura 2a mostra que a tenacidade do aço H13 reduz entre 30% e 80%, enquanto que o VF800AT apresentou variação de 20% a 50% (Figura 1a). Apesar dessa expressiva variação de propriedades, é importante comentar que as microestruturas muito distantes das condições ideais também antecipam outras variações, como instabilidade dimensional para o aço VF800AT ou perda de resistência a quente para o H13.

Além das propriedades mecânicas, as microestruturas apresentadas podem ser rapidamente discutidas. Para o aço VF800AT, Figura 1b, a microestrutura ideal (condição A) apresenta uma matriz com alta susceptibilidade ao ataque químico (coloração mais escura), indicando revenimento extenso e, assim, alto alívio das tensões e da condição inerente de baixa dureza da martensita. O mesmo não acontece nas condições incorretas B e C, pois o revenimento em baixa temperatura ainda leva grande fragilidade da transformação martensítica e, assim, explica a menor tenacidade. Já na condição D, também incorreta, o revenimento foi corretamente aplicado em alta temperatura, mas a têmpera foi realizada em temperatura excessivamente alta, denotada pelas ripas grosseiras de martensita (observar aspecto agulhado). O mesmo não é notado na condição de tratamento térmico ideal, condição A, pois a temperatura de austenitização nesse caso não promove excessivo crescimento de grão como na condição D. Em termos das microestruturas do aço H13, Figura 2b, resultados semelhantes são observados. O revenimento em temperatura excessivamente baixa também reduz a tenacidade para a condição F e o excesso de temperatura de austenitização promove fragilização na condição G. Uma diferença

interessante existe na condição H, que apresenta temperaturas corretas, porém resfriamento demasiadamente lento durante a têmpera. Nesse caso, a microestrutura apresenta intensa marcação de contornos de grão (comparar a condição H com a E), denotando presença de carbonetos nessa região, que diminuem a tenacidade.

Para aços rápidos, o mesmo efeito das condições de tratamentos térmicos pode ser apontado. Um exemplo é mostrado na Figura 3, para a tenacidade em flexão avaliada em duas situações, ambas com a dureza especificada para 60 HRC: os resultados são para um aço rápido tipo M2, cuja composição apresenta 0,9% C, 6% W, 5% Mo e 2% V. Nesse caso, a diferença de propriedades também é relevante, da ordem de 65%. E, como nos casos anteriores, a mesma dureza foi obtida, porém empregando temperaturas de austenitização e revenimento diferentes. Novamente, a microestrutura de revenimento em alta temperatura apresenta aspecto mais escuro, denotando um revenido mais intenso e explicando a maior tenacidade.

Portanto, este item mostra que a especificação de dureza, apesar de muito relevante no controle da qualidade de tratamentos térmicos de aços baixa liga, é muito pouco relevante em aços ferramenta. Outros exemplos podem ser considerados, como falhas específicas encontradas nesses materiais (MESQUITA; BARBOSA, 2008). Na maioria deles, a causa da falha não estava relacionada a variações na dureza, mas a alterações de microestrutura e em uma condição em que a dureza estava dentro do especificado. Desse modo, esta discussão deixa claro que o atendimento da dureza não é fator suficiente para a qualidade do tratamento térmico de ferramentas.

No próximo item, alguns aspectos serão apontados e, com eles, algumas formas alternativas do controle da qualidade do tratamento térmico poderão ser estabelecidas.

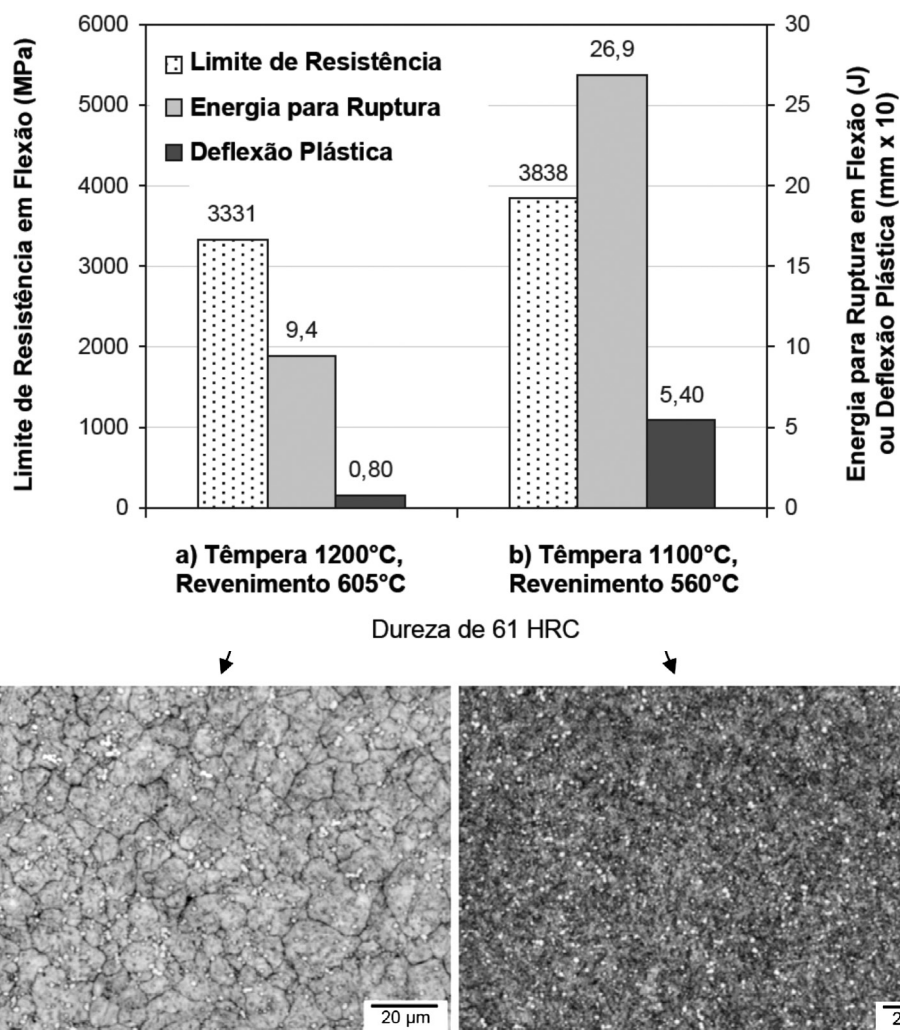


Figura 3: Propriedades mecânicas do aço rápido M2 tratado termicamente para 61 HRC em duas condições

Fotos com ataque nital 4%, aumento de 500 x.

Fonte: Mesquita et al., 2008.

4 Controle da qualidade baseado no processo de tratamento térmico

Pelos exemplos anteriores, observa-se que a criação de um mecanismo de controle de qualidade baseado na dureza não é efetivo. Na realidade, vários exemplos mostraram que a principal propriedade afetada por um tratamento incorreto corresponde à tenacidade.

Dessa forma, um método de controle baseado nessa propriedade poderia ser sugerido, numa

primeira avaliação. Com efeito, a NADCA, desde 2003, estabelece que corpos de prova sejam anexados a matrizes de fundição sob pressão, estabelecendo valores mínimos aceitáveis para a tenacidade. Um exemplo da recomendação para tanto é mostrado na Figura 4. Nesse caso, fenômenos como a precipitação de carbonetos em contornos de grão, que afetam a tenacidade apenas em peças grandes, já podem ser avaliados, o que é um fator positivo. Contudo, a análise da tenacidade torna-se limitada a regiões da superfície e, ainda assim, regiões internas das matrizes poderiam estar em

condições indesejáveis. Uma avaliação paliativa, também estabelecida pela NADCA, é a colocação de termopares no interior da peça, utilizando os canais de refrigeração da peça (como indicado na Figura 4). Tais informações são importantes e, de fato, auxiliam a gerar dados de controle. Entretanto, também têm suas limitações, principalmente pelo número de termopares colocados e pela acuidade do sinal gerado (especialmente, em casos de furos de dimensões muito maiores que o diâmetro dos termopares). Além disso, outras ferramentas sem furos de refrigeração – como punções e matrizes de trabalho a frio ou ferramentas de forjamento – não podem empregar tal técnica.

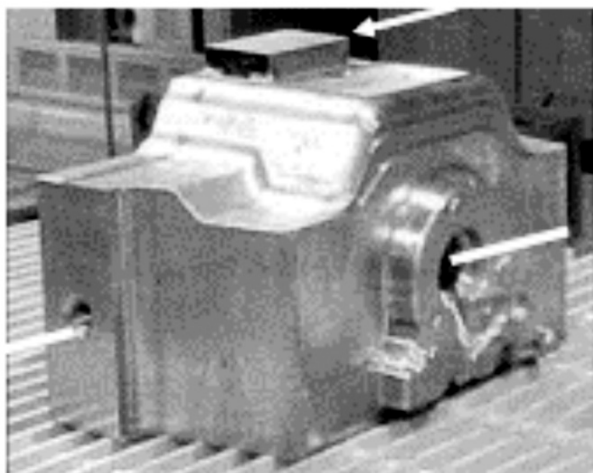


Figura 4: Exemplo de matriz, mostrando a colocação do corpo de prova para testes de tenacidade (indicado pela seta) e as possíveis posições de colocação dos termopares (indicado pelas linhas)

Fonte: NADCA, 2006.

A discussão anterior mostra, assim, que dificilmente podem ser criadas situações que representem, exatamente, as propriedades das regiões das ferramentas. Ou seja, apesar de gerarem importantes informações para controle, não podem ser tomadas como garantias absolutas do tratamento térmico realizado. Isso é especialmente crítico para moldes e matrizes de grandes dimensões, em que os custos expressivos (em alguns casos de

centenas de milhares a mais de um milhão de reais) devem ser absorvidos pelas peças produzidas, ou seja, pelo desempenho da ferramenta. E igualmente crítico é a realização de ensaios destrutivos nas ferramentas tratadas, por motivos óbvios.

Portanto, os mecanismos de controle de qualidade do tratamento térmico discutidos acima mostram que, para grande parte dos casos, não são suficientes para garantir o desempenho final das ferramentas. Apesar disso, neste trabalho, apresenta-se uma opção baseada em duas etapas, a saber: i) estabelecimento de um processo e ii) no seu controle do processo. A seguir, esses dois itens são discutidos.

4.1 Estabelecimento do processo – homologação

Os pontos discutidos, anteriormente, mostraram, em resumo, uma combinação crítica para ferramentas: o alto valor agregado, a necessidade de alto desempenho e a sensibilidade das propriedades mecânicas às condições de tratamento térmico. Devido a esses três pontos, uma empresa que se propõe a realizar um tratamento de qualidade não deveria fazê-lo antes da realização de testes internos, ou seja, de uma homologação interna do seu processo. Algumas das recomendações a seguir são baseadas na NADCA (2006), sendo outros resultados de observações de casos de falha e de sucesso, no Brasil e no exterior. Esse processo está relacionado a alguns subitens, como:

- Condições indicadas pelo fabricante do aço ferramenta: dada a questão crítica do tratamento térmico, os fabricantes de aço ferramenta (siderúrgicas) normalmente provêm uma quantidade suficiente de informações para os tratamentos térmicos de seus produtos. Muitos aços são *commodities* e, assim, informações de tratamento térmico de vários fabricantes podem ser coletadas, para promo-

ver o maior conhecimento possível das “boas práticas recomendadas”. Por outro lado, caso sejam encontradas divergências, o fabricante do aço (departamento de assessoria técnica) deve ser contatado e essas divergências discutidas. Em última instância, o autor sugere que o fabricante do aço em questão defina quais condições devem ser empregadas para seu tratamento térmico; pois mesmo em caso de produtos *commodities*, elementos residuais ou processos de fabricação diferenciados podem levar um fabricante a estabelecer recomendações diferentes de outros. Além das informações dos fabricantes, diversas literaturas podem ser de auxílio, como os livros: *Stahlschlüssel* (2010), *Heat Treater's Guide* (1995) ou estudos de Roberts (1998) e Thelning (1984), ou a própria recomendação da NADCA (2006).

- Estabelecimento do foco, isto é, de quais tipos de ferramentas serão tratados termicamente. Alguns tratadores térmicos estão aptos a tratar todos os tipos de aços ferramenta, ou seja, aços para trabalho a quente e a frio, para moldes de plástico e aços rápidos. Muitos não possuem condições para tanto, por limitações de temperatura, pressão de gás ou volume de fluido para resfriamento. Ou mesmo, existem situações em que os aços podem ser tratados, porém não com matrizes de grandes dimensões. Ou ainda, os fornos são demasiadamente grandes, com baixa capacidade de resfriamento, para peças de pequenas dimensões. Assim, o estabelecimento de qual será o foco da empresa é fundamental, antes de qualquer avaliação. Uma vez estabelecido qual o segmento de atuação, então ficará fácil definir quais materiais deverão ser homologados, ou seja, avaliados internamente antes do oferecimento dos serviços externos. Assim, podem ser definidos os tipos de aço e as dimensões

das peças envolvidas. E, o mais importante, toda vez que esse foco for alterado, uma nova homologação deve ser realizada.

- Avaliação de amostras, em condições efetivamente equivalentes aos blocos e matrizes a serem tratados. A primeira forma de realizar a avaliação seria tratar blocos em condições semelhantes às ferramentas a serem tratadas. Em muitos casos, isso pode ser inviável em termos de custos. Por exemplo, uma tonelada de aço H13 pode ter um custo de mais de 25 mil reais. Além desse aspecto, o próprio corte das peças tratadas pode ser proibitivo – especialmente em ferramentas de aços para trabalho a frio, quando as durezas obtidas são superiores a 50 HRC. Nesses casos, condições equivalentes, como “sanduíches” ou inserção de peças no interior de outras peças, podem ser empregadas; alguns exemplos são mostrados na Figura 5. Após tratadas as peças, uma cuidadosa avaliação metalúrgica dos materiais empregados deve ser conduzida, sempre baseada em normas ou padrões específicos. Caso o tratador térmico não tenha conhecimento metalúrgico para tanto, o próprio fabricante da matéria-prima ou laboratórios especializados podem ser consultados.
- Conhecimento das variáveis do(s) forno(s). Variáveis, como posição das peças, modo de colocação, quantidade de peças e pressão de resfriamento, mudam muito de forno para forno. Por exemplo, considera-se que a pressão de resfriamento superior a 6 bar é necessária para têmpera em fornos a vácuo (NADCA, 2006). Contudo, fisicamente, a têmpera é gerada pelo contato do gás frio com a peça, o que depende de muitas outras variáveis além da pressão – a principal delas o fluxo de gás dentro dos fornos¹. Assim, para uma dada condição (material e

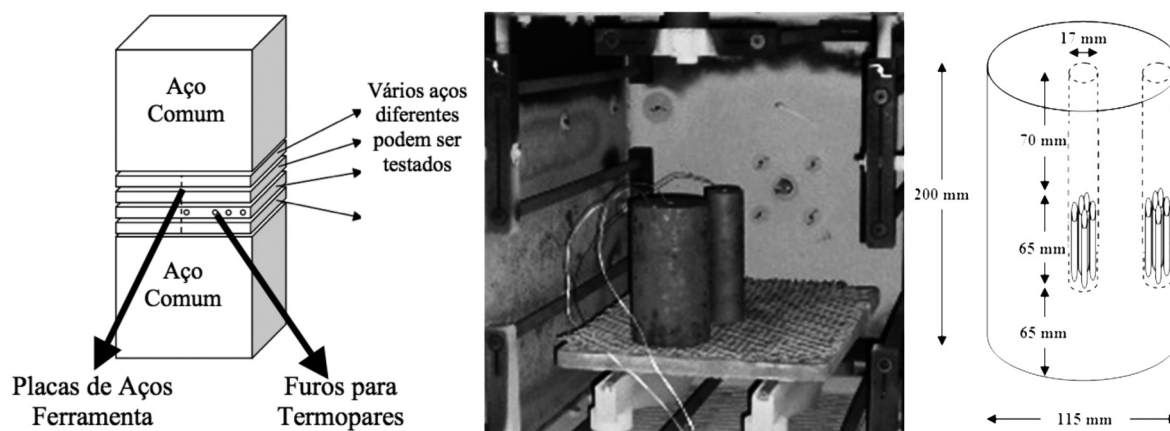


Figura 5: Opções de simulação do tratamento térmico de grandes peças com pequenas amostras, de um ou vários aços ferramentas (alguns exemplos de nomes são mostrados)

tipo de peça) as variáveis dos fornos e meios de resfriamento devem ser conhecidas. Isso pode ser realizado com a colocação de probes em diversas posições dos fornos e avaliação da taxa de resfriamento com termopares. Ou mesmo, esses probes podem ser feitos de aços ferramenta e suas microestruturas e propriedades avaliadas posteriormente, em função das variáveis dos fornos.

- Medidas tradicionais de dureza e controle da tenacidade. Ainda que pareça contrário ao discutido anteriormente, isto é importante para os testes. Ou seja, além de destruir as peças e levantar todas as informações, estas peças devem ser avaliadas, também, com as medidas simples – dureza e, se possível, ensaios de tenacidade em corpos de prova. Isso porque, ao longo da operação, os valores da homologação podem ser comparados às medidas do “dia a dia” realizadas. E casos de discrepância podem ser identificados previamente ao uso da matriz, levando a um eventual retratamento, mas não a uma falha.

Após essa etapa de homologação, o tratador térmico terá um suficiente conhecimento dos seus

equipamentos e da capacidade do seu processo, estando ciente dos seus pontos fortes e dos seus pontos fracos. Uma vez bem conduzido, isso pode inclusive ser utilizado como ferramenta de marketing, na venda dos tratamentos térmicos. Ou seja, pode auxiliar na criação de uma estratégia inicial baseada em qualidade, mas não (o que seria mais comum) em menores preços.

4.2 Controle do processo

O controle do processo significa, principalmente, não alterar as variáveis definidas na homologação (item anterior). Essa orientação parece incoerente às recomendações de melhoria contínua, mas de forma alguma deve ser reconhecida como tal. Pelo contrário, os processos de uma empresa de tratamentos térmicos podem ser continuamente melhorados – em termos dos serviços oferecidos, em economia de energia (com refratários mais eficientes), melhoria do sistema de logística, atendimento técnico e recomendações aos clientes, entre outras. Entretanto, as variáveis relacionadas à metalurgia não devem ser alteradas, quer isso dizer que tempos em temperatura, pressões ou meios de resfriamento, temperaturas de austenitização e revenimento, números de revenimentos, e demais variáveis metalúrgicas não

devem ser alteradas. Ou, quando precisarem de alterações, a literatura deve ser consultada ou uma nova homologação realizada.

Para o controle do processo, alguns passos são sugeridos, entre eles, destacam-se:

- Avaliação da ferramenta antes do tratamento térmico, visando a identificar qual processo deve ser estabelecido e quais problemas eventuais surgiram devido ao projeto da peça. Em termos do processo, é praticamente impossível definir um processo único ou ter uma homologação para cada tipo de peça (aço, dimensão e dureza). Assim, cabe ao responsável técnico, com seus conhecimentos, definir qual processo deve ser empregado (obviamente, baseado nos dados homologados) ou se uma nova homologação é necessária. Em termos do projeto da peça, a máxima “o cliente tem sempre razão” é extremamente perigosa nesse caso, pois a natureza não obedece aos clientes, mas as suas próprias leis. Portanto, paredes finas, cantos vivos, diferenças grandes de secção e demais fatores críticos do projeto da peça devem ser avaliados. Caso exista tendência a problemas, o cliente deve ser consultado, ou mesmo o tratamento não deve ser realizado. Porque, como explicado, os aços ferramenta são usualmente materiais de alta temperabilidade, podendo gerar trincas em locais específicos. Vários exemplos desse tipo de falhas foram discutidos em trabalhos anteriores (MESQUITA; BARBOSA, 2008).
- Segmento do processo estabelecido. Algumas recomendações metalúrgicas óbvias, como a necessidade de dois ou três revenimentos, podem não parecer tão óbvias assim aos olhos dos operadores. Por exemplo, trocar dois revenimentos de duas horas por um de quatro horas parece perfeitamente normal,

apesar de estar totalmente incorreto em termos metalúrgicos. Portanto, o processo estabelecido deve ser seguido à risca. E sempre que encontrados desvios, estes devem ser correlacionados aos conhecimentos metalúrgicos e a literatura deve ser consultada. Em casos críticos, o retratamento das peças deve ser realizado – sempre precedido de um recozimento.

- Utilização das medidas tradicionais de dureza ou corpos de prova de tenacidade. Apesar de discutidas anteriormente como não suficientes, essas medidas podem ser valiosas para indicar mudanças do processo. Por exemplo, se para uma ferramenta de tamanho média de 300 mm de aço H13 forem empregados têmpera com austenitização a 1020 °C e revenimento a 600 °C para dureza final de 45 HRC e, em certo momento, a dureza obtida nas mesmas condições for de 40 HRC, algo importante mudou no processo. Nesse caso, as variáveis precisam ser entendidas, eventualmente com ferramentas específicas de solução de problemas. Da mesma forma, corpos de prova para tenacidade, ou quando possível a introdução de termopares nas ferramentas, podem ser interessantes para indicar mudanças expressivas do processo.
- Repetição dos testes de homologação. Nenhum processo é constante, visto que variáveis diversas atuam em um ambiente industrial. Assim, a homologação realizada há seis meses, ou há um ano, pode não ter resultados válidos nesse momento. Testes constantes são então sugeridos, de modo a garantir a estabilidade dos tratamentos realizados.

Avaliando todos esses itens é de se esperar o comentário de que são exagerados e, na prática, podem ser simplificados. De fato, a maioria dos tratadores térmicos de aços ferra-

menta no Brasil não segue os requisitos acima descritos, mas apenas utilizam os controles de temperatura do forno (e não da peça) e fazem os controles de dureza, visto que esses são os necessários para aços ao carbono ou aços baixa liga. Contudo, há de se lembrar de que o valor pago por quilo de tratamento térmico de aço ferramenta é muito alto, justamente pela maior responsabilidade para o desempenho da peça. Felizmente, também existem empresas de tratamento térmico que conhecem e controlam seu processo, garantindo assim adequada qualidade da ferramenta final produzida. Isso agrega valor ao tratamento térmico e motiva uma diferente estratégia de preços, pois a melhoria de desempenho é frequentemente percebida pelo usuário da ferramenta.

Como consideração final pode ser observada que, efetivamente, o controle da qualidade do tratamento térmico de aços ferramenta está intimamente ligado ao controle do processo. Apesar de existirem ensaios não destrutivos, como dureza e tenacidade em amostras, estes possuem uma série de limitações. Assim, devem ser empregados como maneira de controle da estabilidade do processo, mas não de sua garantia. Em resumo, a qualidade do tratamento térmico em ferramentas, moldes e matrizes apenas pode ser garantida se todo o processo for conhecido e garantido.

Esta abordagem remete a outro aspecto da qualidade no setor de tratamento térmico, no sentido de gestão. Praticamente, inexistem estudos nesse sentido, o que é crítico, pois, como descrito neste artigo, as questões de gestão e controle dos processos são fundamentais para assegurar a qualidade final do molde ou matriz tratado termicamente. Este estudo será realizado no futuro, pelos autores desta pesquisa, avaliando a gestão da qualidade em regiões com alta concentração de empresas de fabricação de moldes e matrizes.

5 Conclusões

Neste trabalho, discutiram-se diversos aspectos sobre o tratamento térmico de ferramentas, moldes e matrizes, sendo os itens sumarizados por:

- O tratamento térmico de aços ferramenta mostra diversos pontos específicos e diferentes dos aços comuns e ao carbono: alto valor agregado das peças produzidas, variações expressivas de condições de tempo e temperatura e sensibilidade do desempenho final às condições de tratamento empregadas.
- Os ensaios de dureza não podem ser considerados como condição suficiente para um tratamento térmico de qualidade. Devido ao alto teor de elementos de liga, os aços ferramenta podem atender aos requisitos de dureza mesmo que a microestrutura e, portanto, as demais propriedades estejam em condições insatisfatórias.
- Para a garantia de um tratamento térmico de qualidade, primeiramente, o processo empregado precisa ser cuidadosamente conhecido e as variáveis envolvidas conhecidas: equipamentos, procedimentos e condições de tempo e temperatura.
- Após conhecimento do processo, este deve ser mantido constante sem mudanças das variáveis metalúrgicas, especialmente em relação aos tempos, às temperaturas e às taxas de aquecimento ou resfriamento envolvidas. Os demais controles (dureza e tenacidade nas peças ou amostras) podem então ser empregados para avaliação da estabilidade do processo.

A garantia da qualidade do tratamento térmico, portanto, apenas existe quando o processo

empregado é bem estabelecido e o segmento dos parâmetros é garantido.

Agradecimento

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa produtividade.

Notas

¹Em caso de óleos de têmpera ou outros fluidos, medidas específicas (como capacidade de resfriamento) podem ser levantadas, com o auxílio dos próprios fornecedores dos meios de têmpera.

Referências

CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002.

HEAT TREATER'S GUIDE: practices and procedures for irons and steels, 2nd ed. ASM International, Ohio: Material Park, 1995.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. *Recomendações sobre temperaturas de tratamento térmico do aço VF 800AT*. Catálogo Técnico Villares Metals S. A., 2004.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. Failure analysis in tool steels. In: *Failure analysis of heat treated steel components*. Material Park, Ohio: ASM International, 2008, p. 311-355.

MESQUITA, R. A.; GONCALVES, C. S.; SLAVIERO, A. L.; BARBOSA, C. A. Effect of hardening conditions on the mechanical properties of high speed steels. In: EUROPEAN CONFERENCE ON HEAT TREATMENT 2008, 2008. European Conference on Heat Treatment 2008, 2008. p. 1-8-CDROM.

MESQUITA, R. A.; HADDAD, P. T. Propriedades fundamentais dos aços ferramenta para matrizes de forjamento. In: 29° SENAFOR e 13° CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO, 2009, Porto Alegre: 29° Senafor e 13° Conferência Internacional de Forjamento. Porto Alegre, 2009. v. 1. p. 55-66.

MESQUITA, R. A. et al. Estudo do fim de vida em matrizes de fundição sob pressão. In: CONAF 2009, 2009, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Abifa, 2009. v. 1. p. CD-ROM.

MESQUITA, R. A.; LEIVA, D. R.; BARBOSA, C. A. Estudos de tratamento térmico nos aços ferramenta VH13ISO e VF800AT. In: ENCONTRO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 3., 2005, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2005. p. 30-40-CD ROM.

NADCA #229/2006- *Special Quality Die Steel & Heat Treatment Acceptance Criteria for Die Casting Dies*. Holbrook Wheeling, Illinois: North American Die Casting Association – NADCA, 2006, 33 p.

NADCA #207/1990- *Premium Quality H13 Steel Acceptance Criteria for Pressure Die-Casting Dies*. River Grove, Illinois: North American Die Casting Association – NADCA, 1990, 12 p.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. Tool steels. 5. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998. p. 1-123; p. 219-250

STAHLSCHLÜSSEL (Key to Steel), Verlag Stahlschlüssel, 22. ed., 789 p., 2010.

STEEL PRODUCTS MANUAL, *Section Tool Steels*, [s.l]: ISS, Iron and Steel Society, 1988. 81p.

THELNING, K-E. *Steel and its heat treatment: bofors handbook*. London; Boston: Butterworths, 1984.

Recebido em 20 set. 2012 / aprovado em 30 out. 2012

Para referenciar este texto

MESQUITA, R. A.; MORAES, P. Tratamento térmico de moldes e matrizes e os aspectos de qualidade relevantes. *Exacta*, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 357-370, 2012.