

DESENVOLVIMENTO DE AÇO COM USINABILIDADE MELHORADA E AÇOS ENDURECÍVEIS POR PRECIPITAÇÃO PARA MOLDES DE PLÁSTICO

Rafael Agnelli Mesquita ⁽¹⁾

Celso Antonio Barbosa ⁽²⁾

Resumo

Os moldes para plástico possuem longos tempos de utilização que, normalmente, excedem anos. Associando isto à alta complexidade de um molde, as etapas de manufatura tornam-se os principais fatores a serem considerados na fabricação de um molde. Neste sentido, o presente trabalho visa apresentar o desenvolvimento de três aços, associados à melhoria de usinabilidade ou à facilidade de tratamento térmico, visando otimizar as condições de manufatura dos moldes. A adição de enxofre é o principal modo adotado para se melhorar a usinabilidade de aços para moldes. Contudo, em moldes de grandes dimensões, pode comprometer a polibilidade. Assim, o presente trabalho mostra o desenvolvimento de um aço similar ao ABNT P20, produzido via tratamento com Ca para melhoria da usinabilidade sem perda de polibilidade. As curvas de desgaste de flanco em função do comprimento usinado mostram sensível redução no desgaste das ferramentas, do aço tratado com Ca (VP20 ISO) para o aço convencional (P20 convencional). Visando também reduzir a complexidade dos tratamentos térmicos dos aços convencionais (por têmpera), são apresentados os desenvolvimentos de dois aços endurecíveis por precipitação. Dentre os aços endurecíveis por precipitação, o aço VP50 IM, atinge níveis dureza de 40 HRC, por um tratamento por 3 h a 500 °C. Com o mesmo tratamento, o aço inoxidável VP80 atinge dureza da ordem de 48 HRC, próxima da obtida nos aços inoxidáveis martensíticos. Dentre as vantagens do endurecimento por precipitação destacam-se a redução nas distorções e a facilidade de manutenção do molde.

Palavras-chave: Aços para molde; Usinabilidade; Endurecimento por precipitação.

Development of improved machinability steel and PRECIPITATION hardening steels for plastic moulds

Abstract

Plastic moulds have normally long operation life, which exceed many years. Associating this fact to the mould high complexity, the manufacturing becomes the main factor to be analyzed for its production. In this context, the present work presents the development of three mould steels, related to improvement of machinability or heat treating, leading to optimization of moulds manufacturing conditions. Sulfur additions are commonly used to improve machinability in steels. However, in large moulds, it can impair the polishability. Therefore, the present work presents the development of a AISI P20 similar steel, produced with Ca treating. As a result, higher machinability can be promoted with no loss in polishability. The flank wear versus machined length curves show substantial reduction in wear of tools, when the Ca treated steel (VP20 ISO) is compared to the regular P20 (P20 conventional). Aiming at reducing the heat treating complexity of conventional steels (hardened through quenching), two new precipitation hardening steels are also presented. The steel VP50-IM reaches a maximum hardness of 40 HRC, through one simple treatment at 500 °C for 3h. Through the same treatment, the stainless steel VP80 lead to hardness around 48 HRC, close to the values of hardened and tempered martensitic steels. The reduction of distortion and the facility for mould repairing are the most important advantages of these precipitation hardening steels.

Key-words: Mould steel; Machinability; Precipitation hardening.

I INTRODUÇÃO

A conformação de plásticos constitui um importante ramo industrial, no qual os moldes utilizados têm papel essencial. Os moldes para plásticos podem ser muito complexos, a fim de proporcionar

adequada qualidade do produto produzido e elevada velocidade de produção. A usinagem e o acabamento da superfície são etapas críticas na produção dos moldes e normalmente correspondem à maior fração do custo total do molde. Os aços

⁽¹⁾ Engenheiro de Materiais, Membro da ABM, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP Brasil, e-mail: agnelli@villares.com.br.

⁽²⁾ Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, Gerente de Tecnologia da Villares Metals S. A., Sumaré - SP, Brasil, e-mail: celsoa@villares.com.br.

utilizados em moldes, apesar de muitas vezes pouco ligados, possuem propriedades de limpeza micro-estrutural e de processamento que os diferenciam dos outros aços convencionais e ao carbono.

Os moldes para plástico possuem vida útil muito superior aos outros aços ferramenta utilizados em matrizes de trabalho a quente e trabalho a frio. Não raro encontram-se casos de vida superior a 10 anos e, normalmente, o molde deixa de ser utilizado apenas quando o projeto da peça é substituído. Portanto, as propriedades mais importantes desses materiais relacionam-se às características de processamento, como polibilidade, usinabilidade e resposta ao tratamento térmico.

1.1 Polibilidade e Usinabilidade

A superfície do molde é fundamental para o acabamento da peça produzida, sendo o grau de polimento dependente da aplicação. Moldes perfeitamente polidos podem ser necessários para muitas aplicações, como injeção de dispositivos óticos, como óculos, faróis ou mesmo CDs. No caso de conformação de plásticos com textura, a superfície do molde necessita igualmente de adequado polimento. A *polibilidade* mede a facilidade de realização do polimento em um aço para moldes, sendo afetada por diversos fatores metalúrgicos. Inclusões não metálicas, como óxidos e sulfetos, podem diminuir a polibilidade, dependendo do tamanho e de como estão distribuídas. Além disso, a dureza deve ser uniforme e a presença de decarbonetação é indesejável.

Dado o elevado volume de material removido na confecção dos moldes, a *usinabilidade* é também muito importante para moldes de plástico. A usinabilidade de um material depende de fatores metalúrgicos e das condições de usinagem como ferramenta e velocidade de corte, sendo um resultado de interação do metal com a operação de usinagem. O termo é geralmente usado para expressar o estado da superfície usinada, a taxa de remoção de material, a facilidade de saída do cavaco ou a vida da ferramenta.⁽¹⁻²⁾

Em geral, existe um compromisso entre a usinabilidade e polibilidade do aço para moldes, relacionado principalmente ao teor de enxofre.⁽³⁻⁴⁾ Este elemento forma inclusões com o manganês, tipo MnS, que possuem baixo ponto de fusão e alta deformabilidade, melhorando usinabilidade. Causam um efeito lubrificante na aresta de corte e facilitam a quebra do cavaco na

zona de cisalhamento. Contudo, também diminuem a polibilidade. Quando deformadas pelo processo de forjamento, as inclusões de enxofre tornam-se alongadas, sendo tanto mais grosseiras quanto maior a dimensão do bloco. Assim, a redução do teor de enxofre, visando melhorar a polibilidade, é especialmente importante para moldes de grandes dimensões.

Nesse contexto, o primeiro objetivo do presente trabalho é apresentar o desenvolvimento de um aço para moldes, VP20 ISO, que possui elevada usinabilidade sem perda de polibilidade. Para tanto, o aço VP20 ISO é produzido com baixo teor de enxofre e submetido a um tratamento com Ca, durante o refino secundário na aciaria. Os testes apresentados estão focados para aplicação em moldes de grandes dimensões, sendo avaliado como exemplo um bloco de 15 t, utilizado para produção de um molde de 8 t. Porém, os resultados também se estendem a moldes de dimensões menores, pois o mesmo mecanismo é válido.

1.2 Resposta ao Tratamento Térmico

O tratamento de têmpera e revenimento é o mais freqüentemente aplicado nos aços para moldes, a fim de propiciar a resistência mecânica necessária para a aplicação. Contudo, as variações dimensionais e de forma promovidas neste tratamento constituem uma importante questão. Aços endurecíveis por precipitação são muito adequados para esses fins, devido à maior estabilidade dimensional.

Assim, o presente trabalho também avalia dois novos aços, VP50 IM e VP80, desenvolvidos para aplicação em moldes de plástico e capazes de serem endurecidos por precipitação. Além desta propriedade, o aço VP50 IM possui alta usinabilidade devido à adição de enxofre. O VP80, por outro lado, é inoxidável e pode ser utilizado em moldes para processos corrosivos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço VP20 ISO é similar ao aço ABNT P20, porém com modificação nos teores de manganês e níquel. Sua composição é apresentada na Tabela I. O sufixo *ISO* refere-se a tecnologia diferenciada de trabalho do metal líquido. Este tratamento inicia-se no forno elétrico a arco, através do tratamento com escória. Posteriormente, durante o refino secundário no forno panela, ocorre a desoxidação e eliminação de gases. Adições de Ca são empregadas e o teor residual deste elemento será o responsável pela modificação do tipo e morfologia das inclusões, proporcionando aumento da usinabilidade.

A usinabilidade do aço VP20ISO foi avaliada em fresamento, pela medida do desgaste da ferramenta de corte (desgaste de flanco) em função do tempo e comprimento usinado. Para comparação, utilizou-se um aço P20 convencional, ou seja, produzido sem tratamento com Ca no refino secundário. O efeito do Ca na microestrutura foi avaliado por microanálise por WDS, associada à microscopia eletrônica de varredura.

Tabela 1. Composição química dos aços VP20 ISO, VP50 IM e VP80. Valores em porcentagem em massa e balanço em Fe. Os valores não colocados são de elementos residuais.

Aço	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	Al	Cu
VP20 ISO	0,36	0,3	1,6	1,8	0,2	0,8	<0,003	-	-
VP50 IM	0,15	0,3	1,6	0,3	0,3	3,0	0,080	0,8	0,9
VP80	0,04	0,3	0,3	12,0	1,5	7,8	<0,005	1,2	-

Nos aços VP50 IM e VP80, além da fusão e refino, são empregados processos de refusão por VAR (*vacuum arc remelting*). Neste processo o lingote produzido é refundido sob vácuo. Isso traz vantagens como a redução do teor de elementos como O, N e H, a eliminação de inclusões grosseiras e o refino da microestrutura, por uma solidificação mais rápida. Um exemplo de vantagem da microestrutura mais refinada é a possibilidade de se trabalhar com níveis de enxofre ligeiramente mais altos no VP50 IM, visando a melhoria da usinabilidade. As inclusões de MnS ficam mais distribuídas, garantindo que a polibilidade não será demasiadamente prejudicada.

Os aços VP50 IM e VP80 são fornecidos na condição solubilizada, com dureza aproximada de 32 e 35 HRC respectivamente. Após usinagem, o envelhecimento deve ser aplicado para que a dureza final seja obtida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Usinabilidade no Aço VP20 ISO

Como comentado anteriormente, o aço VP20ISO foi primeiramente aplicado em um molde de grandes dimensões. Na fabricação deste molde, o volume de material removido por usinagem totaliza mais de 6.500 kg, sendo por isso desejável alta usinabilidade. A polibilidade é igualmente importante, pois problemas de polimento poderiam comprometer a qualidade do produto e, por conseguinte, os recursos gastos na produção do molde.

A melhoria da usinabilidade pelo tratamento com Ca pode ser avaliada na Figura 1. Comparando o aço VP20 ISO ao aço P20 convencional, é verificado expressivo aumento em usinabilidade. Por exemplo, para um dado tempo de usinagem, o desgaste da ferramenta é menor na usinagem do aço VP20 ISO que no P20 convencional. Outra maneira de se observar este ganho é a análise do volume usinado, em cm³, até o fim de vida da ferramenta ($V_B=0,4$ mm). Fazendo esta comparação (Figura 2), observa-se um ganho de 77 % do aço VP20 ISO em relação ao P20 convencional. Tal ganho é importante principalmente para o aumento da produtividade na operação de usinagem do molde ou redução no consumo de ferramentas. Outros aços para moldes, como o DIN 1.2312, podem trazer ganhos de usinabilidade equivalentes ou mesmo superiores ao observado no aço VP20 ISO, mas devido à adição de S em sua composição. Contudo, estes casos sempre incorrem em expressiva perda de polibilidade, o que inviabiliza o uso em muitas aplicações, principalmente para as cavidades. O aço VP20 ISO, por outro lado, possui a vantagem de promover o expressivo ganho de usinabilidade mostrado nas Figuras 1 e 2, sem perda de polibilidade.

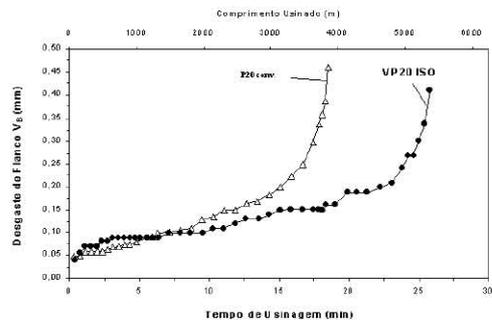


Figura 1. Desgaste da ferramenta em função do tempo e comprimento usinado para o aço VP20 ISO e P20 convencional. Ensaio em fresamento, velocidade de corte 208 m/min, profundidade de corte 2,05 mm e avanço 0,09 mm/dente, sem refrigeração.⁵

3.2 Efeito do Ca no VP20 ISO

O tratamento com Ca é o grande responsável por este fato. O Ca reduz o efeito danoso das inclusões duras, como inclusões de alumina e silicatos, pois forma inclusões ternárias do tipo $Al_2O_3-SiO_2-CaO$. Ocorre ainda a formação de sulfeto de Ca na superfície das inclusões, como mostra a Figura 3. Esse “envelope” de sulfeto de Ca minimiza o efeito deletério das inclusões abrasivas sobre a aresta da ferramenta de corte. O resultado conjunto desses fatores gera a melhoria de usinabilidade observada. Como tais inclusões não possuem fração demasiadamente elevada e não tornam-se alongadas durante a conformação, não existe perda de polibilidade do material.

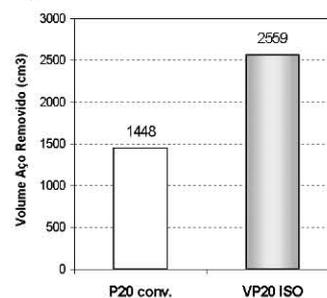


Figura 2. Volume de aço removido até o fim de vida da ferramenta (desgaste de flanco $V_B=0,4$ mm). Fresamento de canais com fresa $\varnothing 20$ mm e 3 arestas cortantes.

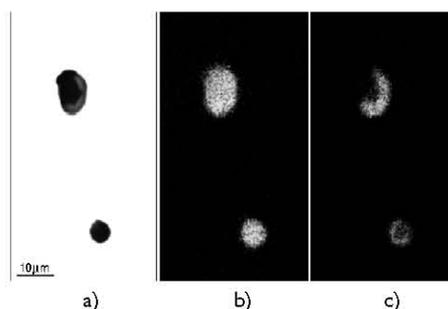


Figura 3. Inclusão complexa do aço VP20 ISO, mostrando o efeito do Ca. a) imagem (elétrons retroespalhados), b) raios-X para o elemento Ca e c) raios-X elemento S.⁵ Aumento 1000 x

3.3 Endurecimento por Precipitação nos Aços VP50 IM e VP80

As principais vantagens do endurecimento por precipitação sobre a têmpera e revenimento são descritas abaixo:

- *Varição dimensional previsível e uniforme.*
- *Redução das distorções, que podem surgir na têmpera devido ao resfriamento brusco;*
- *Menor custo e do tempo para o tratamento térmico.*
- *Redução de descarbonetação, que facilmente ocorre no aquecimento prévio à têmpera.*
- *Dureza uniforme em função do diâmetro. Não depende da profundidade de têmpera. Esta característica é muito importante quando o material para usinagem em alta dureza (HSM).*

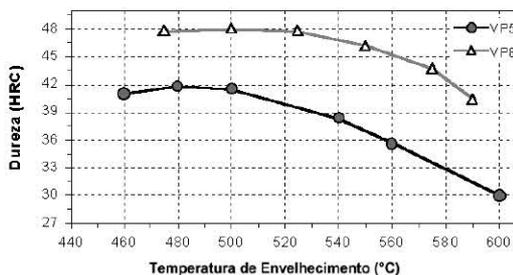


Figura 4. Curvas de envelhecimento dos aços VP50 IM e VP80. Valores obtidos para tempo de envelhecimento de 3h.

A resposta ao tratamento térmico dos aços VP50 IM e VP80 pode ser observada nas curvas de envelhecimento da Figura 4. No aço VP50 é obtida dureza máxima de 40 a 42 HRC, consideravelmente mais elevada que do aço P20, entre 30 e 34 HRC. Isso pode trazer vantagens em relação à resistência ao desgaste do molde e auxiliar no polimento.

Para o aço VP80, a dureza inicial é ligeiramente mais elevada, cerca de 35 HRC. Após o envelhecimento, durezas até 48 HRC podem ser obtida. Esta faixa de dureza é próxima da dureza de trabalhos dos aços inoxidáveis martensíticos, como o aço DIN 1.2083 (AISI 420). Estes aços são endurecíveis por têmpera e revenimento, possuindo assim os inconvenientes de distorções e os riscos deste tratamento comentados anteriormente. Ainda, apenas obtêm resistência à corrosão após têmpera e revenimento. O aço VP80, por outro lado, possui alta resistência à corrosão na condição solubilizada e, também, após envelhecimento.

3.4 Estabilidade Dimensional e de Forma

Como comentado, uma das principais vantagens do endurecimento por precipitação é a ausência de distorções, pela ausência da têmpera. Mesmo em cavidades complexas, tais materiais apresentam variação dimensional pequena e uniforme. Valores típicos de variação dimensional (de contração) após o tratamento térmico, são mostrados na Tabela 2. A fim de eliminar as tensões de usinagem, os materiais devem ser aquecidos lentamente até a temperatura de envelhecimento, pois os tratamentos de alívio de tensão não se aplicam a estes aços. Desconsiderando a variação dimensional geradas pelo alívio das tensões de usinagem, a variação do tratamento é mínima e previsível. Assim, os moldes podem ser usinados prevendo tal variação; ou, no caso do VP50IM, esta pode mesmo ser desconsiderada em muitos casos.

3.5 Nitretação no VP50 IM

Em alguns moldes deseja-se aplicar tratamentos superficiais, para melhorar a velocidade de produção das peças, aumentar a resistência ao desgaste ou facilitar o polimento. Como a temperatura de nitretação normalmente coincide com a de envelhecimento dos aços endurecíveis por precipitação (aproximadamente 510 °C), ambos tratamentos podem ser feitos simultaneamente. Ou seja, não é necessário envelhecer e aplicar a nitretação, porque o próprio aquecimento da nitretação já produz o endurecimento por precipitação. Isso é válido desde que o tempo de tratamento supere 5 horas em temperatura. Assim, comparados com aços temperados e revenidos, elimina-se uma operação durante a fabricação do molde, pois o tratamento prévio a nitretação não é mais necessário.

Para o aço VP80 tratamentos de nitretação geralmente não são empregados, pois esses resultam em expressiva perda de resistência a corrosão, propriedade essencial para suas aplicações. Assim, a discussão anterior aplica-se apenas ao aço VP50 IM, que frequentemente é nitretado.

Tabela 2. Variação dimensional após envelhecimento nos aços VP80 e VP50 IM. O sinal negativo indica que existe contração.

Após envelhecimento a 500 °C	VP80	VP50IM
Varição Dimensional	-0,07%	-0,006%
Dureza	48,5 HRC	41HRC

3.6 Resistência à Corrosão do Aço VP80

O aço VP80 possui alta resistência à corrosão, cerca de 60% superior à dos aços inoxidáveis martensíticos normalmente aplicados em moldes de plásticos. A maior resistência à corrosão do VP80 é promovida por três fatores:

- *Teor de Cr de 12%, garantindo inoxidabilidade.*
- *O baixíssimo teor de C (ver Tabela 3), que reduz a taxa de corrosão, pela não formação de carbonetos com o Cr.*
- *O teor de 1,5% de Mo, que aumenta consideravelmente a resistência à corrosão por pites.*

Tabela 3. Teor de carbono e PRE para o VP80 e outros aços inoxidáveis aplicados em moldes.

	VP80	DIN 1.2083 (~AISI 420)	DIN 1.4125 (~AISI 440)
Teor de C	0,04%	0,40%	1,0%
PRE	16,7	13,5	-*

* Não adequado pois constitui-se um aço de alto C.

A Tabela 3 compara, portanto, o teor de carbono e o número PRE para o aço VP80 e aços inoxidáveis martensíticos. A resistência à corrosão é essencial para conformação de polímeros clorados, como o PVC, pois liberam íons cloreto durante o processamento. Neste sentido, o número PRE da Tabela 3 é muito importante, pois mede efetivamente a resistência à corrosão por pites. Para outros plásticos a resistência à corrosão pode também ser desejável, pois evita danos na superfície dos moldes, quando armazenados em locais úmidos por exemplo.

3.7 Soldagem dos Aços VP50 IM e VP80

Uma das vantagens dos aços endurecíveis por precipitação é a possibilidade de trabalharem com baixo teor de C. O primeiro resultado do menor teor de carbono é a formação de camada branca de baixa dureza e fragilidade após usinagem por eletroerosão, reduzindo o risco de trinca e facilitando sua remoção.

Contudo, a maior vantagem é facilidade de soldagem. A soldagem é muito aplicada no setor de moldes, para reparo ou para pequenas alterações no projeto. Os aços temperáveis tem certa dificuldade para soldagem, pois formam martensita de alta dureza durante o resfriamento após a solda. O mesmo não ocorre nos aços VP50 IM e VP80. Após a soldagem e aplicação de novo envelhecimento a dureza final torna-se uniforme nas regiões da solda e nas regiões adjacentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BOULGER, F. W. Machinability of steels. In: **Metals handbook**. International Handbook Committee. 10.ed. [S.l.]: ASM International, 1990. p. 591-602.
2. COOK, N. What is machinability? In: TIPNIS, V. A. **Influence of metallurgy on machinability**. [S.l.]: American Society for Metals, 1975. p. 1-10.
3. KOVACH, C.; MOSKOWITZ, A. Effects of manganese and sulfur on machinability of martensitic stainless steels. **Transactions of the Metallurgical Society of Aime**. v. 245, n.10, p. 2157, oct. 1969.
4. MILAN, J.C.G.; MACHADO, A.R; BARBOSA, C.A. Usinabilidade de aços para moldes de injeção de plástico tratados com cálcio. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 55., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABM, 2000 p. 3206-3215.
5. TIPNIS, V. A.; JOSEPH, R. Testing for machinability: influence of metallurgy on machinability. In: TIPNIS, V. A. **Influence of metallurgy on machinability**. [S.l.]: American Society for Metals, 1975. p. 11-30.

4 CONCLUSÕES

- O tratamento com Ca promove expressivo aumento na usinabilidade sem provocar diminuição da polibilidade do aço VP20 ISO. Este arranjo de propriedades é importante especialmente para moldes de grandes dimensões, mas também interessante para outros moldes.

- Nos VP50 IM e VP80, as vantagens estão relacionadas ao tratamento térmico de envelhecimento. Destacam-se a melhor uniformidade de dureza obtida, menor custo e tempo de tratamento e o mínimo risco de distorções. O fato de não serem temperáveis ainda promove melhoria na soldabilidade.

- Para o VP50IM, o teor de S levemente elevado e a produção via VAR promove a formação de inclusões finas MnS, elevando a usinabilidade mas ainda conservando adequada polibilidade. Se nitretado, o próprio aquecimento da nitretação pode atuar como envelhecimento do material, reduzindo uma etapa na fabricação do molde.

- O aço inoxidável VP80 é uma interessante alternativa em relação aos aços inoxidáveis martensíticos freqüentemente utilizados, pelo tratamento térmico facilitado e pela maior resistência à corrosão.