

AÇO PARA MOLDES PLÁSTICOS DE ALTO DESEMPENHO: INOVANDO PARA O AUMENTO DA COMPETITIVIDADE DA CADEIA PRODUTIVA*

José Britti Bacalhau¹
Jorge Otubo²

Resumo

Na conformação de plásticos de alto desempenho, cuja demanda cresce continuamente nos setores automotivo e de eletrodomésticos, é necessário aços com elevada resistência mecânica e excelente polibilidade. O aço DIN 1.2711 e suas modificações são materiais encontrados no mercado que atendem tais necessidades, porém não foram projetados para essa aplicação. O presente trabalho discute as características de um novo aço desenvolvido especificamente para moldes plásticos de alto desempenho. Foram produzidos em escala piloto, dois lingotes de 55 kg, sendo um deles o DIN 1.2711 que serviu de referência, e o outro com a nova composição química. A curva TRC dos materiais foi determinada por dilatométrica, e sua usinabilidade avaliando o volume de material removido em relação ao desgaste da ferramenta de corte em fresamento. Caracterizações microestruturais por MO, MEV e dureza também foram realizadas. O Novo Aço apresenta elevada homogeneidade microestrutural e de dureza, boa temperabilidade e usinabilidade superior ao DIN 1.2711. A segunda etapa constou na produção de um bloco forjado em escala industrial a partir de um lingote de 35 toneladas, e na validação dos dados experimentais em empresas fabricantes ou usuários de moldes, as quais comprovaram a superior usinabilidade do Novo Aço em aproximadamente 50% ao DIN 1.2711. Devido à boa combinação de propriedades de manufatura o Novo Aço se torna uma interessante opção para o aumento da competitividade das ferramentarias e usuários finais de moldes plásticos.

Palavras-chave: Moldes Plásticos; Aço Ferramenta; Usinabilidade.

HIGH PERFORMANCE PLASTIC MOLD STEEL: INNOVATION FOR COMPETITIVENESS INCREASE IN PRODUCTION CHAIN

Abstract

In the forming of high-performance plastics, which demand grows continuously in the automotive and house appliance, tool steels with high mechanical properties and excellent polishability must be used. DIN 1.2711 grade and its variations are materials found in the market that meet those needs, but they were not designed for these applications. The present paper discusses the characteristics of a new steel developed specifically for high-performance plastic molds. Two ingots of 55 kg on pilot scale were produced, one was DIN 1.2711 used as a reference and the other with the new chemistry. The steel's CCT curves were determined by dilatometry and its machinability evaluating based on removed chips volume in relation to flank wear via milling. Microstructural characterization by OM, SEM and hardness were also performed. The New Steel presents high microstructural homogeneity and toughness, good hardenability and superior machinability to DIN 1.2711. The second phase consisted in the production of a forged block from a 35 tons ingot on industrial scale, and the experimental data were confirmed on tool makers and end users of molds. The New Steel machinability in comparison to DIN 1.2711 was superior on approximately 50%. Due to the good manufacturing properties the New Steel becomes an interesting option to increase the competitiveness of tool makers and end-users of plastic molds.

Keywords: Plastic Molds; Tool Steels; Machinability.

¹ *Mestre em Engenharia de Materiais, membro da ABM, Gerente de Produto da Villares Metals S.A., Sumaré, SP; e-mail: jose.bacalhau@villaresmetals.com.br*

² *Doutor em Engenharia Mecânica, Professor Adjunto do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, SP; e-mail: jotubo@ita.br*

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais poliméricos vem conquistando a cada ano novas aplicações, e substituindo com sucesso muitos componentes que tradicionalmente eram fabricados em materiais metálicos [1]. A Figura 1 exemplifica a grande versatilidade de aplicações dos materiais poliméricos e seu consumo porcentual por setor de mercado [2].

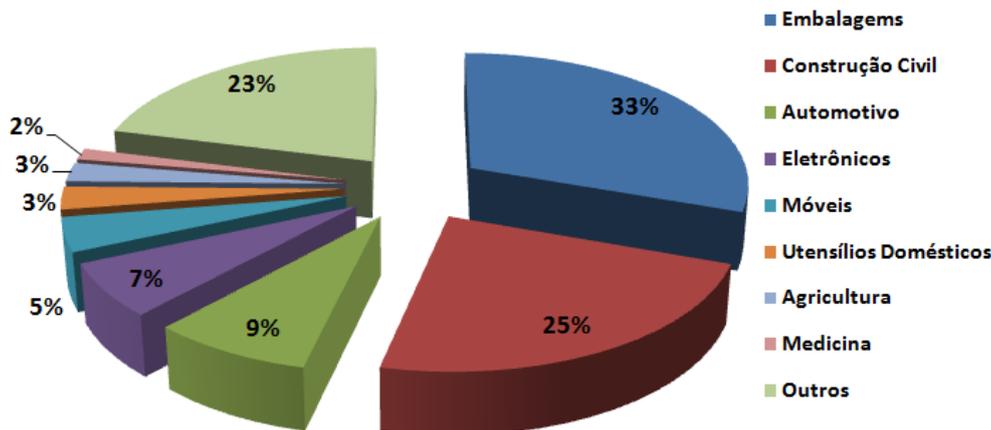


Figura 1. Consumo europeu de materiais plásticos em 2007 [2].

O grande aumento na produção e consumo de peças fabricadas em materiais plásticos influenciou fortemente o mercado de aços para moldes e matrizes, já que é necessária a sua manufatura para a conformação dos polímeros, por processos como: injeção, extrusão e sopro.

Os processos de usinagem são na maioria das vezes empregados na fabricação das cavidades e canais de refrigeração dos moldes com a remoção de um volume elevado de material na forma de cavacos. Isto acarreta um significativo consumo de ferramentas de corte e elevado tempo de usinagem. O maior custo na fabricação de um molde é a usinagem e representa cerca de 70 a 80% de seu custo total [1,3-5].

Aços com médio teor de carbono tais como o AISI P20 e DIN 1.2711 são os materiais mais utilizados para a fabricação de moldes plásticos [6,7]. Esses materiais são tradicionalmente fornecidos pelas usinas siderúrgicas, aos fabricantes de molde, em uma condição pré-endurecida via tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. O DIN 1.2711 é normalmente empregado em moldes de alto desempenho que demandam superior resistência mecânica, e uma resposta ao polimento espelhada como acabamento superficial. Por essa razão blocos de DIN 1.2711 são produzidos na faixa de dureza entre 38-42 HRC na condição temperado e revenido. A Figura 2 apresenta a curva de transformação em resfriamento contínuo (TRC) desse material.

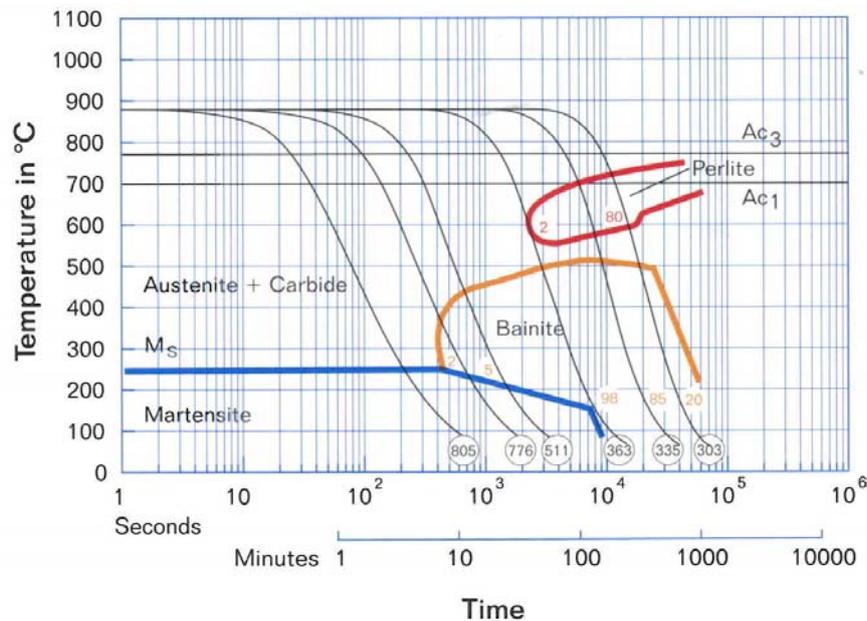


Figura 2. Curva TRC do aço DIN 1.2711 [3].

O presente trabalho tem como objetivo apresentar as propriedades do novo aço para moldes plásticos em comparação ao tradicional DIN 1.2711, em relação a sua homogeneidade microestrutural e usinabilidade. Além disso, os dados experimentais foram validados em testes de campo, por meio da manufatura de moldes industriais em ferramentarias da região de Caxias do Sul – RS e Joinville - SC.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

1.1. Produção dos Aços em Escala Piloto

Em um forno de indução a vácuo VIM (*Vacuum Induction Melting*) em escala piloto foram produzidos dois lingotes de 55 kg, sendo um deles em aço DIN 1.2711 usado como referência e o outro com a composição química do Novo Aço. A Tabela 1 apresenta os teores dos elementos de liga de cada lingote.

Tabela 1. Composição química dos lingotes produzidos em escala piloto. Valores em porcentagem em massa e balanço em Fe.

Aços	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Mo	V
DIN 1.2711	0,55	0,25	0,80	0,006	0,7	1,65	0,3	0,1
Novo Aço	0,26	0,25	1,60	0,006	1,85	0,60	0,70	0,08

Tais lingotes foram posteriormente aquecidos a 1150°C e conformados mecanicamente via forjamento em prensa para barras quadradas de seção transversal de 80 mm conforme mostradas na Figura 3. Não foi aplicado o tratamento térmico de homogeneização com a finalidade de preservar no material as segregações oriundas dos fenômenos de solidificação.



Figura 3. Barras forjadas a partir dos lingotes em escala piloto.

1.2. Avaliação da Temperabilidade do Novo Aço

A temperabilidade do novo aço foi avaliada por meio do ensaio de dilatométrica, e sua curva de transformação em resfriamento contínuo (TRC) pode ser construída. Os corpos de prova foram ensaiados sob vácuo com aquecimento a 900°C, patamar de 10 minutos, e resfriadas até a temperatura ambiente nas seguintes taxas: 0,01°C/s; 0,02°C/s; 0,05°C/s; 0,5°C/s e 50°C/s.

1.3. Usinabilidade em Fresamento

Os ensaios de usinabilidade em fresamento tiveram por finalidade avaliar o volume de material removido em relação ao desgaste de flanco da ferramenta de corte. Blocos de 80x80x200 mm do Novo Aço e do DIN 1.2711 foram temperados e revenido para 40 HRC que é a dureza de aplicação em moldes plásticos de alto desempenho.

A estratégia de fresamento realizada foi a de passes paralelos em um centro de usinagem da marca *Hermle*. O critério empregado para o final de vida da ferramenta de corte foi desgaste de flanco em 0,30 mm, e a descrição dos parâmetros de usinagem é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nos ensaios de usinabilidade em fresamento.

Centro de Usinagem C 600 U - Hermle	
Material Usinado	Blocos de 80 x 80x 200 mm
Ferramenta Sandvik	
Ferramenta Toroidal	R300-25T12-10M
Diâmetro	25 mm
Número de dentes	3
Inserto de metal duro com cobertura de Ti(C,N) - Al ₂ O ₃ - TiN	
Raio do inserto	5 mm
Pastilha	R300-1032M-PH 4230
Parâmetros de Corte - Concordante	
Velocidade de corte	200 m /min
Avanço	0,23 mm /dente
Profundidade de corte axial	0,5 mm
Profundidade de corte radial	10 mm

1.4. Produção do Novo Aço em Escala Industrial e Avaliação de seu Desempenho por Empresas da Cadeia de Fabricação de Moldes e Matrizes

O Novo Aço foi produzido em escala industrial na empresa Villares Metals S.A. via rota de fusão em Forno Elétrico a Arco (FEA) seguido de tratamentos de refino secundário em Forno Panela e Forno VD (*Vacuum Degasing*). O lingotamento foi

convencional em lingotes de grandes dimensões com massa aproximada de 35 toneladas. Os lingotes foram homogeneizados a 1260°C e forjados em blocos com dimensões aproximadas de 800 x 1200 x 3000 mm. Seu beneficiamento foi via tratamento térmico de têmpera e revenimento para durezas na faixa de 38-42 HRC. A Figura 4 apresenta imagens do processo de forjamento do lingote e do bloco após têmpera e revenimento.



Figura 4. a) Lingote de 35t em processo de recalque do forjamento. b) Bloco forjado após beneficiamento por têmpera e revenimento para 40 HRC. Dimensões: 800 x 1200 x 3000 mm

O desempenho do Novo Aço foi avaliado por empresas que fazem parte da cadeia de fabricação de moldes e matrizes, como ferramentarias, empresas de polimento, texturização e injetores de plástico. Produtos diversos foram injetados em moldes manufaturados no Novo Aço, dentre as principais aplicações estão relacionadas partes de veículos para do setor automotivo e produtos de utilidades domésticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta a curva TRC do Novo Aço para moldes plásticos. Verifica-se que o produto apresenta elevada temperabilidade, uma vez que, mesmo quando submetido a taxas lentas de resfriamento da ordem de 0,05°C/s a 0,01°C/s sua microestrutura é totalmente bainítica com uma dureza média de 400 HV (41 HRC).

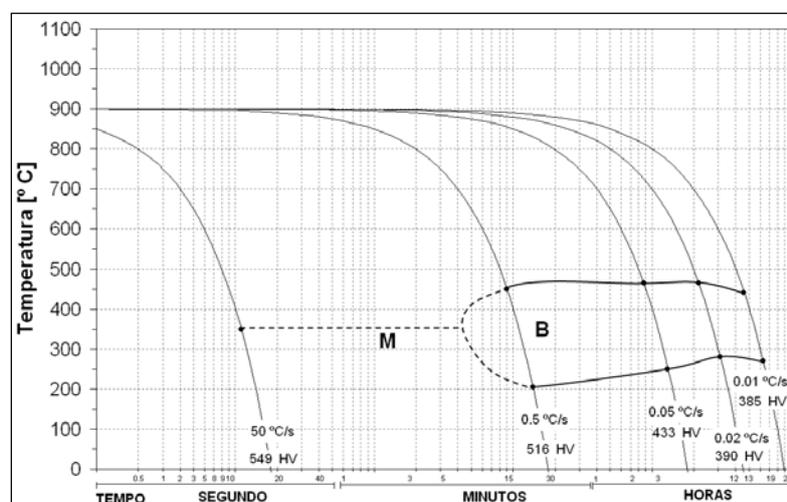


Figura 5. Curva de transformação em resfriamento contínuo do Novo Aço. Material com microestrutura bainítica mesmo quando submetido a taxas lentas de resfriamento, entre 0,05 e 0,01°C/s.

Tal característica não é observada no aço DIN 1.2711, em que há a formação de perlita quando resfriado nas mesmas condições descritas acima, vide Figura 2. Por essa razão a produção do DIN 1.2711 é limitada a blocos com espessura máxima de aproximadamente 500 mm, pois durante o resfriamento na têmpera, seu núcleo resfria mais lentamente que a superfície, podendo formar um microconstituente pró-eutetóide no centro do bloco com dureza inferior as especificadas para a aplicação. Em termos microestruturais, haveria a formação de martensita na superfície, bainita a meio-raio e perlita no centro de grandes blocos do aço DIN 1.2711. No Novo Aço a microestrutura seria bainítica em toda sua extensão.

É fator de alta relevância na fabricação de aços para moldes plásticos, a produção de blocos com elevada homogeneidade microestrutural e de dureza, uma vez que, tais moldes passarão por etapas rigorosas de acabamentos superficiais como: polimento, texturização por meio de ataques ácidos, além de volumosa remoção de material por usinagem [8-12]. Tais processos responderão de maneira não uniforme se os blocos de aço não forem homogêneos em toda sua extensão em dureza e microestrutura, tendo como consequência moldes não conformes com baixo nível de espelhamento e com desníveis em seu relevo após a texturização [3-4].

No balanceamento químico do Novo Aço há apenas 0,26% de carbono, que é menos da metade do teor no DIN 1.2711, e mesmo assim, uma superior temperabilidade pode ser observada, Figuras 2 e 5. Tal fenômeno acontece, pois o carbono foi dosado apenas para atingir a dureza acima de 40 HRC conforme necessidade da aplicação e a temperabilidade proporcionada com adições diferenciadas dos elementos cromo, manganês e molibdênio, vide Tabela 1 que compara a composição do Novo Aço com o DIN 1.2711.

O menor teor de carbono contribuiu também com a redução dos níveis de micro e macro segregação do Novo Aço, que são provenientes dos mecanismos de rejeição de soluto na solidificação. As Figuras 6 e 7 apresentam as microestruturas das barras forjadas do DIN 1.2711 e do Novo Aço produzidos em escala piloto. Vide o acentuado nível de micro segregação na barra do DIN 1.2711 e a boa homogeneidade do Novo Aço após forjamento sem tratamento térmico prévio de homogeneização.

As regiões mais escuras na microestrutura do DIN 1.2711 são compostas predominantemente por bainita, enquanto que nas regiões micro segregadas com tonalidade mais clara houve a formação de martensita. As regiões micro segregadas apresentam localmente um maior teor de elementos de liga que a nominal do aço, principalmente em carbono e silício que são elementos com baixo peso/raio atômico e segregam com facilidade, resultando em um aço mais heterogêneo microestruturalmente e em dureza.

Por outro lado, o microconstituente predominante no novo Aço é a bainita, uma vez que o baixo teor de carbono desse material resulta em níveis de microsegregação pouco acentuados, e uma microestrutura homogênea.

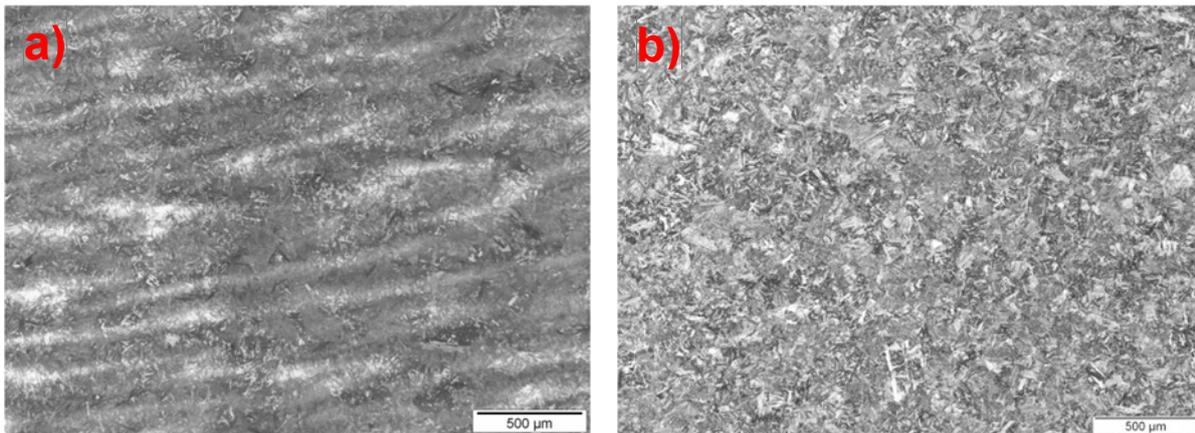


Figura 6. Microestrutura das barras forjadas sem prévio tratamento térmico de homogeneização – 50X de aumento. a) Aço DIN 1.2711 e b) Novo aço.

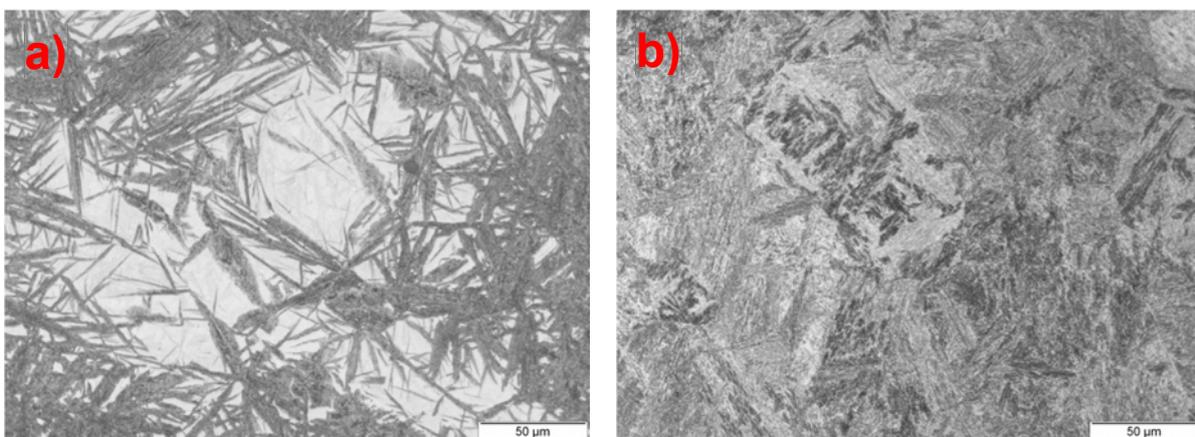


Figura 7. Microestrutura das barras forjadas sem prévio tratamento térmico de homogeneização – 500X de aumento. a) Aço DIN 1.2711 e b) Novo aço.

Medidas de dureza com microidentação Vickers foram realizadas nas regiões claras e escuras da microestrutura do aço DIN 1.2711 e também do Novo Aço. A Figura 8 ilustra um exemplo do ensaio com as microidentações de dureza nas duas regiões e a Tabela 3 quantifica os valores médios de dureza encontrados no ensaio. Note que a região clara de martensita supera os 600 HV (55 HRC), enquanto a escura em média obtém-se 470 HV (47 HRC). O Novo Aço por apresentar microestrutura homogênea apresenta baixa variação de dureza com média acima de 400 HV (41 HRC), que é a desejada para aplicação em moldes plásticos de alto desempenho.

Aços com maiores teores de elementos de liga possuem uma tendência natural de apresentarem regiões segregadas oriundas do processo de solidificação. Com a finalidade de tornar esses aços isotrópicos, é comum a prática de tratamentos térmicos de homogeneização, que são longos períodos de exposição do lingote a elevadas temperaturas para promover a difusão dos átomos das regiões segregadas para as menos enriquecidas. Extrapolando esse conceito para a produção de grandes blocos industriais, produtos com consideráveis teores de elementos de liga com menores densidades que a nominal do aço a exemplo do carbono, silício, fósforo e enxofre, estão propensos a formar regiões de macrosegregações (segregações de longo alcance). Tais aços quando produzidos em grandes blocos inevitavelmente apresentarão propriedades anisotrópicas, uma vez que o processo difusivo da homogeneização torna-se tão extenso para equalizar a composição química que é economicamente inviável. Por essa razão o Novo Aço é mais

favorável que o aço DIN 1.2711 para aplicações em moldes plásticos, uma vez que é menos susceptível a formação de regiões segregadas, e a homogeneidade microestrutural é fator chave no sucesso da manufatura de moldes plásticos de alto desempenho.

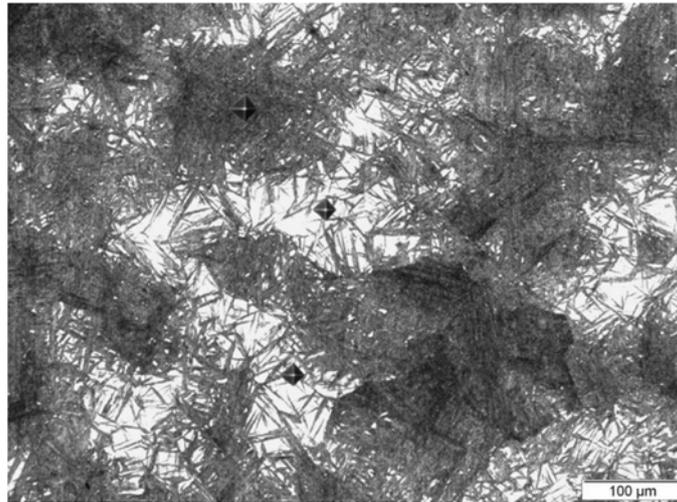


Figura 8. Microestrutura do DIN 1.2711 com os detalhes das impressões de dureza nas regiões com variações de intensidade em microsegregação. Imagem com aumento de 200X.

Tabela 3. Valores médios de dureza encontrados nas barras do aço DIN 1.2711 e Novo Aço com micro indentação seletiva das regiões segregadas.

Aço	Região	Dureza média HV 0,2kg	Desvio Padrão HV 0,2kg	Conversão para HRC
DIN 1.2711	Região clara	618	21	56
	Região escura	473	13	47
Novo Aço	Homogêneo	418	17	42

A usinabilidade dos dois aços foi medida no Centro de Competência em Manufatura CCM/ITA, e a curva comparativa do volume fresado de material em relação ao desgaste de flanco da ferramenta de corte é apresentada na Figura 9. Para um desgaste fixo da aresta de corte em 0,30 mm, que é considerada o fim de vida da ferramenta, o volume usinado do Novo Aço foi de 270 cm³, enquanto que para o DIN 1.2711 foi de apenas 180 mm³, um desempenho superior em 50% para o caso estudado. Tendo em mente que a usinagem é a etapa de maior custo no processo de fabricação de um molde, essa é uma vantagem muito significativa para as ferramentaria de fabricação de moldes.

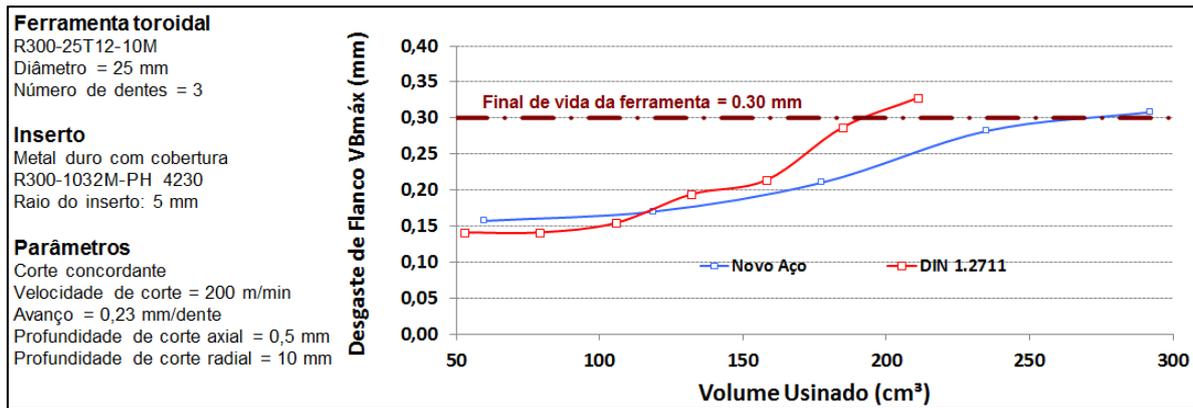


Figura 9. Teste comparativo de usinabilidade em fresamento entre os aços DIN 1.2711 e Novo Aço.

O desempenho comparativo dos dois aços em furação foi realizado por uma ferramentaria da região de Caxias do Sul - RS, durante a fabricação de um molde para injeção de peças automotivas. A Figura 10 apresenta que para as condições de usinagem adotadas, o número de furos realizados até nova afiação da broca foi em média de 6,0 para o Novo Aço e de 1,5 para o DIN 1.2711.

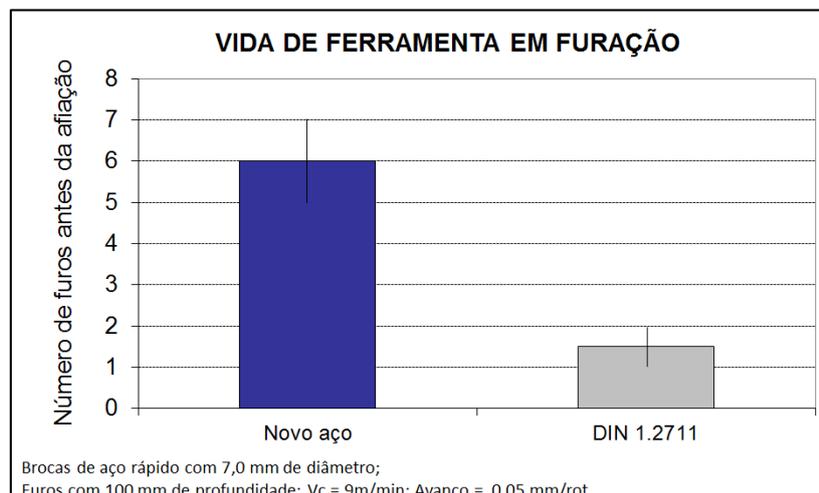


Figura 10. Desempenho em furação do DIN 1.2711 e Novo Aço durante manufatura de um molde para injeção de peças automotivas.

A razão do desempenho superior em usinagem do Novo Aço em relação ao aço DIN 1.2711 está relacionada a dois principais fatores: O primeiro como descrito anteriormente, a elevada homogeneidade microestrutural e de dureza em toda a secção do bloco, minimizando a presença de pontos duros na estrutura do aço; o segundo deve-se ao tratamento de modificação das microinclusões, nas etapas de elaboração do aço líquido no Forno Panela e Forno VD. Em momento oportuno no processo de aciaria é adicionado Ca-Si ao metal líquido, responsável por modificar as inclusões tornando-as aluminatos de cálcio-silício globulares, encapsuladas por sulfetos de manganês (MnS). Vide Figura 11 que apresenta a caracterização composicional em uma inclusão complexa desse tipo via técnica de WDS (*wavelength dispersive spectroscopy*) no MEV.

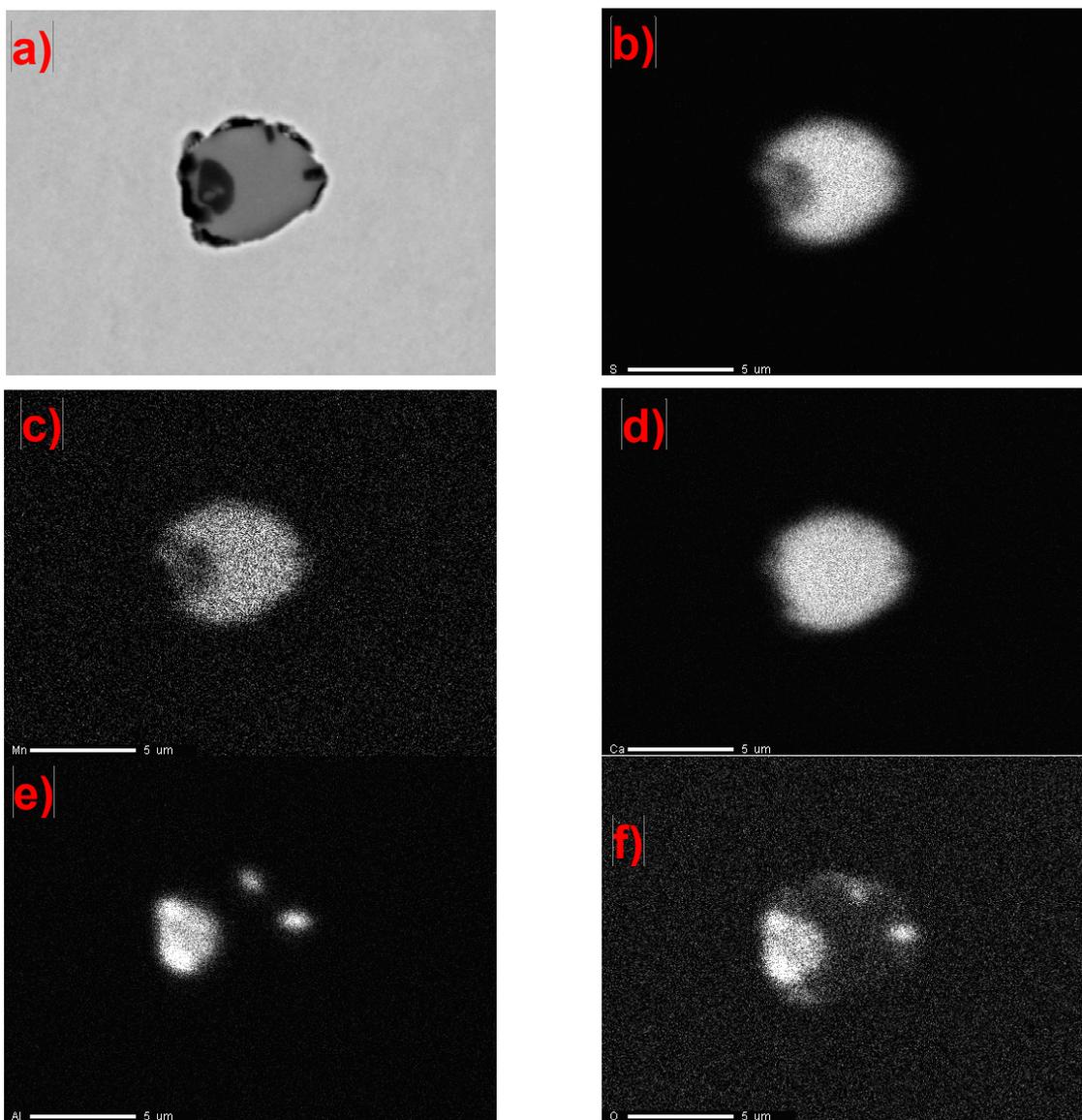


Figura 11. Análise via WDS a) Imagem composicional da inclusão; b) enxofre; c) manganês; d) cálcio; e) alumínio; f) oxigênio.

Tais microinclusões contribuem com a usinabilidade do Novo Aço, pois auxiliam na quebra do cavaco, além de minimizar o desgaste das ferramentas de corte, pois são menos duras que aluminas puras, e o MnS possui baixo ponto auxiliando na lubrificação da ponta da ferramenta de corte.

As imagens a seguir, Figuras 12 e Figura 13, apresentam moldes que foram fabricados com o Novo Aço, para a fabricação de produtos e peças que a sociedade interage em seu dia-a-dia. O molde da Figura 12 foi manufaturado para a injeção de caixas organizadoras de utilidades domésticas, enquanto os moldes da Figura 13 são para a indústria automotiva, respectivamente para a injeção do revestimento inferior da coluna B e do painel de instrumentos de automóveis lançados em 2014.

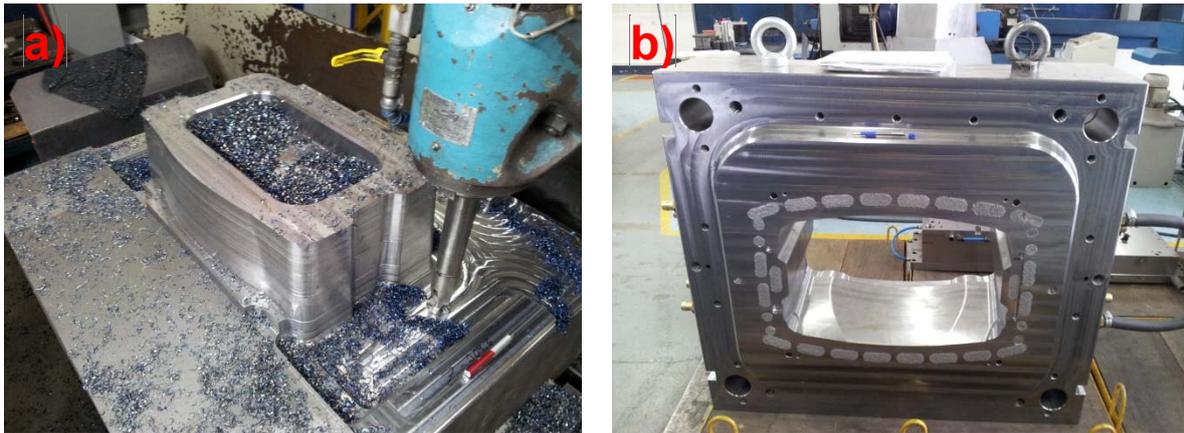


Figura 12. Molde para injeção de caixa organizadora – utensílio doméstico. a) Molde em processo de desbaste por usinagem. b) Cavidade do molde aguardando montagem.



Figura 13. Moldes para injeção de peças automotivas. a) Molde do revestimento inferior da Coluna B. b) Cavidade do molde para injeção de painéis de instrumentos de veículos.

4 CONCLUSÃO

O baixo teor de carbono do Novo Aço, associado à desoxidação do metal líquido com Ca-Si durante sua fabricação, contribuem para obter-se um produto com reduzido nível de segregação e elevada homogeneidade de dureza.

Os elementos responsáveis pela boa temperabilidade do Novo Aço são principalmente o cromo, manganês e molibdênio, uma vez que o carbono foi adicionado apenas para contribuir com a dureza requerida após têmpera e revenimento para a aplicação.

A minimização de pontos duros do Novo Aço, tais como segregações severas e inclusões abrasivas, favorecem a sua usinabilidade sem concomitante prejuízo na sua polibilidade.

Devido à boa combinação de propriedades de manufatura do Novo Aço, esse produto se torna uma interessante opção para o aumento da competitividade das ferramentarias e usuários finais de moldes plásticos.

REFERÊNCIAS

- 1 Gehricke, B.; Schruff, I. Trends In Plastic Mould Steel Applications. In: Jeglitsch, F.; Ebner, R. Leitner, H. (Org.). International Conference On Tooling, 5.,1999, Proceedings... Leoben: University of Leoben, 1999. p.83-92.
- 2 Konstruktionsbüro Jakob. Disponível em: <<http://www.gojakob.de/>>. Acesso em: 1 mar. 2012.

- 3 Hippenstiel, F. et al. Handbook of Plastic Mould Steels. Wetzlar: Edelstahlwerke Buderus AG, 2004. 328p.
- 4 Vetter, P.; Hippenstiel, F. A new pre-hardened plastic mould steel as a tailored solution for large moulds. In: Rosso, M; Grande, M. A. Ugues, D. (Ed.) International Conference On Tooling: Tooling materials and their applications from research to market, 7., 2006, Turin, Italy. Proceedings... Turin: Politecnico di Torino, vol. 1, May 2006. p.317-324.
- 5 Corre, S. et. al. Development of a new pre-hardened mold steel with improved machining, welding, polishing and conducting capacities. In: JEGLITSCH, F.; Ebner, R.; Leitner, H. (Ed.). International Conference On Tooling, 5., 1999, Proceedings... Leoben: University of Leoben, 1999. p.677-683.
- 6 Villares Metals S.A. Ficha técnica do aço VP20ISO. Disponível em <www.villaresmetals.com.br>. Acesso em: 1 fev. 2012.
- 7 Villares Metals S.A. Ficha técnica do aço N2711M. Disponível em <www.villaresmetals.com.br>. Acesso em: 1 fev. 2012.
- 8 Roberts, G. A; Krauss, G; Kennedy, R. L. Tool steels. 5.ed. Materials Park, OH: ASM International, 1998. 364p.
- 9 Bacalhau, J. B.; Barbosa, C. A. Desenvolvimento de aço inoxidável de alta usinabilidade para moldes plásticos – VIMCOR. In: Congresso Anual Da Abm, 66. 2011, São Paulo.. Anais..., São Paulo: ABM, p. 2580-2591, 2011.
- 10 Luo, Y.; et al. Microstructure and properties of big section microalloyed steel in unquenched and untempered for moulds. In: Rosso, M; Grande, M. A. Ugues, D. (Ed.) International Conference On Tooling: Tooling materials and their applications from research to market, 7., 2006, Turin, Italy. Proceedings... Turin: Politecnico di Torino, vol. 1, May 2006. p.123-130.
- 11 Thelning, K. E.; Steel and Its Heat Treatment, 2nd edition, 1984, Butterworths
- 12 Silva, A. L. C., Mei, P. R., Aços e ligas especiais. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 646 p.