



AO INOXIDÁVEL DE ALTA USINABILIDADE PARA O SEGMENTO DE MOLDES PLÁSTICOS¹

José Britti Bacalhau²
 Celso Antonio Barbosa³

Resumo

Aços ferramentas utilizados na confecção de moldes ou dispositivos para injeção de plásticos são altamente demandados, em relação à usinabilidade, soldabilidade e em alguns casos, resistência a corrosão. No processo de manufatura de um molde, uma das etapas de maior custo é a usinagem, como abertura de cavidades e furações profundas. O presente trabalho discute o desenvolvimento de um aço inoxidável, com soldabilidade e usinabilidade maximizadas, para aplicação em câmaras quentes, placas de refrigeração e porta moldes. Avaliou-se o efeito do N e Mn na formação de ferrita delta no aço, via simulações termodinâmicas. Os resultados foram validados após a produção de ligas em escala piloto e posteriormente em escala industrial. A partir do material forjado, foram realizados ensaios de usinabilidade, soldabilidade, resistência a corrosão, e microscopia óptica. O baixo nível de tensões residuais no aço, associados à micro inclusões benéficas a usinabilidade – MnS, atribuíram à liga, excelente desempenho em usinabilidade. O desempenho do aço em furação profunda é considerado muito satisfatório, visto que furos concordantes de 390 mm foram realizados, e os mesmos se encontraram no centro de uma placa de refrigeração sem desvios. O baixo teor de carbono no aço, 0,05%, favoreceu sua soldabilidade e também a inoxidabilidade, permitindo um maior teor de Cr livre na matriz. O aço VIMCOR torna-se assim, uma interessante alternativa para o segmento de injeção de plásticos.

Palavras-Chave: Aço inoxidável; Alta usinabilidade; Moldes plásticos.

HIGH MACHINABILITY STAINLESS STEEL FOR PLASTIC MOLDS

Abstract

Tool steels applied in molds and components of plastic injection are highly demanded regarding machinability, weldability and in some cases, corrosion resistance. In the manufacture process of molds, the most expensive phase is the machining, like cavities opening and deep drilling. The present work discusses the development of a stainless steel with maximized weldability and machinability, to be applied in hot runners, refrigeration plates and die holder. The effect of N and Mn it has been observed regarding the delta ferrite formation by thermodynamic modeling. The results have been evaluated in alloys produced initially in pilot scale and further in industrial scale. From forged billets the following tests have been performed: machinability, weldability, corrosion resistance, and optical microscopy. The low level of residual stress in this steel, associated to micro inclusions favorable to machinability – MnS, have given to the alloy, excellent machining performance. The deep drilling of this steel is considered really satisfactory, once, concordant holes of 390 mm were machined, and they have met each other in the center of a refrigeration plate without deviations. The low carbon content in the steel, 0.05%, contributed to their improved weldability and corrosion resistance, allowing a higher free Cr content in the steel matrix. For these reasons, VIMCOR, become an interesting alternative to the plastic injection field.

Key Words: Stainless steel; High machinability; Plastic molds.

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 Materiais, membro da ABM, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: jose.bacalhau@villaresmetals.com.br.

³ Engenheiro Metalurgista, membro da ABM, Gerente de Tecnologia da Villares Metals S. A., Sumaré - SP, Brasil, e-mail: celso.barbosa@villaresmetals.com.br.

1 INTRODUÇÃO

As ferramentas e moldes são normalmente empregados em processos de conformação de outros materiais, sejam eles materiais poliméricos ou metálicos.⁽¹⁾ A crescente demanda das ferramentarias por aços de elevada usinabilidade e dos usuários finais por moldes com maior número de cavidades, estimula as usinas siderúrgicas a desenvolver novos aços com propriedades diferenciadas. Um novo aço foi desenvolvido para aplicações em dispositivos como as câmaras quentes,⁽²⁾ onde o efeito conjunto da temperatura e do resfriamento com água pode levar à corrosão, necessitando o uso de aços inoxidáveis.

Além das características de resistência à corrosão e usinabilidade, o uso de solda é muitas vezes empregado em aços para molde, em pequenos reparos e para modificações do projeto inicial. Contudo, os aços inoxidáveis martensíticos convencionais, de alto teor de cromo (12% a 17%) e médio teor de carbono (aprox. 0,4%), possuem altíssima temperabilidade causando endurecimento expressivo e possibilidade de trincas nas regiões em que a solda é aplicada (Tabela 1). Assim, o desenvolvimento de uma liga com baixo teor de carbono é, também, desejável.

Tabela 1. Composição química típica de aços inoxidáveis tradicionais. A dureza aproximada da martensita é colocada, para indicar a dificuldade de soldabilidade gerada pelo elevado teor de carbono. Teores em porcentagem em massa e balanço em Fe

| Designação | C | S | Mn | Ni | Cr | Mo | V | Dureza Martensita |
|-------------------------------|------|---------|-----|-----|------|-----|------|-------------------|
| AISI 420 mod. (DIN 1.2083) | 0,40 | 0,003 * | 0,5 | - | 13,5 | 0,5 | 0,25 | 55 HRC |
| DIN 1.2316 | 0,38 | 0,005 * | 0,6 | 0,8 | 16,0 | 1,0 | - | 55 HRC |
| DIN 1.2085 | 0,35 | 0,15 | 1,0 | - | 15,0 | - | - | 55 HRC |

*Valores típicos; não especificados por norma

Um fator metalúrgico complicador em aços inoxidáveis martensíticos com baixos teores de Ni e C (elementos austenizantes), é a estabilidade da microestrutura em termos de ausência de ferrita delta. A formação de ferrita delta é limitada a um máximo de 10% em volume, pois sua presença diminui muito a resistência a corrosão e as propriedades mecânicas do aço. Assim, as temperaturas de forjamento e laminação (processamento) desses aços são limitadas e devem ser bem controladas evitando a formação desse microconstituente.

O presente trabalho teve como objetivo, o desenvolvimento de um aço inoxidável de alta usinabilidade, com dureza entre 290 HB - 330 HB, atendendo as principais exigências das ferramentarias como excelente usinabilidade e soldabilidade; dos usuários finais como boa resistência a corrosão e da siderurgia como sendo um material com boa processabilidade (ampla faixa de temperatura para conformação a quente). Esse aço foi denominado Vimcor, e suas principais aplicações no seguimento de injeção de plásticos são: câmaras quentes, placas de refrigeração, porta moldes e moldes para injeção de termoplásticos não clorados de baixa demanda em polibilidade,



2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Simulações Termodinâmicas

Para a definição da composição química do aço VIMCOR, inicialmente foi simulado, com o auxílio do software *Thermo-Calc* com a base de dados termodinâmica TCFE6,⁽³⁾ o efeito do N e do Mn na temperatura de formação da ferrita delta. As composições químicas simuladas para a determinação da nova liga (simulações 1 a 5) e de outras duas ligas comerciais já existentes no mercado são apresentadas na Tabela 2.⁽⁴⁾

Tabela 2. Temperatura de equilíbrio para formação de 10% em volume de ferrita delta, em ligas comerciais e ligas propostas, calculadas via simulação no *Thermocalc*. Composição química com porcentagem em massa e balanço em Fe

| Aço | Composição Química | | | | | | Temperatura Máxima de Conformação (°C) |
|------------------|--------------------|------|-----|-----|------|-----|--|
| | C | N | Mn | Ni | Cr | Cu | |
| Liga Comercial 1 | 0,05 | 0,04 | 1,3 | 0,1 | 12,5 | 1,0 | 1150 |
| Liga Comercial 2 | 0,05 | 0,04 | 0,3 | 0,7 | 13,5 | 2,5 | 1100 |
| Simulação 1 | 0,05 | 0,05 | 1,3 | 0,1 | 12,5 | 1,0 | 1160 |
| Simulação 2 * | 0,05 | 0,06 | 1,3 | 0,1 | 12,5 | 1,0 | 1180 |
| Simulação 3 * | 0,05 | 0,07 | 1,3 | 0,1 | 12,5 | 1,0 | 1190 |
| Simulação 4 * | 0,05 | 0,08 | 1,3 | 0,1 | 12,5 | 1,0 | 1200 |
| Simulação 5 | 0,05 | 0,05 | 2,5 | 0,1 | 12,5 | 1,0 | 1190 |

* Formação de gás N₂ durante a solidificação.

Teores muito elevados de nitrogênio, a partir de 0,06%, prevêm a formação de gás na solidificação, e conseqüentemente, a geração de porosidades nos lingotes inviabilizando seu uso. Na simulação 5, por outro lado, o efeito de um teor mais elevado de Mn, associado a um teor de nitrogênio seguro, houve um ganho de 40°C a 90°C na temperatura máxima de conformação, em relação às ligas comerciais.

Após os indicativos dos fortes efeitos do nitrogênio e manganês na microestrutura desses aços, três composições foram escolhidas e produzidos lingotes de 55 kg em forno VIM de escala piloto. Uma delas foi a liga comercial 1 e as outras duas referentes às simulações 1 e 5.

2.2 Estabilidade Microestrutural

Amostras no estado bruto de fusão, das ligas produzidas em escala piloto foram submetidas a tratamentos de homogeneização, com a finalidade de verificar as temperaturas de formação de ferrita delta e confrontá-las com as informações obtidas via simulação no *Thermocalc*. As homogeneizações foram realizadas a 1.120°C, 1.150°C, 1.180°C, 1.200°C, 1.230°C e 1.260°C por 24 horas seguidas de resfriamento ao ar. Após esses tratamentos térmicos, as amostras foram preparadas metalograficamente e avaliadas via microscopia óptica, a fração volumétrica de ferrita delta gerada.

Após esse ensaio, ficou definido que o aço Vimcor possuiria a composição química referente à liga "Simulação 5" da Tabela 2.



2.3 Produção em Escala Industrial

Com a finalidade de avaliar o forjamento do aço Vimcor e seu desempenho em relação à usinabilidade, soldabilidade e resistência a corrosão, foi produzido em escala industrial uma corrida do aço Vimcor. Placas de seção retangular de 130 mm x 700 mm foram forjadas a 1.180°C.

Para efeito de comparação de propriedades, foi escolhido o aço VP420T (aço inoxidável martensítico da série AISI 420, temperado e revenido, de marca comercial da Villares Metals S.A.), que também foi caracterizado paralelamente ao Vimcor.

As composições químicas dos aços Vimcor e VP420T, ambos produzidos em escala industrial e beneficiados para dureza final de 290 HB – 330 HB são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química dos aços VIMCOR e VP420T produzidos em escala industrial. Valores em porcentagem em massa e balanço em Fe

| Aço | AISI | DIN Wnr | C | Mn | S | Cr | Ni | Cu | N |
|--------|------|---------|------|------|-------|------|------|------|------|
| VIMCOR | - | - | 0,06 | 2,47 | 0,08 | 12,1 | 0,30 | 0,51 | 0,04 |
| VP420T | 420 | 1.2083 | 0,38 | 0,42 | 0,001 | 13,2 | 0,19 | 0,08 | 0,01 |

* Os aços apresentados são Marcas Registradas da Villares Metals S.A.

2.4 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. Foram realizadas aberturas de cavidade padrão⁽⁵⁻⁷⁾ e monitorado o desgaste de flanco da ferramenta, em blocos de 200 mm x 200 mm x 100 mm em Vimcor e VP420T produzidos em escala industrial (Figura 1). O critério utilizado para o fim de vida da ferramenta de corte foi desgaste de flanco de 0,25mm.

A Tabela 4 apresenta as características da ferramenta de corte utilizada (insertos) e os parâmetros de usinagem empregados.



Figura 1. Abertura de cavidade padrão em fresamento.


Tabela 4. Parâmetros utilizados nos ensaios de usinabilidade em fresamento

| Centro de Usinagem C 600 U - Hermle | |
|--|-----------------------------|
| Material Usinado | Blocos de 200 x 200x 100 mm |
| Ferramenta | |
| Ferramenta Toroidal | R300-25T12-10M |
| Diâmetro | 25 mm |
| Número de dentes | 3 |
| Inserto de metal duro com cobertura | |
| Raio do inserto | 5 mm |
| Pastilha | R300-1032M-PH 4230 |
| Parâmetros de Corte - Concordante | |
| Velocidade de corte | 200 m /min |
| Avanço | 0,12 mm /dente |
| Profundidade de corte axial | 0,5 mm |
| Profundidade de corte radial | 10 mm |

O desempenho do Vimcor em relação à furação profunda, também foi avaliado. Nesse caso, foi realizada a fabricação placa de refrigeração para moldes de pré-forma de garrafas PET em uma ferramentaria. Foram usinados oito furos de 16 mm de diâmetro com 780 mm de comprimento, para os canais de refrigeração. Cada canal foi produzido via furos concordantes de 390 mm.

2.5 Soldabilidade das Ligas

A avaliação da soldabilidade do aço Vimcor em relação ao VP420T, foi realizado em ensaios na Gleeble 1500D.⁽⁸⁻¹⁰⁾ Corpos de prova cilíndricos de 10 mm de diâmetro dos dois aços foram aquecidos a 1.400°C em uma taxa de 50°C/s. Manteve-se o patamar de temperatura por 5 segundos e então, foi desligado o equipamento, resfriando as provas através da extração de calor em garras de cobre (Figura 2). Foram utilizadas garras de cobre para manter o pico do gradiente de temperatura no centro do corpo de prova e maximizar a extração de calor no resfriamento.


Figura 2. Imagem dos corpos de prova ensaiados na Gleeble.

2.6 Resistência a Corrosão

A resistência a corrosão foi avaliada em amostras retangulares de 200 mm x 90 mm dos aços inoxidáveis Vimcor, VP420T e do aço mais empregado em moldes plásticos, o P20 (aço baixa liga) que tiveram suas superfícies fresadas e retificadas. Essas peças foram armazenadas, sem nenhum tipo de proteção superficial, por seis meses, e então avaliado qualitativamente, o nível de corrosão superficial provocado pela ação do vapor d'água existente no ambiente de um galpão industrial coberto.

3 RESULTADOS

3.1 Simulações Termodinâmicas e Estabilidade Microestrutural

A Figura 3 apresenta as faixas de temperatura de conformação dos aços com composição química apresentadas na Tabela 2, obtidas via simulação no *software Thermo-Calc*. Essas faixas de temperatura representam a região do *gama loop*⁽¹¹⁾ dos aços mais a formação de 10% em volume de ferrita delta. Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as regiões entre 600°C e 1.400°C dos mapas de fases dos aços Comercial 1 e Vimcor (referente a simulação 5). É notável que o aço Vimcor, apresentou um campo austenítico mais amplo.

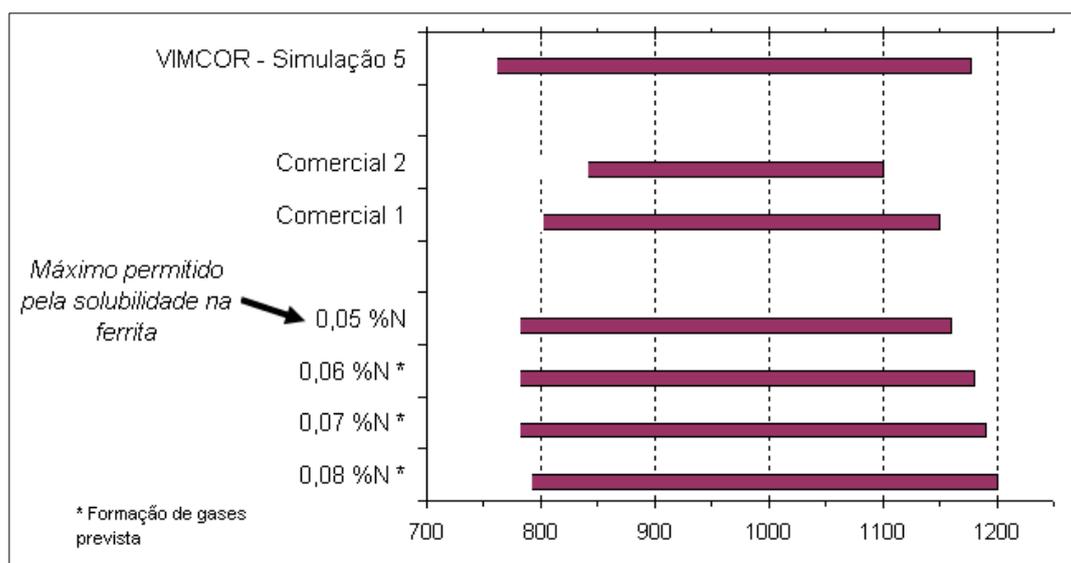


Figura 3. Faixas de temperatura para conformação dos aços estudados, obtidas via simulação no *software ThermoCalc*. Previsão para a formação de 10% em volume de Ferrita Delta.

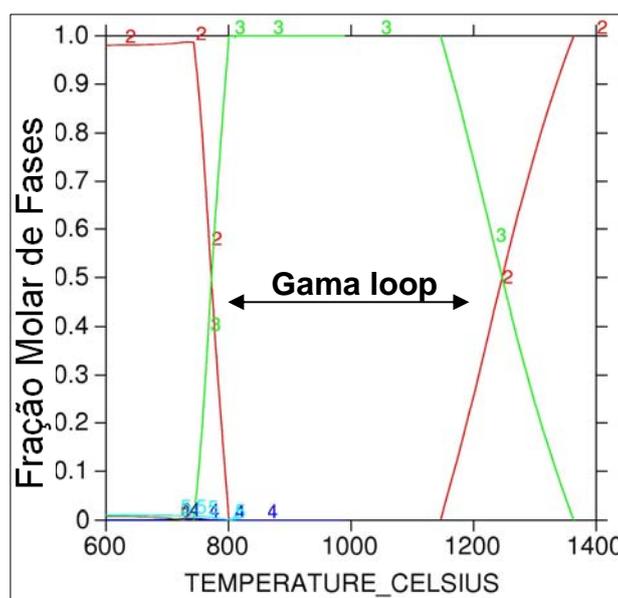


Figura 4. Mapa de fases do aço Comercial 1.

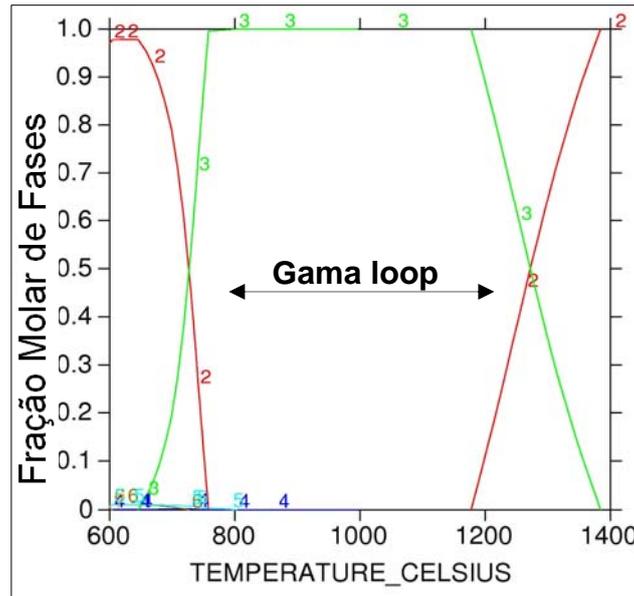


Figura 5. Mapa de fases do aço Vimcor.

Os resultados da quantidade de ferrita delta formada nas ligas produzidas em escala piloto, após o tratamento de homogeneização, são mostrados na Tabela 5 e Figuras 6 e 7.

Tabela 5. Fração volumétrica, determinada por metalografia quantitativa, de ferrita delta nas Ligas Comercial, Pesquisada 1 e Vimcor. As medidas foram realizadas após 24 horas nas temperaturas indicadas

| Liga | 1150 °C | 1180 °C | 1200 °C | 1230 °C | 1260 °C |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Comercial 1 | 0,0% | 0,6% | 8,4% | 21,3% | 29,1% |
| Liga Pesquisada 1 | 0,0% | 0,0% | 7,3% | 15,7% | 21,9% |
| Liga Pesquisada 2 (VIMCOR) | 0,0% | 0,0% | 0,2% | 3,2% | 21,0% |

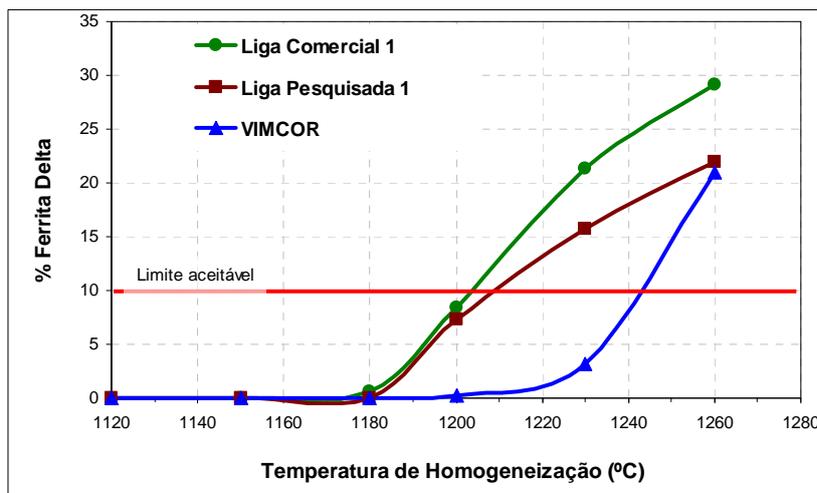


Figura 6. Gráfico de % de ferrita delta em função da temperatura de homogeneização, mostrando o aumento da quantidade de ferrita delta para a Liga Comercial 1, Pesquisada 1 e Vimcor.

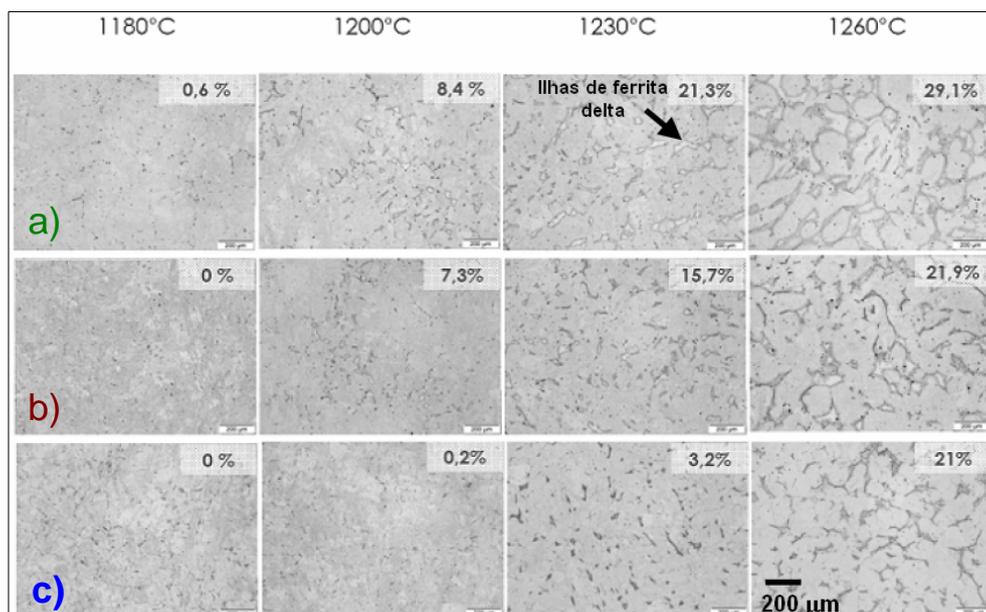


Figura 7. Microestruturas referentes aos tratamentos de homogeneização, com detalhes das ilhas de Ferrita Delta formadas. a) Liga Comercial 1; b) Liga Pesquisada 1; e c) Vimcor.

3.2 Ensaio de Soldabilidade

Os resultados obtidos pela simulação do processo de soldagem na Gleeble, para os aços Vimcor e VP420T, são apresentados na Figura 8. Na zona termicamente afetada (ZTA) houve a formação de martensita não revenida para ambos os aços, porém, o aço VP420T atingiu valores de dureza de até 56 HRC, ou seja, mais de 20 pontos acima da dureza do material base (MB), enquanto que a dureza do Vimcor apresentou pequenas variações.

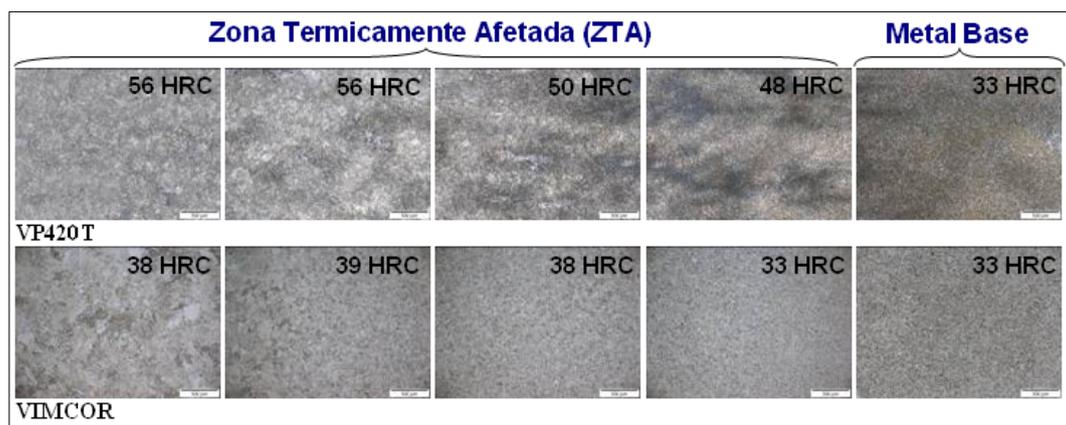


Figura 8. Microestruturas e durezas obtidas na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal base (MB) após ensaio de soldagem na Gleeble.

3.3 Resistência à Corrosão

As condições superficiais das amostras, após seis meses de armazenagem denotam bem a diferença entre os aços inoxidáveis e o aço baixa liga P20 (Figura 9). O aço

ferramenta para moldes plásticos P20, apresentou muitos pontos de oxidação em sua superfície, enquanto que tanto o Vimcor quanto o VP420T, praticamente não sofreram danos superficiais dos vapores d'água presentes no ambiente.

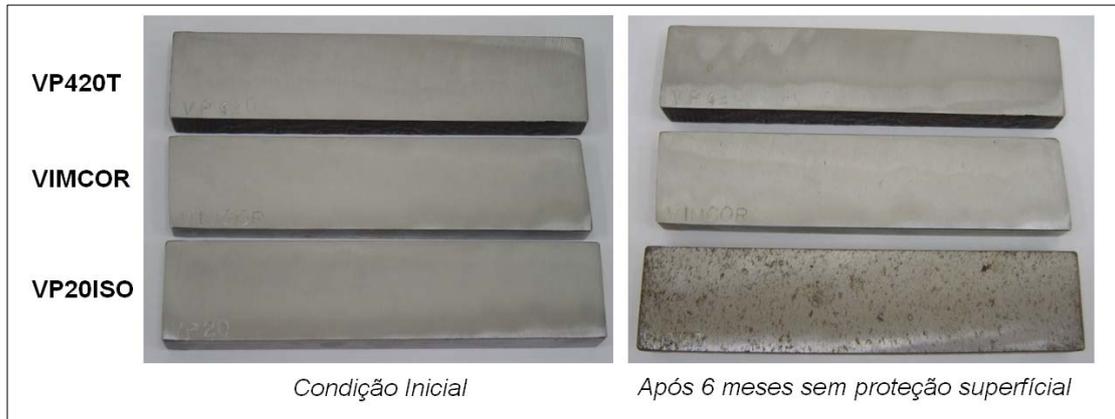


Figura 9. Condição superficial após seis meses.

3.4 Ensaios de Usinabilidade

No gráfico abaixo (Figura 10), pode ser verificado os desempenhos em usinabilidade em fresamento dos aços Vimcor e VP420T produzido em escala industrial. Nota-se que, utilizando os mesmos parâmetros de usinagem, para um desgaste de flanco de 0,25 mm (fim de vida da ferramenta de corte), o volume usinado para o Vimcor foi de 750 cm³ enquanto que para o aço VP420T o volume foi de 550 cm³, ou seja, desempenho superior em 36%.

A avaliação da ferramentaria que confeccionou uma placa de refrigeração em Vimcor (Figura 11) foi de que o aço apresentou excelente desempenho em fresamento e mandrilhamento. Trinta e seis furos com precisão de 0,01 mm foram usinados (trinta e dois furos com 38 mm e quatro com 62 mm de diâmetro), observou-se grande economia de insertos de cermet, quando comparado a uma mesma usinagem do aço VP420T. Em relação à furação profunda, o Vimcor obteve também desempenho muito satisfatório. Foram usinados oito furos de 16 mm em diâmetro com 780 mm de comprimento, para os canais de refrigeração. Cada canal foi produzido via furos concordantes de 390 mm, e todos se encontraram no centro da placa sem desvios.

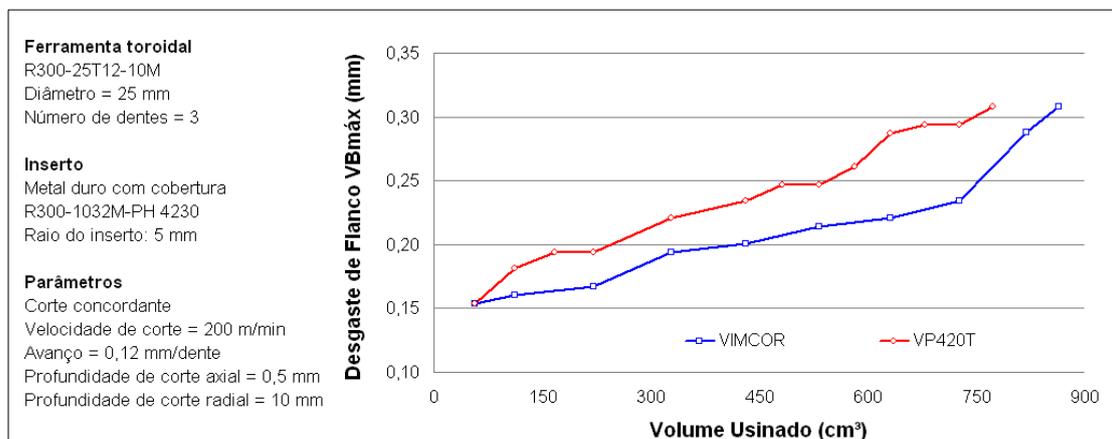


Figura 10. Usinagem em fresamento entre os aços Vimcor e VP420T produzidos em escala industrial.



Figura 11. Placa de refrigeração produzida em aço Vimcor.

4 DISCUSSÕES

Observa-se que um pequeno aumento no teor de nitrogênio de 0,04% para 0,05%, na composição química dos aços estudados em escala piloto, já é suficiente para promover uma maior estabilidade do campo austenítico (*gamma loop*), e, portanto, aumentar a faixa de conformação desses produtos. Contudo, o efeito mais marcante ocorre quando se combina essa pequena variação no teor de N, com o aumento nos teores de Mn (Figuras 6 e 7). Foi possível obter ganhos até mesmo superiores ao calculado pelo software termodinâmico.

Graças a essa maior estabilidade microestrutural do aço Vimcor, sua processabilidade em forjamento e/ou laminação é muito satisfatória, sendo possível, o uso de maiores temperaturas de conformação, sem a formação de ferrita delta. Em processos siderúrgicos, esse maior campo de trabalho se reflete em processos mais estáveis e menores exigências de potência das prensas e laminadores.

O aço Vimcor apresentou os principais requisitos desejados pelas ferramentarias e usuários finais de câmaras quente, placas de refrigeração e porta moldes (segmento de injeção de termoplásticos), que são: excelente usinabilidade, soldabilidade e boa resistência a corrosão.

Em usinabilidade em fresamento (Figura 10), para o fim de vida das ferramentas de corte, ou seja, desgaste de flanco de 0,25 mm, o volume de material usinado no aço Vimcor foi 36% superior ao aço VP420T. Isso se deve a presença de sulfetos de manganês – MnS na microestrutura do Vimcor (vide os teores de enxofre na Tabela 3). Tais microinclusões são benéficas a usinabilidade, pois possuem baixo ponto de fusão, atuando como lubrificantes da ferramenta e corte e auxiliam na quebra dos cavacos, durante a usinagem.^(12,13) Em relação à furação profunda, o principal responsável por desvios de furos é o nível de tensões residuais no aço. No segmento de moldes plástico, processos convencionais de têmpera impõem altas taxas de resfriamento em grandes blocos de aço, o que induz elevados níveis de



tensões residuais.⁽¹⁴⁾ No beneficiamento o aço Vimcor é possível, obter as propriedades desejadas, mesmo após lentas taxas de resfriamento, minimizando assim, seu nível de tensões residuais. Dessa maneira, furações profundas são realizadas, praticamente sem desvios dos furos no centro das peças (Figura 11).

O baixo teor de carbono do Vimcor (Tabela 3) atribuiu ao aço excelente soldabilidade. Após a aplicação do processo de soldagem, há a formação de uma zona termicamente afetada (ZTA), com dureza muito semelhante a do metal de base, fato que não ocorre no VP420T, onde a dureza da ZTA atinge valores superiores a 20 HRC da dureza do material de base (Figura 8). Isso confere ao Vimcor após aplicação de solda, um ajuste por usinagem facilitado, devido à menor variação de dureza gerada.

A principal ocorrência de oxidação em câmaras quentes e placas de refrigeração é devido à evaporação e condensação de água em suas superfícies. Já em porta moldes se deve, a longos períodos de armazenagem, sem a aplicação de proteção superficial (óleo para proteção, por exemplo). O Vimcor possui 12% de Cr em sua composição química, e baixíssimo teor de carbono, aproximadamente 0,05%. Assim, quase que a totalidade do Cr está na matriz do aço e, portanto, disponível para a formação da película passivadora de Cr_2O_3 , que é responsável pela inoxidabilidade do aço. Por essa razão, o Vimcor, atende sem problemas as necessidades de resistência a corrosão para o segmento a que se destina.

5 CONCLUSÃO

- os teores mais elevados de N e Mn na composição química do Vimcor proporcionaram maior estabilidade microestrutural do aço e conseqüentemente o controle da formação de ferrita delta;
- maiores faixas de temperatura de conformação poderão ser aplicadas na fabricação do Vimcor, já que os maiores teores de N e Mn, ampliaram o campo gama loop desse aço;
- Vimcor possui excelente usinabilidade em fresamento, mandrilhamento e principalmente em furação profunda, pois apresenta baixos níveis de tensões residuais e MnS como microinclusões benéficas a usinagem;
- a soldabilidade do aço Vimcor é também muito satisfatória, pois há a formação de uma zona termicamente afetada após a soldagem com durezas muito semelhantes a do material de base; e
- o aço Vimcor torna-se uma interessante alternativa para o segmento de injeção de termoplásticos, tendo em vista que ele possui os principais requisitos desejados pelas ferramentarias e usuários finais do segmento de moldes plásticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Associação de Inteligência em Manufatura – AIM do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA e a Qualicad Projetos e Ferramentaria, pelo grande apoio na realização dos ensaios de usinabilidade.

REFERÊNCIAS

- 1 ROBERTS, G. A; KRAUSS, George; KENNEDY, Richard. **Tool steels**. 5. ed. Materials Park, OH: ASM International, 1998.



- 2 POLIMOLD INDUSTRIAL. **Sistema de câmara quente e acessórios**: catálogo 2001. São Paulo: Polimold Industrial: 2001. 72p.
- 3 FOUNDATION OF COMPUTATIONAL THERMODYNAMICS. **Thermo-Calc Software User's Guide**: Version S. Stockholm, Sweden: FCT, 2009.
- 4 US Patents No 6,045,633 e No 6,358,344.
- 5 Trent, M. C., Wright, P. K., 2000. **Metal cutting principles**. 4.ed. London: Butterworth-Heinemann, 1977. 203p.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook**: Machining, v.16. 9.ed. Metals Park: Ohio, 1989.
- 7 Gomes, J.O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de Alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be**. 2001. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- 8 Sun, Z; Han, H Y. Gleeble Simulation of Stainless Steel Weld Metals. In: INTERNATIONAL TRENDS IN WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY, 3. 1992, Gatlinburg, Tennessee. **Anais...** Metals Park, Ohio: ASM International, 1993. p. 731-735.
- 9 Zu, Z. X., Evaluation of Weldability in 60 kg/m Heavy Railway Steel Using Gleeble 1500 Simulation Technique. In: ADVANCES IN WELDING SCIENCE AND TECHNOLOGY. 1986, Gatlinburg, Tennessee. **Anais...** Metals Park, Ohio: ASM International, 1986. p. 821-824.
- 10 Lundin, C. D., Historical development of the high speed time-temperature controller designed for welding research: the Gleeble. In: PHYSICAL SIMULATION OF CASTING, HOT ROLLING AND WELDING. 1997, Tsukuba; Japan. **Anais...** Tsukuba: National Research Institute for Metals, 1997. p. 283-289.
- 11 COLOMBIER, R. E HOCHMANN, J., **Aceros inoxidables aceros refractarios**. Madrid: Ediciones urmo, 1968. 625p.
- 12 JOSEPH, R. A.; TIPNIS, V. A. The influence of non-metallic inclusions on the machinability of free-machining steels. In: **Influence of metallurgy on machinability**. Metals Park, Ohio: ASM International, 1975. p.55-72.
- 13 Kiessling, R. **Nonmetallic inclusions in steel**: Part III. London: Iron and Steel Institute, 1968. 118p.
- 14 KOLOZSVÁRY, Z. Residual Stresses in Nitriding. In: **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Materials Park, OH: ASM, 2002.