

DESENVOLVIMENTO DE UM AÇO INOXIDÁVEL ENDURECÍVEL POR PRECIPITAÇÃO PARA MOLDES DE PLÁSTICO*

Rafael Agnelli Mesquita ⁽¹⁾
Celso Antonio Barbosa ⁽²⁾

Resumo

A cadeia produtiva dos polímeros termoplásticos, usualmente conhecidos como plásticos, vem apresentando intenso crescimento. Na manufatura dos bens, o uso de moldes e ferramentas é essencial para proporcionar a qualidade e produtividade adequada. O presente trabalho, portanto, apresenta o desenvolvimento de um novo aço para moldes, denominado VP80, especificamente para aplicação em processos que exigem alta resistência à corrosão. Plásticos como o PVC ou poliacetias são exemplos de materiais que, durante a conformação, podem promover liberação de ácidos, tornando o processo corrosivo. O material desenvolvido trata-se de um aço inoxidável endurecível por precipitação, conciliando propriedades de alta resistência mecânica e à corrosão. Dada a importância do polimento dos moldes, a propriedade dos aços conhecida como polibilidade também foi objetivada no novo material. Produzido com processo por fusão à vácuo, o novo aço garante alta limpeza microestrutural e, conseqüentemente, alta polibilidade. A dureza obtida, entre 35 a 48 HRC, é uniforme, também contribuindo para a polibilidade. E, por ser obtida via endurecimento por precipitação, não envolve os problemas de distorção e os altos custos de tratamento térmico dos aços martensíticos utilizados na mesma aplicação, tipicamente o AISI 420. Assim, o trabalho discute as principais propriedades do novo material, comparando-o aos aços inoxidáveis martensíticos tradicionais.

Palavras-chave: Aço inoxidável, Moldes de Plástico, Endurecimento por Precipitação, Resistência à Corrosão, Polímeros Clorados.

Abstract

The thermoplastic productive chain, usually known as plastics, have experimented intense growth. In the manufacture of goods, the use of dies and tools is essential to obtain the desired quality and productivity. The present work reports the development of a new steel for dies, called VP80, specifically to applications in processes which must bear high corrosive conditions. Plastics such as PVC or poliacetols are examples of materials that can liberate acids, during conformation. The new material is a precipitation hardened stainless steel which offsets the properties of mechanical and corrosion resistance. Due to the great importance of the dies' polishing, the steel property known as polishability was also investigated for this new material. Produced by the process of vacuum arc remelting, the new steel guarantee high level of microstructural cleanliness and, consequently, high polishability. The measured hardness was between 35 and 48 HRC, being uniform, also contributing to the good polishability. Being obtained by precipitation hardening, the new material do not suffer from distortion neither have high costs of heat treating common of martensitic steels used for the same application (typically AISI 420). So, it is the aim of this article to discuss the main properties of the new material, comparing their properties to those of the traditional martensitic stainless steel.

Key-words: *Stainless Steel, Dies for Plastics, Precipitation Hardening, Corrosion Resistance, Chlorinated Polimers*

* VII Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, São Paulo, 23 a 25/novembro/2004.

1) Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Pesquisador da Villares Metals S. A., Sumaré, SP, Brasil, e-mail: rafael.mesquita@villaresmetals.com.br

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

“As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade dos autores”.

1. INTRODUÇÃO

Os moldes utilizados na conformação de plásticos possuem importância essencial nesta área industrial. Normalmente apresentam geometria complexa e elevado nível de polimento, para proporcionar adequadas características do produto plástico conformado e elevada velocidade de produção. As propriedades do material empregado, como usinabilidade e polibilidade, são assim importantes para o desempenho do molde [1]. Os moldes de plástico normalmente são manufaturados a partir de aços, com dureza variada dependendo da exigência da aplicação. Apesar de muitas vezes pouco ligados, os aços utilizados possuem propriedades de limpeza microestrutural e de processamento que os diferenciam dos outros aços convencionais e ao carbono.

Para processamento de alguns polímeros, principalmente PVC, a utilização de moldes feitos em aço inoxidável é necessária. Durante o aquecimento e processamento, este polímero libera ácido clorídrico, atacando a superfície do molde e prejudicando a qualidade da peça produzida caso o aço não possua alta resistência à corrosão. Para garantir esta propriedade e alta resistência mecânica, são frequentemente empregados aços inoxidáveis martensíticos, da classe 400. A Tabela 1 mostra a composição dos dois aços tipicamente empregados, nomenclatura Villares Metals VP420 e VP440. Estes materiais são produzidos com processos especiais de refusão sob escória eletro-condutora (ESR), designação ISOMAX, para maximizar a limpeza microestrutural e eliminar impurezas.

Tabela 1: Composição química dos aços inoxidáveis empregados em moldes e a faixa típica da dureza de trabalho. O sinal “~” nas similaridades indica que os materiais próximos, mas apresentam diferença em alguns elementos.

| Aço | AISI | DIN | C | Cr | Mo | Ni | Outros | Dureza de trabalho (HRC)* |
|----------|-------|--------|------|------|------|-----|---------|---------------------------|
| VP420 IM | ~ 420 | 1.2083 | 0,40 | 13,5 | - | - | V=0,25 | 40 a 52 |
| VP440 IM | ~ 440 | 1.4125 | 1,00 | 17,5 | 0,50 | - | - | 50 a 57 |
| VP80 | - | - | 0,04 | 12,0 | 1,5 | 7,8 | Al=1,20 | 35 a 48 |

* Faixa de valores que tipicamente são empregados

Em algumas aplicações, a utilização de aços inoxidáveis em moldes de plástico é importante, porque proporcionam alto grau de polimento sem mudança dos aspectos da superfície pela corrosão. Alguns exemplos são dispositivos ópticos como faróis, CD's e óculos.

Apesar de adequadas propriedades de polimento e resistência à corrosão, os aços inoxidáveis martensíticos têm no tratamento térmico sua principal limitação. A inoxidabilidade e as propriedades mecânicas necessárias à aplicação apenas são obtidas após a têmpera e revenimento. Contudo, a têmpera de moldes pré-esboçados é complexa, envolvendo possibilidade de trincas e distorções. É, portanto, um tratamento de alto risco e custo. Dada esta necessidade, foi desenvolvido um novo aço inoxidável, endurecível por precipitação – o VP80. Sua composição química também está apresentada na Tabela 1. A produção deste material também emprega refusão, visando conciliar alta polibilidade e propriedades mecânicas.

O presente trabalho, portanto, apresenta o desenvolvimento do aço VP80 e alguns dados comparativos ao aço AISI 420.

2. CORRIDAS EM ESCALA PILOTO

2.1 Projeto de Liga do Aço VP80

Antes da realização do projeto de liga do aço VP80, as necessidades metalúrgicas do novo material foram analisadas. Tais necessidades estão relacionadas às condições de manufatura do material ou às propriedades necessárias para trabalho, sendo dadas abaixo:

Propriedades de Desempenho:

- Alta resistência à corrosão, preferivelmente superior à do aço DIN 1.2083 (AISI 420 modificado).
- Resistência à corrosão mesmo em baixa dureza;
- Ausência de ferrita delta após processamento a quente e ausência de austenita retida após têmpera.

Propriedades de Manufatura:

- Menor custo e tempo de tratamento térmico.
- Alta estabilidade dimensional durante o tratamento térmico.
- Altíssima polibibilidade.
- Uniformidade de dureza após o tratamento térmico.
- Facilidade de reparo por solda.
- Custo não excessivamente elevado.

2.2 Composições Avaliadas em Escala Piloto

A fim de satisfazer todos os pontos acima, foram escolhidos como base para a composição química do novo material os aços PH de alta resistência, especialmente o aço 13-8 Mo [2]. Algumas composições foram avaliadas, principalmente em termos dos teores de elementos geradores do endurecimento por precipitação (Al e Ti) e dos teores de Ni. A Tabela 2 apresenta tais composições.

Tabela 1: Composição química típica de aços aplicados em trabalho a frio. Porcentagem em massa e balança em Fe. O sinal “~” nas similaridades indica que os materiais próximos, mas apresentam diferença em alguns elementos. Os teores não indicados são de elementos residuais.

| Composição | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | Al | Ti | P | S | Al + 0,56 Ti* |
|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|--------------|--------------|---------------|
| C1 | 0,05 | 0,19 | 0,32 | 12,0 | 1,45 | 9,03 | 1,15 | - | 0,006 | 0,003 | 1,15 |
| C2 | 0,015 | 0,14 | 0,23 | 12,1 | 1,44 | 9,02 | 1,50 | - | 0,006 | 0,003 | 1,50 |
| C3** | 0,038 | 0,25 | 0,25 | 12,4 | 1,56 | 7,75 | 1,16 | - | 0,007 | 0,004 | 1,16 |
| C4 | 0,002 | 0,09 | 0,05 | 9,97 | 1,99 | 10,10 | 0,39 | 0,27 | 0,006 | 0,008 | 0,54 |
| C5 | 0,003 | 0,09 | 0,05 | 9,98 | 1,98 | 10,13 | 0,74 | 0,54 | 0,006 | 0,008 | 1,04 |
| C6 | 0,002 | 0,09 | - | 9,98 | 1,96 | 10,13 | 0,87 | 0,65 | 0,007 | 0,008 | 1,23 |

* A equação $Al + 0,56Ti$ elimina as diferenças de peso atômico entre estes elementos, principais responsáveis pelo endurecimento por precipitação.

** Após análise esta composição foi definida como a base para o novo material.

As composições da Tabela 1 foram fundidas em forno de indução à vácuo, em escala piloto – lingotes de 50 kg, com secção média de 140 mm. Os lingotes foram forjados para bitolas quadradas de 70 mm, totalizando 4 vezes de redução em área. Os materiais foram então caracterizados quanto às propriedades mecânicas e resposta ao tratamento térmico.

2.3 Resultados de Escala Piloto

Para os aços martensíticos PH, deseja-se microestrutura totalmente martensítica no estado solubilizado. Portanto, primeiramente todas as composições da Tabela 1 foram avaliadas metalograficamente, a fim de identificar a presença de ferrita delta. Em nenhuma composição esta fase estava presente.

As temperaturas de críticas de transformação também foram analisadas, como mostra a Tabela 2. Primeiramente, a temperatura AC_1 deve ser suficientemente elevada para permitir o tratamento de envelhecimento para durezas mais baixas; um valor adequado seria superior a 600 °C. Ainda, é importante que a temperatura M_f esteja acima da ambiente, para proporcionar microestrutura totalmente martensítica.

Tabela 2: Temperaturas críticas de transformação das ligas estudadas.

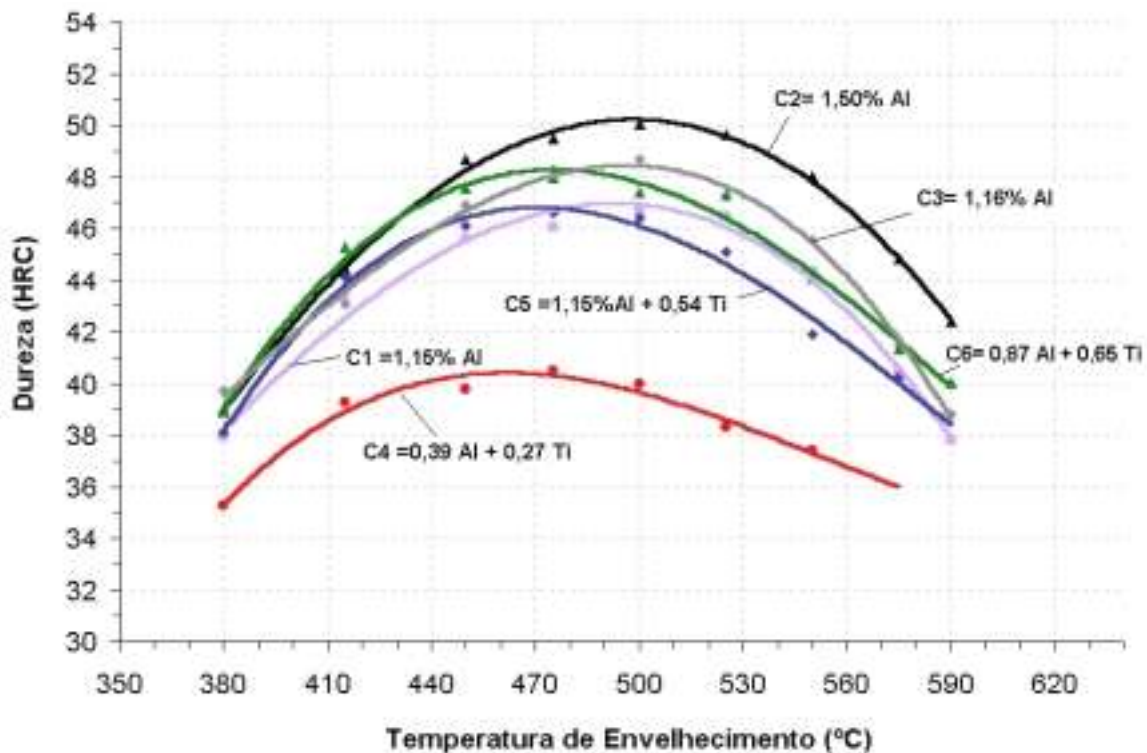
| MATERIAL | ESTADO SOLUBILIZADO | | | |
|-----------|---------------------|-------------|------------|------------|
| | AC_1 (°C) | AC_3 (°C) | M_s (°C) | M_f (°C) |
| C1 | 616 | 737 | 233 | ~25 |
| C2 | 616 | 737 | 184 | ~40 |
| C3 | 621 | 767 | 154 | ~25 |
| C4 | 582 | 762 | 209 | ~44 |
| C5 | 601 | 776 | 204 | 53 |
| C6 | 626 | 776 | 209 | ~44 |

As curvas de envelhecimento dos materiais, bem como a dureza no estado solubilizado, são apresentadas na Figura 1. A temperatura de pico é aproximadamente constante, em torno de 500°C. Abaixo desta temperatura, a dureza é limitada pelo pequeno número de intermetálicos precipitados. Contudo, acima de 500°C a dureza torna-se menor porque o efeito do coalescimento dos precipitados passa a ser predominante; assim, perdem sua eficiência no endurecimento do material.

A dureza de pico varia de 40 a 50 HRC, dependendo da composição. As composições com maior teor de Al ou Ti promovem maior dureza, pois a precipitação de intermetálicos torna-se mais intensa. Por outro lado, a dureza no estado solubilizado tem forte dependência com o teor de carbono das composições. É conhecido que a dureza da martensita (e todos aços no estado solubilizado são martensíticos) depende essencialmente do teor de carbono, explicando, assim, os valores obtidos.

O efeito do Al e Ti no endurecimento por precipitação pode ser observado em mais detalhe na Figura 2, que apresenta a dureza de pico em função desses elementos. A relação $Al + 0,56 Ti$ normaliza a diferença de massa atômica desses elementos, como já discutido. Verifica-se o aumento quase linear da dureza com o teor de Al e Ti. A exceção é a composição C3, que, devido ao maior teor de C, possui dureza

cerca de 2 HRC maior que a C2, apesar do mesmo teor de Al. Teores muito elevados de Al ou Ti, contudo, não teriam efeito benéfico. Primeiramente porque os precipitados no envelhecimento tenderiam a tornar-se mais grosseira, não sendo assim esperado aumento de dureza muito mais significativo. E, segundo e mais importante, porque podem produzir partículas grosseiras, de Al_2O_3 ou TiN, indesejáveis à propriedade de polibilidade, necessária nos aços para moldes de plástico.



Dureza no estado solubilizado:

C1: 26,0 HRC; C2: 30,9 HRC; C3: 35,3 HRC; C4: 25,3 HRC; C5: 27,2 HRC; C6: 27,4 HRC.

Figura 1: Resposta ao tratamento térmico das composições avaliadas, fundidas em escala piloto. Dureza após solubilização a 900 °C por 1h e envelhecimento na temperatura indicada por 3h. Na Tabela são dadas as durezas no estado solubilizado.

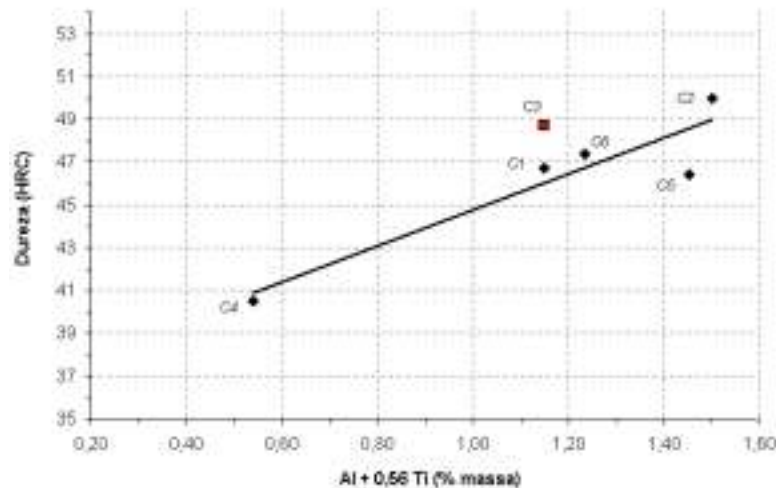


Figura 2: Dureza após envelhecimento a 500°C em função do teor de Al e Ti, em porcentagem em massa, normalizada a diferença de peso atômico pela equação $Al + 0,56 Ti$. A composição C3, pelo diferente teor de C, não foi incluída na regressão linear.

Dentre as composições estudadas, a composição C3 foi considerada a mais interessante para o novo material. Primeiramente, pelo seu menor teor de Ni, sendo o efeito austenizante deste elemento compensado pelo C. Em segundo lugar, pelo teor de alumínio não demasiadamente alto, mas com dureza de pico de 49 HRC. Isto também é promovido pelo C, que, como comentado, aumenta a dureza pelo seu efeito no endurecimento da matriz martensítica. Esta composição não possui Ti, o que também é interessante pela não formação de nitretos grosseiros prejudiciais à polibilidade.

As propriedades mecânicas também foram avaliadas, estando bem relacionadas com a dureza obtida. Na Figura 3 são apenas mostradas as propriedades da liga base do novo aço, C3. Com o aumento na dureza, nota-se aumento na resistência mecânica, mas redução das tenacidade em impacto e redução em área.

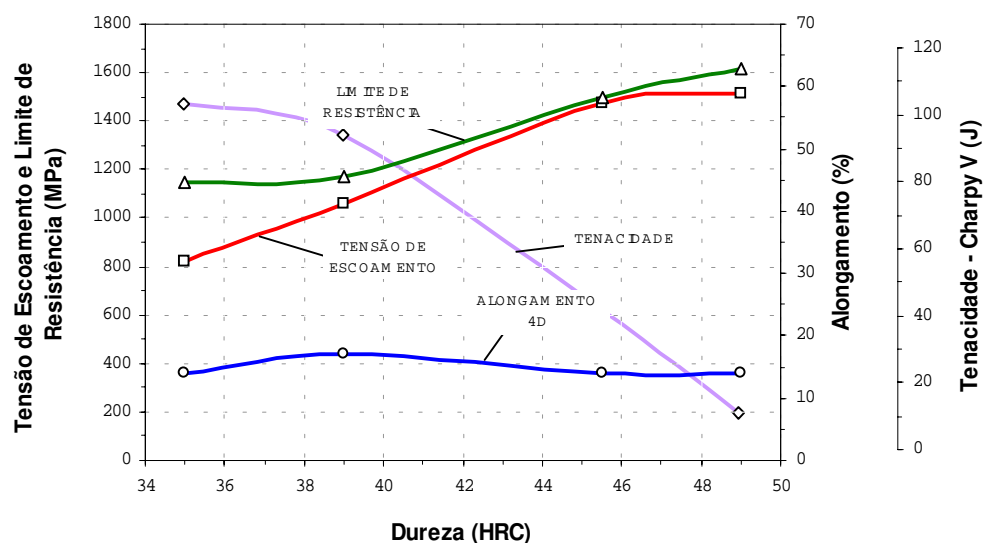


Figura 3: Propriedades mecânicas da composição C3, definida para o aço desenvolvido (VP80), em função da dureza. Resultados obtidos em teste de tração a frio e impacto Charpy com entalhe em V, para corpos de prova usinados na direção longitudinal.

3. MATERIAL PRODUZIDO EM ESCALA INDUSTRIAL

O novo material substituiu com sucesso os aços inoxidáveis da série AISI 400 utilizados em moldes de plástico, com dureza até 50 HRC. Os principais aspectos comparativos são descritos abaixo. Como discutido no item 1, ambos materiais são produzidos com refusão, para refino das microinclusões e melhoria das propriedades, especialmente da polibilidade. Tal processamento é essencial para moldes de plástico de alta solitação [1].

3.1 Tratamento Térmico

O tratamento de envelhecimento corresponde a um dos mecanismos de endurecimento de maior simplicidade quanto à prática do tratamento térmico. Como discutido nas curvas do item anterior, em temperaturas da ordem de 500 °C (para o aço em questão), seguido de resfriamento ao ar. O tratamento pode ser realizado em fornos de baixa temperatura, não exigindo meios bruscos de resfriamento como a têmpera. No aço VP80, esse tipo de tratamento térmico conduz às seguintes vantagens sobre o tratamento de têmpera e revenimento, classe em que incluem-se os aços AISI 400:

- Variação 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, pois o envelhecimento é muito mais simples que um tratamento de têmpera e revenimento.
- Redução de descarbonetação, que facilmente ocorre no aquecimento prévio à têmpera.
- A ausência de descarbonetação reduz a possibilidade de problemas de polimento, como “casca de laranja”.
- Dureza uniforme em função do diâmetro. Não depende da profundidade de têmpera. Esta característica é muito importante para usinagem em alta dureza (HSM).

A Figura 4 mostra a curva de dureza após envelhecimento do aço VP80 produzido em escala industrial. A dureza máxima obtida é de 48 a 49 HRC, próxima da dureza de trabalhos dos aços inoxidáveis martensíticos, como o aço VP420. A dureza inicial é de 35 HRC e, ao contrário dos aços martensíticos, o VP80 é inoxidável nesta condição de baixa dureza.

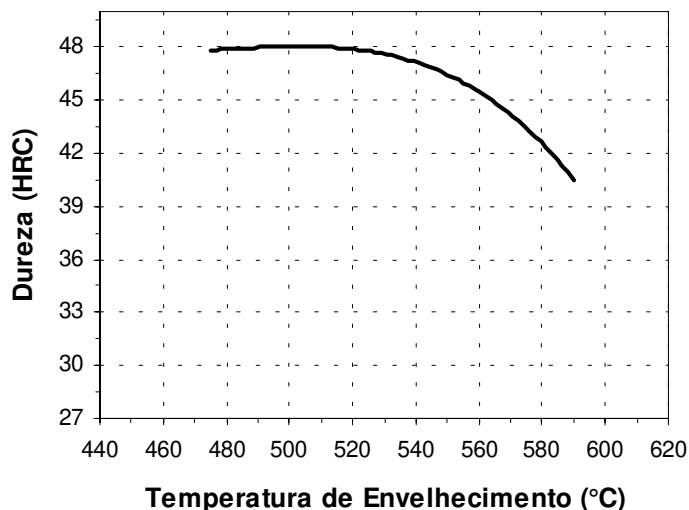


Figura 4: Curva de envelhecimento do aço VP80, produzido em escala industrial. Material envelhecido a partir da condição de fornecimento (no estado solubilizado), utilizando tempos de 3h em cada temperatura. As temperaturas abaixo de 480 °C em geral não são empregadas e, por isso, não são mostradas.

3.2 Estabilidade Dimensional e de Forma

Como comentado, uma das principais vantagens do endurecimento por precipitação é a ausência de distorções, que facilmente podem ocorrer durante a têmpera. Mesmo em cavidades complexas, a variação dimensional é uniforme e previsível. Tipicamente o VP80 apresenta uma contração uniforme de 0,007 mm/com após tratamento térmico.

3.3 Resistência à Corrosão

O aço VP80 possui alta resistência à corrosão, cerca de 60% superior à do aço AISI 420 (inoxidável martensítico), muito aplicado 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, e elimina qualquer risco de sensitização.
- O teor de 1,5% de Mo, que aumenta consideravelmente a resistência à corrosão por pites. Este mecanismo de corrosão é especialmente relevante em processos que envolvam íons cloreto, como a conformação de polímeros clorados. O número PRE, que avalia a resistência à corrosão por pites, está apresentado comparativamente na Tabela 2.

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

| | VP80 | VP420 | VP440 |
|-----------|-------------|--------------|--------------|
| Teor de C | 0,04% | 0,40% | 1,0% |
| PRE | 16,7 | 13,5 | -* |

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

3.4 Soldagem e Eletroerosão

Além da maior resistência à corrosão, o baixo teor de carbono do VP80 também gera a formação de camada branca não frágil após usinagem por eletroerosão. Este processo é comumente empregado em moldes, sendo que a baixa dureza da camada branca reduz o risco de trinca e facilita sua remoção, se necessária.

Contudo, a maior vantagem do baixo teor carbono refere-se à soldabilidade. A soldagem é muito aplicada no setor de moldes, para reparo ou mesmo mudança da peça a ser produzida. Especialmente em casos de pequenas alterações no projeto, uma prática usual é o preenchimento com solda da região a ser alterada e a re-usinagem. Assim, não é necessária nova fabricação de um molde.

Os aços temperáveis, em que se incluem os aços inoxidáveis martensíticos, têm certa dificuldade para soldagem. Formam martensita de alta dureza no resfriamento após a solda, podendo conduzir à trincas ou variações dimensionais. O mesmo não ocorre no aço VP80, tornando a operação de soldagem muito mais simples. Na soldagem do VP80, os consumíveis utilizados podem ser dos aços 17-4 PH ou 13-8 Mo. Após a soldagem, novo envelhecimento deve ser realizado. Como a dureza das regiões já envelhecidas variam pouco no segundo envelhecimento, a dureza final será uniforme nas regiões da solda e nas regiões adjacentes.

4. CONCLUSÕES

Os comentários do presente trabalho podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- As propriedades de manufatura são fundamentais nos aços para moldes de plástico e, portanto, o desenvolvimento do aço VP80 focou melhorar tais propriedades.
- O desenvolvimento do novo material teve como base os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação de alta resistência, visando dureza em torno de 50 HRC, com teor de Al abaixo de 1,15%.
- As principais diferenças do aço VP80 em relação aos aços inoxidáveis martensíticos, especialmente o AISI 420, estão relacionadas ao tratamento térmico. O tratamento de envelhecimento do VP80 reduz a tendência a trincas e distorções, sendo ainda operacionalmente muito mais simples e de menor custo que a têmpera e revenimento.
- Em termos das outras propriedades de manufatura, o aço VP80 possui alta polibibilidade e facilidade nas etapas de soldagem e eletroerosão. Em uso, possui maior resistência à corrosão, importante para processos de injeção de plásticos que sejam mais agressivos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MESQUITA, R. A. e BARBOSA, C. A. “Desenvolvimento de Aço com Usinabilidade Melhorada e Aços Endurecíveis por Precipitação para Moldes de Plástico”, **In: Anais do 1º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes**, p. 31, São Paulo, SP, Brasil, 28 a 30 de Outubro de 2003

[2] PERRY, D. C. AND JASPER, J. C., Handbook stainless steels (1978); *Structure and Constitution of Wrought Precipitation-Hardenable Stainless Steels*, pp.7.1-7.18, 1978.