



NOVO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO, DE ELEVADÍSSIMA USINABILIDADE PARA PORTA-MOLDES E MOLDES DE INJEÇÃO DE PLÁSTICOS¹

Francisco Arieta²
Wolfgang Pannes³
Michael Bauer⁴
Claudia Ernst⁵

Resumo

Há uma clara tendência no mercado de injeção de plásticos para moldes com número cada vez maior de cavidades e furos, geometrias complexas, resistência a corrosão, melhoria microestrutural e principalmente de usinabilidade quando comparado com a tradicional opção do mercado que é o aço inox martensítico resulfurado similar a norma DIN WNr. 1.2085. Com esse objetivo, foi desenvolvido um novo aço inox martensítico de elevadíssima usinabilidade. No desenvolvimento do novo aço foi utilizado o software Thermo-Calc, versão 3, em conjunto com melhoria e controle na adição de enxofre, tratamento térmico, análise por microscopia ótica e eletrônica. Assim um novo aço inox martensítico, denominado Corroplast FM, com aprox. 0.22%C, 1.60%Mn, 12,80%Cr, 0.12%S + outras adições, fornecido pré-tratado com dureza de 27-33 HRC, foi desenvolvido em escala industrial e comparado em termos de teor de ferrita delta, carbonetos primários de cromo e usinabilidade com o tradicional aço DIN 1.2085. Análise microestrutural revelou que o novo aço não apresentou ferrita delta, corroborando com as previsões e cálculos do Thermo-Calc. O Corroplast FM apresentou sulfetos de manganês bem mais globulizados, superior tenacidade e, incomparavelmente superior usinabilidade, com ganhos superiores a 200% em relação ao tradicional aço DIN 2085.

Palavras-chave: Inoxidável; Thermo-calc; Usinabilidade; Porta moldes.

NEW MARTENSITIC STAINLESS STEEL OF VERY HIGH MACHINABILITY FOR FRAMES AND MOULDS FOR PLASTIC INJECTION

Abstract

There is clear trend in the plastic injection market for moulds with an increasing number of cavities, holes, complex geometries, corrosion resistance, improved microstructure and in particular machinability when compared with the traditional martensitic and resulfurized DIN WNr. 1.2085 steel. With those aims, a new steel martensitic stainless steel has been developed. For the development, the thermodynamic software Thermo-Calc, version 3 was used together with improved control process for sulphur addition, heat treatment and optical and SEM analysis. The new steel, denominated Corroplast FM with approx. 0.22%C, 1.60%Mn, 12,80%Cr, 0.12%S + other element additions, pre-treated to hardness of 27-33 HRC has been industrially developed and compared with DIN 2085 steel in terms of delta ferrite and primary chromium carbides contents and machinability. Microstructural analysis showed that the new steel presented no delta ferrite, corroborating with the Thermo-Calc calculations. CORROPLAST FM showed much smaller, more globulized MnS inclusions, superior impact toughness and extremely higher machinability, over 200% superior than the DIN 2085 steel.

Key words: Stainless; Thermo-calc; Machinability; Frames.

¹ Contribuição técnica ao 9º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 10 e 11 de agosto de 2011, São Paulo, SP

² Membro da ABM, eng.metalurgista, PhD, Gerente Técnico da Schmolz-Bickenbach do Brasil Ltda, Rua José Antonio Valadares, 285 – CEP 04185-020, São Paulo, Brazil. Email: f.arieta@schmolz-bickenbach.com.br.

³ Gerente de Produto da Deutsche Edelstahlwerke GmbH, DEW (Schmolz & Bickenbach Group), Costumer Services Tool Steels Manager, Aue Str. 4, D-58452 Witten, Germany. Email: Wolfgang.Pannes@DEW-STAHl.com.

⁴ Assistência Técnica, Deutsche Edelstahlwerke GmbH, DEW (Schmolz & Bickenbach Group. Email: Michael.Bauer@DEW-STAHl.com

⁵ Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento Deutsche Edelstahlwerke GmbH, DEW (Schmolz & Bickenbach Group. Email: Claudia.Ernst@DEW-STAHl.com.

1 INTRODUÇÃO

Há uma clara tendência na indústria mundial de processamento de materiais plásticos por moldes cada vez maiores, com maior número de cavidades, aumento dos ciclos de injeção e em conjunto com materiais poliméricos reforçados com fibras e outras cargas minerais, pigmentos e partículas corrosivas e devido a um marketing agressivo, às constantes mudanças no formato dos produtos. Um exemplo típico dessa tendência é encontrado na indústria de embalagens de PET (*Polyethylene Terephthalate* ou Poli Tereftalado de Etileno) utilizadas no envasamento de água, refrigerantes, óleos, medicamentos, cosméticos, farmacêuticos, entre outros, e que tem mantido elevado crescimento no Brasil e exterior graças às suas características: produto leve, custo baixo, sem riscos de quebra, elevada resistência mecânica, barreira contra gases, brilho e transparência e 100% reciclável. Esse crescimento acelerado, por sua vez exigiu dos fabricantes de embalagens linhas cada vez mais produtivas, ou seja, número maior de cavidades por ciclo de injeção. Conforme pode ser visto na Figura 1, o número de cavidades de pré-formas de garrafas PET por molde, que era de 48 nos anos 1990, nos dias de hoje são de 192 cavidades.

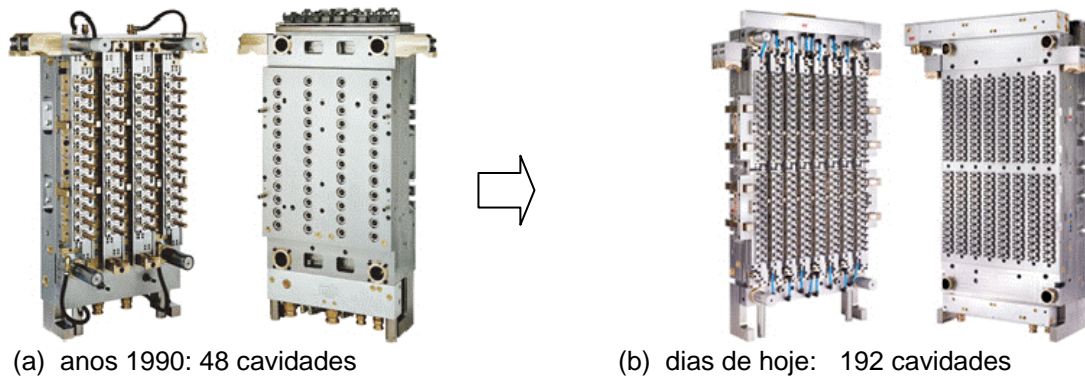


Figura 1. Evolução do número de cavidades de injeção de pre-formas de garrafas PET: (a) anos 90; (b) dias de hoje.

Por outro lado, esse aumento no número de cavidades resultou em conjuntos e super-estruturas de porta-moldes e moldes com multi-cavidades, de dimensões, complexidades geométricas e pressões de fechamento cada vez maiores, com mínimas distâncias entre cavidades para otimização de espaço em conjunto com sistemas de câmara quente mais complexos e eficientes. O resultado disso tudo é que, do ponto de vista das propriedades requisitadas nos aços utilizados, principalmente nos porta-moldes (onde se concentram a maior parte da usinagem), há clara necessidade de aços com excepcional usinabilidade, para causar mínimas tensões residuais e deformações pós-usinagem, adequada condutibilidade térmica e tenacidade, ótima homogeneidade microestrutural, de dureza e de propriedades mecânicas, aliado com suficiente resistência a compressão, resistência ao desgaste e resistência a corrosão. Este último requisito se faz necessário tanto nas cavidades e machos como também nos porta-cavidades e sistemas de câmara quentes para evitar a geração de sub-produtos de corrosão gerados, como por exemplo, devido à condensação de água advinda de sistema de refrigeração com água gelada e assim contaminar as regiões de cavidade.

Tradicionalmente, os aços inoxidáveis martensítico da família AISI 420 ou DIN WNr. 1.2083, tem sido usado tanto nas cavidades como em porta-cavidades. Normalmente nas cavidades e machos requisitando polimento superior, utilizam-se os aços da família AISI 420 (e similares) em versões refundidas (VAR ou ESR). Já



para os porta-cavidades e câmara quentes, até os anos 90, a versão resulfurada do AISI 420, i.e., o AISI 420FM ou seu similar, DIN X 33CrS16 WNR 1.2085 (para simplificação será mencionado no texto como DIN 2085) era ainda muito utilizada. Porém esses aços, devido combinação dos níveis de C e Cr, junto com a temperatura típica de conformação, geram porcentagem significativa de ferrita delta resultando em variação microestrutural e limitada tenacidade. Em muitas aplicações, com usinagem pesada e mais complexa, mesmo com o enxofre adicionado, é muito comum ocorrer significativa distorção após usinagem. Assim, no começo dos anos 2000⁽¹⁻³⁾ foi desenvolvida uma nova família de aços inox martensíticos com teores de cromo e carbono mais baixos e adições de Cu, Ni, N, e outros elementos, resultando em melhoria significativa de usinabilidade, tenacidade, estabilidade dimensional e resistência à corrosão em relação ao DIN 2085. Apesar disso e objetivando uma melhora ainda mais significativa na microestrutura, usinabilidade e propriedades mecânicas em relação ao obsoleto DIN 2085, a usina Deutsche Edelstahlwerke (DEW) da Alemanha e pertencente ao grupo Schmolz-Bickenbach, desenvolveu o novo aço inoxidável denominado de Corroplast FM.

Neste trabalho estão mostrados a metodologia utilizada no desenvolvimento do Corroplast FM e os resultados e comparação de sua usinabilidade, propriedades mecânicas, tenacidade e corrosão em relação ao tradicional aço inox martensíticos resulfurado DIN 2085.

2 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O projeto de desenvolvimento do novo aço teve os seguintes objetivos:

- características básicas: aço inoxidável, martensítico, resulfurado, que apresente similar resistência mecânica, condutibilidade térmica e corrosão, porém significativamente superior usinabilidade do que o tradicional aço DIN2085, normalmente fornecido beneficiado (faixa típica de 270-325HB);
- que apresente uniformidade de propriedades físicas, químicas e microestruturais por toda a seção das barras testadas; e
- que atinja no mínimo 10 joules em teste de impacto, corpo de prova sem entalhe e dimensões de 7 x 10 x 55 mm, retirados do centro, no sentido transversal da placa de teste e mínimo de três corpos de prova.

Para atingir os objetivos acima, o departamento de pesquisas e desenvolvimento da Deutsche Edelstahlwerke (DEW), em Witten, Alemanha, utilizou da seguinte metodologia:

- uso do software Thermo-Calc (versão 3) para levantamento de fases de equilíbrio em função do teor de C, Cr, Ni, N, S e outros elementos e da temperatura, com objetivo minimizar a fração volumétrica de ferrita delta aliado com adição de enxofre para melhoria de usinabilidade;
- fusão e conformação mecânica em escala reduzida (30 toneladas);
- fusão em escala industrial (130 tons); e
- avaliação de propriedades mecânicas e testes de usinabilidade.

2.1 Projeto de Liga e Simulações via Thermo-Calc

O projeto da nova liga se baseou no aço tradicional DIN 2085 que apresenta a faixa de composição mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável DIN 2085

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	Dureza
-----	---	----	----	----	----	---	--------



DIN	AISI							Tipica (HB)
2085	~420 FM	0,28 0,38	Max 1,00	Max 1,40	15,0 16,0	Max 1,00	0,05 0,10	280-325

O aço DIN 2085 é um aço inox martensítico, normalmente fornecido no estado beneficiado 280-325HB e sendo resulfurado, apresenta boa usinabilidade quando comparado com outros aços inox martensíticos tradicionais, sem adição de enxofre como o DIN 2083 (~AISI 420) ou o DIN 2316. Porém, sendo resulfurado, o DIN 2085 tem aplicação limitada à porta-moldes, sistema de câmara quente e outras aplicações onde se exige um aço inox martensítico sem requisitos de alto brilho ou polibilidade elevada.

É comum em lingotes de grandes dimensões dos aços inox martensíticos tradicionais como DIN 2083, DIN 2085, DIN 2316, e outros apresentarem heterogeneidades microestruturais como segregação de carbonetos de cromo do tipo $M_{23}C_6$ e a presença da fase ferrita delta. Esta última é bastante prejudicial quando presente tanto na temperatura de conformação a quente⁽⁴⁾ assim como no produto final, especialmente na tenacidade nas direções transversais assim como na usinabilidade. Embora seja mais dúctil e mole do que uma matriz martensítica revenida, a ferrita delta dissolve pouco carbono e uma vez presente, seus contornos de grão servem de sítios para precipitação de carbonetos e nitretos que serão pontos de descontinuidade afetando a usinabilidade e tenacidade da matriz.⁽⁵⁾

Assim do ponto de vista de projeto de liga, a eliminação ou minimização de ferrita delta foi considerada essencial neste projeto. Embora quanto maior o lingote maior a probabilidade de geração de ferrita delta devido à segregação e falta de difusão (e que podem ser minimizada via tratamentos de recozimento a temperaturas elevadas e tempos longos ou através do uso de processos secundários de refino como refusão em arco sob vácuo ou eletro-escória), a melhor opção do ponto de vista metalúrgico de processo é através do aumento no teor de elementos austenitizantes como carbono, nitrogênio, níquel, manganês e outros que expandem a lupa austenítica para um determinado teor de cromo.

Mais recentemente, aumentou-se muito o número de trabalhos técnicos de desenvolvimento de aços inoxidáveis martensíticos através de simulações numéricas com programa Thermo-Calc e com isso foram levantados diagramas de equilíbrio para novas composições⁽⁶⁾ variando os teores de cromo, carbono, nitrogênio, níquel junto com adição de enxofre, objetivando-se basicamente expandir o campo austenítico e diminuir o campo bifásico austenita-ferrita. Com isso, durante as etapas de conformação a quente e tratamento térmico, se consegue microestruturas sem a presença deletéria de ferrita delta no produto final.

3 RESULTADOS

3.1 Simulações com o Programa Thermo-Calc

As simulações com o Thermo-Calc identificaram como melhor alternativa o aço com a composição química nominal que pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do novo aço inox martensítico

Novo Aço Inox Martensítico Resulfurado	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	S
	0,22	0,30	1,60	12,8	+	+	0,12

Na Figura 1a, pode ser vista parte do diagrama de equilíbrio do aço convencional DIN 2085 e na Figura 1b e do novo aço desenvolvido.

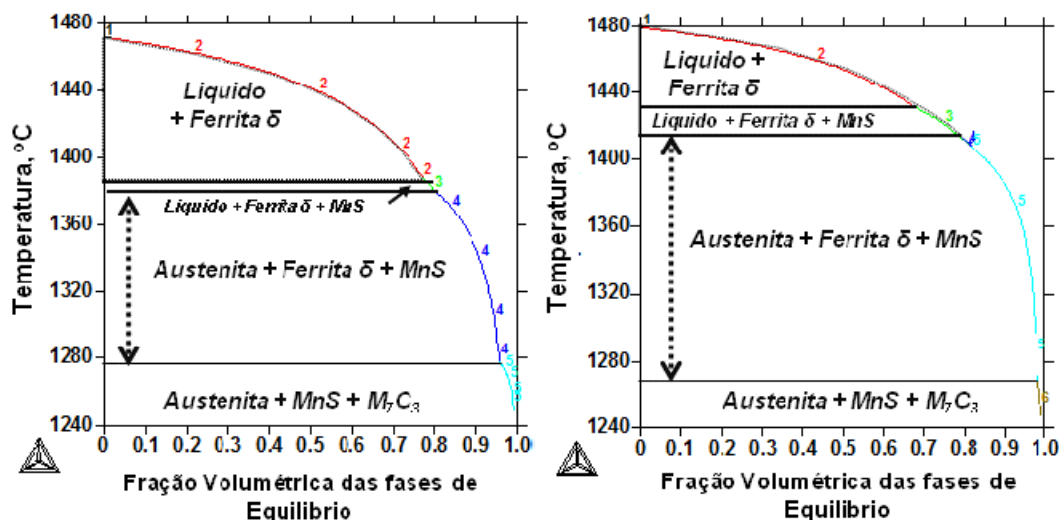


Figura 1. Diagrama temperatura em função da fração volumétrica de fases de equilíbrio para as ligas: (a) DIN 2085; (b) novo aço desenvolvido.

Como pode ser visto, para a liga convencional DIN 2085 sua solidificação se inicia com a formação da ferrita delta à aproximadamente 1.470°C enquanto que para nova liga se inicia à 1.480°C. A maior diferença é no final da solidificação e início da formação da austenita que ocorre a temperaturas mais altas com a nova liga, ou seja, à aproximadamente 1.420°C e à 1.380°C para a liga convencional DIN 2085.

Na Figura 2a estão mostrados, simultaneamente, os diagramas de fases em função da temperatura e teor de carbono para a liga convencional DIN 2085 (com linhas hachuradas delimitando os campos das fases) e para a nova liga (com linhas contínuas).

Na Figura 2b está em destaque a faixa de temperatura de 950°C-1.250°C, tipicamente utilizada durante as etapas de conformação mecânica a quente desses aços. Como pode ser observado na Figura 2b, enquanto que com o aço tradicional DIN 2085, devido ao seu pequeno campo monofásico austenítico, somente para ligas com teores de carbono no limite superior (0,38%) e temperaturas de conformação a quente mais altas, se evitaria adentrar no campo bifásico austenita-ferrita delta. Por outro lado, devido ao seu campo austenítico bastante expandido, com o novo aço desenvolvido, a conformação a quente pode ser garantidamente executada dentro do campo monofásico austenítico evitando a assim a presença de ferrita delta no produto final forjado e/ou laminado a quente.

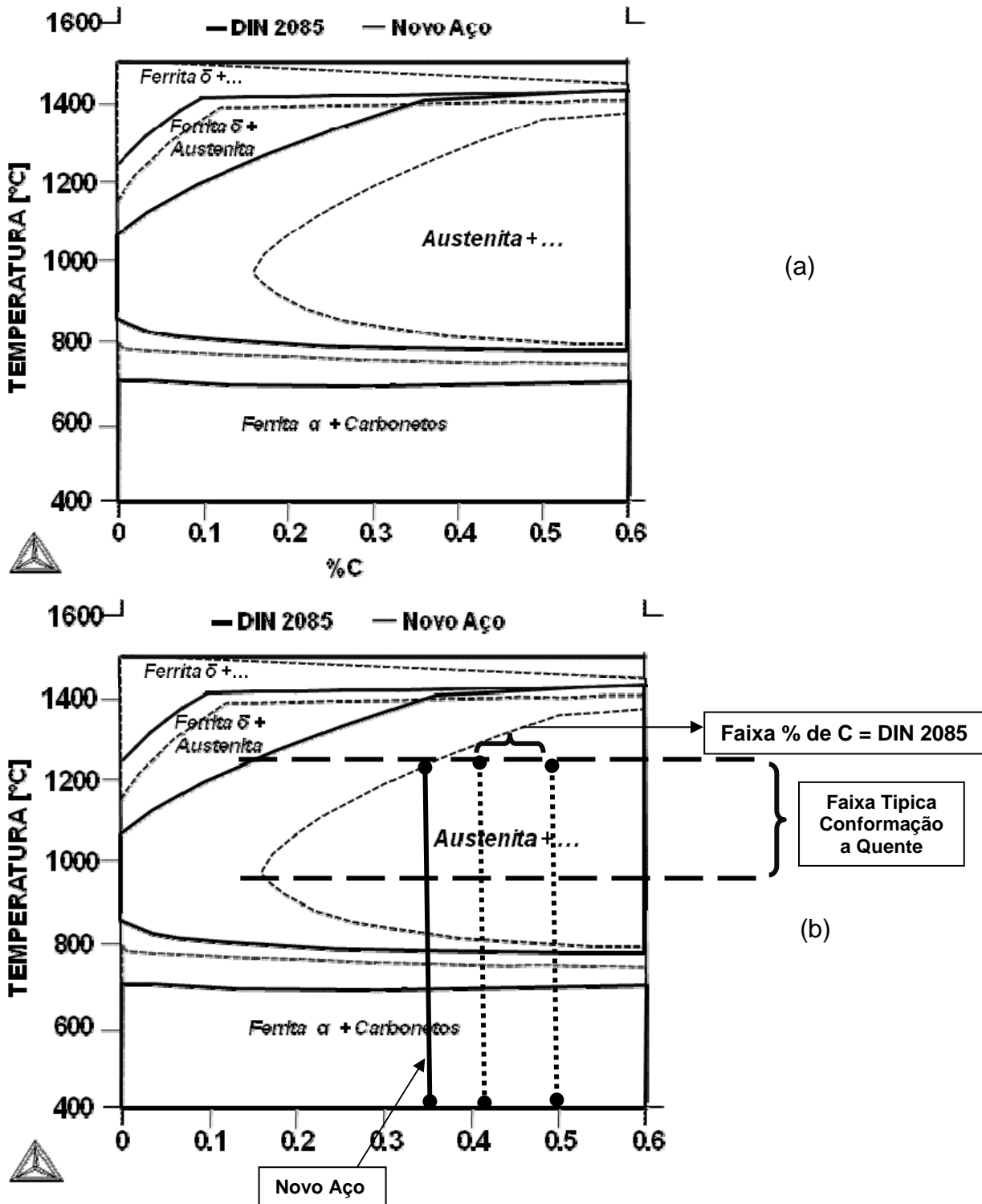


Figura 2 . (a) Diagrama de equilíbrio de fases (linhas hachuradas) do aço martensítico resulfurado DIN 2085 e do no aço desenvolvido (linhas contínuas) em função do teor de carbono; (b) ibid anterior, com destaque da faixa típica de conformação a quente e sua interseção com teor de carbono do novo aço desenvolvido (0,22%) e faixa de carbono (0,28-0,38%) do DIN 2085.

3.2 Análise Microestrutural

Na Figura 3 podem ser vistas microestruturas típicas retiradas do centro de barras laminadas com 115 mm de espessura x 1.000 mm de largura do aço convencional DIN 2085 e do novo aço inox martensítico:

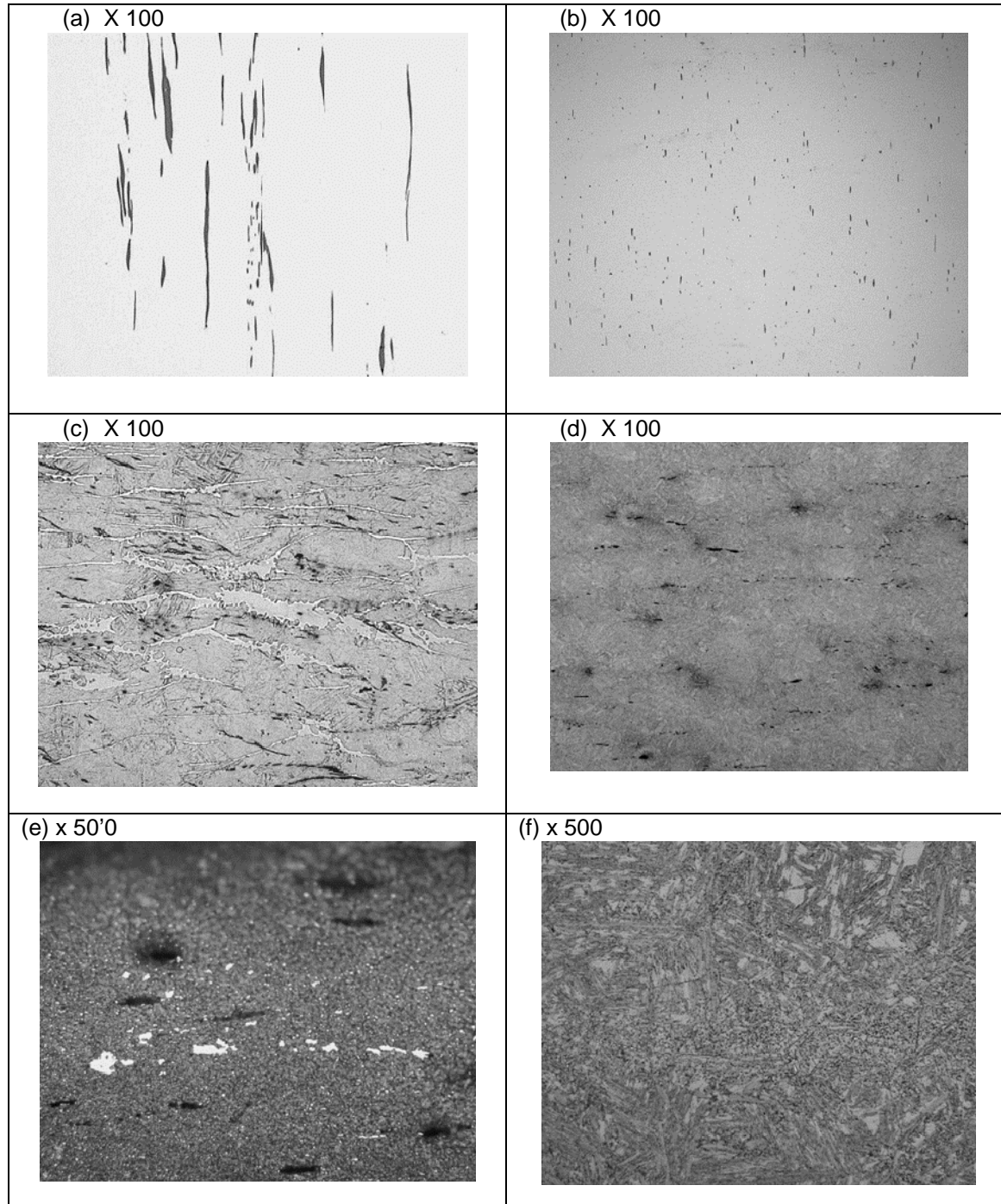


Figura 3. Microestruturas típicas: (a,c,e) aço 2085; (b,d,f) = novo aço.

Como pode ser visto na Figura 3 (a,c,e) para o aço convencional DIN 2085 no estado beneficiado, é evidente a presença de ferrita delta, as inclusões de MnS são bastante alongadas e há presença de carbonetos primários. Por outro lado, na Figura 3 (b,d,f) com o novo aço, não é observado a presença de ferrita delta, as



inclusões de sulfetos são muito mais finas e esféricas, não é observado a presença de carbonetos primários ou seja, uma microestrutural muito mais favorável do ponto de vista de propriedades mecânicas e de tenacidade. Em termos de ferrita delta, os resultados da análise microestrutural corroboraram com os cálculos termodinâmicos via Thermo-Calc.

3.3 Dureza e Tenacidade

Medições de dureza realizadas a 3 mm da superfície e de 10 mm em 10 mm foram realizadas na secção transversal da barra laminada com 115 mm de espessura x 1.000 mm de largura e, após tratamento térmico de tempera revenimento, mostraram uma dureza média de 27 HRC. O valor de dureza está dentro da faixa utilizada pelos principais fabricantes internacionais de porta moldes e sistema de câmara quente e foi considerado apropriado para os testes de usinabilidade cujos resultados estão mostrados na secção posterior.

Testes de impacto foram realizados de acordo com a norma alemã Stahl-Eisen-Prüfblatt (SEP 1314), utilizando corpos de prova sem entalhe de dimensões de 7 mm x 10 mm x 55 mm com o martelo impactando sob a face 10 mm x 55 mm. Os corpos de prova foram fresados e retificados com precisão dimensional de $7,0 \pm 0,1$ x $10 \pm 0,1$ x 55 ± 1 mm e ± 10 minutos nos lados adjacentes de 90° . Os corpos de prova apresentavam rugosidade superficial $R_a \leq 1,6 \mu\text{m}$ na face 10 mm x 55 mm e $R_a \leq 3,2 \mu\text{m}$ na face de 7 mm x 55 mm. Os corpos de prova foram retirados com o seu comprimento paralelo ao sentido da espessura da chapa de 115 mm e no centro da secção transversal. Três corpos de prova foram testados e o resultado encontrado foi de 14 joules, ou seja, bem superior ao valor mínimo de 5 joules, normalmente requisitado em aços inox martensíticos dessulfurados como DIN 2085.

4 DISCUSSÃO

Uma vez que uma microestrutura isenta de ferrita delta, constituída de sulfetos finos e mais globulizados, em conjunto junto com uma dureza e tenacidade compatível com os requisitos para aços inox martensíticos e muito utilizados em porta moldes, sistemas de câmara quente e muitas outras aplicações exigindo um aço inox martensítico de elevada usinabilidade, o principal objetivo deste desenvolvimento de liga seria acessar e comparar sua usinabilidade com o tradicional aço DIN 2085. Assim sendo foram utilizados duas etapas de testes de usinabilidade: uma etapa preliminar com testes em laboratório e uma etapa com testes em escala industrial utilizando equipamentos de última geração.

Nos testes iniciais em laboratório, o objetivo foi executar um número máximo de cavidades retangulares nas dimensões de 2 mm x 100 mm x 115,5 mm e calcular o volume de cavacos removidos de placas laminadas, tratadas termicamente na dureza informada anteriormente e pré-desbastadas nas dimensões de 2 mm x 215 mm x 480 mm para ambos os materiais, i.e., o aço convencional DIN 2085 e o novo aço desenvolvido. Utilizando inserto de metal duro tipp SEKO HM revestido, o número máximo de cavidades e volume removido era atingido quando um desgaste de 0,35 mm era detectado no inserto.

Os resultados dos testes de laboratório mostraram que quando se usinou o aço convencional DIN 2085, foi removido um volume de 517 cm^3 de cavacos enquanto com o novo aço desenvolvido foi conseguido remover um volume de 1.196 cm^3 , ou seja, um volume 130% superior.



Do resultado preliminar em laboratório se partiu para testes de usinabilidade (fresamento facial, fresamento helicoidal, furação) em escala industrial em centro de usinagem MAG Huller Hille, modelo Bluestar 6, potência de 27 KW, direção de fresamento horizontal, máxima rotação de 10.000 RPM e fluido refrigerante SK 50. Os tipos de insertos e parâmetros de usinagem utilizados podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros e tipo de operação de usinagem utilizados nos testes de usinabilidade

Parâmetro	Fresamento Facial	Fresamento Helicoidal	Furação
Ferramenta	Ø 45 mm	Ø 25 mm	Ø 18,5 mm
Inserto	KP40 Besch	K15	VHM
Produtor	Depo	Safety	Guhring
Veloc. (m/min)	160	80	80
Avanço (mm)	0,80	0,40	0,30
Prof. Corte (mm)	2,5/3,5	5 /10	55
Largura do Corte	-	25	18,5
Meio Refrigerante	Não	Não	Sim
Estabilidade da Máquina	OK	OK	OK

Os resultados mostraram que na operação de furação, o novo aço desenvolvido apresentou um ganho de mais de 200% em relação ao DIN 2085, na operação de desbaste o ganho foi superior a 178% e na operação de fresa de acabamento o ganho foi superior a 160%.

Os resultados de usinabilidade alcançados com o novo aço inox martensítico e resulfurado, denominado de Corroplast FM são excepcionais e deverão atender o mercado de moldes exigindo aço inox martensíticos onde não aja requisito de elevada polibilidade, como por exemplo, na indústria de porta-moldes e sistema de câmara quente de ótima geração.

Preliminares testes com exposição à umidade revelaram ainda que o aço Corroplast FM apresentou resistência à corrosão superior ao DIN 2085. Segundo Breitler e Mayerhoffer,⁽⁷⁾ a presença de ferrita delta e consequente geração de interface com a matriz martensítica atuam como ponto de corrosão acelerada. Como o aço Corroplast FM não apresentou ferrita delta em sua microestrutura essa pode ser uma explicação plausível. Porém testes de corrosão estão sendo realizados para investigação em maior profundidade para comparar a resistência à corrosão do novo aço Corroplast FM e o aço DIN 2085.



5 CONCLUSÕES

- Foi desenvolvido um novo aço inoxidável martensítico, denominado de Corroplast FM, com aproximadamente 0,22%C 12,8%Cr 1,60 Mn 0,12% mais adições de Ni e N;
- Quando comparado com o tradicional aço inox martensítico resulfurado DIN 2085, o Corroplast FM não apresentou em sua microestrutura a presença de ferrita delta, corroborando com as simulações e cálculos de termodinâmica computacional realizados com o programa Thermo-Calc;
- Quando comparado com o aço inox martensítico DIN 2085, o Corroplast FM apresentou microestrutura com sulfetos de manganês bem mais finos e mais globulizados;
- Quando comparado com o aço inox martensítico DIN 2085, o Corroplast FM apresentou superior tenacidade em testes de impacto sem entalhe;
- Quando comparado com o aço inox martensítico DIN 2085, o Corroplast FM apresentou usinabilidade substancialmente superior.

REFERÊNCIAS

- 1 ERNST, C.; PANNES, W., Optimized Steel Selection for Applications in Plastic Processing. In: BERGSTRÖM, J.; FREDRIKSSON, G.; JOHANSSON, M.; KOTIK, O. (Ed.): The Use of Tool Steel : Experience and Research, **Proceed. 6th Int Tooling Conference**, Karlstad University, Sweden, p. 271-287, September, 1st-13th, 2002.
- 2 HENN, E.; FRIEDRICH, R.J.; GUSCOTT, M.A., **Patente Nº 6.358.334 B4**, 19/03/2002.
- 3 SAMMT, K.; SAMMER, J.; GECKLE, J. Development Trends of Corrosion Resistant Plastic Mould Steels. In: BERGSTRÖM, J.; FREDRIKSSON, G.; JOHANSSON, M.; KOTIK, O. (Ed.): The Use of Tool Steel : Experience and Research, **Proceed. 6th Int Tooling Conference**, Sweden, p. 285-292, September, 1st-13th, 2002.
- 4 CARDOSO, P.H.S; KWIETNIEWSKI, C.; PORTO, J.P., REGULY, A.; STROHAECKER, T.R.; The Influence of Delta Ferrite in the AISI 416 stainless hot workability. **Materials Science and Engineering A**, v. 351, p. 1-8, 2003.
- 5 LAGE, M.L.; BARBOSA, R.A.N.M., DE CARVALHO, R.N. Emprego da Termodinâmica Computacional e da Metalografia na Quantificação de Ferrita Delta em Aço DIN EN X20Cr13, **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, São Paulo**, v.6, Nº.3, p. 125-129, Jan-Março, 2010.
- 6 ZINNER, S.; PERKO, J.; A Pre-hardened Plastic Mould Steel with Higher Hardness. In: BEISS, P.; BROECKMANN, C.; FRANKE, S.; KEYSSELITZ, B. (Ed.) Tool Steel – Deciding Factor in Worldwide Production, **Proceedings of the 8th Int Tooling Conference**, RWTH Aachen University, Germany, p. 13-23, June 2-4, 2009.
- 7 BREILER, R.; MAYERHOFER, J.; Superclean Tool Steels for TV-Panel Production. In: BERNS, I.H.; HINZ, H-Fr.; HUCKLENBROICH, I.M. In: Progress in Tool Steels (Ed.), **4th Tooling Conference**, Ruhr University Bochum, Germany, p. 287-296, Sept 11-13th, 1996.