

ADEQUAÇÃO DE UMA FAMÍLIA DE AÇOS PARA PRODUÇÃO DE PERFIS ELETRO-SOLDADOS PARA O ATENDIMENTO DA NORMA BRASILEIRA DE PROJETO DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS¹

Willy Ank de Moraes²
Herbert Christian Borges³
Anderson Nascif de Almeida⁴
Bruno Medeiros de Almeida⁵
Edmar Santos Martha⁵

Resumo

Este trabalho descreve a criação e adequação de um aço estrutural de alta resistência, utilizável na fabricação de perfis eletro-soldados. Além de atender aos requisitos do processo de produção de perfis conforme norma NBR15279, o aço deve gerar um perfil que também atenda à norma NBR 8800 para o projeto de estruturas. O projeto do aço foi inicialmente obtido a partir de um modelo matemático recentemente desenvolvido e usado como referência para o projeto e produção de uma versão do aço ASTM A570 Gr. 50 Tipo 1 e 2, especialmente para este produto. O acompanhamento feito ao longo de um semestre permitiu o refino e otimização deste projeto, quantificando o papel real dos parâmetros de produção do aço no seu desempenho mecânico. Juntamente com a recente incorporação da nova família de aços patináveis do sistema Usiminas este desenvolvimento está permitindo a ampliação da produção e comercialização deste novo produto. Adicionalmente este trabalho gerou subsídios para revisar a norma NBR 8800 de projeto de estruturas metálicas e uma série de normas associadas com a especificação de aços estruturais patináveis (com maior resistência à corrosão atmosférica) para construção civil: NBR5008/5920/5921.

Palavras-chave: Desenvolvimento de novos produtos; Aço estrutural; Laminados planos de aço; Perfis estruturais.

ADAPTATION OF A STEEL FAMILY TO PRODUCTION OF ERW STRUCTURAL SHAPES FOR ATTENDANCE TO DESIGN OF STEEL AND COMPOSITE STRUCTURES FOR BUILDINGS STANDARD

Abstract

This work describes the creation and adaptation of a high strength structural steel appropriate to ERW structural shapes production. Besides attending to the requirements of the standard of shapes production, according to NBR 15279, the developed steel should generate a product that also attending to the standard NBR 8800 used to structural project. The design of steel started from a mathematical model recently developed and used as a reference to production ASTM A570 grade 50 Type 1 and 2 structural steel special version for this product. The performance of this steel was accompanied during a semester what allowed an improvement in its project, by qualifying more deeply the production parameters-performance in use relationship. Jointly with the recent incorporation of the new family of weatherable steels, the described development has been allowing ERW structural shapes to grow in production and market. Besides, this work generated subsidies to revise NBR 8800 and a series of specification standards associated with weatherable steels: NBR 5008/5920/5921.

Palavras-chave: Development of new products; Structural steel; Hot strip steel; Structural shapes.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Doutorando, Mestre em Eng^a Met. e de Materiais, Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Analista de Produtos (Desenvolvimento de Novos Produtos) da COSIPA; Prof. do Depto. de Engenharia Mecânica da UNISANTA (willymoraes@cosipa.com.br; willyank@unisanta.br).

³ Mestrando em Eng^a Metalúrgica. Analista de Produtos (Assistência Técnica) da COSIPA (herbertborges@cosipa.com.br).

⁴ Gerente da Unidade de Perfis Eletro-soldados do Sistema Usiminas (andnascif@usiminas.com.br).

⁵ Técnico de Qualidade da Unidade de Perfis Eletro-soldados do Sistema Usiminas.

INTRODUÇÃO

Diferente do perfil Usilight, criado em 1999, os perfis eletro-soldados lançados recentemente pelo Sistema Usiminas são produzidos com novas características. Dentre estas se destaca a sua elevada resistência mecânica, oriunda do uso de um novo aço estrutural, da classe ASTM 50 ($\sigma_{ys} \geq 345\text{MPa}$). Porém este aço também deve apresentar outras características especiais, necessárias para otimizar o processo de produção dos perfis, e também para oferecer as características mecânicas necessárias para o projeto das estruturas e conseqüentemente para a aplicação final.

Nos perfis eletro-soldados, as juntas soldadas são feitas por solda elétrica de alta freqüência (eletrofusão) e devem ser aprovadas em rigorosos testes mecânicos exigidos pela NBR 15279.^[1] Assim o próprio processo de produção, ilustrado na Figura 1, limita o carbono equivalente (%Ceq) do aço empregado, o que garante uma ótima soldabilidade não só na fase de produção do perfil, mas também na sua utilização final. Entretanto este importante requisito dificulta o projeto do aço quando se considera o conjunto dos demais requisitos.

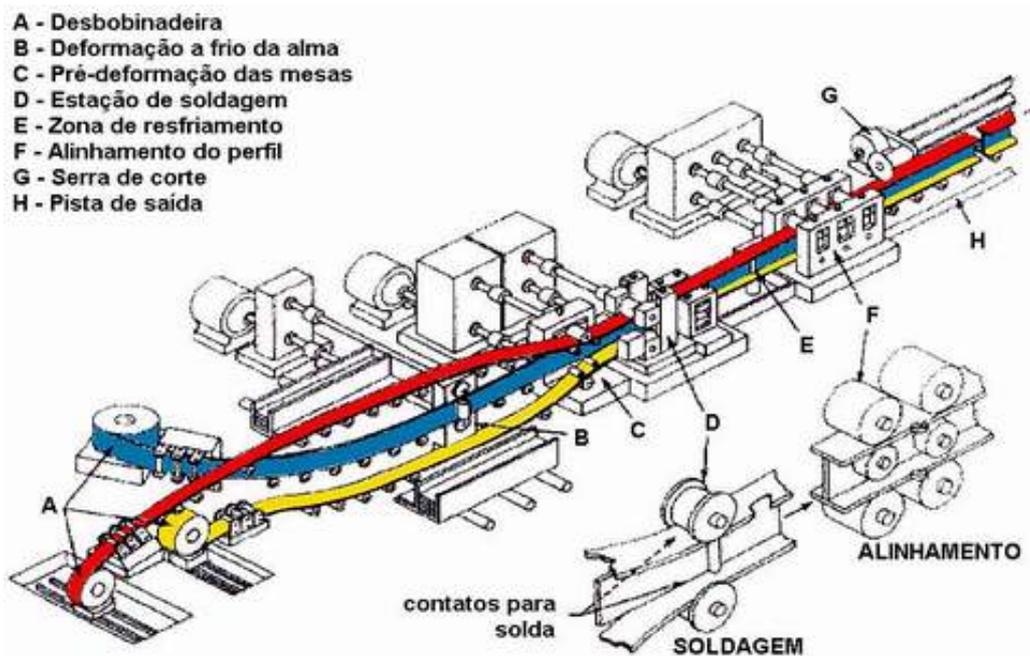


Figura 1 – Esquema de produção dos perfis eletro-soldados da planta de Taubaté.

Para o uso dos perfis é desejável uma resistência mecânica homogênea, com uma pequena amplitude de variação. Além de oferecer uma maior homogeneidade nas propriedades do produto e assim facilitar a sua aplicação, esta característica é desejável especialmente caso a estrutura seja solicitada em condições críticas, onde os perfis devem se deformar plasticamente antes da falha das juntas (soldadas ou parafusadas) entre estes.

Similarmente uma plasticidade mínima do material é desejável para evitar a colapsibilidade da estrutura. No caso em particular do uso da norma de cálculo NBR 8800,^[2] um valor mínimo da relação elástica (σ_{uts}/σ_{ys}) é solicitado para valer as considerações de cálculo desta norma. Este requisito é mais simples de ser atendido com aços de resistência mecânica normal, do nível ASTM 36 ($\sigma_{ys} \geq 250\text{MPa}$). Porém

a garantia de uma elevada relação elástica (σ_{uts}/σ_{ys}) é desafiadora para aços de alta resistência mecânica, especialmente quando também é necessário um baixo teor de carbono equivalente, como é o caso em questão.

Este artigo apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento de um aço estrutural, adequado para ser aplicado na produção de perfis eletro-soldados. Estão descritos os principais resultados de desempenho deste aço e a evolução destes resultados ao longo do último semestre, durante o qual foram realizados ajustes finos no projeto de liga e de fabricação do aço, visando melhorar ainda mais a vocação dos perfis deste aço para o uso em estruturas metálicas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto do aço foi inicialmente concebido a partir de um modelo matemático recentemente desenvolvido na Cosipa^[3] e usado como referência para o projeto e produção de uma versão do aço ASTM A570 Gr. 50 Tipo 1 especialmente para esta aplicação. A norma ASTM A572^[4] foi escolhida como guia para a especificação deste aço por duas razões principais: por ser um dos aços estruturais mais utilizados no mundo e por permitir uma relativa liberdade para o projeto de liga. Além deste enquadramento, foi também buscado o atendimento da norma COS CIVIL 350,^[5] cujo limite de escoamento ($\sigma_{ys} \geq 350\text{MPa}$) é similar à ASTM A572 Gr. 50, porém com um limite de resistência mais elevado ($\sigma_{uts} \geq 500\text{MPa}$). A Tabela 1 apresenta uma comparação dos requisitos das duas normas de aço estrutural e as características de referência para o aço adaptado.

Tabela 1 – Resumo dos requisitos dos aços para material estrutural até 12,50mm de espessura.

AÇO	%Cmáx	%Mn	%Pmáx	%Smáx	%Simáx	%Almín	%ΣMicro	σ_{ys} mín (MPa)	σ_{uts} mín (MPa)	Along (3)
ASTM A572 Gr.50 (padrão)	0,23	0,50 a 1,35 (1)	0,040	0,050	0,40	-	0,005 a 0,15 (2)	345	450	19%
COS CIVIL Gr. 350 (padrão)	0,20	0,60 a 1,60	0,030	0,025		0,015	0,010 a 0,050	350	490	19%
Aço perfil eletro-soldado	0,18	0,60 a 1,35	0,025	0,020 (4)	0,30	0,020	0,020 a 0,045	Ver Tabela II		

(1) Espessuras menores ou iguais a 9,52mm.

(2) Pode conter adições dos elementos Nb, V, Ti, Mo.

(3) Base de medida $L_0=50\text{mm}$ em (CP retangular com seção reta com 12,5 x espessura).

(4) Objetivado máximo 0,010%S.

A norma NBR 15279 requisita um carbono equivalente máximo de 0,45%, porém a necessidade de melhorar a produtividade da linha de fabricação de perfis (vide Figura 1) e a necessidade do oferecimento de um produto com ótima soldabilidade no uso final fez com que o teor de carbono equivalente fosse limitado a 0,40% C_{eq} no projeto do aço. A maior dificuldade imposta pela limitação no teor do carbono equivalente foi a obtenção de uma relação elástica (σ_{uts}/σ_{ys}) mais elevada, tal com exigida pela NBR 8800.

Uma relação elástica elevada só pode ser obtida em aços de alta resistência normalmente ou com incremento no valor do carbono equivalente^[6] e/ou pela adição de elementos microligantes não convencionais e de maior custo.^[7] Porém estas práticas têm um impacto negativo sobre a soldabilidade e sobre o custo final do perfil. Assim a solução foi experimentar e desenvolver um projeto de liga

diferenciado, com emprego de elementos microligantes adequados, mas que não encareçam o custo final do material.

Por outro lado, em aços e elementos estruturais de alta resistência mecânica as normas internacionais, como, por exemplo, a ASTM A709,^[8] A992^[9] e A1026,^[10] requisitam uma relação elástica mais baixa ($\sigma_{uts}/\sigma_{ys} \geq 1,18$) do que a atualmente exigida pela NBR 8800 ($\sigma_{uts}/\sigma_{ys} \geq 1,25$). Em casos excepcionais, como na norma ASTM A1043,^[11] é solicitada uma relação elástica tão elevada quando na NBR 8800 ($\sigma_{uts}/\sigma_{ys} \geq 1,25$). Porém neste último caso é permitido um teor de carbono equivalente mais elevado de 0,45%Ce_q, que é favorável a obtenção desta propriedade,^[6] porém prejudicando a soldabilidade do produto.

Assim, ao longo do desenvolvimento deste trabalho e de posse dos primeiros resultados, foi solicitada ao comitê de revisão da NBR8800 a diminuição do limite mínimo da relação elástica, para aços de alta resistência mecânica: de $\sigma_{uts}/\sigma_{ys} \geq 1,25$ para $\sigma_{uts}/\sigma_{ys} \geq 1,18$. Esta alteração deixou a norma brasileira similar às normas internacionais, viabilizando a produção e utilização de perfis, não só eletro-soldados, que apresentem menor custo e maior soldabilidade.^[12]

Desta forma, considerando o conjunto das características descritas, adotou-se como objetivo o desenvolvimento de uma versão do ASTM A572 Gr. 50 com as características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo dos requisitos dos aços para material estrutural até 12,50mm de espessura e das características objetivadas no aço do perfil eletro-soldado.

	%Ce _q máx	σ_{ys} mín (MPa)	σ_{ys} máx (MPa)	σ_{uts} mín (MPa)	(σ_{uts}/σ_{ys}) mín	Patinável
ASTM A572 Gr.50 (aço)	–	345	–	450	–	–
NBR 15279 (produção)	0,45	–	–	–	–	–
NBR 8800 (projeto estruturas de edifícios)	–	≤ 450 (nominal)	–	–	1,25 (anterior) 1,18 (revisão)	–
AÇO DO PERFIL ELETRO-SOLDADO (visado)	0,40	350	450	500	1,18 (objeti- vado 1,25)	Sim

O desenvolvimento foi feito em duas etapas, nas quais foram testadas formulações de aços com pequenas diferenças na composição química visando verificar qual seria o aço que melhor atenderia a estas solicitações. Paralelamente também foi testado o uso do tipo 2 do aço ASTM A572 Gr. 50, que possui adições diferenciadas de elementos microligantes de maior custo, mas que apresentariam melhores valores de relação elástica. Os resultados ao longo do tempo serão apresentados a seguir.

RESULTADOS

O aço atende completamente aos requisitos da norma do aço (ASTM A572 Gr. 50) e de produção (NBR 15279). O gráfico mostrado na Figura 2 ilustra a evolução no atendimento a todos os requisitos desejados, listados na Tabela 2, ao longo dos últimos seis meses. Pode-se notar que, excluindo a relação elástica mais restrita ($\sigma_{uts}/\sigma_{ys} \geq 1,25$), todas as demais propriedades visadas estão atualmente sendo atendidas em mais do que 95% dos casos. No caso em particular da relação elástica estabelecida na revisão da NBR 8800 ($\sigma_{uts}/\sigma_{ys} \geq 1,18$),^[12] esta está sendo atendida integralmente, assim como o carbono equivalente que se encontra bem abaixo de 0,40%: teor médio de $0,34 \pm 0,02\% \text{C}_{eq}$.

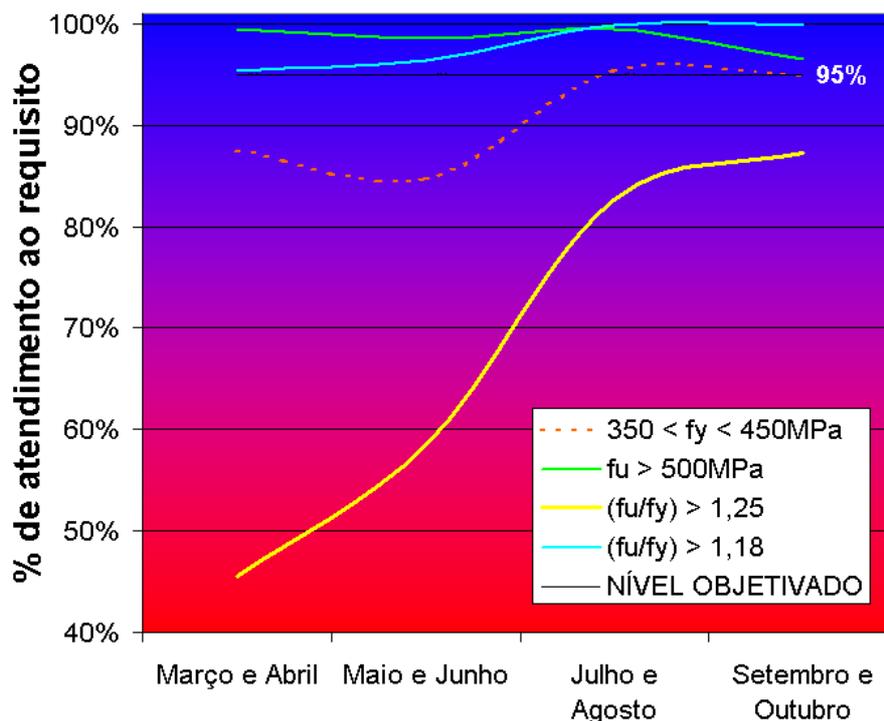


Figura 2 – Gráfico ilustrando a evolução no atendimento dos requisitos do aço.

O gráfico da Figura 3 descreve melhor a evolução na obtenção da relação elástica nos últimos seis meses de produção do aço ASTM A572 Gr. 50 Tipo 1. Este gráfico ilustra como os ajustes na composição química e parâmetros de laminação efetivamente melhoraram o desempenho deste material, aumentando os valores da relação elástica (σ_{uts}/σ_{ys}).

Apesar de estatisticamente 13% do aço ainda apresentar uma relação elástica entre 1,18 e 1,25, a produção e teste de uma versão do aço ASTM A572 Gr. 50 Tipo 2 demonstrou que é possível atender integralmente mesmo ao requisito de relação elástica mínima de 1,25. Os dados da Tabela 3 mostram os resultados de desempenho dos dois tipos de aço desenvolvidos, nos quais foram variados os tipos de elementos de liga.^[7] Os dados demonstram que é possível obter uma relação elástica maior, porém com um custo maior desta formulação de liga encarece o custo de produção, oferecendo impactos negativos na comercialização do produto.

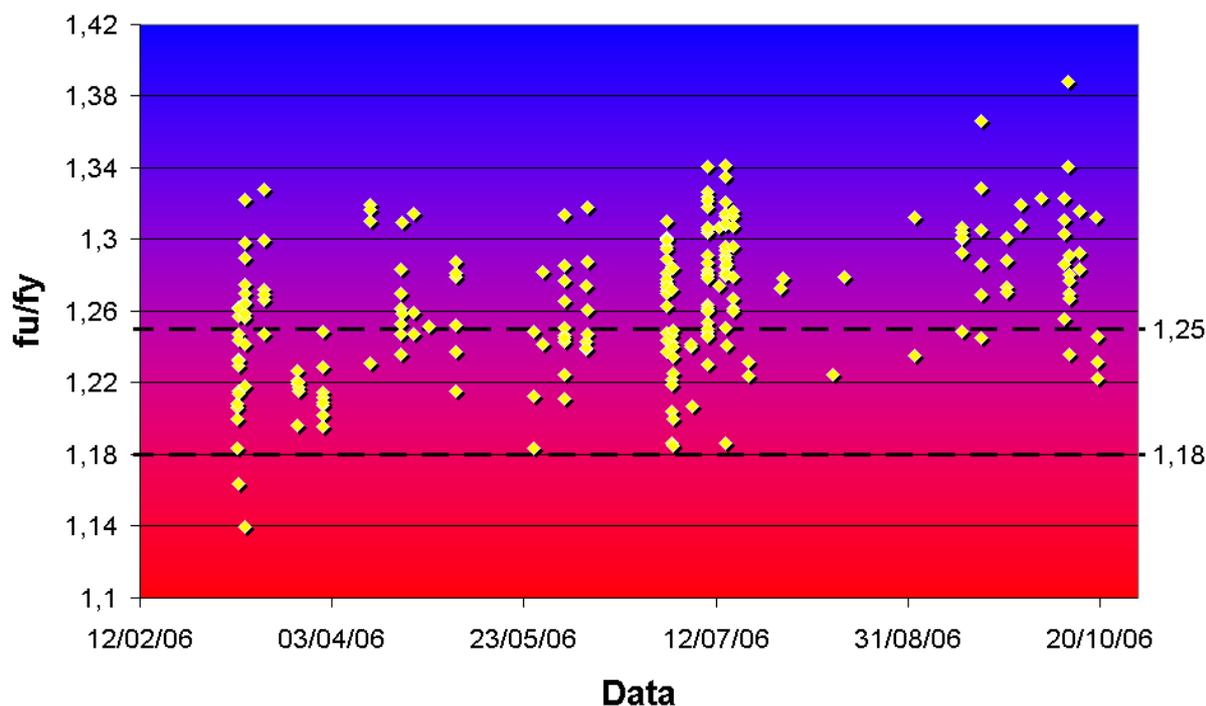


Figura 3 – Distribuição nos valores obtidos da relação elástica (σ_{uts}/σ_{ys}) ao longo do ano de 2006 na produção do aço ASTM A572 objetivando a produção de perfis eletro-soldados.

Tabela 3 – Resultados médios dos aços ASTM A572 Gr. 50 nas formulações Tipo 1 e Tipo 2 (ref. Março e Abril 2006)

Tipo	Espessura (mm)	%Ceq	%Micro	σ_{ys} (MPa)	σ_{uts} (MPa)	σ_{uts}/σ_{ys}	Along
1	≤ 8,00	0,33	0,016	427	537	1,25	26,7%
1	> 8,00	0,35	0,019	424	544	1,28	27,0%
2	≤ 8,00	0,31	0,016	396	530	1,33	28,1%

A necessidade de resistência à corrosão atmosférica é uma característica desejável e importante aos perfis utilizados na construção metálica. O trabalho realizado nos último semestre e a recente incorporação da nova família de aços patináveis do sistema Usiminas permitiu o recente início da produção de perfis de alta resistência mecânica ($\sigma_{ys} \geq 350 \text{ MPa}$ e $\sigma_{uts} \geq 500 \text{ MPa}$) e que também apresentam resistência à corrosão atmosférica. O projeto de liga do aço COS AR COR 350 é totalmente inédito^[13] e neste caso privilegia tanto a obtenção de uma alta relação elástica (σ_{uts}/σ_{ys} médio de $1,29 \pm 0,03$) quanto um baixíssimo teor de carbono equivalente (Ceq médio de $0,25 \pm 0,02\%$, segundo a fórmula do IIW).

CONCLUSÕES

O trabalho de desenvolvimento e adequação deste aço permitiu não apenas promover o início e crescimento da produção industrial do perfil eletro-soldado do Sistema Usiminas, mas também gerou subsídio para oferecer sugestões consistentes de melhoria na norma brasileira de projeto de estruturas, a NBR 8800. Similarmente alterações relevantes também forma submetidas ao grupo de revisão das normas NBR5008, NBR5920 e NBR5921, associadas com a especificação de aços estruturais patináveis para construção civil.

O trabalho realizado em parceria pelas áreas técnicas da COSIPA e da fábrica de perfis em Taubaté permitiu criar e desenvolver um aço e um produto associado com atrativas características para o uso na construção de estruturas metálicas. Adicionalmente, o emprego do aço COS AR COR 350 em perfis eletro-soldados, está permitindo ampliar a produção destes produtos, conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.

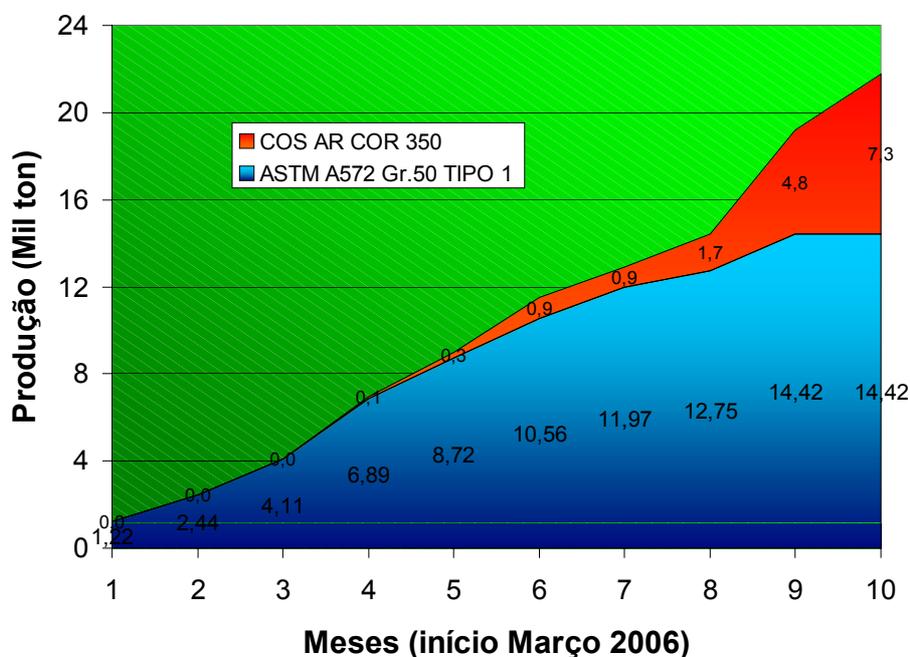


Figura 4 – Evolução nos últimos 10 meses da produção do aço ASTM A572 Gr. 50 Tipo 1 e COS AR COR 350 para a produção de perfis eletro-soldados.

REFERÊNCIAS

- 1 NBR 15279:2005; **Perfis estruturais de aço soldados por alta frequência (eletrofusão) – Perfis I, H e T – Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- 2 NBR 8800:1996 (em revisão); **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996.
- 3 MORAIS, W.A.; BORGES, H.C.; PEREZ, F.A.; Modelamento e quantificação da relação propriedades x microestrutura nos aços estruturais laminados a quente da Cosipa, Artigo a ser publicado no congresso anual da ABM, 2007.
- 4 ASTM A572:2006; **Specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel**. Annual Book of ASTM Standards Volume: 01.04. American Society for Testing and Materials, 2006.
- 5 COS CIVIL, **Aço para uso Estrutural Cosipa**. Catálogo de produtos laminados da Cosipa “on-line”: <www.cosipa.com.br>. Acesso em 01/02/2007.
- 6 BODNAR, R.L.; FLETCHER, F.B.; MANOHAR, M.; **The physical metallurgy of normalized plate steels**. MS&T Conference Proceedings, 2004.
- 7 SAGE, A.M. **Microalloyed steels for structural applications**. Metals and Materials, v.5. n.10, p.584-588, Oct. 1989.

- 8 ASTM A709/A709M:2006a; **Standard specification for Structural Steel for Bridges**. Annual Book of ASTM Standards Volume: 01.04. American Society for Testing and Materials, pp.372-379, 2006.
- 9 ASTM A992/A992M:2004a; **Standard specification for Structural Steel Shapes**. Annual Book of ASTM Standards Volume: 01.04. American Society for Testing and Materials, pp. 597-599, 2006.
- 10 ASTM A1026:2003; **Standard specification for Alloy Steel Structural Shapes for Use in Building Framing**. Annual Book of ASTM Standards Volume: 01.04. American Society for Testing and Materials, pp.618-619, 2006.
- 11 ASTM A1043/A1043M:2003; **Standard specification for Alloy Steel Structural Shapes for Use in Building Framing**. Annual Book of ASTM Standards Volume: 01.04. American Society for Testing and Materials, pp.637-639, 2006.
- 12 NBR 8800:1996 (em revisão); **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Setembro 2006
<<http://www.dees.ufmg.br/repo/secretaria/outros/NBR8800SETEMBRO2006.pdf>>
. Acesso em 03/12/2006.
- 13 COS AR COR 350 / USI SAC 350; **Aços estruturais patináveis com elevada resistência à corrosão atmosférica**
<<http://www.cosipa.com.br/Pagina/0,3379,17-2212-6382,00.html>> ou
<<http://www.usiminas.com.br/Secao/0,3381,1-35,00.html>>. Acesso em 03/12/2006.