

# DESENVOLVIMENTO DO AÇO D6A PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE FERRAMENTAS <sup>1</sup>

*Luis Fernando Maffei Martins* <sup>2</sup>

*Gilberto Belan* <sup>3</sup>

*Geovane Martins Castro* <sup>4</sup>

*Fabício Camponez Salazar* <sup>5</sup>

*Francisco Gonçalves Lima* <sup>6</sup>

*Antônio Vaz Teixeira* <sup>6</sup>

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo descrever o desenvolvimento realizado em conjunto pela ACESITA e MANGELS do aço D6A. Trata-se de um aço de médio teor de carbono, com adição de cromo, vanádio, níquel e molibdênio. Este material é utilizado para fabricação do corpo de serras bimetálicas, que são obtidas através de solda longitudinal do corpo com uma aresta de aço ferramenta. As serras bimetálicas apresentam característica de alta flexibilidade, conferida pelo corpo produzido com o aço D6A, aliada à alta resistência dos dentes de aço ferramenta. Em função das dificuldades do processo de fabricação deste tipo de serra, a especificação da matéria prima apresenta uma série de requisitos especiais que serão aqui apresentados, bem como as particularidades dos processos de aciaria, laminação a quente, laminação a frio e tratamento térmico. O sucesso deste desenvolvimento foi devido ao trabalho em parceria do fornecedor e cliente, que permitiu a atuação em um nicho de mercado exigente e de tecnologia moderna.

**Palavras-chave:** Ferramentas; D6A.

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado no 42º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos – Santos – SP – 25 a 28 de outubro de 2005

<sup>2</sup> Eng.º Metalurgista, MSc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais; Supervisor de Pesquisa e Desenvolvimento da MANGELS

<sup>3</sup> Tecnólogo de Processo de Produção; Técnico de Processos da MANGELS

<sup>4</sup> Eng.º Mecânico, Mestrando em Metalurgia Física - CPGEM UFMG; Pesquisador do Centro de Pesquisa da ACESITA

<sup>5</sup> Eng.º Químico – Metalurgista da Aciaria da ACESITA

<sup>6</sup> Técnico Metalúrgico – Metalurgista da Laminação a Quente da ACESITA

## 1 INTRODUÇÃO

O aço D6A é amplamente utilizado na fabricação do corpo de serras bimetálicas para corte de metais. Este tipo de serra combina as características de um aço ferramenta com as de um aço de alta resistência temperado e revenido. Deste modo, a serra apresenta alta resistência à abrasão, conferida pelo aço ferramenta, onde os dentes da serra são estampados, e alta flexibilidade, tenacidade e resistência à fadiga, conferidas pelo aço do corpo da serra, de D6A. A produção das fitas bimetálicas se dá pela junção dos dois diferentes aços, através de solda por feixe de elétrons, efetuada no sentido longitudinal da fita, conforme Figura 1.

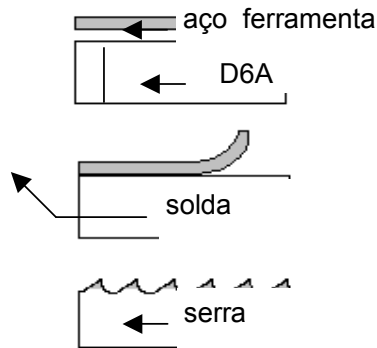


Figura 1. Esquema de fabricação da serra bimetálica

A junção entre o aço ferramenta e o corpo não pode apresentar falhas. Qualquer irregularidade pode levar ao deslocamento dos dentes durante as rígidas condições a que a serra é submetida durante sua aplicação, usualmente corte de metais. Em função deste processo de solda, a especificação do aço D6A, utilizado no corpo da serra, apresenta uma série de exigências particulares. A presença de inclusões é altamente prejudicial e deve ser rigorosamente controlada pois provoca falhas na solda. Também é essencial o controle da presença de gases no material, para se evitar bolhas na região da solda, que, inclusive, é realizada sob vácuo.

O desenvolvimento do processo de fabricação na aciaria e laminação a quente iniciou-se em novembro do ano 2000, com a produção do primeiro lote experimental no dia 26/02/2001. Os principais desafios vencidos foram a captação de inclusões, a obstrução da válvula submersa no lingotamento, a alta resistência à deformação e a susceptibilidade de ocorrência de trincas e rompimentos em função da alta temperabilidade.

Na etapa de laminação a frio, a variação de espessura deve ser bastante restrita e o material tem que sofrer tratamento térmico adequado para gerar uma estrutura com matriz ferrítica e carbonetos esferoidizados, com controle do tamanho dos mesmos. Esta estrutura permite maior controle e uniformidade no processo de têmpera a que a serra é submetida após estampagem dos dentes. As tiras do aço D6A têm, ainda, para garantia da qualidade da solda, que apresentar empeno lateral restrito e suas bordas devem ser perpendiculares à superfície e sem presença de rebarbas, o que é obtido através de usinagem.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço D6A foi cadastrado na ACESITA como aço ACE P647L, com composição otimizada em função da aplicação. A média e o desvio padrão dos principais

elementos de todas as corridas produzidas (Jan/2001 a Jun/2005) está mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química média de todas as corridas de D6A.

Dados	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	N2	O2
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	PPM	PPM
Média	0,475	0,66	0,18	0,0128	0,0027	0,95	0,56	0,94	0,05	0,10	75	21
Desv Pad	0,014	0,02	0,02	0,0023	0,0013	0,04	0,03	0,04	0,01	0,01	15	9

O trabalho foi dividido em 3 etapas. Em uma primeira abordagem, efetuou-se o estudo da viabilidade técnica de produção na ACESITA e na MANGELS, em função de resultados históricos de aços ligados especiais, da utilização de modelos matemáticos de balanço térmico e de massa na aciaria, previsão de temperaturas de transformações, de temperabilidade e de deformação. Na segunda etapa foi produzido o primeiro lote experimental e realizado a caracterização metalográfica do produto. A partir de amostras deste primeiro lote, foram realizadas simulações de laminação em laboratório para a otimização dos padrões de processo. A terceira etapa consistiu do ajuste dos padrões de processo em novos lotes experimentais e a produção em escala industrial de forma economicamente viável, com o atendimento pleno à especificação.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, passar-se-á descrever sucintamente os resultados em cada etapa do processo de fabricação.

#### 3.1 Aciaria

Na ACESITA, inicialmente, o gusa é dessulfurado numa estação de pré-tratamento, através da injeção de agente dessulfurante ( $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$  e  $\text{SiO}_2$ ) e de nitrogênio. Em seguida, é realizado o processo de sopro no convertedor MRPL (Metal Refining Process with Lance), que tem a função de garantir os teores de carbono e fósforo. Ao final do sopro, o metal é vazado em uma panela com revestimento refratário. Durante o vazamento é realizada a adição das ligas para desoxidação e garantia da composição química. A etapa seguinte é o Forno Panela, para o ajuste químico e térmico do aço. A última etapa na aciaria é o Lingotamento Contínuo, cuja função é solidificar o metal elaborado.

Contudo, no primeiro lote de produção, houve sérias ocorrências de obstrução da válvula submersa no Lingotamento Contínuo. Estas ocorrências levaram ao sucatamento de quantidade significativa de aço. Para bloquear estas ocorrências, a primeira ação tomada foi a inclusão da etapa de raspagem de escória após o vazamento no convertedor, e o desenvolvimento de escória sintética apropriada no Forno Panela. Esta escória tem como características principais uma boa fluidez e uma elevada basicidade. A segunda ação foi a otimização da adição de trióxido de molibdênio, que passou a ser adicionada no convertedor ao invés de ser na panela durante o vazamento. A terceira ação foi a seleção de panelas com revestimento refratário em condições diferenciadas para a produção deste aço. Esta ação implicou em uma restrição para a produção do aço D6A, mas garante o melhor controle da escória.

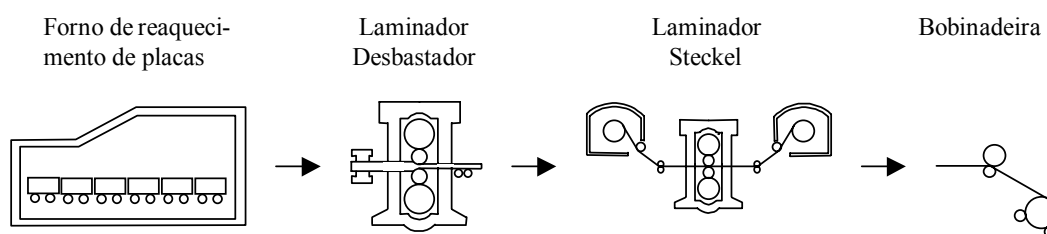
Após a implantação destas ações, o aço D6A passou a ser produzido com estabilidade operacional na aciaria. Não houve mais ocorrências de obstrução da válvula submersa no Lingotamento Contínuo. O controle dos residuais de fósforo e enxofre neste aço, além do atendimento à restrita especificação de composição química e nível de inclusões, conforme a Tabela 2, é um diferencial de qualidade obtido. As placas possuem a dimensão nominal de 200x1220x13000 mm.

**Tabela 2.** Média e desvio padrão das inclusões de todas as corridas de aço D6A

Micropureza	ASTM E45 - Método A				DIN 50602 - Método K		
	A	B	C	D	K0	K1	K2
Média	1,74	0,64	0	1	9,7	2,7	0
Desvio Padrão	0,25	1,05	0	0	8,2	4,3	0

### 3.2 Laminação a Quente

Segundo um único fluxo de processo, conforme a Figura 2, são obtidas as bobinas de aço AISI D6A nas dimensões 2,65x1200 mm, 3,00x1200 mm e 3,75x1200 mm, que posteriormente são enviadas à MANGELS.

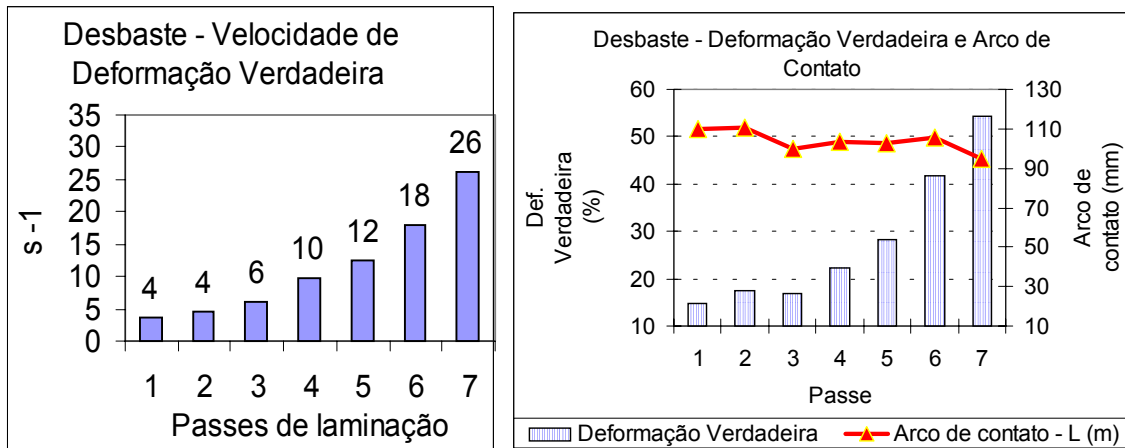


**Figura 2.** Fluxograma simplificado do processo de laminação a quente.

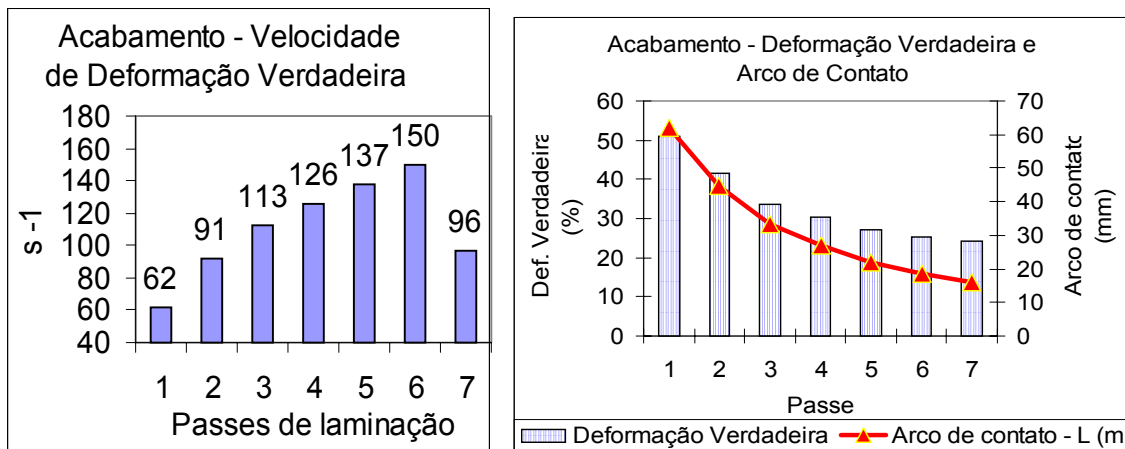
Em função da baixa ductilidade a quente deste aço, as placas são reaquecidas a uma temperatura em torno de 1260°C. Quanto menor o gradiente térmico entre a superfície e o centro das placas, melhores serão as condições de laminação. A laminação de desbaste é realizada em 7 passes, em um laminador quádruplo reversível tipo Rougher Mill, obtendo um esboço com espessura nominal de 28 mm. A laminação de acabamento é realizada também em 5 ou 7 passes, em um laminador quádruplo reversível tipo Steckel Mill.

A espessura média da carepa das bobinas de D6A é de 11,5 µm, é densa e tem característica protetiva, em função da presença de Cr, Ni e Mo. Como comparação, a espessura média da carepa de um aço SAE 1050 é 17,1 µm.

Nas Figuras 3 e 4 são mostradas as metodologias de reduções desenvolvidas para este aço, que foram baseadas no aço inoxidável AISI 304, em função da composição química e conseqüentemente da elevada tensão de escoamento.

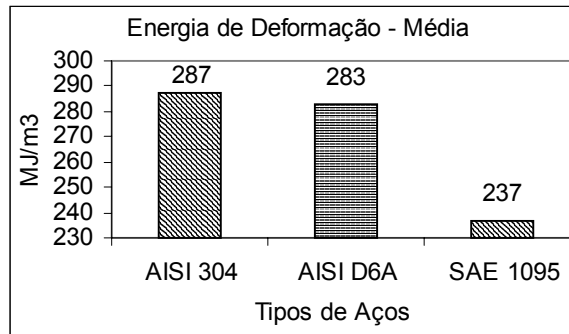


**Figura 3.** Velocidade de deformação verdadeira, deformação verdadeira e arco de contato na laminação de desbaste de aço AISI D6A, com espessura inicial de 200 mm (placa) e final de 28 mm (esboço).



**Figura 4.** Velocidade de deformação verdadeira, deformação verdadeira e arco de contato na laminação de acabamento de aço AISI D6A, com espessura inicial de 28 mm (esboço) e final de 2,65 mm (bobina a quente).

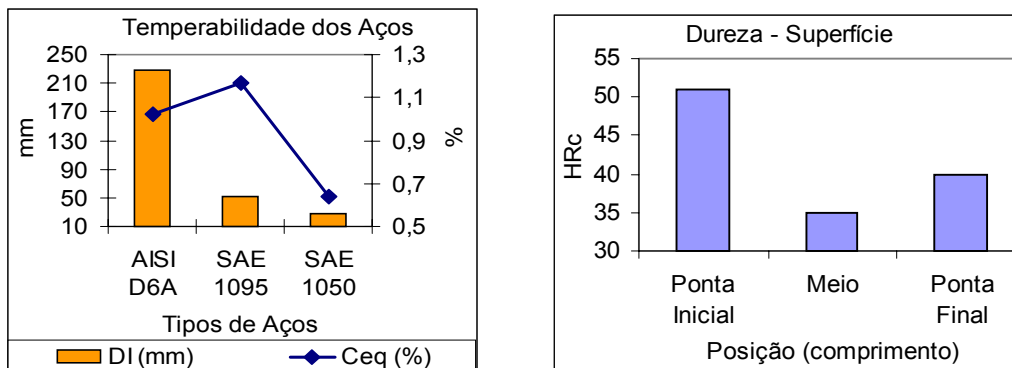
Na laminação de desbaste, o aumento em cada passe da deformação e velocidade de deformação visa evitar trincas de bordas (devido a baixa ductilidade a quente) e deslizamentos, além do refino da estrutura bruta de fusão. Na laminação de acabamento, o incremento na velocidade de deformação em cada passe é função do torque dos motores e da estabilidade na laminação. Já a redução da velocidade no último passe é função do resfriamento da bobina na zona úmida, que é um processo posterior à laminação no Steckel. A seqüência de reduções em cada passe na deformação e arco de contato visa o atendimento aos padrões necessários quanto à forma (ondulações, coroamento e cunha, principalmente) e uniformidade na espessura das bobinas. Os lotes iniciais foram laminados no modo manual, utilizando esta “filosofia” de redução. Após o ajuste do processo, as bobinas passaram a ser laminadas através de modelo matemático. A Figura 5 mostra uma comparação da energia de deformação necessária na etapa de desbaste de 3 tipos de aços. Trata-se da energia consumida para desbastar a placa por unidade de volume (MJ/m<sup>3</sup>).<sup>(1)</sup>



**Figura 5.** Energia de deformação média na etapa de desbaste dos aços AISI 304, AISI D6A e SAE 1095, entre os dias 01/01/05 a 30/06/05, em 7 passes e esboço de 28 mm.

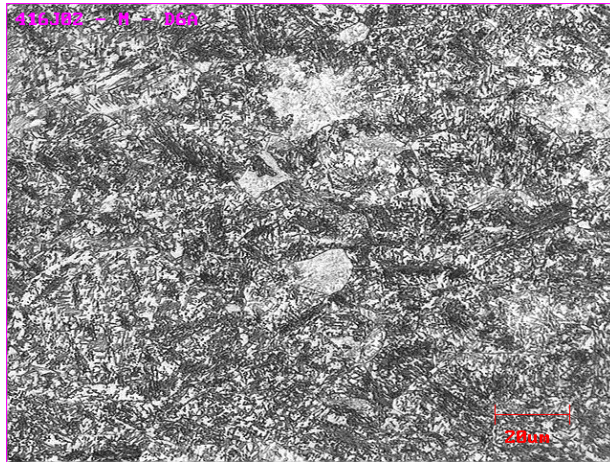
Os elementos presentes neste aço alteram as temperaturas de transformação, sendo que 823°C é a temperatura teórica de início de formação da ferrita pró-eutetoide ( $Ar_3$ ) e 758°C a temperatura de início de formação da perlita ( $Ar_1$ ).<sup>(2-3)</sup> Os elementos Ni, Si e Al, presentes no aço em solução sólida, e os elementos Cr, Mo e V, formadores de carbonetos, promovem um incremento na resistência à deformação do aço D6A, tornando-o similar ao inox AISI 304 e muito maior ao aço carbono SAE 1095. A deformação é realizada no campo austenítico, com recristalização após cada passe e obtendo um importante refino de grão. O tamanho de grão austenítico típico do aço D6A varia de 10  $\mu\text{m}$  a 20 $\mu\text{m}$ , que corresponde ao padrão ASTM 8 ou mais fino.

O aço D6A possui temperabilidade elevada, mesmo sendo um aço de médio teor de carbono e com carbono equivalente menor que o SAE 1095.<sup>(4)</sup> Exige um rígido controle do resfriamento, desde o lingotamento até o produto bobina a quente. A Figura 6 mostra uma comparação da temperabilidade dos aços através do parâmetro DI (Diâmetro crítico) e mostra a evolução típica da dureza ao longo do comprimento de uma bobina de aço D6A.



**Figura 6.** A esquerda, comparação da temperabilidade (DI em mm) e carbono equivalente (Ceq em %) dos aços AISI D6A, SAE 1095 e SAE 1050. A direita, evolução da dureza típica ao longo do comprimento das bobinas de AISI D6A.

A ponta interna das bobinas de D6A possui estrutura bainítica inferior, com microdureza média 565 HV. A ponta externa é constituída de bainita superior, com microdureza média de 460 HV. A região central da bobina (meio) é constituída de perlita fina e bainita, com microdureza média de 381 HV, conforme a Figura 7.



**Figura 7.** Microestrutura típica do centro das bobinas de D6A.

### 3.3 Laminação a Frio

O processo de laminação a frio do aço D6A deve ser tal que o produto atenda às especificações dos fabricantes de serras, que foram definidas em função das exigências dos processos de solda por feixe de elétrons, estampagem ou usinagem dos dentes e tratamento térmico final da serra, conforme as Tabelas 3 a 5.

**Tabela 3.** Especificação de propriedades mecânicas.

Propriedade	Unidade	Especificação
Dureza	HRB	85 a 100
Limite de resistência	MPa	máximo 800

**Tabela 4.** Especificação de microestrutura e micropureza.

Característica	Norma	Nível especificado
% de coalescimento	-	mínimo 95 %
nível de coalescimento	SEW 1520	máximo 2.1

**Tabela 5.** Especificação de superfície e forma.

Característica	Unidade	Especificação
rugosidade	$\mu$ Ra	máximo 0,60
empeno lateral	mm/1 m	máximo 0,80

A produção das tiras relaminadas segue o fluxo: Recebimento da bobina, decapagem, corte circular, recozimento inicial, laminação de desbaste, recozimento, laminação de acabamento, recorte, usinagem das bordas, embalagem e expedição. No recebimento são conferidas as dimensões e o atendimento à especificação quanto a composição química e nível de inclusões.

Em uma linha de decapagem contínua, a bobina é desbobinada e imersa em tanques contendo ácido clorídrico para remoção dos óxidos (carepa) provenientes da laminação a quente. Nesta etapa é também realizada inspeção visual da superfície da bobina.

A bobina é cortada longitudinalmente, por facas circulares, em rolos de largura adequada às limitações dos laminadores.

As bobinas laminadas a quente, em razão da alta temperabilidade do aço D6A, apresentam estrutura bainítica. Visando preparar a estrutura do material para a laminação, bem como iniciar a transformação estrutural do material de modo a obter uma estrutura completamente esferoidizada ao final do processo, é realizada uma etapa inicial de recozimento. São utilizados fornos do tipo campânula, também denominados fornos sino, com atmosfera controlada com uma mistura de gases de composição de aproximadamente 95% de nitrogênio e 5% de hidrogênio, e temperatura sub-crítica. Os fornos possuem um sistema de controle de temperatura para evitar variações que podem levar à austenitização do material, com posterior formação de perlita grosseira no resfriamento, que é indesejável.

A laminação de desbaste é realizada em laminadores reversíveis com rígidos sistemas de controle de variação de espessura. Os cilindros de laminação são retificados com abaulamento apropriado para reduzir a variação de espessura ao longo da largura da tira, bem como garantir a rugosidade da superfície da tira. A redução de espessura durante esta etapa deve ser adequada para a obtenção das propriedades mecânicas e microestrutura especificadas, pois a energia armazenada durante a laminação a frio é a força motriz para a recristalização durante o recozimento.<sup>(5)</sup>

Na etapa final de recozimento é garantida a estrutura do material com matriz ferrítica e 100% dos carbonetos esferoidizados conforme a Figura 8, bem como o atendimento às especificações de propriedades mecânicas. Os parâmetros de processo são similares aos do recozimento inicial, sendo que a temperatura é da ordem de 700°C e o tempo de aproximadamente 24 horas, o que favorece a transformação das estruturas perlítica e bainítica em carbonetos esferoidizados em matriz ferrítica. Esta transformação se dá pela difusão do carbono, sendo que o potencial termodinâmico para que ela ocorra é a redução da área de contorno de fase ferrita/cementita.<sup>(6)</sup>



**Figura 8.** Microestrutura típica do aço D6A após a laminação a frio e tratamento térmico.

Na laminação de acabamento são definidas as propriedades mecânicas, condições de forma e de rugosidade do material, além da variação de espessura ao longo do comprimento e da largura do rolo. O perfil transversal deve ser o mais homogêneo possível pois será uma das características que irá definir o empeno lateral final do produto.

Em seguida os rolos relaminados são recortados longitudinalmente com uma largura adequada ao produto final. Após esta etapa é feito a usinagem de bordas, que confere às bordas dos rolos recortados as características de isenção de rebarba e



geometria “quadrada”, ou seja, com a borda no sentido perpendicular à superfície do material. Esta etapa é essencial para o bom desempenho do produto na operação de solda por feixe de elétrons pois define a geometria das bordas e garante o empeno lateral adequado à aplicação. O produto é embalado, enviado ao mercado nacional e exportado para a América Latina, Estados Unidos e Europa.

#### **4 CONCLUSÕES**

Foi desenvolvido o aço AISI D6A através de uma parceria entre as empresas ACESITA e MANGELS. Este aço atende a requisitos especiais quanto a micropureza, propriedades mecânicas, forma e superfície. É utilizado na fabricação do corpo de serras bimetálicas. É destinado ao mercado nacional e exportado para vários países.

Foi necessário inserir etapa de raspagem de escória na aciaria e o desenvolvimento de escória sintética de boa fluidez e elevada basicidade para melhorar a captação de inclusões e evitar as ocorrências de obstrução no lingotamento.

O aço D6A possui elevada tensão de escoamento, baixa ductilidade a quente e elevada temperabilidade, sendo necessário o desenvolvimento de padrões especiais de deformação e velocidade de resfriamento.

O produto laminado a frio atende perfeitamente à especificação, com uma estrutura completamente esferoidizada, além das propriedades mecânicas, forma e superfície adequadas à aplicação.

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 WUSATOWSKI, Z. Fundamentals of Rolling. **Oxford: Pergamon Press**, 1969.
- 2 BARTULICI, E; MAGALHÃES, M. R.; BARBOSA, R; SANTOS, D. B. Obtenção e Caracterização de um Aço C-Mn Laminado a Frio de Alta Resistência Multiconstituído. **41º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM**. Joinville, SC, 2004.
- 3 KRAUSS, G. Principles of Heat Treatment of Steel. **American Society for Metals**, Metals Park, Ohio 44073, 1990.
- 4 ROSSI, E. H.; CASTRO, G. M. Um Modelo de Avaliação da Temperabilidade dos Aços Planos Carbono. **40º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM**. Vitória, ES, 2003.
- 5 REED-HILL, R.E. Princípios de Metalurgia Física, **Guanabara Dois**, 1982.
- 6 CALLISTER JR., W.D. Materials Science and Engineering, 2nd edition, **John Wiley & Sons Inc.**, 1991

# DEVELOPMENT OF THE STEEL D6A FOR APPLICATION IN THE INDUSTRY OF TOOLS <sup>1</sup>

*Luis Fernando Maffei Martins  
Gilberto Belan  
Geovane Martins Castro  
Fabrício Camponez Salazar  
Francisco Gonçalves Lima  
Antônio Vaz Teixeira*

## **Abstract**

This work has as objective to describe the development, by ACESITA and MANGELS, of the steel D6A. It is a steel of medium carbon content, with addition of chromium, vanadium, nickel and molybdenum. This material is used for production of the body of bimetal blades, that are obtained through a longitudinal welding of the body with an edge of tool steel. The bimetal blades offers high flexibility, checked by the body produced with the steel D6A, allied to the durable and tough cutting ability of the teeth of steel tool. In function of the difficulties of the process of production of this blade, the raw material specification presents a series of special requirements that will be presented, as well as the particularities of the melt shop, hot strip mill, cold strip mill and heat treatment. The success of this development was due to the work in partnership of the supplier and customer, which allowed the participation in a fussy and high technology market.

**Key words:** Tools; D6A.

<sup>1</sup> *42<sup>nd</sup> Rolling Seminar - Processes, Rolled and Coated Products – 25 to 28 October 2005, Santos, SP, Brazil*