

DESENVOLVIMENTO DO AÇO MICROLIGADO DIN 20MoCr4 PARA ANEL SINCRONIZADOR DA CAIXA DE CÂMBIO DE VEÍCULOS PESADOS¹

Antenor Ferreira Filho²
Antônio A. Costa Mendes³
Edson Hugo Rossi⁴
Fábio Stagetti⁵
Geovane Martins Castro⁶
José Geraldo Ank⁷
Maurício Bomfim⁸

Resumo

O presente trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento do aço DIN 20MoCr4, um aço de baixa liga, microligado (Nb), de elevada pureza, microestrutura fina e elevada resistência mecânica, desde sua produção na aciaria passando pela laminação a quente e a frio. Na simulação do processo de laminação a quente um modelo da evolução microestrutural foi utilizado, e se mostrou uma ferramenta de grande auxílio. As principais etapas do processo de laminação a frio são também apresentadas com ênfase no recozimento, considerado como crítico para o bom desempenho do material no processo posterior de conformação, *fine blanking*. O sucesso do projeto se deu através de uma parceria entre as empresas Brasmetal Waelzohz e ArcelorMittal Inox Brasil, e possibilitou a oferta de um produto nacional, o anel sincronizador da caixa de marcha de veículos pesados, componente este que anteriormente era produzido com material importado.

Palavras-chave: Aço microligado; DIN20MoCr4; Anel sincronizador.

DEVELOPMENT MICROALLOYED DIN 20MoCr4 GRADE FOR SYNCHRONIZER RING OF AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract

The present work presents the stages of development of steel DIN 20MoCr4, a steel of low alloy, microalloyed (Nb), of high pureness, fine microstructure and high mechanics resistance, since its production in steel plant passing for hot and cold rolling process. In the simulation of hot rolling process, has been used a model of microstructure evolution and it has showed a tool of great aid. The main stages of the cold rolling process also are presented with emphasis in the annealing, considered as critical for the good performance of the material in the posterior process of conformation, "fine blanking". The success of the project is result of a partnership between the companies Brasmetal Waelzholz and ArcelorMittal Inox Brazil generating the development and made possible offers of a national product, the ring synchronizer of the box speed of weighed vehicles, component this that previously was produced with imported material.

Key words: Microalloyed; DIN20MoCr4; Synchronizer ring.

¹ Contribuição técnica ao 45° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Gainhas - PE

² Membro da ABM, Doutor, Diretor Industrial da Brasmetal Waelzholz S.A. Ind. e Com.

³ Engenheiro, Assistente Técnico da ArcelorMittal Inox Brasil S.A.

⁴ Membro da ABM, Mestre, Engenheiro Metalurgista da ArcelorMittal Inox Brasil S.A.

⁵ Engenheiro Metalurgista da Brasmetal Waelzholz S.A. Ind. e Com. e mestrando Poli-USP.

⁶ Membro da ABM, Mestre, Metalurgista de Processo e Produto da ArcelorMittal Inox Brasil S.A..

⁷ Membro da ABM, Engenheiro, Metalurgista do Processo Aciaria da ArcelorMittal Inox Brasil S.A..

⁸ Membro da ABM, Mestre, Supervisor de Desenvolvimento da Brasmetal Waelzholz S.A. Ind. e Com.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar os principais resultados do desenvolvimento do aço DIN 20MoCr4 que corresponde a um aço carbono de baixa liga e de alta pureza. O produto foi desenvolvido por uma equipe multidisciplinar das empresas ArcelorMittal Inox Brasil e Brasmetal Waelzholz. Envolveu contatos e reuniões com toda a cadeia produtiva. O cliente final é a Mercedes-Benz e o produto brasileiro foi homologado pela sua matriz na Alemanha.

Foi criada uma oferta nacional de um componente que era anteriormente importado ou fabricado a partir de matéria prima importada. Este componente é o anel sincronizador, que está localizado na caixa de marcha do veículo. Atua nas engrenagens como se fossem "freios", fazendo com que as mesmas girem numa única rotação. Sua função é de permitir o engate e o desengate suave e confortável das marchas. No engate das marchas são gerados esforços de *bending* e deslizamento (atrito) para a transmissão de torque.⁽¹⁾ As características mais críticas para a qualidade desta aplicação são as resistências mecânica e ao desgaste. Para atender a estas exigências é necessário um aço microligado e com menor fração de inclusões.

Como a deformação a quente dos aços microligados se processa na fase austenítica, é gerado um intenso refinamento de grãos.⁽²⁾ O aumento de energia livre causado pela introdução de novos contornos de grãos é compensado pela diminuição de energia devido à eliminação dos defeitos cristalinos. Os grãos recristalizados dinamicamente param de crescer e permanecem pequenos, pois o potencial termodinâmico vai sendo igualado com o restante da matriz deformada através das deslocamentos geradas. A recristalização metadinâmica consiste no crescimento de núcleos gerados durante a deformação a quente após o descarregamento. É um tipo de recristalização que inicia dinamicamente e cresce estaticamente após o término da deformação. É necessário obter uma microestrutura com grãos finos. Procura-se, então, acumular as deformações nos passes finais através da adição de elementos microligantes, tais como o nióbio. A recristalização estática é atrasada ou suprimida, gerando um acúmulo de deformação e alta taxa de nucleação. O acúmulo de deformação na fase austenítica gera uma maior quantidade de sítios para a transformação ferrítica, propiciando assim um maior refino de grão. Além disso, quando o Nb se encontra em solução sólida durante a transformação de fase, ele segrega nos contornos de transformação de fase, reduzindo a taxa de crescimento da ferrita.⁽²⁻⁴⁾

Bobinas laminadas a quente nas mais diversas qualidades com espessura na faixa entre 2,0 mm e 10,0 mm são as matérias primas de partida para o processo de laminação a frio. O processo envolve as etapas de decapagem, corte, laminação, recozimento e recorte. As características de acabamento de superfície, propriedades mecânicas e microestrutura dos aços laminados a frio são definidas principalmente pela composição química do aço e condições de processamento durante a laminação a quente e laminação a frio.

O contínuo desenvolvimento da indústria de veículos pesados tem exigido de seus fornecedores um crescente desempenho na qualidade de seus produtos. O anel sincronizador, em especial, além das características mecânicas de resistência e desgaste já citadas deve apresentar após conformação um excelente acabamento de superfície e bordas lisas e isentas de estouro, que podem se obtidas através do uso do processo de manufatura denominado de corte fino ou *fine blanking*.⁽⁵⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foi realizada a caracterização do produto importado e considerado como referência. Os baixos residuais de fósforo, enxofre e oxigênio indicaram que o aço possuía alta pureza, com baixa intensidade de micro inclusões e de segregação. A presença de nióbio e nitrogênio indicaram a formação de carbonitreto de nióbio. Estas partículas de 2ª fase promovem o refinamento de grão e um aumento na resistência ao desgaste,^(2,4) e como consequência ocorrerá um endurecimento sub-estrutural e a melhoria da tenacidade.⁽⁶⁾

Foi evidenciado no produto laminado a quente grão ferrítico fino num padrão ASTM 9 a 14, que é típico de aços microligados e diferente dos aços carbono de baixa liga que são produzidos normalmente.^(4,6) Baseado nestas informações foi produzido uma corrida de aço. O resultado da composição química é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Típica composição química das corridas produzidas.

% C	% S	% Cr	% Mo	% Nb	N2 (ppm)
0,193	0,002	0,456	0,472	0,037	145

Amostras de esboço foram laminadas a quente no laminador piloto do Centro de Pesquisas da ArcelorMittal Inox Brasil, para obtenção da melhor prática. Na simulação do processo de laminação a quente foi utilizado um modelo matemático de evolução microestrutural.^(4, 7- 9)

As análises metalográficas nos corpos-de-prova das bobinas laminadas a quente foram realizadas em seções longitudinais. As microestruturas obtidas foram analisadas por microscopias ótica e eletrônica de varredura (MEV). As propriedades mecânicas foram avaliadas através de ensaio de tração.

O processo de laminação a frio foi realizado nas dependências da Brasmetal Waelzholz. As mesmas técnicas citadas, exceto MEV, foram utilizadas na caracterização do produto laminado a frio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o processo de desenvolvimento todas as etapas de produção do anel sincronizador foram testadas e aprovadas. De forma macro o fluxo é o seguinte:

- Produção da BQ preta de aço microligado de alta pureza;
- Produção de tiras laminadas a frio, cortadas e tratadas termicamente;
- Estampagem do anel sincronizador pelo processo de corte fino "*fine blanking*";
- Retífica das superfícies para o acerto dimensional fino;
- Usinagem dos dentes seguido de tratamento termoquímico de carbonitretação;
- Montagem dos componentes na caixa de câmbio, e;
- Montagem do veículo pesado.

3.1 Produção da BQ Preta na ArcelorMittal Inox Brasil

3.1.1 Aciaria

O gusa líquido é vazado do carro torpedo em uma panela, sendo então dessulfurado em uma estação de pré-tratamento (PTG), através da injeção de agente dessulfurante (CaO , CaF_2 e SiO_2) e de nitrogênio. Em seguida, é realizado o processo de sopro no convertedor MRPL (*Metal Refining Process with Lance*), para reduzir 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.

Após esta etapa procede-se uma raspagem de escória para garantir uma maior limpeza do aço. Isto é obtido retirando-se toda a escória remanescente do convertedor substituindo-a por uma escória sintética à base de CaO , MgO , Al_2O_3 e alumínio. Esta escória passa a ter uma forte capacidade de absorver inclusões como silicatos e sulfetos.

A etapa seguinte é o Forno Panela, para o ajuste químico e térmico do aço. A última etapa na aciaria é o Lingotamento Contínuo de placas. Em 2008 foi introduzida uma modificação através do uso de Carbureto de Cálcio (CaC_2), aliado a uma adição de escória sintética à base de CaO e CaF_2 que possibilitou uma maior desoxidação da escória e uma excelente dessulfuração do aço. Esta modificação no processo foi necessária para minimizar o desgaste no revestimento refratário das panelas. Com a introdução do carbureto de cálcio, a dessulfuração do gusa pode ser reduzida ou até eliminada.

3.1.2 Laminação a quente

Durante a laminação a quente as temperaturas são rigorosamente controladas, para obtenção do efeito desejado. Um dos parâmetros de controle, para assegurar um ótimo encharque da placa e cargas compatíveis de laminação, é o controle da energia de deformação no desbaste. Para o aço DIN 20MoCr4 esta energia tem um valor intermediário entre os aços inoxidáveis 4XX e 3XX, ficando em média de 260 MJ/m^3 . Outra variável importante é a temperatura de chegada do esboço, controlada e abaixo da temperatura de não recristalização T_{nr} , para acumular deformações sem que haja recristalização metadinâmica. Desta forma são obtidos grãos ferríticos muito finos, responsáveis em última instância pelo elevado limite de escoamento do aço.

Como pode ser visto na Tabela 2, o aço produzido apresentou com bons resultados de rendimento físico e qualidade.

Tabela 2: Resultados de rendimento físico e qualidade do aço DIN 20MoCr4 na laminação a quente.

Item de Verificação	2007		2008	
	DIN 20MoCr4	Aços ao Carbono	DIN 20MoCr4	Aços ao Carbono
Rendimento Físico - %	98,0	95,1	98,6	95,2
Qualidade (aprovação) - %	79,6	93,0	94,9	95,0

Na laminação controlada de aços microligados, as bandas de deformação dividem os grãos de austenita em vários sub-grãos. Estes, além dos contornos, são locais preferenciais de nucleação dos grãos ferríticos.^(2,4) Resulta em uma microestrutura ferrítica fina e equiaxial, que foi evidenciado nas amostras de aço DIN 20MoCr4 e mostrado na Figura 1.

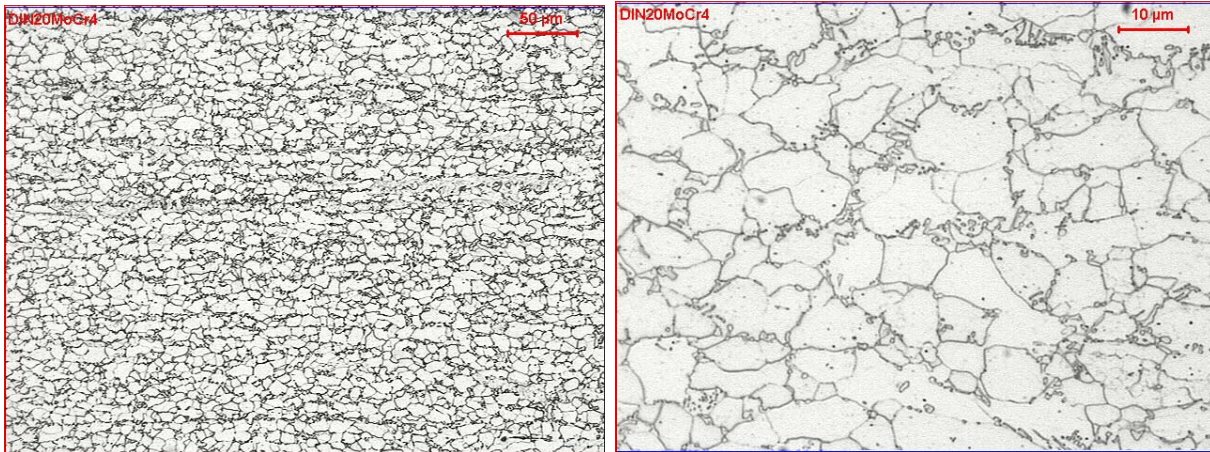


Figura 1: Fotomicrografias do aço DIN 20MoCr4 recozido, sendo a esquerda com aumento de 200X e a direita 1000X – ataque Nital 5% e 7 s.

A evolução do tamanho do grão austenítico é fundamental para a obtenção das propriedades desejadas. Sendo assim, o processo de laminação a quente foi determinado com base no modelo matemático desenvolvido para os aços microligados⁽⁴⁾. A formação de perlita, numa fração superior aos tradicionais aços microligados, é responsável pelo endurecimento da BQ preta, com aumento na resistência mecânica comparado ao microligado tradicional e requer o tratamento térmico de recozimento (esferoidização) na laminação a frio. O modelamento do incremento nas propriedades mecânicas da BQ Preta, devido a formação a Perlita em aço microligado, é uma sugestão para trabalho futuro e não há informação disponível na literatura para o aço em questão.

As partículas de carbonitretos de nióbio, na laminação controlada, ancoram os contornos de grãos.⁽⁴⁾ Obtem-se uma microestrutura ferrítica fina, típica dos aços microligados. Estas partículas são essenciais para que o crescimento de grão nas etapas de tratamento térmico nas demais da cadeia produtiva do anel sincronizador seja monotônico. Assim, a microestrutura permanece “fina” na peça final, para atendimento às propriedades requeridas.

O modelamento⁽⁴⁾ prevê a ocorrência de recristalização estática nos dois primeiros passes de desbaste e dinâmica (metadinâmica) nos demais passes deste processo. No laminador acabador Steckel, em função da temperatura abaixo da T_{nr} , a deformação é acumulada. Neste caso o modelo prevê a ausência de recristalização. Como nos dois últimos passes de laminação no Steckel a deformação acumulada foi maior que a deformação crítica, principalmente no terceiro e último passe, provavelmente ocorreu uma recristalização induzida por deformação, não prevista neste modelo. Este fenômeno é responsável por um intenso refinamento dos grãos, que é totalmente benéfico para a aplicação. A melhoria contínua do modelo para a previsão

deste fenômeno é uma sugestão de trabalho futuro e não há informações disponíveis na literatura para o aço em questão.

A Figura 2 mostra a previsão da evolução do tamanho de grão austenítico e da tensão de fluxo (MFS) durante os passes de laminação a quente, de acordo com o modelo desenvolvido.

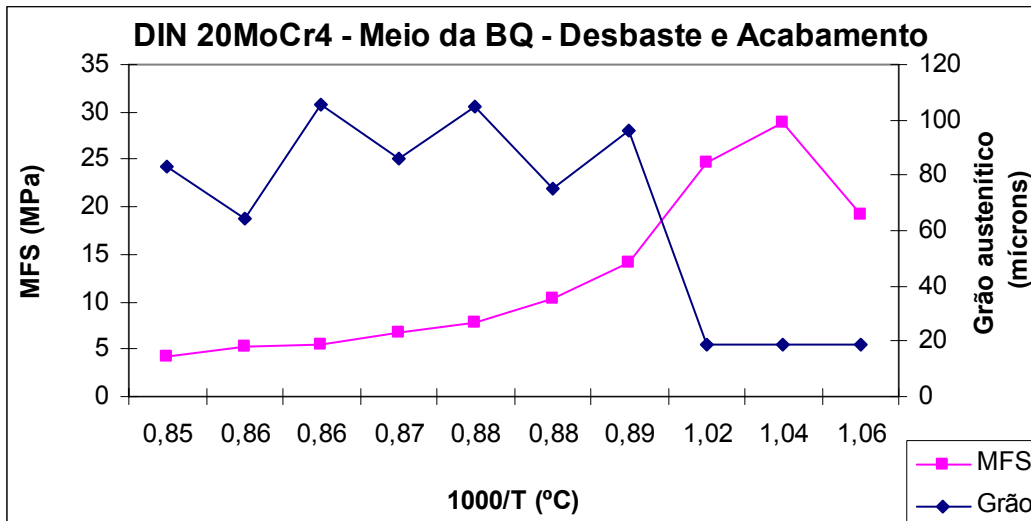


Figura 2: Evolução da tensão de fluxo e do tamanho de grão austenítico no aço DIN 20MoCr4 laminado a quente, posição central (meio) da BQ.

Os três últimos passes (3 últimos pontos) são de acabamento (Steckel) e realizados abaixo da T_{nr} . O modelo não conseguiu prever a evolução do tamanho de grão nos dois últimos passes no Steckel em função da deformação acumulada estar acima da deformação crítica como já citado. O aumento na MFS (tensão de fluxo) é uma evidência que as cargas de laminação são altas no Steckel e similares ao inox austenítico⁽⁷⁾.

A previsão do tamanho de grão ferrítico após o resfriamento da BQ laminada a quente, de acordo com o modelo, é 8,3 μm em média. Através de microscopia óptica (analisador de imagens), o diâmetro médio dos grãos ferríticos retirados em amostras de BQ Preta na região central, variou de 6,5 a 8 μm , que corresponde a grãos ASTM 12 de forma típica e corresponde, totalmente, ao padrão do aço importado. Este resultado confirma que houve um refinamento maior do que o previsto no modelo desenvolvido na ArcelorMittal Inox Brasil.

A previsão de propriedades mecânicas nas bobinas laminadas a quente, realizada pelo modelo, é mostrada abaixo:

- Limite de escoamento: 470 MPa.
- Limite de resistência: 647 MPa.

Os dados reais, médios, de propriedades mecânicas das bobinas laminadas a quente, são:

- Limite de escoamento: 626 MPa (sempre acima de 550 MPa)
- Limite de resistência: 743 MPa.

Como já citado, a diferença é devido ao maior refinamento dos grãos e ao endurecimento provocado pela formação da fase perlita no resfriamento. São questões favoráveis ao produto e requerem um desenvolvimento futuro do modelo.

Todas as bobinas laminadas a quente atenderam à especificação de microestrutura, micropureza e propriedades mecânicas. A partir desta fase iniciou-se a laminação a frio.

3.2 Produção de Tiras Laminadas a Frio na Brasmetal Waelzholz

O processo de laminação a frio envolve as etapas de decapagem, corte, laminação e recozimento. As características de acabamento de superfície, propriedades mecânicas, microestrutura dos aços relaminados são definidas, principalmente, pela composição química do aço e condições de processamento durante as laminações a quente e a frio.

A Figura 3 apresenta um fluxo completo do processo de relaminação, desde o recebimento da matéria prima (bobinas laminadas a quente) até a tira laminada a frio.

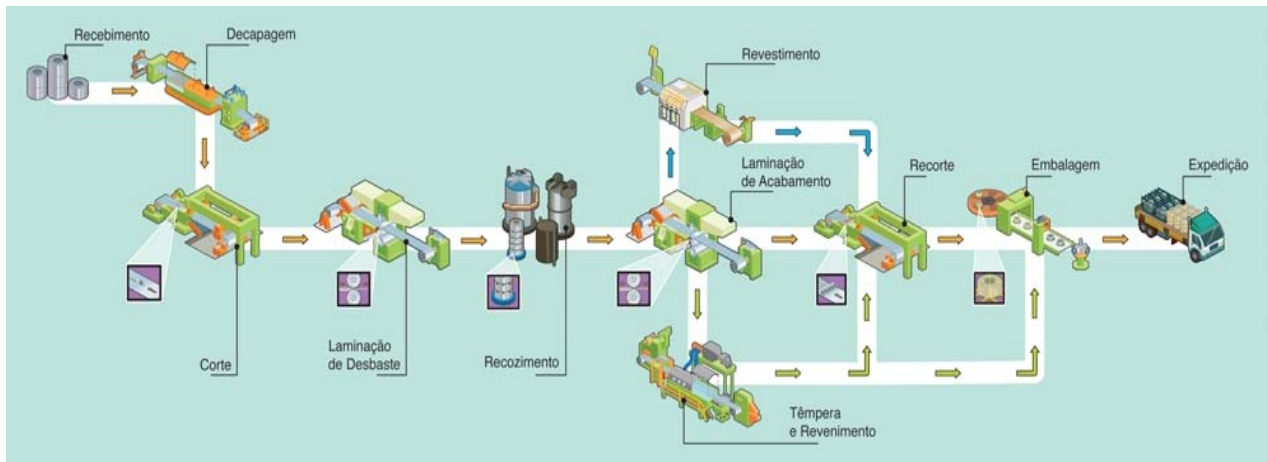


Figura 3. Fluxograma de produção de tiras laminadas a frio.

3.2.1 Decapagem

A bobina laminada a quente recebida da usina é submetida inicialmente a esse processo químico, passando por uma série de tanques contendo uma solução de aço clorídrico, que remove o óxido, melhorando o acabamento de superfície e permitindo assim que a tira apresente um bom acabamento de superfície após o processo de laminação a frio.

3.2.2 Corte

É a transformação da bobina em rolos, de forma a adequá-los em termos de largura conforme capacidade dos laminadores e a uniformidade do perfil transversal de espessura.

3.2.3 Laminação de desbaste

Esta etapa de processo além de objetivar a adequação dimensional do produto promove uma melhoria no acabamento de superfície através da redução a frio, atua como potencial termodinâmico e induz ao material uma textura cristalográfica adequada para a etapa posterior de recozimento.

A laminação é realizada em modernos laminadores quádruplos reversíveis que possuem controles automáticos de espessura, com os quais se assegura a manutenção de tolerâncias muito restritas de espessura ao longo do comprimento da tira. Por meio de retífica e abaulamento, associado ao emprego de recursos de flexão dos cilindros de laminação, pode-se atuar sobre a precisão dimensional e a exatidão da planicidade da tira, que é fundamental para a estabilidade do anel sincronizador.

3.2.4 Recozimento

Aços laminados a frio párea o uso em processos de estampagem do tipo *fine blanking* devem ser submetidos a processos especiais de recozimento. A redução de dureza do material e a microestrutura adequada são alcançadas através de um processo de esferoidização dos carbonetos presentes no material, quando o aço é mantido em temperaturas e tempos adequados para que ocorra uma mudança na morfologia destes carbonetos. Uma microestrutura heterogênea composta de ferrita e cementita lamelar é a causa das fissuras sobre a superfície cisalhada após o corte fino. Portanto, pode-se atribuir à microestrutura do aço o fator de maior influência no sucesso da operação.

3.2.5 Laminação de acabamento

As tolerâncias finais de espessura, acabamento de superfície, planicidade da tira, assim como as características de resistência mecânica do aço são obtidas através da laminação de acabamento.

3.2.6 Etapas finais

As etapas finais são o recorte, embalagem e a entrega das tiras ao próximo processo da cadeia produtiva.

Todas as bobinas laminadas a quente atenderam à especificação de microestrutura e propriedades mecânicas.

4 CONCLUSÕES

- Foi desenvolvido, com sucesso, o produto brasileiro anel sincronizador da caixa de marcha de veículos pesados, numa parceria entre as empresas Brasmetal Waelzohz e ArcelorMittal Inox Brasil, e de toda a cadeia produtiva nacional;
- Criou-se uma oferta nacional de um componente que era anteriormente importado ou produzido a partir de uma matéria prima importada;
- O desenvolvimento permitiu obter um aço de elevada pureza, com microestrutura fina e elevada resistência mecânica;
- A simulação do processo de laminação a quente através do modelo de evolução microestrutural se mostrou uma ferramenta de grande auxílio. Com modelos deste tipo, é possível simular alterações no processo de laminação e na composição química dos aços, visando o aumento de produtividade, a melhoria das propriedades

mecânicas e da microestrutura. O modelo tornou-se uma importante “ferramenta” de trabalho, desenvolvida a partir da compreensão dos fundamentos da Metalurgia Física da Deformação a Quente.

Agradecimentos

Aos Eng. Paulo Sérgio Torres – Gte. de Engenharia da empresa Eaton Ltda e ao Eng. Antoninho Dolezar – Gte. de Qualidade da empresa Asbrasil S.A.

REFERÊNCIAS

- 1 MERCEDES-BENZ BRASIL. Peças e motores. Disponível em www.mercedes-benz.com.br. Acesso em 23 de agosto de 2005.
- 2 PADILHA, A. F.; SICILIANO Jr, F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. **ABM**, São Paulo, 1996.
- 3 SAKAI, T.; JONAS, J. J. Dynamic recrystallization: mechanical and microstructural considerations. **Acta Metallurgica**, v. 32, n. 2, p. 189-209, 1984.
- 4 CASTRO, G. M., BARBOSA, R. Evolução do Tamanho de Grão e Propriedades Mecânicas no Aço Microligado Laminado a Quente. 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos – ABM. Campos do Jordão – SP – Brasil – 16 a 19 de outubro de 2007.
- 5 FERREIRA FILHO, A; STAGETTI, F. *Tiras de aço laminadas a frio utilizadas na conformação de peças pelo processo “fineblanking”*. 43º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos – ABM. 17 a 20 de Outubro de 2006, Curitiba-PR.
- 6 KRAUSS, G. Principles of Heat Treatment of Steel. **American Society for Metals**, Metals Park, Ohio 44073, 1990.
- 7 BARBOSA, R. Simulation of hot working austenitic stainless steel; Tese de Doutorado, 1983, Universidade de Sheffield, Inglaterra, Reino Unido.
- 8 MACCAGNO, T.M., JONAS, J.J., HODGSON, P.D. Spreadsheet modelling of grain size evolution during rod rolling. **ISIJ International**. v.36, n.6, p720-728. 1996.
- 9 SICILIANO Jr, F; MINAMI, K; MACCAGNO, T.; JONAS, J.J. Mathematical Modeling of the Mean Flow Stress, Fractional Softening and Grain Size during the Hot Strip Rolling of C-Mn Steels. **ISIJ International**, V. 36, n 12, p1500-1506. 1996.