

ANÁLISE DA CONFORMABILIDADE DE UM AÇO LAMINADO A QUENTE CLASSE ESTAMPAGEM VIA EBSD E ENSAIOS MECÂNICOS¹

Christien Guisard Hauegen²
Carlos Roberto Guinâncio Carvalho³
Reginaldo Gomes Toledo⁴
Marcos Valério⁵
Robson Dias Caetano⁵

Resumo

O constante aumento da aplicação do conceito de inovação no desenvolvimento de produtos de maior competitividade no mercado proporcionou a viabilidade do presente estudo. Este trabalho teve como objetivo uma análise avançada da conformabilidade de um aço laminado a quente classe estampagem. Esta avaliação foi conduzida através da correlação existente entre as propriedades mecânicas do material e as características da textura cristalográfica, introduzidas através do processo de laminação a quente deste aço. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV) em conjunto com a técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD – *Electron Backscatter Diffraction*) para revelar a correlação entre as propriedades obtidas através de ensaios mecânicos convencionais e a textura cristalográfica do material.

Palavras-chave: Laminação a quente; Conformabilidade; Textura cristalográfica; EBSD.

FORMABILITY ANALYSIS OF A DRAWING CLASS HOT ROLLED STEEL VIA EBSD AND MECHANICAL TESTING

Abstract

The constant increase of the innovation's concept application on the development of more competitive products to the market provided the viability of this study. This paper aims an advanced formability analysis of a hot rolled steel stamping class. This evaluation was conducted by the correlation between the mechanical properties and the characteristics of the crystallographic texture introduced through the hot rolling process. A scanning electron microscope (SEM) associated with the electron backscatter diffraction (EBSD) technique were used to show the correlation between the mechanical properties obtained through conventional tests and the crystallographic texture of the material.

Keywords: Hot rolling; Formability; Crystallographic texture; EBSD.

¹ Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos, Companhia Siderúrgica Nacional – Volta Redonda, RJ – Brasil.

³ M.Sc., Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Projetos Especiais, Companhia Siderúrgica Nacional – Volta Redonda, RJ – Brasil.

⁴ Engenheiro Eletricista, Engenheiro de Desenvolvimento de Produtos, Companhia Siderúrgica Nacional – Volta Redonda, RJ – Brasil.

⁵ Corpo técnico, Companhia Siderúrgica Nacional – Volta Redonda, RJ – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de processamentos termomecânicos aos materiais metálicos é uma das diversas maneiras de se controlar as propriedades presentes nessa categoria de materiais. Em específico, o processo de laminação dos aços é amplamente utilizado no setor siderúrgico e resulta em produtos destinados a inúmeros segmentos do mercado. Geralmente, os aços laminados têm um controle de suas propriedades a partir da adição de elementos de liga, refinamento microestrutural, transformações de fase e tratamentos térmicos. Através do avanço da tecnologia na análise dos materiais cristalinos, tornou-se possível a observação da textura cristalográfica de materiais metálicos. Atualmente os estudos estão direcionados para a previsão e controle preciso desta propriedade.

O presente trabalho estudou a textura cristalográfica presente em um aço laminado a quente, com o objetivo de correlacionar esta característica, obtida através de análise estatística, com as propriedades mecânicas. Em seguida, espera-se determinar e controlar as variáveis que forem capazes de gerar a otimização das propriedades de conformabilidade deste material quando o mesmo for solicitado mecanicamente.

A textura cristalográfica é uma propriedade definida como a distribuição da orientação dos cristais em um agregado policristalino, visto que durante os processos de deformação plástica ou tratamento térmico, os grãos têm a tendência de sofrer sucessivas rotações.⁽¹⁾ As etapas de processamento termomecânico de um material metálico podem produzir um efeito de orientação preferencial, podendo ser introduzida pela solidificação direcional (gradientes de temperatura durante a solidificação), deformação plástica, recristalização ou por transformação de fase. Se o material exibir orientação preferencial, diz-se que apresenta textura e suas propriedades são anisotrópicas e se a orientação estiver distribuída ao acaso ou aleatória o material é ausente de textura e suas propriedades são consideradas isotrópicas.⁽²⁾ O controle da textura se torna importante devido ao forte efeito nas propriedades do produto final. Conhecendo-se a textura é possível a obtenção de um melhor entendimento do comportamento do material durante e após as etapas de processamento termomecânico.⁽³⁾ Sendo assim, é possível a otimização de processos de estampagem profunda através do controle desta propriedade, por exemplo.

Através da técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD – *Electron Backscatter Diffraction*) calcula-se a função distribuição de orientação (FDO), que é fundamental para uma descrição estatística da textura. Estas funções determinam a frequência de ocorrência de determinadas orientações em um espaço tridimensional definido por três ângulos de *Euler* $\{\varphi_1, \Phi, \varphi_2\}$, os quais representam as rotações necessárias do sistema de coordenadas da amostra em análise. Existem dois sistemas de notação para os ângulos de *Euler*. Um foi proposto por *Bunge* e outro por *Roe*, sendo o mais utilizado o sistema proposto por *Bunge*,^(1,2) utilizado no presente estudo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

O material utilizado neste trabalho foi produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional. O material foi lingotado para a confecção de uma placa e em seguida, a

placa foi desbastada via laminação a quente até a espessura de aproximadamente 2 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal da liga estudada.

Tabela 1 - Composição química do aço em estudo (teores expressos em % em peso)

C máx.	Mn máx.	P máx.	N máx.	Si máx.	Al mín.
0,06	0,45	0,03	0,006	0,03	0,020

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação metalográfica

As amostras foram inicialmente preparadas seguindo os procedimentos convencionais de metalografia. Foram realizadas etapas de lixamento seguidas por polimento mecânico. Para análise da textura via EBSD foi realizado um polimento diferenciado, através do uso de uma solução de sílica coloidal.

2.2.2 Difração de elétrons retroespalhados

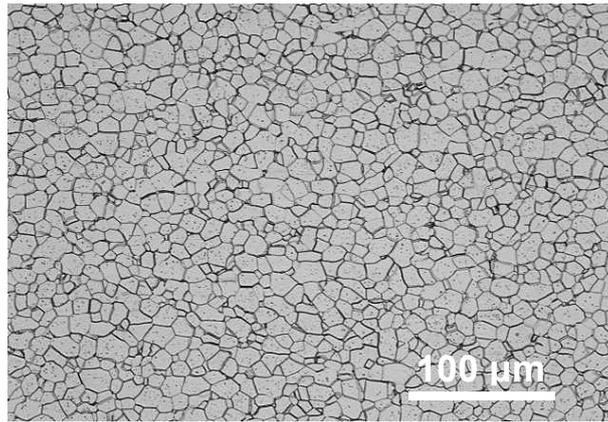
As medidas de EBSD foram realizadas utilizando-se um sistema da EDAX que se encontra acoplado ao FEG (*Field Emission Gun*) instalado na CSN. O sistema possui uma câmera de ultra-alta velocidade. A área de cada amostra foi mapeada com *step size* de 1 μm e resolução angular de até 2° para determinar as frações de contorno de baixo ângulo.

Os dados gerados foram analisados e interpretados por meio de perfis de distribuição de diferenças de orientação, distribuições e cálculo de tamanho de grão e as FDOs. A técnica de EBSD consiste em posicionar, no microscópio eletrônico de varredura (MEV), uma amostra com superfície perfeitamente plana inclinada a 70° com o feixe de elétrons incidente.

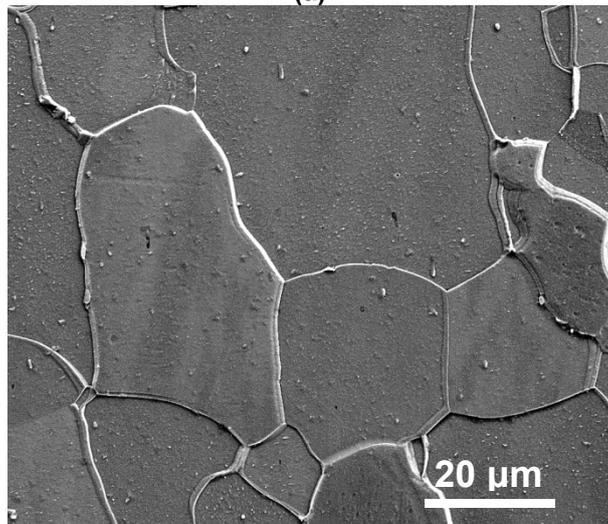
A determinação da textura cristalográfica do material foi analisada a partir das FDOs calculadas para o material laminado. Para que a análise da textura do material seja confiável, a avaliação está aliada a uma representação estatística dos dados, onde foi empregado um método sistematizado no qual foram analisadas áreas que totalizam um número acima de 2000 grãos representativos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O material apresentou uma microestrutura originada do processo de laminação a quente, onde os grãos encontraram-se recristalizados. A microestrutura é composta de grãos ferríticos em conjunto com a presença de precipitados de cementita globular fina. A Figura 1 apresenta os aspectos microestruturais presentes na seção longitudinal do material.



(a)



(b)

Figura 1 – Micrografias via (a) microscopia óptica (MO), referente à seção longitudinal; e (b) microscopia eletrônica de varredura (MEV; *Extra High Tension* (EHT) = 10 kV; detector de elétrons secundários), referente ao plano de laminação, representativas da microestrutura do material laminado a quente classe estampagem em estudo.

Com a construção de mapas de orientação, a partir da técnica de EBSD, foram obtidos dados do material processado. Através da interpretação de todos os valores, foi realizada uma análise apurada deste aço laminado.

Uma característica importante dos materiais policristalinos é o tamanho de grão. A partir do *software* de análise dos dados provenientes da varredura de EBSD, é definido o conceito de contorno de ângulo de rotação. Definiu-se toda variação de até 15° como contorno de baixo ângulo e que a partir deste valor seria denotado como de alto ângulo. Sendo assim, para o cálculo desta característica, foi realizada uma estatística através de todas as fronteiras de alto ângulo, resultando em 12,88 μm. O valor citado anteriormente é uma média dos valores calculados, porém é importante uma análise representativa a partir da distribuição de todos tamanhos de grão em função da sua fração volumétrica, como está apresentado na Figura 2.

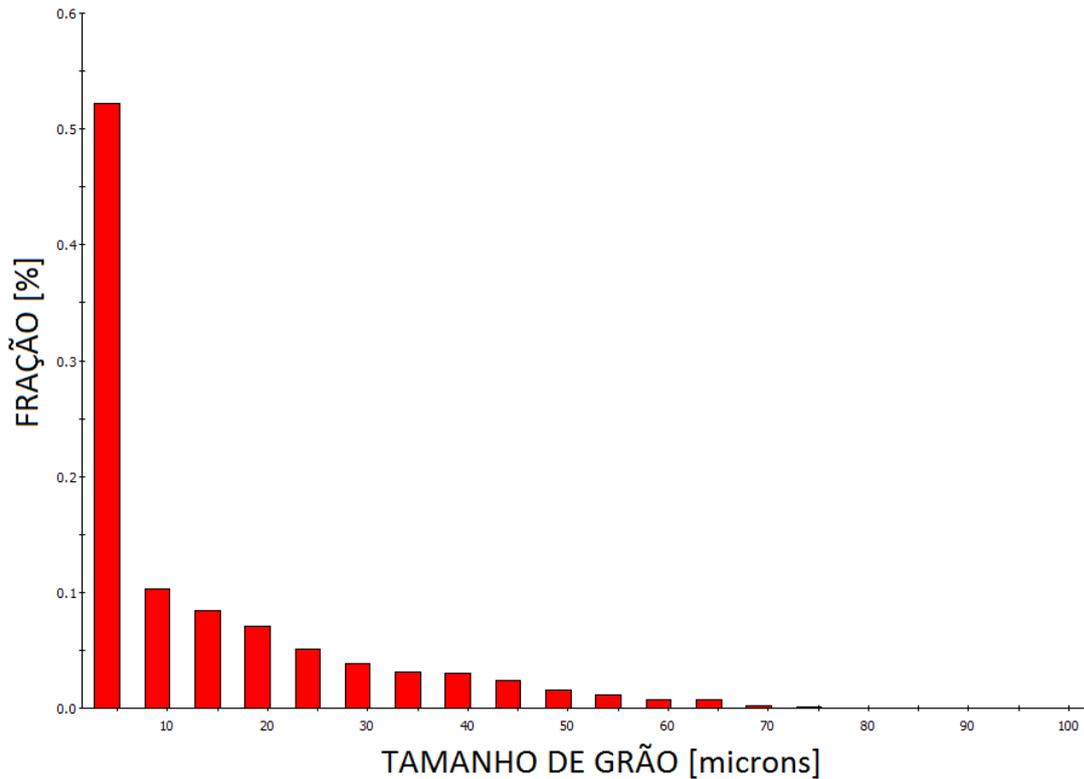


Figura 2 – Distribuição das medidas de tamanho de grão em função da fração volumétrica desta característica.

Os dados de orientação coletados através das varreduras são capazes de gerar mapas de orientação (OIM – *Orientation Image Map*) sendo que a partir deles se torna simples observar a distribuição das orientações cristalográficas pela microestrutura do material. A Figura 3 apresenta alguns destes mapas referentes ao material analisado.

Aprofundando nesta análise estatística em função das orientações referentes aos cristais presentes no aço, foi interessante a realização de um cálculo estatístico das componentes de textura presentes material.

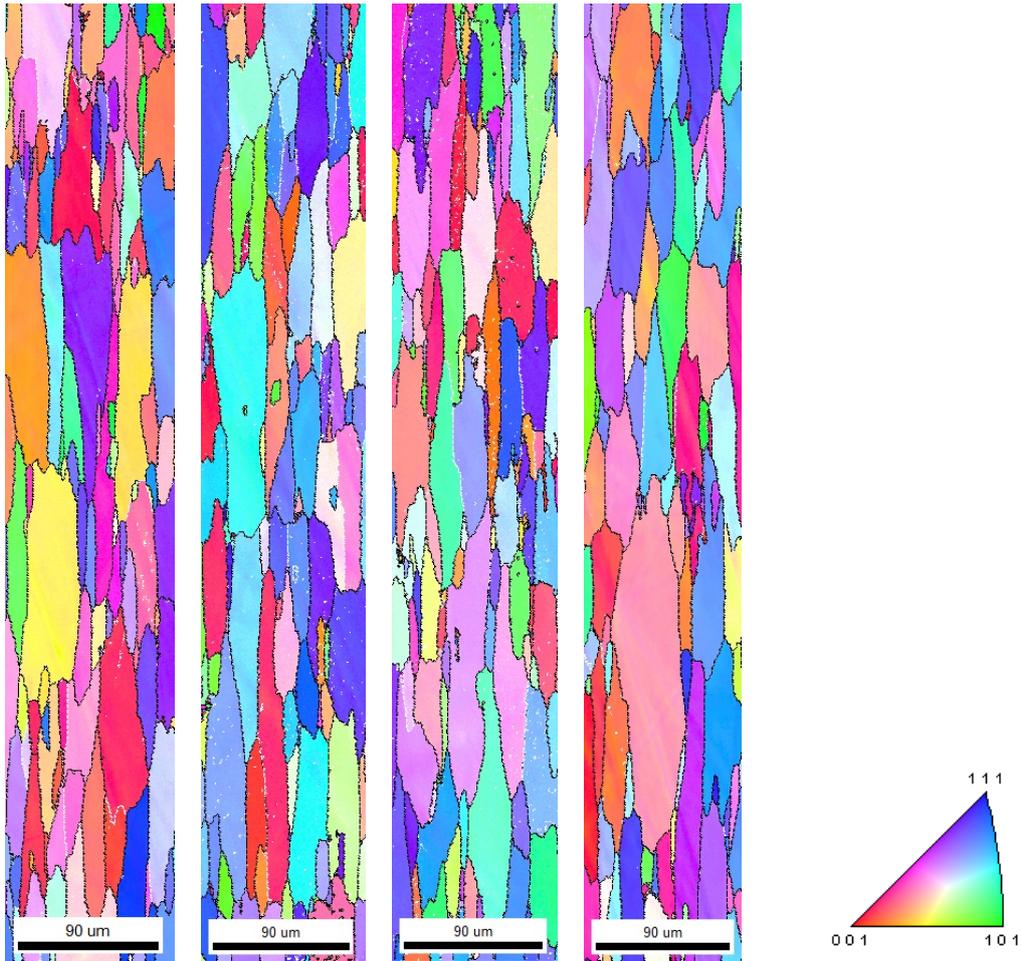


Figura 3 – Alguns mapas de orientação referentes ao plano de laminação do material laminado a quente. Nota-se uma aleatoriedade nas orientações cristalográficas, porém existe uma certa tendência para $\{111\}/\text{DN}$. (EBSD; EHT = 20 kV)

A determinação das orientações preferenciais $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ através das FDOs é feita por meio de ábacos de indexação. Os ábacos são apresentados com notações de *Bunge* para os ângulos de *Euler*, em que os planos são representados por linhas retas e as direções por pontos sobre as linhas. Algumas orientações são típicas de certos materiais e seu respectivo processamento. A partir da observação da maior intensidade das fibras, na FDO em $\varphi_2 = 45^\circ$ presente na Figura 4, é possível determinar algumas características da textura do material.

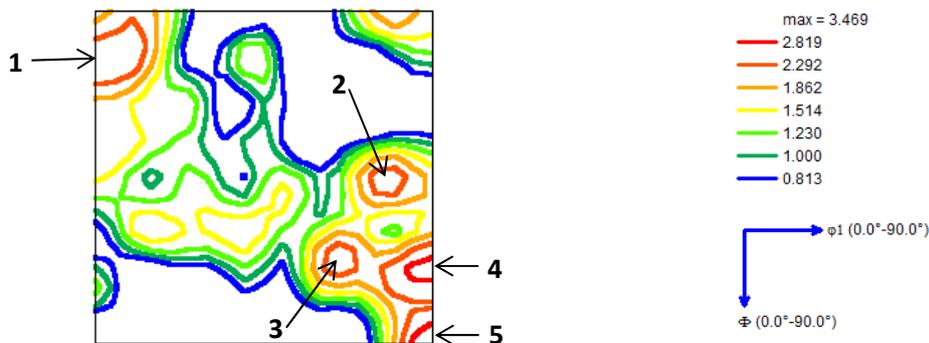


Figura 4 – FDO em $\varphi_2 = 45^\circ$, apresentando 5 leves componentes de textura cristalográfica.

Os materiais laminados a quente apresentam grande aleatoriedade quando se referencia a orientação cristalina, foram encontradas componentes fracas de textura, da ordem de 2,292 até 3,469. Essa grande aleatoriedade dos grãos promoveu em favor da isotropia plástica, o que é representada por \bar{R} tendendo ao número 1. O presente material também apresentou graus de isotropia planar como pequenas variações das propriedades mecânicas no plano chapa, representado por baixos valores de ΔR .

A análise da FDO apresenta quatro componentes com intensidade considerável em relação à máxima observada. Nestas faixas podemos determinar as orientações associadas através de ábacos de indexação e assim quantificar as intensidades referentes às texturas introduzidas neste material laminado a quente. A Tabela 2 apresenta as orientações preferenciais, de baixa intensidade, constatadas.

Tabela 2 – Indexação das texturas presentes nas componentes encontradas em $\varphi_2 = 45^\circ$

Componente	Textura cristalográfica
1	$(001)[\bar{1}\bar{1}0]$
2	$(\bar{2}23)[0\bar{1}2]$
3	$(\bar{2}21)[0\bar{1}1]$
4	$(\bar{2}21)[1\bar{2}3]$
5	$(\bar{1}10)[001]$

Devido às condições do processo de laminação a quente o material apresenta de certa forma uma textura aleatória, porém o estudo através da técnica de EBSD permite a quantificação, em termos de intensidade, das componentes de textura presentes nas áreas analisadas. Sendo assim, nota-se que entre a aleatoriedade, esses níveis de intensidade de orientação tiveram efeito sobre a redução dos valores de R do material.⁽⁴⁾

Outra forma de se analisar as componentes da textura cristalográfica presente nos materiais é por meio da figura de pólo. Tendo em vista que é de interesse a quantificação e a observação da textura cristalográfica $\{111\}$ //DN, denominada fibra DN, observada com intensidade baixa na FDO como característica comum entre aços laminados a quente, gerou-se a figura de pólo para esta condição na Figura 5.

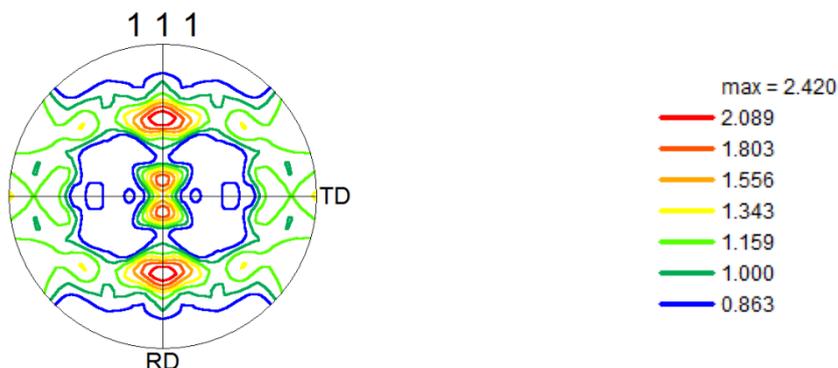


Figura 5 – Figura de pólo representativa do material. Nota-se uma tendência para a intensificação das orientações referentes à $\{111\}$ //DN.

Notou-se a partir da figura de pólo gerada que existe uma tendência para a formação da textura desejada para a estampagem $\{111\}$ //DN, porém as intensidades

são baixas devido à condição das chapas de aço processadas a quente até uma espessura de aproximadamente 2 mm. Os aços, de maneira geral, após laminação a quente, apresentam grãos com intensa aleatoriedade, apresentando componentes leves de textura, oriundas da deformação ou recristalização. A textura cristalográfica está correlacionada sobre as propriedades mecânicas dos materiais metálicos em relação à conformabilidade do material e suas características de deformação. Os valores das propriedades mecânicas encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas médias obtidas por meio de ensaio de tração uniaxial em corpos de prova extraídos na direção transversal ao sentido de laminação

LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	R	n
248	351	28,2	0,831	0,181

O coeficiente de encruamento, n , indica a capacidade de deformação plástica uniforme, ou seja, até o ponto de estricção, onde se inicia o processo de instabilidade plástica e o material se deforma de forma uniforme. Dessa forma, o presente material apresentou capacidade de encruamento, ou seja, aumento de resistência por deformação plástica. Algumas componentes de textura apresentaram efeito na anisotropia plástica normal e planar. Assim, a componente de textura $\{111\}$ //DN é ideal para processos de estampagem profunda, pois maximiza o \bar{R} e minimiza o ΔR , sendo assim, espera-se descobrir os mecanismos de formação de textura neste material para assim controlar o processo de laminação, visando a otimização da estampabilidade do material.

4 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas no material deste estudo, foi possível concluir que o aço apresentou a microestrutura homogênea e composta de grãos ferríticos recristalizados. Também estavam presentes precipitados de segunda fase em forma de cementita globular fina. Esta microestrutura teve significativa influência nas propriedades mecânicas características apresentadas pelo material.

Com a análise da textura cristalográfica foi possível notar que o material apresentou uma elevada aleatoriedade na orientação dos grãos, característica comum dos materiais laminados a quente. Sendo assim, o estudo focou em analisar as componentes onde se encontravam as máximas intensidades de textura, mesmo elas sendo leves. Estas componentes indicaram a tendência da formação da fibra $\{111\}$ //DN, porém em intensidades baixas. A indicação desta preferência branda de orientação foi importante fator responsável pelo excelente desempenho deste material no mercado.

O fato de ser um material laminado a quente, de certa forma, restringiu a intensificação da textura no aço, entretanto, com a ferramenta de EBSD foi possível quantificar esses níveis e estudos futuros visando alterações no processo de laminação para a intensificação dessas componentes.

O aço apresentou excelentes características mecânicas de conformabilidade dentro da categoria dos produtos laminados a quente.

Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem: Companhia Siderúrgica Nacional - Usina Presidente Vargas (CSN-UPV) pelo fornecimento das amostras de aço para a

realização deste estudo; e ao Centro de Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional em conjunto com todo corpo de funcionários, pela estrutura e foco no desenvolvimento de produtos.

REFERÊNCIAS

- 1 GODEC, A., JENKO, M., Presentation methods of textures measurements. *Materiali in Tehnologie*, v. 34, p. 359-364, 2000.
- 2 RANDLE, V. and ENGLER, O., Introduction to texture analysis. *Macrotexture, Microtexture and Orientation Mapping*. Amsterdam, Gordon & Breach, 2000.
- 3 VIANA, C. S. C, PAULA, A. S., Texturas de Deformação. In: *TEXTURA E RELAÇÕES DE ORIENTAÇÃO*. 2ª ed., São Paulo. 1º Workshop sobre Textura São Paulo: EPUSP, 2003.
- 4 RAY, R. K., JONAS, J. J., BUTRÓN-GUILLÉN, M. P., SAVOIE, J., Transformation Texture in Steels. *ISIJ International*, vol. 34, p. 927-942, 1994.