

# ESTUDO DO EFEITO DO PROCESSAMENTO TERMOMECÂNICO NO REFINO DE GRÃO DE AÇOS C-Mn E ARBL<sup>1</sup>

Almir Turazi<sup>2</sup>  
Carlos Augusto Silva de Oliveira<sup>3</sup>

## Resumo

Para aumentar a resistência mecânica, a tenacidade e a soldabilidade, com menores custos procura-se produzir aços com granulação cada vez mais fina. Na laminação de tiras a frio, pode-se refinar o grão ferrítico pelo aumento dos sítios para nucleação ou pela redução da taxa de crescimento dos grãos no recozimento após a laminação. Neste trabalho estudou-se, laboratorialmente, o efeito de variáveis de processo no refino de grãos ferríticos. Este estudo foi realizado de modo a simular possíveis condições de aplicação na indústria. Os materiais estudados foram tiras de aço C-Mn e microligados ao Nb e Nb-Ti. Inicialmente, foram caracterizados através de análise metalográfica e ensaios mecânicos os aços laminados a frio e a quente produzidos industrialmente. Em seguida, foram reproduzidas rotas de processamento, em laboratório, envolvendo têmpera, revenido, conformação a frio e recozimento. Entre as rotas estudadas, uma simulou os parâmetros utilizados pela indústria atualmente. Por fim, foi realizada a análise dos resultados do processamento gerados em laboratório comparando-se a rota industrial e as novas rotas sugeridas. No laboratório os resultados mostraram redução de 33% a 43% do tamanho de grãos entre a rota do processamento industrial reproduzida e a desenvolvida com maior refino de grão. No aço C-Mn o tamanho médio dos grãos na simulação do processamento industrial foi de 7,7  $\mu\text{m}$  e dureza de 135 HV. Na rota mais eficaz, este tamanho foi de 5,2  $\mu\text{m}$  e dureza de 144 HV. Nos aços ARBL o tamanho médio foi 3,6  $\mu\text{m}$  e 206 HV de dureza.

**Palavras-chave:** Conformação a frio; Refino de grão; Simulação.

## THE EFFECT OF THERMOMECHANICAL PROCESS ON THE GRAIN SIZE OF C-Mn AND HSLA STEEL

### Abstract

Ferrite grain size control is one of the most suitable ways to improve strength, toughness and weldability. Grain size can be controlled in annealing after cold rolling process by ferrite nucleation and / or growth. This work aimed about the study of process variables simulation to refining the grain of C-Mn, Nb and Nb – Ti steels. The variables were selected in order to simulate future industrial conditions. The studied variables were: heat treatment (quenching, tempering and annealing) and cold deformation. The best laboratory simulations showed a 43% reduction grain size from the industrial simulation, from 6.4 to 3.7  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** Cold rolling; Grain size; Simulation.

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

<sup>2</sup> Mestrando PGMAT, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: [almirturazi@hotmail.com](mailto:almirturazi@hotmail.com).

<sup>3</sup> DSc, Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: [carlosa@emc.ufsc.br](mailto:carlosa@emc.ufsc.br).

# 1 INTRODUÇÃO

O setor industrial sente cada vez mais a necessidade de melhorar a qualidade de seus produtos sem que haja aumento nos custos envolvidos. Algumas pesquisas no desenvolvimento de aços laminados buscam materiais mais resistentes através de modificações nos seus processamentos de modo a se obter grãos cada vez mais finos. O refino de grão aumenta a resistência das chapas metálicas, com menores custos de produção, comparado com a adição de elementos de liga, por exemplo.

Já é muito conhecido o efeito do tamanho médio dos grãos na resistência dos aços através da equação de Hall-Petch:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

Esta equação mostra que o limite de escoamento ( $\sigma$ ) do aço com baixo teor de carbono varia inversamente com a raiz quadrada do diâmetro de grão ( $d$ ). Quanto menor o tamanho de grão de um material policristalino, maior a quantidade de contornos, o que dificulta a movimentação de discordâncias pelo material devido a maior desorientação cristalina encontrada nas regiões de contorno.<sup>(1)</sup>

Uma das formas para se obter redução do tamanho de grãos na laminação a frio/ recozimento envolve o estudo e a alteração de algumas variáveis do processamento como: quantidade de deformação, parâmetros de tratamentos térmicos, temperatura de recozimento e tamanho inicial dos grãos. Dependendo de como estas variáveis são combinadas pode-se produzir uma maior nucleação de ferrita ou reduzir a sua taxa de crescimento durante o recozimento de recristalização ocasionando um tamanho de grãos final menor.

O objetivo deste trabalho foi portanto, o de estudar o efeito do processamento no refino de grão ferrítico e nas propriedades mecânicas de três aços; um C-Mn e dois microligados, um ao Nb e outro Nb-Ti. Este estudo foi realizado em laboratório, procurando simular possíveis condições de aplicação na indústria. No caso estudado, o processo de fabricação atual envolve conformação a frio e recozimento. As variáveis estudadas foram temperaturas de recozimento e tratamentos térmicos (especificamente têmpera e revenido). A quantidade de deformação a frio não foi estudada em função das características do processamento industrial destes aços, onde o material de partida eram bobinas laminadas a quente com 2 mm de espessura e o produto final eram bobinas laminadas a frio com 1mm de espessura.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em chapas de aços fornecidas pela empresa Brasmetal Waelzholz S.A. conforme especificações abaixo:

**Tabela 1-** Composição química dos aços fornecidos pela indústria (% em peso).

Aço	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	Ti	N
CF <sup>(a)</sup>	0,13	0,79	0,016	0,005	0,21	0,034	-	-	0,0062
ML Nb <sup>(b)</sup>	0,09	1,04	0,018	0,004	0,07	0,039	0,036	-	0,0044
ML Nb+Ti <sup>(c)</sup>	0,10	0,9	0,021	0,008	0,28	0,047	0,022	0,074	0,0053

<sup>(a)</sup>CF: Material conforme NBR 6650

<sup>(b)</sup>ML Nb: Material conforme NBR 6656 - Microligado ao Nióbio

<sup>(c)</sup>ML Nb+Ti: Material conforme NBR 6656 - Microligado ao Nióbio e Titânio

Cada aço foi obtido nas seguintes condições:

MP= laminado a quente (matéria-prima da indústria). Espessura= 2 mm.

PA= laminado a frio e recozido (produto acabado da indústria). Espessura= 1 mm.

Partindo-se do processamento atual, onde as chapas sofrem uma redução de 50% de espessura por laminação a frio e, em seguida, um recozimento a 700°C, foram desenvolvidos novos caminhos para processamento visando a redução do tamanho de grãos.

As variáveis estudadas incluíram desde têmpera e revenido até temperaturas e tempos diversos para o recozimento. Sete rotas foram estudadas, em laboratório, conforme descrito a seguir:

1ª) Deformação a frio com redução de 50% de espessura seguida de recozimento a 700°C por uma hora (reprodução do processo atualmente realizado na indústria). O intuito é avaliar a eficiência do teste laboratorial e obter parâmetros para comparar as rotas propostas.

2ª) Deformação a frio com redução de 50% de espessura seguida de recozimento a 650°C por uma hora. Espera-se que uma temperatura de recozimento menor reduza o crescimento dos grãos.

3ª) Aquecimento a 910°C por 30 minutos, têmpera em água e revenido a 650°C por uma hora. Em seguida deformação a frio com redução de 50% da espessura e recozimento a 600°C por uma hora.

4ª) Têmpera a 910°C seguida de revenido a 650°C e deformação a frio, mas com temperatura de recozimento de 650°C, visando avaliar a influência da temperatura de recozimento no tamanho final de grão.

5ª) Aquecimento a 740°C por 30 minutos seguido de têmpera em água, visando a obtenção de um aço "dual phase". Após têmpera, uma deformação a frio com redução de 50% da espessura e, por fim, um recozimento a 650°C por 1 hora. Aços baixo carbono podem ser tratados com uma têmpera intercrítica (temperaturas entre A3 e A1) para formar uma estrutura bifásica de ferrita mais martensita.<sup>(2,3)</sup> Espera-se que a martensita formada aumente o número de sítios de nucleação de novos grãos de ferrita durante o recozimento, reduzindo o tamanho final dos grãos.

6ª) Deformação a frio com redução de 50% de espessura seguida de recozimento a 700°C por 4 horas. (Rota 1 com maior tempo de recozimento).

7ª) Aquecimento a 740°C por 30 minutos seguido de têmpera em água. Deformação a frio com redução de 50% da espessura e, por fim, um recozimento a 650°C por 4 horas. (Rota 5 com maior tempo de recozimento).

As rotas 6 e 7 foram utilizadas para verificar o efeito do tempo de recozimento no tamanho de grão dos aços estudados, já que na indústria é comum ter tempos de recozimento maiores.

A conformação a frio foi realizada em uma prensa de fricção e os tratamentos térmicos (têmpera, revenido e recozimento) em um forno mufla, ambos no LabConf – UFSC.

As amostras fornecidas pela indústria (MP e PA) e as de cada rota produzida em laboratório foram lixadas, polidas e atacadas com nital 2% para então serem analisadas em microscópio óptico para determinação do tamanho médio dos grãos ferríticos, através da norma ASTM E 112-96. Na determinação dos tamanhos de grão se utilizou o software Image Pro Lite.

As propriedades mecânicas foram avaliadas através de ensaio de microdureza. Este ensaio foi realizado utilizando-se um microdurômetro Vickers, marca SHIMADZU – mod. HMV, com carga de 2,9418 N e penetrador piramidal de diamante. Foram realizadas no mínimo 7 medidas por condição.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização dos Materiais Fornecidos pela Indústria

As Figuras 1 e 2 mostram as microestruturas do aço ML Nb+Ti tanto na condição MP como na condição PA. Os resultados do tamanho de grãos são apresentados na Tabela 2 e os de microdureza Vickers na Tabela 3.

Na condição MP (laminado a quente) o aço ML Nb+Ti é o que apresenta menor tamanho de grão dentre os aços estudados. Para DeArdo,<sup>(4)</sup> isto ocorre devido ao efeito de refino de grão dos elementos microligantes, Nb e Ti.

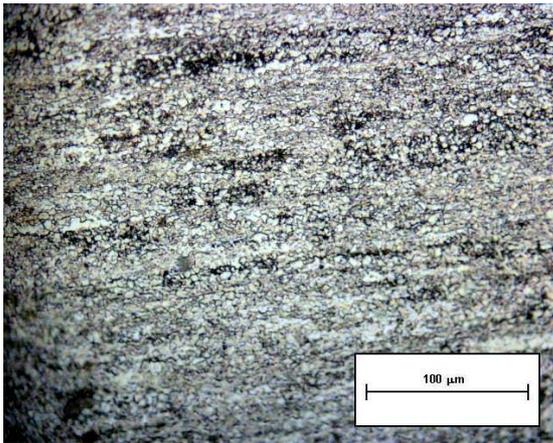


Figura 1- Material ML Nb+Ti – matéria-prima

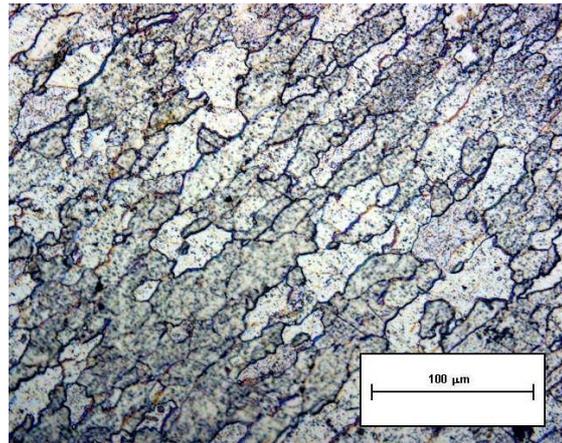


Figura 2- Material ML Nb+Ti - produto acabado

Tabela 2- Tamanho de grão dos materiais fornecidos pela indústria.

MATERIAL	CONDIÇÃO	TAMANHO DE GRÃO (µm)	DESVIO PADRÃO
CF	MP	9,0	2,0
	PA	12,0	2,2
ML (Nb)	MP	7,3	1,6
	PA	13,0	3,6
ML (Nb+Ti)	MP	6,6	1,2
	PA	15,3	3,4

Tabela 3- Microdureza Vickers dos materiais fornecidos pela indústria.

MATERIAL	CONDIÇÃO	MICRODUREZA VICKERS (HV - 2,9418 N)	DESVIO PADRÃO
CF	MP	174	3
	PA	139	4
ML (Nb)	MP	208	8
	PA	161	3
ML (Nb+Ti)	MP	228	1
	PA	168	4

Porém, após o processo de fabricação (laminação a frio e recozimento), nota-se que o tamanho dos grãos aumenta para todos os materiais estudados, e para o caso dos aços ARBL este aumento foi mais acentuado ainda. A ocorrência deste fato se baseia no tipo de processo de fabricação, onde o percentual de deformação a frio é relativamente pequeno e o tempo de recozimento muito grande (mais de 4 horas). O aumento mais acentuado dos grãos nos aços ARBL, está associado com a precipitação dos elementos microligantes que retiram o carbono de solução, conforme descrito por Gallego e Kestenbach,<sup>(5)</sup> o que acelera o processo de recristalização e crescimento dos grãos.

Quanto à resistência mecânica pode-se perceber que, mesmo apresentando grãos maiores, os aços ARBL possuem dureza mais elevada que o aço C-Mn na condição PA (produto acabado da indústria). Segundo Honeycombe<sup>(6)</sup> este efeito é devido a formação de carbonetos/ nitretos microligados que bloqueiam, total ou parcialmente, a movimentação de discordâncias nos planos de deslizamento do material. Este efeito acaba tendo maior influência na dureza final da peça que o efeito causado pelo tamanho dos grãos.

### 3.2 Análise das Novas Rotas Desenvolvidas em Laboratório

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados de tamanho de grão ferrítico e microdureza das amostras processadas em laboratório:

**Tabela 4-** Tamanho de grãos obtido com as novas rotas propostas.

ROTA	MATERIAL	TAMANHO DE GRÃO ( $\mu\text{m}$ )	DESVIO PADRÃO
1	CF	7,7	1,4
	ML Nb	6,0	1,0
	ML Nb+Ti	6,4	1,1
2	CF	7,5	0,9
	ML Nb	5,6	0,7
	ML Nb+Ti	6,4	0,8
3	CF	7,0	1,1
	ML Nb	6,1	0,9
	ML Nb+Ti	5,7	0,8
4	CF	9,5	1,7
	ML Nb	9,1	1,4
	ML Nb+Ti	7,5	0,9
5	CF	5,2	0,5
	ML Nb	3,6	0,3
	ML Nb+Ti	3,7	0,3
6	CF	7,5	1,3
	ML Nb	5,8	0,6
	ML Nb+Ti	5,8	0,6
7	CF	6,4	0,8
	ML Nb	4,1	0,2
	ML Nb+Ti	4,1	0,4

Seguindo-se o mesmo processo da indústria, mas em escala laboratorial (rota 1), percebe-se uma redução do tamanho médio de grãos. Isto se deve ao fato de que, em um processo industrial o tempo de recozimento é maior e, também, à diferença entre o processo de deformação a frio utilizado na indústria e o simulado em laboratório. No laboratório foi utilizado o forjamento a frio (recalque) em uma prensa de fricção e na indústria utilizou-se a laminação. No forjamento, embora as espessuras inicial e final tenham sido iguais as obtidas por laminação, ocorrem mais deformações secundárias, o que aumenta o encruamento. A maior quantidade de encruamento faz com que se obtenham, no recozimento, grãos menores.

Os valores do tamanho de grão obtidos na simulação em laboratório, embora menores do que os obtidos na indústria serviram de base para comparação entre as diversas rotas laboratoriais propostas.

A redução da temperatura de recozimento não gerou resultados significativos, conforme visto na rota 2 (mesmo processo industrial modificando-se a temperatura de recozimento de 700°C para 650°C), onde os valores de tamanho de grão e dureza pouco variaram.

As rotas 3 e 4, onde se introduziu uma têmpera a 910°C, não apresentaram o refino de grãos esperado. A análise das amostras da rota 3 apresentou tamanho de grãos semelhante ao processo atualmente utilizado. Para o segundo caso (rota 4), onde a temperatura de recozimento foi maior que na rota 3, houve aumento do tamanho de grãos final, se comparado com a rota 1.

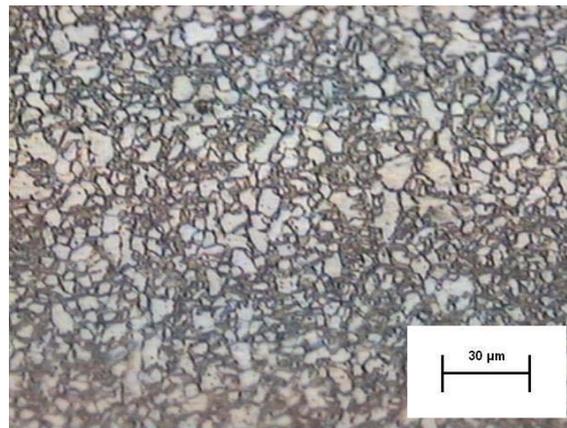
**Tabela 5-** Microdureza Vickers das amostras geradas com as novas rotas propostas.

<b>ROTA</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>MICRODUREZA VICKERS (HV - 2,9418 N)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>
1	CF	135	1
	ML Nb	157	1
	ML Nb+Ti	201	13
2	CF	134	0
	ML Nb	172	6
	ML Nb+Ti	271	9
3	CF	193	3
	ML Nb	185	10
	ML Nb+Ti	156	1
4	CF	136	1
	ML Nb	133	2
	ML Nb+Ti	161	4
5	CF	144	2
	ML Nb	160	2
	ML Nb+Ti	206	5
6	CF	140	4
	ML Nb	146	4
	ML Nb+Ti	182	9
7	CF	135	3
	ML Nb	166	3
	ML Nb+Ti	204	5

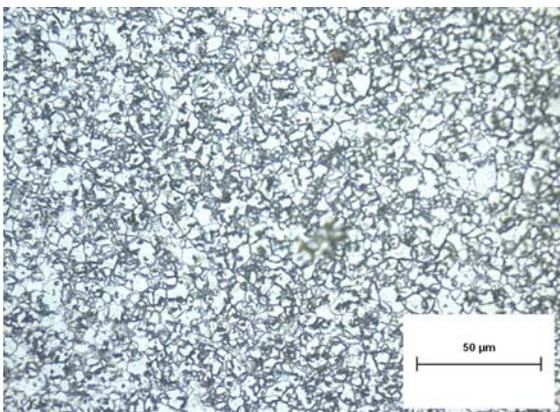
A rota que apresentou melhores resultados, quanto a refino de grãos e melhoria da resistência mecânica, foi a rota 5. Neste processo de fabricação utilizou-se uma têmpera intercrítica, onde apenas parte do material é austenitizado. Segundo Trowsdale,<sup>(7)</sup> durante o aquecimento ocorre partição do carbono enriquecendo a austenita formada. Esta austenita enriquecida se transforma em martensita durante o resfriamento e a estrutura resultante é uma matriz ferrítica com ilhas de martensita.<sup>(7-9)</sup> (Uma amostra de material nesta condição pode ser observada na Figura 3). A pequena porcentagem de martensita é necessária para o aço ter ductilidade suficiente para ser deformado a frio.

Em aços baixo carbono a microestrutura martensítica tem a forma de ripas e a subestrutura é formada com alta densidade de discordâncias arranjadas na forma de células. A densidade de discordâncias é similar à encontrada em amostras submetidas a deformações severas à temperatura ambiente. Assim, pode-se esperar que a deformação da martensita aumente o número de sítios para nucleação da ferrita durante a recristalização, refinando o tamanho dos grãos. (10). Na Figura 4 a micrografia mostra o material ML Nb+Ti após ser processado pela rota 5.

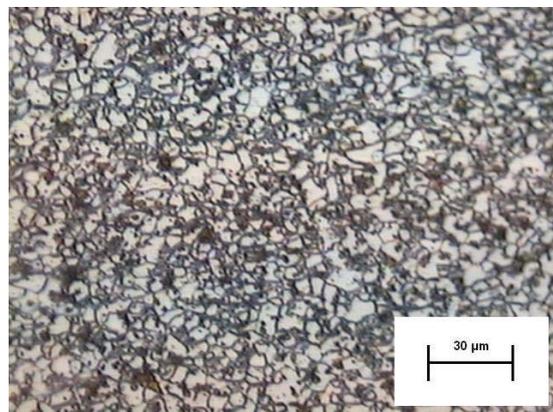
Analisando-se o efeito da variação do tempo de recozimento de uma para 4 horas, ou seja: comparando-se as rotas 5 com 7 e 1 com 6, respectivamente, não se observa variações significativas no tamanho de grão e na microdureza. A Figura 5 mostra a micrografia do aço ML Nb+Ti processado pela rota 7.



**Figura 3-** Aço ML Nb+Ti (MP) aquecido a 710°C e resfriado em água



**Figura 4-** Aço ML Nb+Ti - Rota 5



**Figura 5-** Aço ML Nb+Ti - Rota 7

## CONCLUSÃO

A redução da temperatura de recozimento durante os processos não gerou redução significativa no tamanho final de grãos.

A introdução de uma têmpera com aquecimento a 910 °C seguida de recozimento e resfriamento em água também não tem efeito no refino de grãos, apresentando aumento dos mesmos em uma das rotas simuladas, quando comparado ao processo atual reproduzido em laboratório (rota 1). A introdução de uma têmpera desta natureza encarece o processo de fabricação e não gera resultados significativos para tal investimento.

Para os processos onde introduziu-se uma têmpera intercrítica, os resultados obtidos, quanto ao refino de grãos, foram favoráveis. Para o material microligado ao nióbio e titânio obteve-se 43% de redução de tamanho médio de grãos comparado ao tamanho médio de grãos obtido pela rota 1. O aço microligado ao Nb apresentou 40% e o aço C-Mn 33% de redução.

A variação do tempo de recozimento de 1 para 4 horas não afetou significativamente a dureza e o tamanho médio de grãos.

## Agradecimentos

A Brasmetal Waelzholz S.A. Indústria e Comércio, em especial, ao doutor Antenor Ferreira Filho, pelo fornecimento de material, pelos ensaios industriais e pelo incentivo.

Ao CNPq, pelo financiamento do projeto.

A CAPES, pela bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981.
- 2 SANTOS, D.B.; BRUZSZEK, R.K.; RODRIGUES, P.C.M.; PERELOMA, E.V. **Formation of ultra-fine ferrite microstructure in warm rolled and annealed C-Mn steel**. Materials Science and Engineering A346, p. 189-195, 2003.
- 3 TAVARES, S.S.M.; PEDROZA, P.D.; TEODÓSIO, J.R.; GUROVA, T. **Mechanical Properties of a Quenched and Tempered Dual Phase Steel**. Scripta Materialia, V. 40, n. 8, p. 887–892, 1999.
- 4 DEARDO, A.J. **Metallurgical Basis for Thermomechanical Processing of Microalloyed Steels**. Ironmaking and Steelmaking, V. 28, n. 2, p. 138-144, 2001.
- 5 GALLEGO, J.; KESTENBACH, H.J. **Interação entre os Mecanismos de Endurecimento nos Aços Microligados**. XVI Cbecimat, Porto Alegre, p. 1, 2004.
- 6 HONEYCOMBE, R.W.K. **Carbide Precipitation in HSLA Steels**. Proc. Microalloyed HSLA Steels. (A. DeArdo, ed.), Chicago, p. 1-13, 1988.
- 7 TROWSDALE, A.J.; PRITCHARD, S.B. **Dual Phase Steels – High Strength Fasteners Without Heat Treatment**. Corus Constructions & Industrial, UK, 2002.
- 8 COTA, A.B.; OLIVEIRA, F.L.G.; BARBOSA, A.L.R.; LACERDA, C.A.M.; ARAÚJO, F.G.S. **Microstructure and Mechanical Properties of a Microalloyed Steel After Thermal Treatments**. Materials Research, V. 6, n. 2, p. 117-121, 2003.
- 9 MEDEIROS, J.L.B.; REGULY, A.; STROHAECKER, T.R.; SANTOS, F.P.; CRAIDY, P. **Desenvolvimento e Aplicações dos Aços Dual Phase**. 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, p. 937-942, 2006.
- 10 GALLEGO, J.; SILVA NETO, O.V.; JORGE Jr, A.M.; BALANCIN, O. **Obtenção de Grãos Ferríticos Ultrafinos em Aço Baixo Carbono Através de Tratamento Termomecânico a Morno**. 26º SENAFOR, 10º Conferência Internacional de Forjamento, Porto Alegre, p. 233-244, 2006.