

EFEITO DO PROCESSO TERMOMECÂNICO NA ESTAMPABILIDADE DE AÇOS ARBL¹

Almir Turazi²

Carlos Augusto Silva de Oliveira³

Resumo

O refino de grão ferrítico se tornou alvo de pesquisas nas indústrias devido à possibilidade de aumento da qualidade do material através de pequenas modificações nos processos de fabricação. Este fato reduz os custos envolvidos, se comparado a outros processos de refino de grão. Na produção de aços laminados, espera-se que ocorra melhoria nas propriedades mecânicas e, principalmente, na sua estampabilidade. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito do processamento (laminação a frio e tratamento térmico) na estampabilidade de aços microligados ao Nb e Ti. O intuito foi o desenvolvimento de processo termomecânico de tiras metálicas que gerasse grãos mais finos, aumentando a resistência, e apresentasse boa estampabilidade. O primeiro passo foi a caracterização (microestrutura, dureza, resistência à tração, tamanho de grão e curvas limite de conformação) de chapas de aços ARBL como produzidas industrialmente. Em seguida foram desenvolvidos novos caminhos para processamento, em laboratório, visando sempre a geração de sítios de nucleação de novos grãos após deformação, com o intuito de refinar o grão ferrítico. Após avaliação das simulações em laboratório, a rota com maior eficácia foi realizada em escala industrial. Na tira produzida industrialmente, por esta nova rota, foram realizados os mesmos ensaios da caracterização inicial para comparação.

O levantamento de curvas FLC's mostrou que o aço microligado ao Nb+Ti obteve um aumento na capacidade de deformação combinada (eixos x e y) tanto para os casos de estiramento como para algumas situações de embutimento nas chapas.

Palavras-chave: Refino de grão; Curva limite de conformação.

THE EFFECT OF THERMOMECHANICAL PROCESS ON THE FORMABILITY OF HSLA STEEL

Abstract

To reduce the size of ferrite grain is very important for the industries due to possibility of increase of the quality of the material through simple alterations in the manufacture processes. The objective of this study was to evaluate the effect of the processing (heat treatment and cold deformation) in the Nb-Ti steel formability through reduction of size of grain. This work can be divided in three stages: i) characterization of the materials; ii) simulation of new processes in laboratory; iii) application in the industry. The Forming Limit Diagrams had shown that the Nb-Ti steel got an increase in the deformation capacity, as much for cases of stretching as for some situations of inlaying in plates.

Key words: Grain size; Forming limit diagram.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

² Mestrando PGMAT, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: almirturazi@hotmail.com.

³ DSc, Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: carlosa@emc.ufsc.br.

1 INTRODUÇÃO

Nos processos de fabricação de chapas de aço atualmente empregados na indústria, o tamanho de grão ainda se restringe a um limite considerado alto, levando-se em conta as propriedades que podem ser alcançadas com a sua redução.

Uma das formas para se obter redução do tamanho de grãos na laminação a frio/ recozimento, por exemplo, 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, aumentando, teoricamente, sua resistência mecânica. 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.⁽¹⁾

O processo de estampagem, também pode ser influenciado pela melhora das propriedades mecânicas. O conceito de “estampabilidade” é baseado em primeiro lugar na ruptura. Isto quer dizer que um material com boas características de conformabilidade não deve romper durante a conformação.⁽²⁾

Com base nesses dados as indústrias laminadoras de aços sentem a necessidade e percebem a grande viabilidade de desenvolvimento de processo termomecânico de tiras metálicas que gere grãos mais finos, aumentando a resistência, e acabe apresentando boa estampabilidade.

No caso a ser estudado, o processo de fabricação atual envolve conformação a frio e recozimento. As variáveis estudadas e manipuladas foram temperaturas de recozimento e tratamentos térmicos. Várias rotas foram desenvolvidas em laboratório, utilizando estas variáveis, com intuito de redução do tamanho de grãos. A redução de espessura durante o processo de conformação foi mantida constante nos testes, já que o material de partida e o produto final da indústria possuem esses parâmetros padronizados.

O objetivo deste trabalho foi, portanto, o de estudar o efeito do processamento na estampabilidade de um aço microligado ao Nb e Ti, que é, também, classificado como um aço ARBL (alta resistência baixa liga). Este estudo foi realizado em três etapas. A primeira referente à caracterização dos materiais, a segunda referente à simulação em laboratório e a terceira referente à aplicação na indústria.

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 do aço fornecido pela indústria (% em peso).

Aço	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	Ti	N
ML Nb+Ti	0,10	0,9	0,021	0,008	0,28	0,047	0,022	0,074	0,0053

O material foi produzido conforme NBR 6656 (Microligado ao Nióbio e Titânio) e coletado em duas 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.

O trabalho foi dividido em três etapas:

- 1ª) Caracterização
- 2ª) Simulação em laboratório
- 3ª) Implantação na indústria

Na primeira etapa, de caracterização dos materiais, amostras das chapas foram embutidas, lixadas, polidas e atacadas com nital 2%, para determinação do tamanho de grãos (norma ASTM E 112-96) através de imagens produzidas por microscópio eletrônico de varredura, e determinação da dureza (microdurômetro Vickers marca SHIMADZU – mod. HMV) com carga de 2,9418 N e penetrador piramidal de diamante. Além disso, com as amostras PA, foram preparados corpos de prova para ensaios de tração, anisotropia e levantamento de CLC's (ensaio "Nakazima").

Os ensaios de tração e anisotropia foram realizados utilizando-se uma máquina de ensaio de tração-compressão marca EMIC, modelo DL 10000, de acordo com as normas ASTM E8M-97 e ASTM E517-81, respectivamente.

Nos ensaios de tração foram confeccionados corpos-de-prova paralelos à direção de laminação, com base de medida igual a 50 mm. Foram utilizados para cada ensaio, 05 corpos-de-prova, sendo os resultados apresentados em média aritmética dos valores obtidos. As seguintes propriedades foram calculadas: tensão limite de escoamento (S_e), tensão limite de resistência (S_r), alongamento (e_p) e coeficiente de encruamento (n).

Nos ensaios de anisotropia foram utilizados três corpos-de-prova (CP) para cada uma das três direções avaliadas (0° , 45° e 90° da direção de laminação), com geometria retangular (E517-81 - tipo C). Com as tensões de limite de resistência obtidas nos ensaios de tração, foram estabelecidos os limites para solicitação de cada material ensaiado, com tensões aplicadas próximas ao limite de resistência das chapas. Isto possibilitou a deformação dos corpos-de-prova somente na região plástica e sem a ocorrência de estrição.

Com o ensaio de anisotropia as seguintes propriedades puderam ser calculadas: módulo de elasticidade (E_{0° , E_{45° , E_{90°), tensão limite de escoamento de engenharia (Se_{0° , Se_{45° , Se_{90°), coeficiente de encruamento (n_{0° , n_{45° , n_{90°) e coeficiente de anisotropia (r_{0° , r_{45° , r_{90°), obtidos em cada ângulo 0° , 45° e 90° , formado com a direção de laminação no plano da chapa. Ainda foi possível o cálculo do coeficiente de encruamento normal (\bar{n}) (que tem relação direta com o estiramento das chapas), anisotropia planar (Δr) e anisotropia normal (\bar{r}) (que tem forte influência nas condições de embutimento das chapas).

Com o ensaio Nakazima podem-se avaliar os estados de deformações desenvolvidos nas chapas estampadas, e assim predizer as possíveis situações de falha do material.⁽³⁾ Foi realizado este ensaio em nove amostras de cada chapa de aço do grupo PA (produto acabado da indústria). Estas amostras foram cortadas em guilhotina, paralelas à direção de laminação das chapas. As dimensões variam de 55 a 215 mm na largura, com incremento entre elas de 20 mm e comprimento de 215 mm. Em cada chapa foi gravada uma rede de círculos, com diâmetro conhecido, através do método *silk screen*, para permitir a posterior medição da máxima e mínima deformação principal próximo à região de estrição.

Na segunda etapa deste trabalho foram simuladas em laboratório cinco novas rotas para processamento visando o refino de grão e melhoria nas propriedades mecânicas, 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 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.^(4,5) 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.

4ª) 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).

5ª) 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 3 com maior tempo de recozimento).

As rotas 4 e 5 foram utilizadas para verificar o efeito do tempo de recozimento no tamanho de grão, 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 instalados no LabConf – UFSC.

Amostras produzidas por cada rota foram embutidas, lixadas, polidas e atacadas com nital 2%, para determinação do tamanho de grãos e dureza Vickers.

Na terceira etapa desta pesquisa, a rota com melhores resultados quanto ao refino de grão, foi adaptada em escala industrial onde se produziram tiras laminadas para avaliação da estampabilidade. Realizaram-se, nestas amostras, os mesmos ensaios da 1ª etapa, e sob as mesmas condições, para efeito de comparação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos Materiais

As Figuras 1 e 2 apresentam imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do aço ML Nb+Ti tanto na condição MP como na condição PA. Nota-se a grande diferença de forma e tamanho dos grãos entre as duas amostras. Os resultados do tamanho de grãos são apresentados na Tabela 2 e os de microdureza Vickers na Tabela 3.

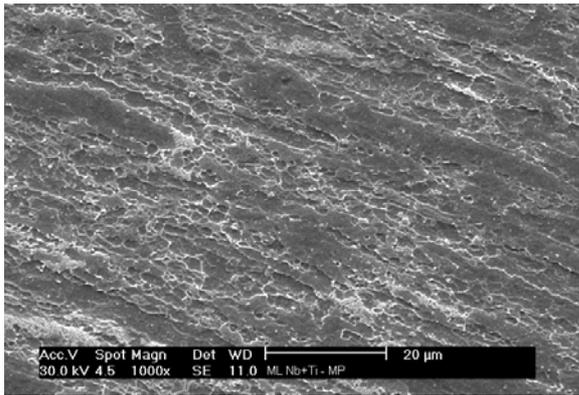


Figura 1- Matéria-prima

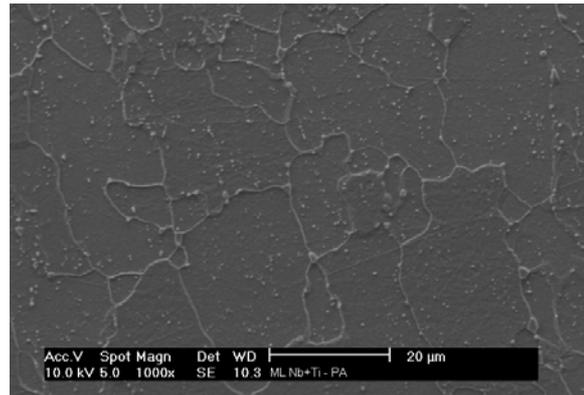


Figura 2- Produto acabado

Tabela 2- Tamanho de grão do aço fornecido pela indústria.

CONDIÇÃO	TAMANHO DE GRÃO (μm)	DESVIO PADRÃO
MP	6,6	1,2
PA	15,3	3,4

Tabela 3- Microdureza Vickers do aço fornecido pela indústria.

CONDIÇÃO	MICRODUREZA VICKERS (HV - 2,9418 N)	DESVIO PADRÃO
MP	228	1
PA	168	4

Após o processo de fabricação (laminação a frio e recozimento), nota-se que o tamanho de grão aumenta para o material estudado. 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). Este aumento acentuado dos grãos neste tipo de aço (ARBL) também está associado com a precipitação dos elementos microligantes que retiram o carbono de solução, conforme descrito por Gallego e Kestenbach,⁽⁶⁾ o que acelera o processo de recristalização e crescimento dos grãos.

Quanto ao ensaio de dureza, comprovou-se a relação da resistência mecânica com o tamanho de grão enunciada através da equação de Hall-Petch ($\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$), que mostra que o limite de escoamento (σ) do aço com baixo teor de carbono varia inversamente com a raiz quadrada do diâmetro de grão (d).

Nas Tabelas 4 e 5 estão dispostos os resultados dos ensaios de tração e anisotropia do material na condição PA. Esta caracterização do material servirá de base para avaliação do novo material que será produzido na indústria com a nova rota desenvolvida em laboratório.

Tabela 4- Resultados do ensaio de tração - material ML Nb+Ti PA.

PROPRIEDADES	VALORES
Se (MPa)	418
Sr (MPa)	493
ep (%)	18,65
n	0,11

Tabela 5- Resultados do ensaio de anisotropia - material ML Nb+Ti PA.

PROPRIEDADES	VALORES
E0° (MPa)	14.424
E45° (MPa)	14.833
E90° (MPa)	15.097
Se-0° (MPa)	425
Se-45° (MPa)	423
Se-90° (MPa)	465
n0°	0,14
n45°	0,11
n90°	0,11
\bar{n}	0,12
r0°	1,20
r45°	2,00
r90°	1,20
\bar{r}	1,59
Δr	-0,80

Na Figura 3 temos os valores de deformações encontradas na região de estricção de cada corpo de prova ensaiado pelo método Nakazima. Na legenda, a numeração é referente à medida, em milímetros, da largura dos corpos de prova. Para cada um, nove medidas foram realizadas.

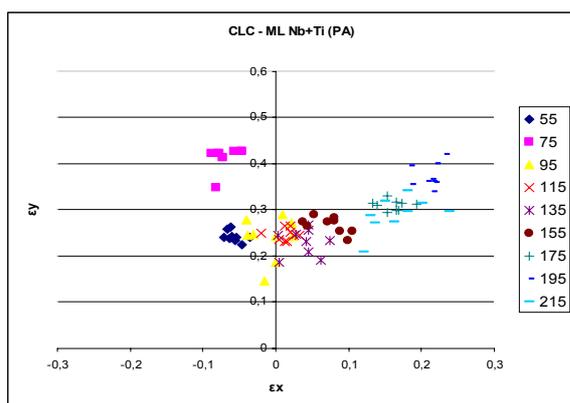


Figura 3- Medidas ensaio Nakazima – material ML Nb+Ti PA.

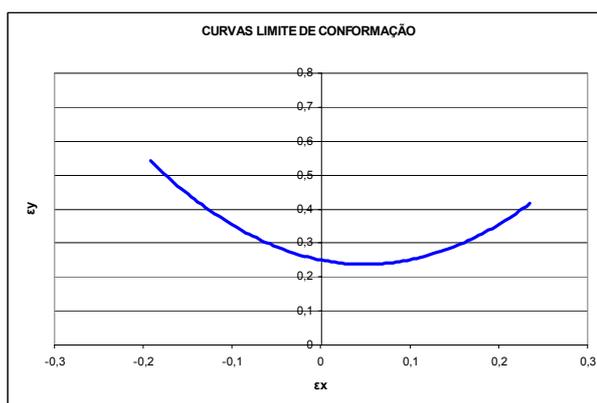


Figura 4 – CLC - material ML Nb+Ti PA

A curva de limite de conformação do material fornecido pela indústria na condição PA foi levantada e está apresentada na Figura 4. Ela representa as combinações entre as deformações principais, máxima e mínima (ϵ_y e ϵ_x , respectivamente), a que o material pode ser submetido sem que haja estricção.⁽³⁾

Através desta curva, e da CLC levantada para o material submetido ao teste industrial, será realizada a avaliação da estampabilidade do material (item 3.3).

3.2 Análise das Simulações em Laboratório

As Tabelas 6 e 7 mostram os resultados de tamanho de grão ferrítico e microdureza das amostras processadas em laboratório:

Tabela 6- Tamanho de grãos obtido com as novas rotas propostas.

ROTA	TAMANHO DE GRÃO (μm)	DESVIO PADRÃO
1	6,4	1,1
2	6,4	0,8
3	3,7	0,3
4	5,8	0,6
5	4,1	0,4

Tabela 7- Microdureza Vickers das amostras geradas com as novas rotas propostas.

ROTA	MICRODUREZA VICKERS (HV - 2,9418 N)	DESVIO PADRÃO
1	201	13
2	271	9
3	206	5
4	182	9
5	204	5

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 às 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.

A rota que apresentou melhores resultados, quanto a refino de grãos e melhoria da resistência mecânica, foi a rota 3. Neste processo de fabricação utilizou-se uma têmpera intercrítica, onde apenas parte do material é austenitizado. Segundo Trowsdale,⁽⁷⁾ 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.⁽⁷⁻⁹⁾ (Uma amostra de material nesta condição pode ser observada na Figura 5). 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 6 a micrografia mostra o material ML Nb+Ti após ser processado pela rota 3.

Analisando-se o efeito da variação do tempo de recozimento de uma para 4 horas, ou seja: comparando-se as rotas 3 com 5 e 1 com 4, respectivamente, não se observa variações significativas no tamanho de grão e na microdureza. A Figura 7 mostra a micrografia do aço ML Nb+Ti processado pela rota 5.

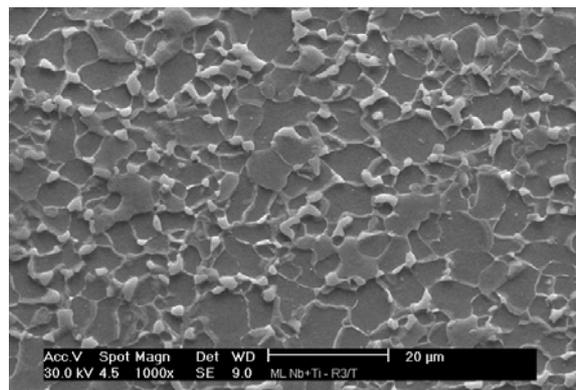


Figura 5- Aço ML Nb+Ti (MP) aquecido a 710°C e resfriado em água em laboratório.

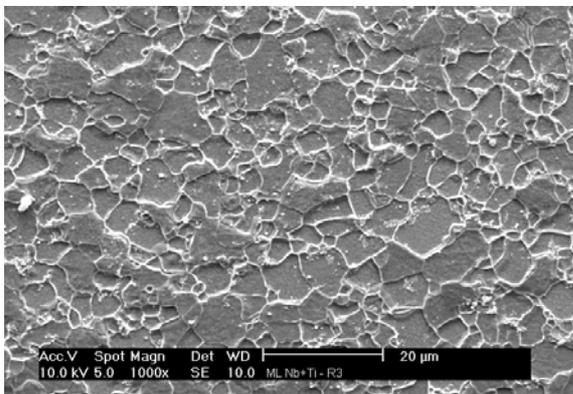


Figura 6- Aço ML Nb+Ti - Rota 3

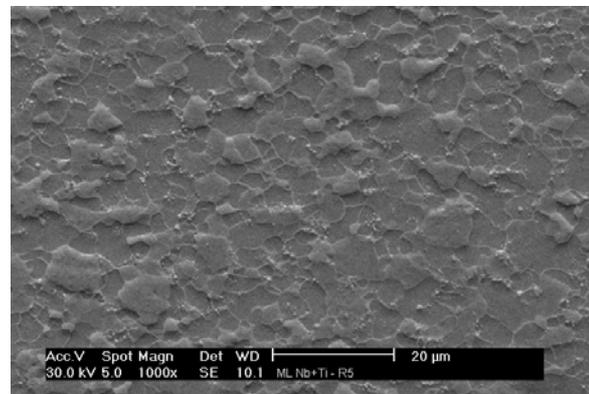


Figura 7- Aço ML Nb+Ti - Rota 5

3.3 Análise do Teste Industrial

Com o novo processo de fabricação submetido ao aço ML Nb+Ti na indústria, gerou-se os valores de tamanho de grão e microdureza mostrados nas Tabelas 8 e 9 respectivamente.

Tabela 8- Tamanho de grão - teste industrial.

CONDIÇÃO	TAMANHO DE GRÃO (µm)	DESVIO PADRÃO
Teste Indústria	7,1	0,8

Tabela 9- Microdureza Vickers – teste industrial.

CONDIÇÃO	MICRODUREZA VICKERS (HV - 2,9418 N)	DESVIO PADRÃO
Teste Indústria	190	5

O processo industrial atualmente utilizado apresenta grãos de 15,3 µm e dureza de 168 HV, como visto no item 3.1 deste trabalho (Tabelas 2 e 3). A nova rota apresentou, então, uma redução de 54 % no tamanho de grão e um aumento significativo de dureza (22 HV).

Nas Figuras 8 e 9 estão dispostas micrografias do aço ML Nb+Ti em duas etapas do novo processo testado na indústria.

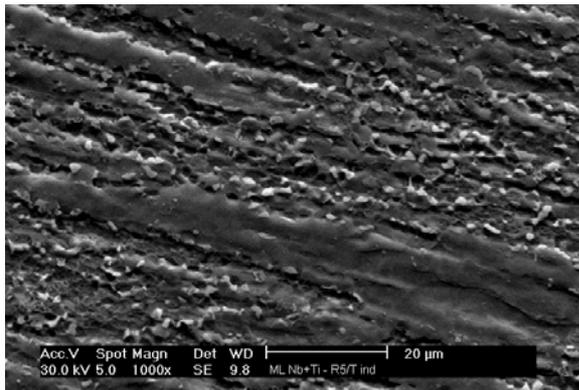


Figura 8- Aço ML Nb+Ti (MP) aquecido a 710°C e resfriado em banho metálico Pb+Bi (Equipamentos industriais).

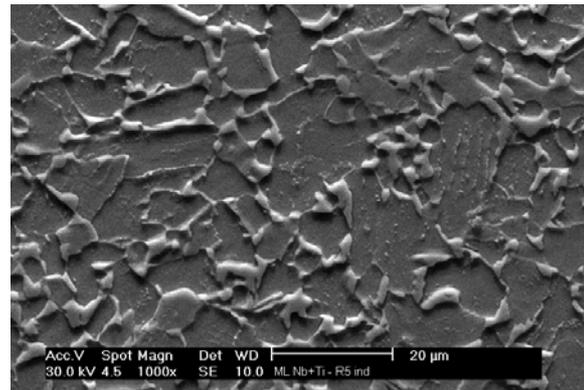


Figura 9- Aço ML Nb+Ti (MP) – Rota 5 (Equipamentos industriais).

Percebe-se que o material final produzido no teste industrial apresenta homogeneidade de forma e distribuição de tamanho de grãos. Diferente do apresentado no produto acabado da indústria com a rota antiga (Figura 2). Essa disposição tem grande influência na ductilidade e resistência mecânica do material. Segundo Newby⁽¹¹⁾ os aços podem apresentar grãos equiaxiais ou grãos alongados (forma de panqueca), e essa variável permite a produção de aços com melhor ou pior estampabilidade.

Os valores de limite de escoamento e limite de resistência encontrados através do ensaio de tração não sofreram melhoras como era o esperado, apresentando até pequena redução. No caso do limite de escoamento esta redução alcançou 6%. Na Tabela 10 estão os resultados do ensaio.

Tabela 10- Resultados do ensaio de tração uniaxial - teste industrial.

PROPRIEDADES	VALORES
Se (MPa)	392
Sr (MPa)	483
ep (%)	16,49
n	0,11

A Tabela 11 apresenta os resultados do ensaio de anisotropia.

Tabela 11- Resultados do ensaio de anisotropia - teste industrial.

PROPRIEDADES	VALORES
E_{0° (MPa)	5.221
E_{45° (MPa)	5.174
E_{90° (MPa)	5.153
S_{e-0° (MPa)	415
S_{e-45° (MPa)	436
S_{e-90° (MPa)	475
n_{0°	0,13
n_{45°	0,10
n_{90°	0,09
\bar{n}	0,11
r_{0°	1,48
r_{45°	1,12
r_{90°	1,60
\bar{r}	1,33
Δr	0,41

Neste caso percebe-se que os valores de limite de escoamento são superiores ao material na condição PA para os corpos de prova coletados a 45° e 90° (de 423 para 436 MPa e de 465 para 475 MPa, respectivamente). Isto leva a conclusão que o material, de forma geal, aumentou seu limite de escoamento, o que não foi evidenciado no ensaio de tração, já que o corpo de prova para aquele ensaio é coletado a 0° da direção de laminação. Embora os valores de S_e não tenham alcançado os valores esperados em relação a grande redução do tamanho de grãos, deve-se levar em conta, também, que estes valores estão relacionados às microestruturas (distribuição de forma e tamanho dos grãos) formadas após os processos, conforme mencionado anteriormente.

O coeficiente de encruamento normal (\bar{n}) calculado para o material não sofreu variação de processo para processo, indicando que em condições de estiramento o material deve manter seus limites de deformação.

Já para o coeficiente de anisotropia normal (\bar{r}) os resultados demonstram pequena redução com a nova rota, de 1,59 para 1,33. Isto seria indicativo de limites de deformação máxima menores em regiões com situações de embutimento. Mas percebe-se, também, que os coeficientes de anisotropia para as amostras coletadas a 0° e 90° aumentaram (1,20 para 1,48 e 1,20 para 1,60 respectivamente). Isto induz a conclusão de que em determinadas regiões da peça estampada, os limites de deformações combinadas (eixos x e y), para condições de embutimento, sejam maiores no material produzido com a nova rota.

Com relação ao ensaio Nakazima, todas as medidas das deformações geradas nas regiões de estricção dos corpos de prova estão apresentadas no gráfico da Figura 10.

A curva de limite de escoamento propriamente dita foi encontrada através da adição de linha de tendência a essas medidas. Na Figura 11, a CLC do material teste da indústria está disposta. A curva levantada na caracterização inicial do material também está demonstrada para efeito de comparação.

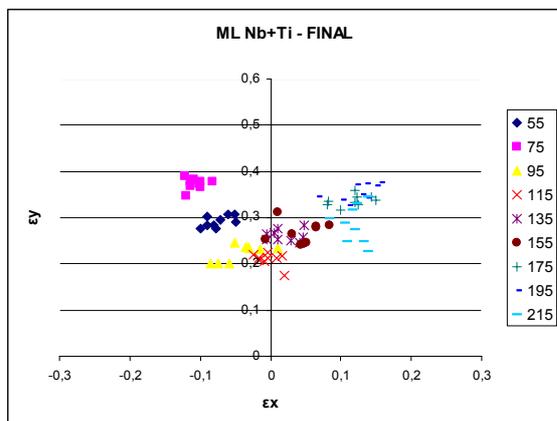


Figura 10- Medidas ensaio Nakazima – material ML Nb+Ti – Teste industrial.

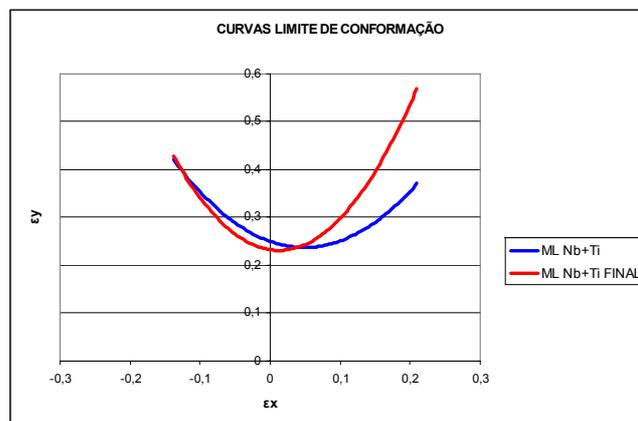


Figura 11- Curvas limite de conformação (linha de tendência 2° grau) - Material na condição PA e teste industrial.

Nota-se a melhoria, em boa parte do gráfico, dos limites de deformação para o aço ML Nb+Ti submetido ao teste com a nova rota proposta (designado no gráfico como ML Nb+Ti FINAL). Mesmo com o material não apresentando variação significativa do seu coeficiente de encruamento normal (\bar{n}), calculado no ensaio de anisotropia, em situações que simulam estiramento (direita do gráfico) seus limites de deformação encontrados no levantamento das CLC's foram superiores. Isto está relacionado com a homogeneidade de forma e distribuição de tamanho dos grãos do material que, como já mencionado, tem forte influência na estampabilidade de aços.

Como previsto através do cálculo de \bar{r} feito no ensaio de anisotropia, onde houve redução de seu valor de 1,59 para 1,33, através das CLC's também se deduz, que em algumas situações de embutimento profundo (esquerda do gráfico), houve pouca variação dos limites de deformação, ou até mesmo redução deste limite.

4 CONCLUSÃO

- Para os processos simulados onde se introduziu 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 de grãos comparado ao tamanho médio de grãos obtido pela rota 1.
- A variação do tempo de recozimento de 1 para 4 horas não afetou a dureza e o tamanho médio de grãos nos testes em laboratório.
- Na indústria, a nova rota proposta, onde uma têmpera intercrítica é introduzida ao processo de fabricação, gera material com grãos mais finos e com uma distribuição mais homogênea quanto à forma e tamanho.
- O material com grãos mais finos apresenta, em geral, limites de deformação até estricção superiores.
- O levantamento das curvas limite de conformação (CLC's) permite constatar que o refino de grão tem forte influência na melhoria da estampabilidade de aços ARBL.

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 SROUR, E.H.Jr. **Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional**. Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- 3 WOODTHORPE, J.; PEARCE, R. **The effect of r and n upon the forming limit diagrams of sheet steel**. Sheet Metal Industries, p. 1061-1067, 1969.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 GALLEGO, J.; KESTENBACH, H.J. **Interação entre os Mecanismos de Endurecimento nos Aços Microligados**. XVI Cbecimat, Porto Alegre, p. 1, 2004.
- 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.
- 11 NEWBY, J.R. **Formability of steel sheet; Metals handbook; Forming and forging**. 9ª ed., v. 14, p. 545-560, 1988.