

# ESTUDO DO ENCRUAMENTO DOS AÇOS DE GRÃO ORIENTADO (GO) E DE GRÃO NÃO-ORIENTADO (GNO) EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA<sup>1</sup>

Wellington Lopes<sup>2</sup>

Maria Teresa Paulino Aguiar<sup>3</sup>

Elaine Carballo Siqueira Corrêa<sup>2</sup>

## Resumo

As propriedades eletromagnéticas dos aços ao silício ou elétricos, os aços de grão orientado (GO) e de grão não-orientado (GNO), constituem objeto de estudo de diversos pesquisadores pelo fato destes materiais apresentarem, dentre outras características, alta permeabilidade magnética e perdas elétricas reduzidas. Desta maneira, os aços GNO e GO são comumente usados no núcleo magnético de motores elétricos e em transformadores, respectivamente. Nestas situações, a mudança da forma e das dimensões desses materiais é pequena ou inexistente, ocasionando assim, estudo incipiente da conformação mecânica dos mesmos e assim, do encruamento dos mesmos. Considerando a demanda para o uso de materiais novos na indústria automobilística e em outros setores, este trabalho apresenta o estudo do encruamento dos aços GO e GNO (no estado como recebido) mediante a realização de ensaios mecânicos de tração e de cisalhamento (isolados e combinados) para diferentes valores de pré-deformação. Os resultados indicaram que o encruamento dos aços GO e GNO é sensível ao modo de deformação plástica e que o endurecimento por deformação é limitado para um valor de deformação específico de deformação definido pela formação da imperfeição superficial “casca de laranja”, observada nos dois materiais.

**Palavras-chave:** Encruamento; Aço GNO; Aço GO; Casca de laranja.

## STUDY OF WORK-HARDENING OF GRAIN ORIENTED (GO) AND GRAIN NON-ORIENTED (GNO) STEELS CONSIDERING STRAIN-PATH CHANGES

### Abstract

The electromagnetic properties of silicon or electrical steels (grain oriented and grain non-oriented steels) are the main goal of several studies because these materials present high magnetic permeability and reduced losses electric. This manner, the GNO and GO steels are commonly used as core material for electric motors and transformers, respectively. In these situations, those steels present small or in-existent changes in the form and the dimension and therefore, the study of sheet metal forming and the work-hardening is still incipient. Considering the demand for new materials in automotive and others industry sections, this work presents the study of work-hardening of grain oriented and grain non-oriented steels (as received condition) after tension and shearing tests (isolated or combined) for different pre-strain values. The results indicated that the work-hardening is sensible to the deformation mode and the hardening is limited for a specific strain value defined by the intensity of superficial irregularity, orange peel, observed in both materials.

**Key words:** Work hardening; Grain oriented steel; Grain non-oriented steel; Orange peel.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67<sup>o</sup> Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>2</sup> Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, Cefet, MG, Brasil; wellingtonlopes@deii.cefetmg.br

<sup>3</sup> Professor, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil, UFMG, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços de grão orientado (GO) e de grão não-orientado (GNO) constituem uma das opções para serem utilizados em condições em que são necessárias respostas eletromagnéticas melhores que as observadas em materiais tradicionais como os aços de baixo teor de carbono (SAE 1006, por exemplo).

Os aços GO e GNO se destacam quando comparados com outros materiais usados para a mesma finalidade, como por exemplo, chapas usadas para o revestimento de motores elétricos e no núcleo magnético de transformadores, por exemplo. Embora os termos orientado e não-orientado indiquem que a orientação cristalográfica destes aços seja diferente, o requisito necessário à obtenção das propriedades eletromagnéticas destes aços está relacionado diretamente com o desenvolvimento de uma orientação (textura) cristalográfica preferencial, a textura Goss, condição esta responsável pela obtenção de propriedades adequadas ao uso dos aços GO e GNO, sendo isso traduzido, dentre outros aspectos, pela alta permeabilidade magnética e perda elétrica reduzida destes materiais, também reconhecidos como aços elétricos, ao silício, pertencente ao grupo dos materiais magnéticos macios.

Para alcançar as propriedades diferenciadas dos aços de grão orientado e de grão não-orientado em termos das respostas eletromagnéticas, faz-se o controle do teor de silício. A adição deste elemento reduz as perdas magnéticas pelo fato de aumentar a resistividade e reduzir a anisotropia magnética. No entanto, o teor deste elemento deve ser o suficiente para não ocasionar a redução da ductilidade e da saturação do magnetismo destes aços (o Si é um elemento não-magnético).<sup>(1)</sup> Deste modo, diferentes rotas de fabricação são utilizadas para alcançar as propriedades adequadas ao uso dos aços GO e GNO.

O processo de fabricação dos aços de grão orientado e de grão não-orientado compreende, dentre outras opções, a laminação a quente, decapagem com ou sem recozimento e laminação a frio, assim como a execução de recozimento intermediário e/ou final e por fim, aplicação de revestimento, apresentando variação quanto à produção dos aços GO e GNO.<sup>(2)</sup> Para o primeiro tipo de aço, por exemplo, cita-se a necessidade de se trabalhar com chapas de espessura reduzida e granulometria grosseira para diminuir as perdas magnéticas e obter a textura cristalográfica adequada ao uso deste material.

Uma rota de fabricação utilizada para obter chapas de aço de grão orientado com espessura menor que 10  $\mu\text{m}$ , por exemplo, consiste na laminação a frio de chapas deste mesmo material com espessura inicial de 300  $\mu\text{m}$ , acompanhada por tratamento térmico de recozimento, por exemplo.<sup>(3)</sup> Este procedimento constitui uma das aplicações dos resultados advindos de diversas pesquisas que têm como objetivo geral, a descoberta das condições de processamento que ocasionam as melhores respostas eletromagnéticas dos aços elétricos.<sup>(4-6)</sup>

Contudo, embora a mudança da forma e das dimensões das chapas dos aços GO e GNO sejam consideradas operações simplificadas destes aços já na condição metalúrgica final, a execução de operações simples, como o corte de chapa (aplicação do esforço mecânico de cisalhamento) e o dobramento (combinação dos esforços de tração e de compressão, de modo geral) também podem modificar a capacidade destes materiais de sustentar a capacidade de sofrer deformação plástica, mesmo que reduzida e assim, limitar a forma dos diferentes artefatos fabricados a partir do uso destes aços.

Desta forma, a investigação do endurecimento por deformação (encruamento) não é objeto comum de estudo dos aços GO e GNO, embora isso seja considerado um

requisito fundamental à conformação das chapas destes aços e assim, a ampliar o uso destes materiais, o que representa pouco mais que 1% da produção mundial de aços.<sup>(2)</sup>

De modo geral afirma-se que a deformação plástica danifica as respostas magnéticas dos aços GNO sendo necessário, em algumas situações, o uso do tratamento térmico de recozimento para aliviar as tensões residuais. Estudos recentes<sup>(7-8)</sup> registram, por exemplo, o aumento da força coerciva e das perdas magnéticas com a raiz quadrada da deformação.<sup>(9)</sup>

Outro estudo que investigou o efeito das condições utilizadas para o processamento termomecânico do aço GNO revelou que a condução do tratamento térmico de recozimento anterior à laminação a frio das tiras laminadas a quente constitui uma sequência de processamento que melhora a resposta magnética e mecânica deste aço. Neste caso, verificou-se que quando o recozimento é executado entre 800°C e 850°C ocorre a formação de um arranjo microestrutural contendo grãos colunares de ferrita livres de carbonetos, os quais favorecem o desenvolvimento de propriedades mecânicas e magnéticas melhores que as encontradas no processamento convencional destes aços.

Nesta pesquisa verificou-se que a melhoria destas propriedades estava relacionada com o tratamento térmico por este permitir a combinação adequada da orientação cristalográfica e da granulometria do aço de grão não-orientado.<sup>(10)</sup>

Trabalhos que abordem aspectos relacionados com as propriedades mecânicas dos aços de grão orientado e de grão não-orientado não são comuns, pois como explicado, esta propriedade não constitui a resposta que determina o uso específico destes materiais.

O estudo das propriedades mecânicas dos aços GO e GNO será uma necessidade para definir as condições necessárias ao aproveitamento destes aços para instrumentos utilizados na indústria automobilística, como por exemplo, as chapas usadas nos motores de tração de veículos elétricos híbridos, os quais apresentam a combinação e motores convencionais de combustão interna com a bateria e motores elétricos.

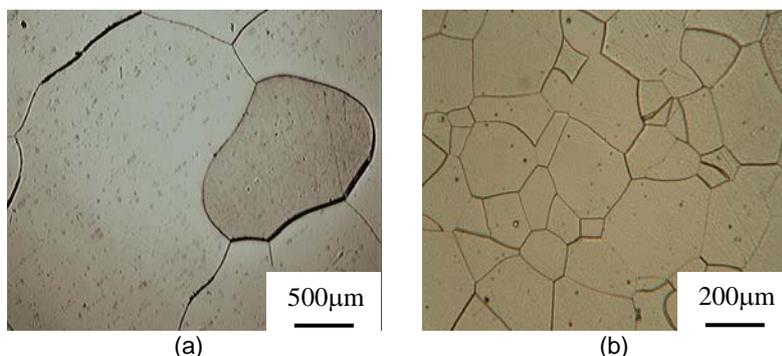
Nestes veículos híbridos, a chapa próxima ao núcleo do rotor dos motores elétricos fica exposta à deformação extrema devido à ação da força centrífuga. Desta forma, o uso de grão não-orientado que poderia ser usado neste caso, deve possuir resistência mecânica e à fadiga. Este exemplo mostra uma ampliação da condição de uso dos aços elétricos, em destaque, o aço GNO. No entanto, as pesquisas existentes apenas abordam a possibilidade de uso destes materiais nestas condições, mas não apresenta resultados que possam avaliar o uso destes materiais de modo a conciliar as propriedades mecânicas e elétricas.<sup>(1)</sup>

Diante do exposto, este trabalho pretende investigar a evolução do encruamento dos aços GO e GNO mediante a combinação dos esforços mecânicos de tração e de cisalhamento, sem mencionar a resposta elétrica, como método de investigação da possibilidade de uso destes materiais em condições que requeiram a mudança de forma de modo significativo destes aços.

## 2 MATERIAL e MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Chapas de aço de grão orientado e de grão não-orientado foram utilizadas neste trabalho com espessura inicial de 0,22 mm e de 0,50 mm, respectivamente (estado inicial), sendo os corpos de prova retirados na direção da laminação das mesmas. A composição química do aço GNO registrou (% em peso) 0,011 C; 2,12 Si; 0,003 Al; 0,416 Mn; 0,029 P e 0,007 S, enquanto o aço GO exibiu composição química composta por 0,036 C; 3,13 Si; 0,001 Al; 0,056 Mn; 0,007 P e 0,033 S. Amostras destes dois aços foram retiradas para a caracterização microestrutural e atacadas com o reativo químico Nital 5% (5 mL de ácido nítrico e 95 mL de álcool etílico). As fotomicrografias destes aços no estado como recebido são apresentadas na Figura 1. Embora a granulometria inicial dos aços GO e GNO fosse diferente (2,77 mm e 102  $\mu\text{m}$ , respectivamente), fez-se a opção de o estudo do encruamento destes aços ser conduzido deste modo por considerar esta a condição destes aços como entregue pelo fornecedor, com as propriedades eletromagnéticas adequadas ao uso dos mesmos.



**Figura 1.** Fotomicrografia dos aços: (a) de grão orientado (GO) e (b) de grão não-orientado (GNO) – microscópio óptico, ataque com reativo químico Nital 5%.

### 2.2 Ensaios de Tração Uniaxial

A caracterização mecânica dos aços GO e GNO foi conduzida na máquina de ensaios Instron 5582 mediante a execução de ensaios de tração até a ruptura com uso de sistema de aquisição de dados *Blue Hill 2* com uso de corpos de prova com dimensões especificadas pela norma ASTM E8. A taxa de deformação inicial utilizada nos testes foi de  $0,001 \text{ s}^{-1}$  com velocidade de 4,5 mm/min, sendo utilizado extensômetro convencional (de agulhas com abertura de 25 mm). Outras amostras foram utilizadas para pré-deformar os aços GO e GNO alterando assim, a condição inicial dos mesmos, em termos da resposta mecânica. Neste caso, os valores de pré-deformação foram diferentes, pois o alongamento uniforme, AU, registrado após os ensaios de caracterização foram diferentes para ambos os materiais. Desta forma, o aço GO foi pré-deformado (deformação convencional) de 0,018 e 0,045, representando 20% e 50%, respectivamente, do valor encontrado para o alongamento uniforme deste material. Considerou-se ainda a retirada de amostra para o teste de cisalhamento, subsequente ao ensaio de tração, do corpo de prova fraturado. Neste trabalho, foi considerado que esta quantidade de deformação representa 100% do valor do alongamento uniforme.

Para o aço GNO, a pré-deformação (deformação convencional) em tração aplicada ao mesmo foi de 0,030 (11% de AU), 0,120 (46% de AU) e 0,261 (100% de AU). Todos estes valores de pré-deformação em tração serão convertidos para deformação efetiva (deformação efetiva) em todas as figuras apresentadas neste estudo.

O encruamento dos aços GO e GNO foi avaliado mediante o cálculo do expoente de encruamento,  $n$ , da montagem das curvas de taxa de encruamento normalizada versus deformação efetiva e da previsão da densidade de discordâncias de acordo com a teoria de plasticidade cristalina pelo modelo de encruamento de Taylor.<sup>(11-12)</sup>

Neste caso, admite-se relação entre a tensão de fluxo (tensão efetiva) e a densidade de discordâncias total,  $\rho_{total}$ , como indicado pela Equação 1.

$$\sigma_{fluxo} = A.G.b. \rho_{total}^{0,5} \quad (1)$$

- $\sigma_{fluxo}$  = tensão de fluxo (MPa);
- $A$  = é uma constante que varia entre 0,3 e 0,5, constituindo a componente atérmica da tensão de fluxo;
- $G$  = módulo cisalhante (MPa);
- $b$  = vetor de *Burgers* (m); e
- $\rho_{total}$  = densidade total de discordâncias (número de discordâncias/m<sup>2</sup>).

Neste trabalho será considerado o valor de 0,3 para a constante  $A$  e de 0,25 nm para  $b$ , enquanto as demais variáveis serão apresentadas. É necessário destacar o fato de que a Equação 1 será utilizada para descrever a previsão do perfil de densidade de discordâncias em função da curva de fluxo identificada para cada condição de carregamento dos aços GO e GNO. Desta forma, a exatidão dos valores numéricos não poderá ser considerada nesta análise, pela admissão dos valores de  $A$  e de  $b$ .

### 2.3 Ensaio de Cisalhamento

A técnica de cisalhamento planar simples foi utilizada para caracterizar os aços GO e GNO quando submetidos apenas a este modo de deformação plástica e assim, obter a relação entre a deformação e a tensão cisalhantes com a deformação e a tensão efetivas e para conduzir a sequência de carregamento tração/cisalhamento que será explicada no próximo item.

Assim como o ensaio de tração uniaxial, o ensaio de cisalhamento foi executado na máquina de ensaios Instron 5582, mas agora fazendo uso de um dispositivo adaptado a esta máquina, como demonstrado em trabalho anterior.<sup>(9)</sup>

Para identificar a relação entre a deformação,  $\gamma$ , e a tensão,  $\tau$ , cisalhantes com a deformação e tensão verdadeiras e desta forma, a deformação,  $\varepsilon_{efet}$ , e a tensão efetivas,  $\sigma_{efet}$ , foi adotado o critério de von Mises para o aço GNO e a relação empírica detectada para o aço GO, de acordo com as Equações 2 e 3 (aço GNO) e Equações 4 e 5 (aço GO), respectivamente.

$$\varepsilon_{efet} = \gamma / 1,73 \quad (2)$$

$$\sigma_{efet} = 1,73 \cdot \tau \quad (3)$$

$$\varepsilon_{efet} = \gamma / 1,20 \quad (4)$$

$$\sigma_{efet} = 1,20 \cdot \tau \quad (5)$$

A taxa de deformação aplicada aos aços GO e GNO nos ensaios de cisalhamento foi de  $0,001s^{-1}$ .

## 2.4 Carregamento Tração/ Cisalhamento

Após a pré-deformação em tração dos aços GO e GNO (item 2.2), os corpos de prova foram cortados com uso de uma cortadeira metalográfica para a retirada dos corpos de prova para o ensaio subsequente de cisalhamento. A quantidade de deformação efetiva aplicada no carregamento em cisalhamento foi de 0,50 para o aço GNO e de 0,20, aproximadamente, para o aço GO. Os ajustes do dispositivo para o ensaio de cisalhamento foram os mesmos usados para o cisalhamento monotônico (item 2.3).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

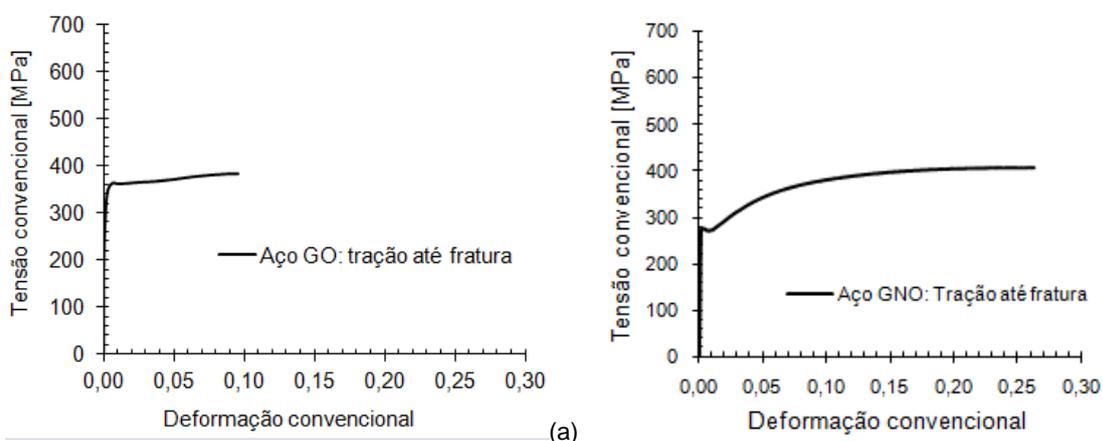
### 3.1 Propriedades Mecânicas Iniciais

O resumo das propriedades mecânicas do aço GNO já foi apresentado em trabalho anterior, sendo exibido novamente na Tabela 1 juntamente com os dados do aço GO. Percebe-se a diferença significativa entre as propriedades mecânicas dos dois materiais quando submetidos ao ensaio de tração conduzido a frio, evidenciando neste caso, a influência do tamanho de grão na redução da resistência mecânica e sendo ainda um limite para a continuidade da deformação plástica devido ao efeito “casca de laranja” como também identificado no aço GNO.<sup>(13)</sup>

**Tabela 1.** Principais propriedades mecânicas do aço GNO

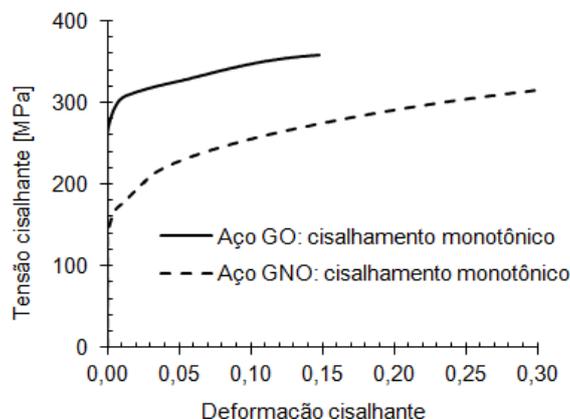
Material	Tensão limite de escoamento, LE (MPa)	Tensão limite de resistência à tração, LRT (MPa)	Alongamento uniforme, AU	Expoente encruamento
Aço GO	337	382	0,090	0,084
Aço GNO	269	410	0,261	0,260

A Figura 2 exhibe as curvas de tensão convencional-deformação convencional dos aços GO e GNO que foram utilizadas para o cálculo das propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 1.



**Figura 2.** Curvas tensão convencional – deformação convencional: (a) aço de grão orientado (GO); e (b) aço de grão não-orientado (GNO).

As curvas de tensão cisalhante versus deformação cisalhante para os dois aços são apresentadas na Figura 3. Estas curvas foram utilizadas para identificação dos parâmetros citados no item 2.3 quanto à obtenção das curvas de tensão e de deformação efetivas.



**Figura 3.** Curvas de fluxo tensão cisalhante – deformação cisalhante para o aço de grão orientado (GO) e de grão não-orientado (GNO).

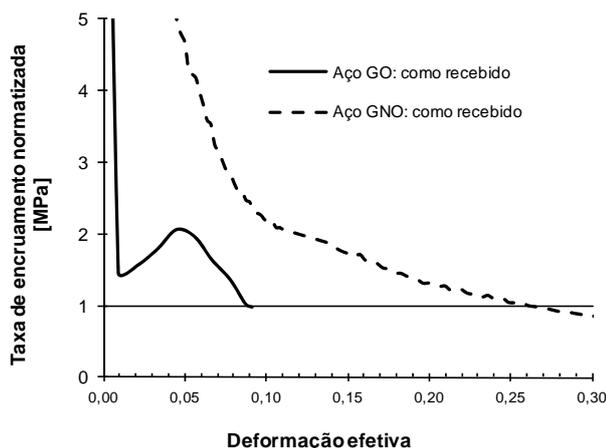
O limite de deformação plástica para o início da instabilidade plástica do aço GO, em termos do valor do alongamento uniforme, foi aproximadamente 65,5% inferior ao identificado pelo aço GNO (0,090 contra 0,261, respectivamente (Figuras 2a e 2b)). Essa diferença está relacionada, dentre outros fatores, ao valor extremamente elevado para o tamanho de grão inicial do aço GO. Esta característica microestrutural, resultado da condição de processamento termomecânico necessária à obtenção das propriedades eletromagnéticas adequadas ao uso dos aços GO e GNO, reduz o endurecimento por deformação plástica a frio como indicado pelo expoente de encruamento (0,084 contra 0,260, respectivamente) como resultado da restrição à movimentação das linhas de discordâncias pelos contornos de grão e deste modo, antecipa o início da instabilidade plástica do aço de grão orientado.

### 3.2 Encruamento no Estado como Recebido

A taxa de encruamento dos aços GO e GNO no estado como recebido foi avaliada pela interpretação das curvas de taxa de encruamento normalizada,  $\theta.1/\sigma$ , deformação efetiva mostradas na Figura 4. Neste caso, a instabilidade plástica inicia quando a curva  $\theta.1/\sigma$  assume valor inferior a 1, sendo o expoente de encruamento igual ao valor de deformação efetiva quando se observa esta condição.

Como esperado, verifica-se que a instabilidade plástica do aço GO ocorre para um valor de deformação inferior ao detectado pelo aço GNO.

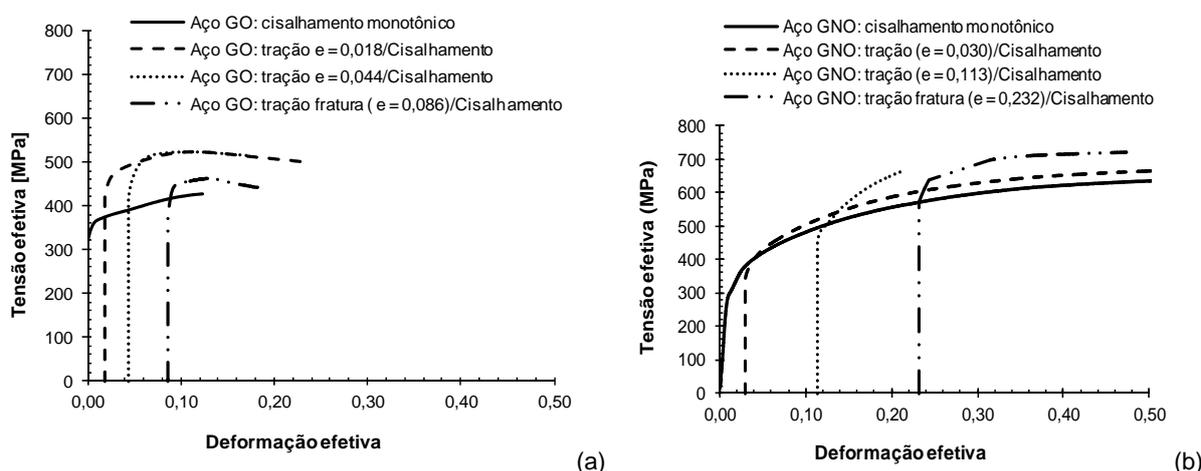
O endurecimento por deformação plástica experimentado pelos aços GO e GNO foi pequeno quando comparado com o padrão típico identificado por outros aços. Esse encruamento reduzido apresentado pelos aços de grão orientado e de grão não-orientado (item 3.1), está associado à granulometria grosseira dos mesmos na condição inicial, sendo isso evidente para o aço GO.



**Figura 4.** Curvas de taxa de encruamento normalizada versus deformação efetiva para os aços GO e GNO o estado como recebido.

### 3.3 Encruamento Após o Processamento Mecânico

A teoria clássica do endurecimento dos metais prevê o aumento da resistência à deformação plástica, para o mesmo modo de deformação, com o acréscimo da quantidade de deformação prévia aplicada ao metal devido ao aumento da densidade de discordâncias e consequentemente, da interação destas com outras e com imperfeições estruturais.<sup>(14)</sup> Este aspecto da resistência mecânica dos aços GO e GNO está representado na Figura 5 pelo posicionamento das curvas de fluxo acima da curva de referência (carregamento monotônico) para o aço GO (para os três valores de pré-deformação em tração (Figura 5a) e apenas para o último valor de pré-deformação (tração até a ruptura) para o aço GNO (Figura 5b). Essas respostas dos aços ao silício evidenciam a diferença do encruamento destes materiais.



**Figura 5.** Curvas de fluxo identificadas para a sequência tração/cisalhamento para diferentes valores de pré-deformação em tração: (a) aço GO; e (b) aço GNO.

Comparando-se os valores de pré-deformação em tração com o valor do alongamento uniforme, usando sempre o respectivo valor de deformação verdadeira, verifica-se que apenas quando esta razão é igual a 100% que a curva de fluxo do aço GNO posiciona-se acima da curva de referência (carregamento monotônico), Para o aço GO, este comportamento é observado desde o menor valor de pré-deformação investigado neste trabalho, aproximadamente 21%. Este resultado

revela que o endurecimento por deformação (encruamento) do aço GO é mais sensível à pré-deformação em tração com posterior deformação em cisalhamento que o aço GNO.

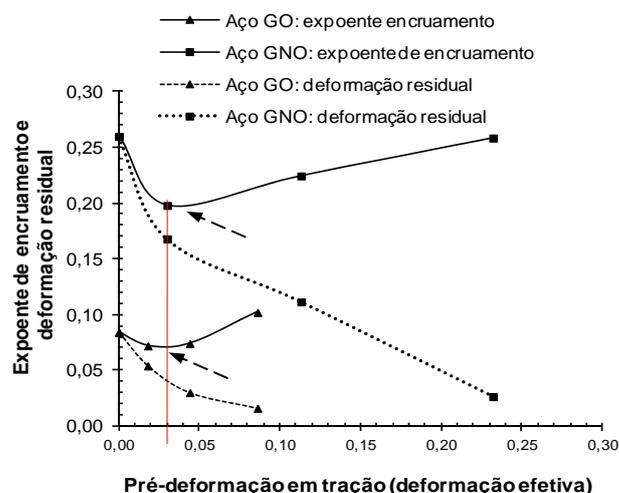
Embora o limite de deformação até o início da instabilidade plástica do aço GO seja apenas 37% do valor registrado para o aço GNO ( $\epsilon_{\text{efet}} = 0,086$  contra 0,232, respectivamente), sendo esta resposta ocasionada pela granulometria grosseira do primeiro aço, nota-se que, para a mesma quantidade relativa de deformação efetiva, o endurecimento por deformação plástica é maior no aço GO, sendo isso indicado na Figura 5 pelo posicionamento das curvas de fluxo.

A diferença na resposta dos aços GO e GNO quanto ao endurecimento por deformação plástica deve ser avaliada ainda em termos do desenvolvimento da imperfeição superficial “casca de laranja”, observada nos dois materiais. O fato de o tamanho de grão inicial do aço GO ser maior que o do aço GNO antecipa a formação desta imperfeição, reduzindo a habilidade deste material endurecer por deformação pela restrição oferecida pelos contornos de grão à movimentação das linhas de discordâncias.

Para avaliar de modo quantitativo o encruamento dos aços ao silício para a sequência tração/cisalhamento, a Figura 6 exibe os valores dos expoentes de encruamento e da deformação residual em função da quantidade de pré-deformação em tração adotada nesta condição de solicitação mecânica.

O expoente de encruamento dos aços GO e GNO exibe a tendência de aumento com a quantidade de deformação em tração, sendo o mesmo maior que o valor inicial (estado como recebido) apenas após o cisalhamento do aço GO deformado até a fratura em tração. Este fato sugere a existência de um valor mínimo de pré-deformação em tração para sensibilizar o encruamento pelo aumento do expoente de encruamento dos aços GO e GNO na condição inicial como recebido após o processamento pela sequência tração/ cisalhamento (aproximadamente 0,03 e 0,04, respectivamente, vide as setas na Figura 6).

Este valor de deformação plástica é reduzido, pois o endurecimento por deformação compete com a formação da imperfeição “casca de laranja”, que também aumenta com a deformação e reduz a capacidade de o material sustentar a deformação plástica até o início da instabilidade plástica, como expresso pelo valor da deformação plástica residual.



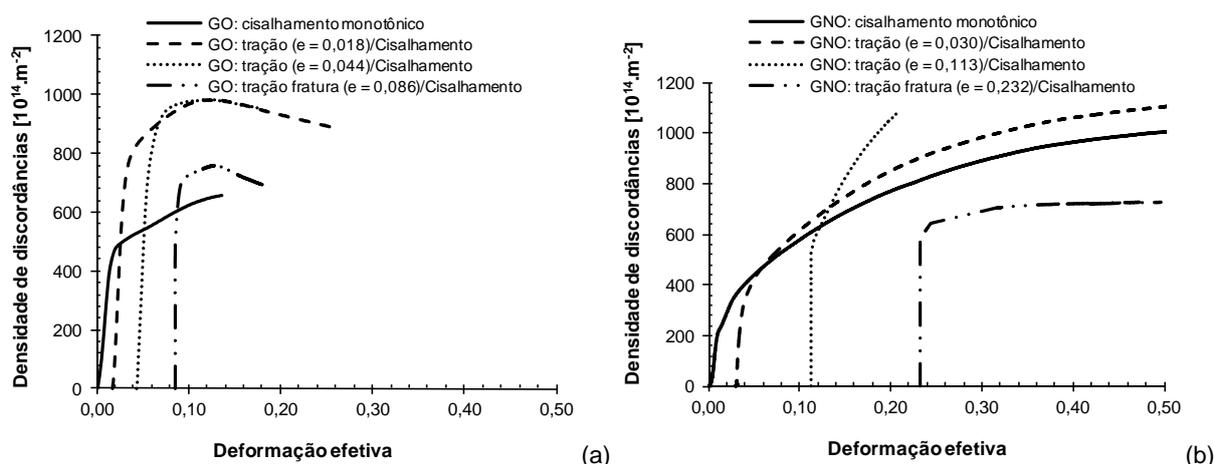
**Figura 6.** Variação do expoente de encruamento e da deformação residual em função da quantidade de pré-deformação em tração (deformação efetiva) para os aços GO e GNO.

A queda contínua da deformação residual para os aços GO e GNO está relacionada ao fato de que, embora o encruamento destes aços aumente com a quantidade de deformação plástica, o mesmo não é suficiente para impedir a restrição à continuidade da deformação plástica pela formação da “casca de laranja” que reduz a resistência mecânica destes materiais.

Pode-se concluir que a combinação dos esforços de tração e de cisalhamento aos aços GO e GNO favorece o aumento gradual da resistência à deformação plástica durante o recarregamento em cisalhamento, embora esse endurecimento não seja suficiente para manter a integridade física destes materiais devido ao desenvolvimento da imperfeição superficial “casca de laranja”.

### 3.4 Previsão da Densidade de Discordâncias

Com o objetivo de comparar a evolução do principal mecanismo responsável pelo encruamento dos aços GO e GNO, a Figura 7 mostra a montagem das curvas que indicam a previsão da densidade de discordâncias em função da deformação efetiva para estes aços para as sequências de carregamento apresentadas neste trabalho. Neste caso, o valor do módulo de cisalhamento,  $G$ , utilizado para o cálculo da densidade de discordâncias foi igual a 22,3 GPa e 26,7 GPa, para os aços GO e GNO, respectivamente, sendo estes avaliados a partir do carregamento monotônico em cisalhamento.



**Figura 7.** Estimativa da densidade de discordâncias em função das sequências de carregamento para os aços: (a) GO; e (b) GNO.

Nota-se a semelhança do perfil da densidade de discordâncias com a tensão efetiva, ambas em função da deformação efetiva para os aços GO e GNO. No entanto, nota-se, como sugerido pela análise da deformação residual mostrada na Figura 6, que o carregamento em cisalhamento da amostra do aço GNO deformada até a fratura em tração exibe a menor quantidade de densidade de discordâncias. Nesta condição, a capacidade de encruamento do aço GNO é inferior quando comparada para os demais valores de pré-deformação (menores), mas até mesmo quando comparado com o aço GO. Estes resultados revelam a diferença da evolução do encruamento dos aços GO e GNO.

A Figura 7a revela que existe um pico para a densidade de discordâncias do aço GO e isso não é observado para a amostra deste material na condição mais deformada. Indicando que, assim como observado para o aço GNO, que existe um limite para o acréscimo do encruamento em função da deformação prévia destes materiais.

Verifica-se por esta figura que o acréscimo da densidade de discordâncias ocorre para uma quantidade máxima de  $\varepsilon_{\text{efet}}$  de até 0,02 após a pré-deformação em tração. Embora este comportamento também seja reconhecido para o aço GNO, a redução significativa da densidade de discordâncias, logo, após o pico, só é observada para a amostra deformada até a fratura em tração.

Estas respostas evidenciam novamente a resposta diferenciada do encruamento dos aços GO e GNO após a mudança do modo de deformação plástica, destacando a sensibilidade maior do aço GO que endurece para até uma quantidade de deformação efetiva de referência menor que o detectado para o aço GNO. No entanto, este efeito é limitado pela formação da “casca de laranja” que tem início imediato com a deformação em tração quando comparado com o observado para o aço GNO.

Nota-se deste modo, que a quantidade de deformação prévia em tração de modo exibir o equilíbrio entre o endurecimento e a redução da ductilidade pela formação da “casca de laranja” é de aproximadamente 33% de AU para o aço GO contra 15% de AU para o aço GNO. Contudo, este equilíbrio, caso exista, é momentâneo, pois a intensidade de formação da imperfeição superficial é maior que o endurecimento decorrente da deformação plástica destes materiais.

#### 4 CONCLUSÕES

A sequência de carregamento tração/cisalhamento para os aços de grão orientado (GO) e de grão não-orientado (GNO) na condição como recebido revelou:

- o aumento imediato da resistência à deformação plástica no início do recarregamento em cisalhamento para o aço GO e apenas para a amostra fraturada em tração para o aço GNO;
- a redução da ductilidade após o recarregamento em cisalhamento;
- a limitação da continuidade da deformação plástica e do incremento no endurecimento dos aços devido à formação da imperfeição superficial “casca de laranja” para os carregamentos monotônico e combinados; e
- a sensibilidade maior ao endurecimento por deformação (não em magnitude) do aço GO após a mudança do modo de deformação plástica (tração para cisalhamento).

#### REFERÊNCIAS

- 1 ODA, Y., KOHNO, M., HONDA, A. *Recent development of non-oriented electrical steel sheet for automobile electrical devices*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.320, p. 2430-2435, (2008).
- 2 FISCHER, O., SCHNEIDER, J. *Influence of deformation process on the improvement of non-oriented electrical steel*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.254-255, p. 302-306, (2003).
- 3 NAKANO, M., ISHIYAMA, K., ARAI, I. *Production of ultra thin grain oriented silicon steel sheets*. Transactions of Magnetics, v.31 (6), p. 3886-3888, (1995).
- 4 DZUBINSKÝ, M., KOVÁČ, F., CERNÍK, M. *Secondary recrystallization kinetics in GO electrotechnical steels*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 215-216, p. 83-85, (2000);
- 5 LANDGRAF, F.J.G., EMURA, M. *Losses and permeability improvement by stress relieving fully processed electrical steels with previous small deformations*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 242-245, p. 152-156, (2002);

- 6 CAMPOS, M.F., LANDGRAF, F.J.G., TAKANOHASHI, R., CHAGAS, F.C., FALLEIROS, I.G.S., FRONZAGLIA, G.C., KAHN, H. *Effect of the hot band grains size and intermediate annealing on the deformation and recrystallization textures in low silicon electrical steels*. ISIJ International, v. 44 (3), p. 591-597, (2004);
- 7 ASTIÉ, B., DEGAUQUE, J., PORTESEIL, J.L., VERGNE, R. *Influence of dislocation structures on the magnetic and magnetomechanical properties of high-purity iron*. Transactions on Magnetics, v. 17, p. 2929-2931, (1981);
- 8 HOU, C.K. *Effect of rolling strain on the loss separation and permeability of lamination steels*. Transactions on Magnetics, v. 30, p. 212-216, (1994);
- 9 SWARTZENDRUBER, L.J., HICHO, G.E., CHOPRA, H.D., LEIGH, L.D., ADAM, G., TSORY, E. *Effect of plastic strain on magnetic and mechanical properties of ultralow carbon sheet steel*. Journal of Applied Physics, v. 81, p. 4263-4265, (1997);
- 10 GUTIÉRREZ-CASTAÑEDA, E.J., SALINAS-RODRÍGUEZ, A. *Effect of annealing prior to cold rolling on magnetic and mechanical properties of low carbon non-oriented electrical steels*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 323, p. 2524-2530, (2011);
- 11 GAO, H., HUANG, Y., NIX, W.D., HUTCHINSON, J.W. *Mechanism-based strain gradient plasticity – I. Theory*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 47, p. 1239-1263, (1999);
- 12 GURUPRASAD, P.J., BENZERGA, A.A. *Size effects under homogeneous deformation of single crystals: a discrete dislocation analysis*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 56, p. 132-156, (2008);
- 13 CASTRO, J.R., CORRÊA, E.C.S., AGUILAR, M.T., CETLIN, P.R., LOPES, W. *Estudo do fenômeno casca de laranja para o aço GNO*. Anais do 66<sup>o</sup> Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo/SP, p. 3159-3168, 18 a 22 de Julho de 2011;
- 14 REED HILL, R.E. *Princípios de metalurgia física*. 2<sup>a</sup> edição, Editora Guanabara, Rio de Janeiro/RJ, 776p, 1982.

