



# ESTUDO DO FENÔMENO CASCA DE LARANJA PARA O AÇO GNO<sup>1</sup>

Júlia Rocha de Castro<sup>2</sup>  
 Elaine Carballo Siqueira Corrêa<sup>3</sup>  
 Maria Teresa Paulino Aguilár<sup>4</sup>  
 Paulo Roberto Cetlin<sup>5</sup>  
 Wellington Lopes<sup>3</sup>

## Resumo

Os materiais utilizados em motores elétricos e em transformadores devem apresentar propriedades eletromagnéticas específicas, como a capacidade de intensificar a ação do campo magnético (permeabilidade magnética) e reduzida perda eletromagnética quando em funcionamento. Nestas condições, os aços de grão orientado (GO) e de grão não-orientado (GNO) são normalmente usados devido à apresentação de excelentes respostas magnéticas em função da orientação cristalográfica (textura). Contudo, com o objetivo de atender a esses requisitos de uso, os aços GNO são normalmente utilizados com granulação grosseira obtida após tratamento térmico de recozimento, embora essa seja uma condição favorável à formação da rugosidade superficial "casca de laranja". Considerando isso, o objetivo deste trabalho foi investigar o efeito das condições de processamento mecânico (modo e quantidade de deformação plástica, além do valor da taxa de deformação em cisalhamento) à ocorrência dessa imperfeição superficial e na resistência mecânica deste material mediante o uso de duas técnicas de ensaios (tração e cisalhamento, isoladas e combinadas). Os resultados indicaram que o aparecimento da irregularidade superficial depende da quantidade e do modo utilizado para a deformação plástica do aço GNO, sendo a ocorrência do fenômeno "casca de laranja" mais evidente quando o material é deformado em cisalhamento, além de se verificar o aumento da resistência mecânica ao escoamento em cisalhamento durante a execução da rota tração/cisalhamento.

**Palavras-chave:** Casca de laranja; Aço GNO; Processamento mecânico.

## STUDY OF ORANGE PEEL PHENOMENOM IN THE GNO STEEL

### Abstract

The materials used in electrical engines and transformers should be present specific electromagnetic properties, as the ability to intensify the action of magnetic field (magnetic permeability) and reduced electromagnetic loss when in use. In these conditions, the grain oriented (GO) and grain non-oriented (GNO) steels are commonly used due to the excellent magnetic properties considering the crystallographic preferred orientation (texture). However, in these situations, the GNO steels present coarse grain obtained after annealing heat treatment, condition that supports the formation of surface roughness (wrinkles), such as "orange peel". Considering this, the aim of this work was to investigate the effect of mechanical processing conditions (mode and amount of plastic deformation as well the strain rate in shearing) on occurrence of this superficial defect and the mechanical strength of this material with the use of two mechanical test techniques (tension and shearing, isolated and combined). The results indicated that the presence of the "orange peel" phenomenon depends of the amount and the mode used for plastic strain of GNO steel, being this problem more evident when the material is deformed in shearing. The data revealed also the increase of the yield strength in shearing during the tension/shearing route.

**Key words:** orange peel, GNO steel and mechanical processing.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Estudante de Graduação em Engenharia de Materiais, CEFET-MG, [julia.rochacastro@gmail.com](mailto:julia.rochacastro@gmail.com)

<sup>3</sup> Professor, CEFET-MG, Departamento de Engenharia de Materiais.

<sup>4</sup> Professor, UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção Civil.

<sup>5</sup> Professor, UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços utilizados para revestimento de motores elétricos devem amplificar um campo magnético aplicado paralelamente à superfície da chapa. Neste caso, os aços de grão não-orientado (GNO) constituem a opção de material mais adequado para essa finalidade. Nestes aços, ao contrário do observado nos aços de grão orientado (GO) a orientação cristalográfica (textura) é praticamente ignorada durante o processamento industrial, pois quando em uso, a direção de magnetização gira 360° a cada ciclo, mas permanece sempre no plano da chapa. Contudo, existem direções de mais fácil magnetização associada ao desenvolvimento de uma textura preferencial (textura Goss).

A composição química dos aços GO e GNO varia em função dos diferentes requisitos de uso e de custo das chapas destes materiais. Desta forma, as chapas mais baratas apresentam teor de silício na faixa de milésimos e de alumínio igual a aproximadamente 0,04% (em peso). Para os aços GNO, a composição química varia em termos dos teores de silício, de alumínio e de fósforo, pois os mesmos influenciam a indução de saturação e a permeabilidade magnética (diminui), além da dureza e da resistividade elétrica (aumenta), contribuindo para a redução das perdas por correntes parasitas e anômalas. Por fim, pode-se afirmar que, de modo geral, os aços de grão orientado apresentam teor de silício e de alumínio somados igual a 3,85% (em peso).<sup>(1,2)</sup>

Outra variável importante para o controle das propriedades magnéticas dos aços de grão não-orientado é o tamanho de grão.<sup>(3)</sup> O aumento do tamanho de grão diminui as perdas por histerese, embora as chamadas perdas anômalas aumentem. Deste modo, existe uma faixa de tamanho de grão considerada ótima, variando entre 100  $\mu\text{m}$  e 150  $\mu\text{m}$ .<sup>(4)</sup> Contudo, os mecanismos que explicam as condições necessárias ao desenvolvimento de uma granulação adequada às condições de serviço são controversos. Embora seja reconhecido que o tamanho de grão e a textura final são formados no último recozimento como resultado da recristalização e do crescimento de grão, os mecanismos responsáveis pela granulometria adequada do aço ainda não são completamente entendidos.

Desta forma, verifica-se, por exemplo, que deformações pequenas (laminação de encruamento ou *skin-pass*) favorecem o crescimento de grãos. No entanto, não há definição se o fenômeno que é observado nesta condição é a recristalização secundária ou a recristalização primária. A prática consiste em aplicar aos aços GNO uma quantidade de deformação em laminação a frio de 0,02 a 0,10 com posterior recozimento para ocasionar o crescimento do tamanho de grão.<sup>(5)</sup>

Diante do exposto, os aços de grão não-orientado são comumente entregues na condição como recozido com granulação grosseira para propiciar as melhores respostas magnéticas. No entanto, a resistência mecânica e o aspecto superficial destes aços devem ser considerados durante a preparação dos mesmos para o uso industrial, como as chapas usadas nos núcleos magnéticos de motores elétricos. Neste caso, os aços GNO passarão por uma operação de conformação mecânica simples, o corte (cisalhamento), mas considerando que os mesmos apresentam granulação grosseira, deve-se, portanto, avaliar a condição destes aços em termos da resistência mecânica e do aspecto superficial para que seja possível o aproveitamento dos mesmos.<sup>(6)</sup>

Durante o processamento a frio dos materiais metálicos alguns tipos de anomalias (irregularidades) podem aparecer na superfície do material que está sendo trabalhado. Um exemplo é o fenômeno conhecido como “casca de laranja”.

Este defeito está relacionado com o tamanho de grão do material, sendo associado à presença de uma granulação grosseira. Neste caso, a região do material que sofreu deformação apreciável tende a apresentar uma superfície extremamente rugosa, semelhante ao aspecto apresentado por uma casca de laranja.<sup>(7)</sup>

O desenvolvimento dessa irregularidade superficial é explicado pelo fato de que grãos individuais tendem a se deformar independentemente uns dos outros, de modo que eles ficam em destaque na superfície da chapa. A classificação desse fenômeno como sendo um defeito ou anomalia deve-se ao fato dessa rugosidade permanecer visível mesmo após a aplicação de um recobrimento superficial protetor ou pintura.

Uma maneira de evitar a formação dessa anomalia é controlar o tamanho de grão do metal. Materiais com granulação fina não exibem tal rugosidade, pois os grãos menores deformam-se como um todo e é difícil distinguir-se à vista desarmada os grãos individuais. Contudo, para os aços de grão não-orientado, a opção de reduzir o tamanho de grão não é possível em todas as condições de uso deste material devido à influência desta variável nas propriedades magnéticas do mesmo.

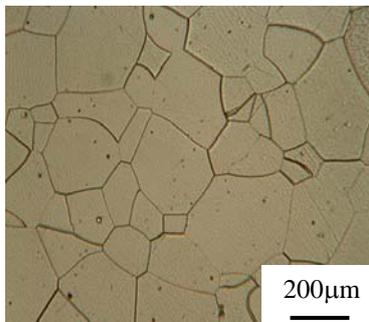
Considerando a necessidade de uso do aço GNO com granulação grosseira para a obtenção das melhores propriedades magnéticas e a relação dessa condição com a formação de defeitos superficiais, este trabalho utiliza um material com granulometria de 102  $\mu\text{m}$  e investiga a susceptibilidade do mesmo ao desenvolvimento da “casca de laranja” e a evolução do comportamento mecânico (resistência mecânica) em função de diferentes condições de processamento mecânico, tais como: a quantidade e o modo de deformação plástica, a taxa de e a combinação de esforços mecânicos.

## 2 MATERIAL e MÉTODOS

### 2.1 Material

Este trabalho utilizou chapas do aço de grão não-orientado (GNO) totalmente processadas no estado como recebido (recozido) com espessura inicial de 0,50mm  $\pm$  0,05mm cortadas a 90° em relação à direção de laminação original da chapa. Os testes foram feitos em sua maioria a 90° devido à disponibilidade deste material nesta direção.

A composição química do aço GNO indicou a presença de (% em peso) 0,011C; 2,12Si; 0,003Al; 0,416Mn; 0,029P e 0,007S, enquanto a caracterização microestrutural do aço GNO (lixamento e polimento mecânicos e ataque com reativo químico Nital 5%) revelou tamanho de grão igual a 102  $\mu\text{m}$  (Figura 1).



**Figura 1.** Fotomicrografia do aço de grão não-orientado (GNO) – microscópio óptico Kontrol, ataque com reativo químico Nital 5% (Aumento de 100X).

## 2.2 Rugosidade Superficial do Aço GNO

A avaliação quantitativa da formação da irregularidade superficial “casca de laranja” em função das condições de solitação mecânica impostas ao aço GNO foi feita mediante a identificação da rugosidade média superficial, padrão RA ( $\mu\text{m}$ ), dos corpos de prova utilizados nos testes de tração, de cisalhamento e de tração/cisalhamento. Deste modo, fez-se uso do rugosímetro portátil SJ 201P da Mitutoyo com comprimento de amostragem de 4mm para expressar a média de 6 valores medidos do padrão  $R_A$ .

## 2.3 Testes de Tração Uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados na máquina de ensaios INSTRON 5582 com uso de sistema de aquisição de dados *Blue Hill 2*. A taxa de deformação inicial utilizada nos testes foi de  $0,001\text{s}^{-1}$  com velocidade de 4,5 mm/min, sendo os testes conduzidos a  $90^\circ$  em relação à direção de laminação original da chapa.

Os testes de tração uniaxial foram realizados para atender os seguintes objetivos: para caracterizar mecanicamente o aço GNO (deformação até a fratura), para verificar o efeito da quantidade de pré-deformação em tração no aparecimento das imperfeições superficiais (casca de laranja), sendo o material pré-deformado de 0,015; 0,018; 0,033 e 0,189 de deformação efetiva (deformação verdadeira), correspondendo a 6%, 7%, 13% e 80% do valor do alongamento uniforme do aço GNO.

## 2.4 Testes de Cisalhamento Planar Simples

O ensaio de cisalhamento planar simples (em uma única direção) foi realizado com o auxílio de um dispositivo adaptado à máquina de ensaios INSTRON 5582, como demonstrado em trabalho anterior.<sup>(8)</sup>

A conversão da deformação cisalhante,  $\gamma$ , (indicada pela razão entre o deslocamento vertical,  $\Delta L$ , e o horizontal,  $\Delta x$ , da amostra) em deformação efetiva,  $\varepsilon_{\text{efet}}$  e da tensão cisalhante,  $\tau$  (razão entre a força aplicada,  $F$ , e a área cisalhada: comprimento versus espessura) em tensão efetiva,  $\sigma_{\text{efet}}$ , foi feita de acordo com o critério de von Mises, como representado pelas equações (1) e (2), respectivamente mediante a realização de testes monotônicos de tração e de cisalhamento como definidos por Rauch.<sup>(9)</sup>

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

$$\sigma_{\text{efet}} = 1,73 \cdot \tau \quad (2)$$

Três valores de taxa de deformação foram aplicados às chapas do aço GNO durante os testes de cisalhamento para verificar o efeito desta variável no aparecimento da imperfeição superficial casca de laranja:  $0,001\text{s}^{-1}$ ,  $0,01\text{s}^{-1}$  e  $0,1\text{s}^{-1}$ .

## 2.5 Ensaios Combinados de Tração e de Cisalhamento

Outro método de estudo do fenômeno casca de laranja compreendeu a execução de ensaio combinado de tração e de cisalhamento. Neste caso, o aço

GNO foi pré-deformado em tração de 0,03 (deformação verdadeira) e, em seguida, deformado em cisalhamento de 0,47 (deformação efetiva), totalizando 0,50 de deformação efetiva.

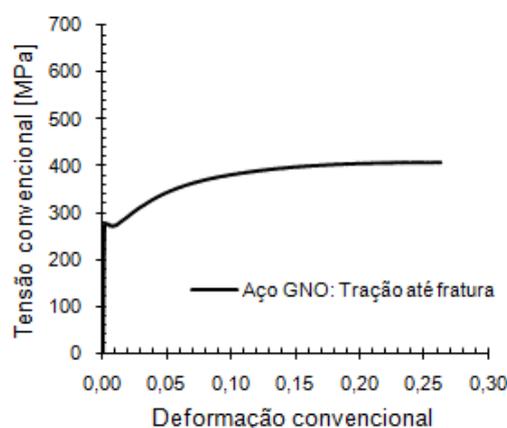
### 3 RESULTADOS e DISCUSSÕES

A Tabela 1 mostra o resumo das principais propriedades mecânicas do aço GNO medidas a 90° em relação à direção de laminação original deste material após a caracterização mecânica obtida por meio de testes de tração uniaxial. Como escrito no item 2.2, o valor do alongamento uniforme do aço GNO foi utilizado como referencial para a pré-deformação em tração deste material, verificando assim, o efeito da quantidade de deformação em tração à formação do fenômeno de “casca de laranja” do aço ao silício.

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

Tensão limite de escoamento, LE (MPa)	Tensão limite de resistência à tração, LRT (MPa)	Alongamento uniforme, AU	Alongamento não-uniforme, ANU	Alongamento total, AT
269	410	0,260	0,121	0,381

A Figura 2 exibe a curva tensão convencional-deformação convencional do aço GNO que foi utilizada para o cálculo das propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 1.

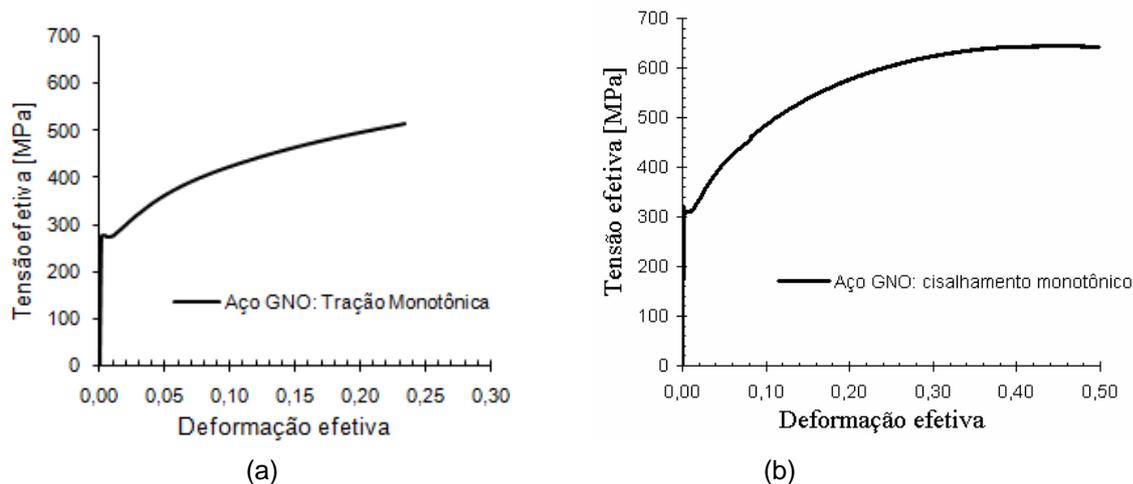


**Figura 2.** Curva tensão convencional – deformação convencional do aço de grão não-orientado (GNO).

#### 3.1 Carregamento Monotônico Versus “Casca de Laranja”

O primeiro método de estudo da susceptibilidade do aço GNO à formação da “casca de laranja” consistiu na deformação plástica monotônica em tração (até a fratura) e em cisalhamento. As Figuras 3(a) e 3(b) mostram as curvas de tensão efetiva – deformação efetiva em tração e em cisalhamento, respectivamente.

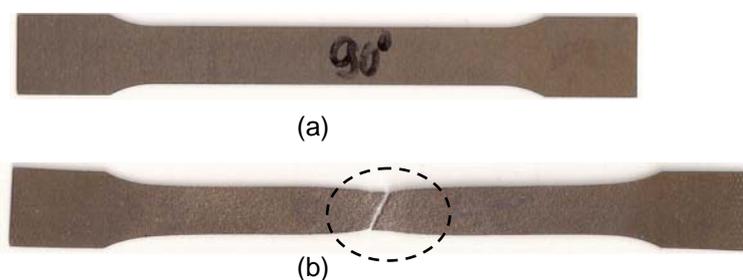
A conversão dos valores de tensão e de deformação cisalhantes em tensão e deformação efetivas foi feita com uso das equações (1) e (2), respectivamente, mostradas no item 2.4.



**Figura 3.** Curvas tensão efetiva – deformação efetiva para o aço GNO sob carregamento monotônico em: (a) tração uniaxial e (b) cisalhamento.

O aspecto macroscópico dos corpos de prova de tração e de cisalhamento antes e após a execução dos respectivos ensaios mecânicos é mostrado nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Verifica-se que o aço GNO apresentou a formação da “casca de laranja” para os dois modos de sollicitação mecânica (vide detalhe em círculo tracejado nos respectivos corpos de prova após a conclusão dos testes).

O critério adotado para a aplicação da quantidade de deformação plástica em tração e em cisalhamento foi baseado na condição de ruptura do material sob esses modos de sollicitação mecânica. Desta forma, em tração, o material foi deformado até a fratura, enquanto em cisalhamento até o aparecimento de trincas nas bordas do corpo de prova (veja as setas apontadas na Figura 5(b)).



**Figura 4.** Corpos de prova de tração utilizados para a medição das propriedades mecânicas do aço GNO: (a) antes do ensaio e (b) após a conclusão do teste até a fratura.



**Figura 5.** Corpos de prova de cisalhamento utilizados para a deformação plástica em carregamento monotônico do aço GNO: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio.

Com relação ao efeito do modo de deformação plástica na formação de imperfeições superficiais nos corpos de prova do aço GNO verificou-se que, devido à localização da deformação plástica em tração (estricção, figura 5(a)), fenômeno este ausente no ensaio de cisalhamento, a ocorrência da “casca de laranja” é mais acentuada nesta região de instabilidade plástica. Contudo, em ambos os modos de esforço mecânico, as estrias tendem a se espalhar ao longo da região que sofreu a deformação plástica, sendo isso evidente na amostra cisalhada (figura 5(b)).

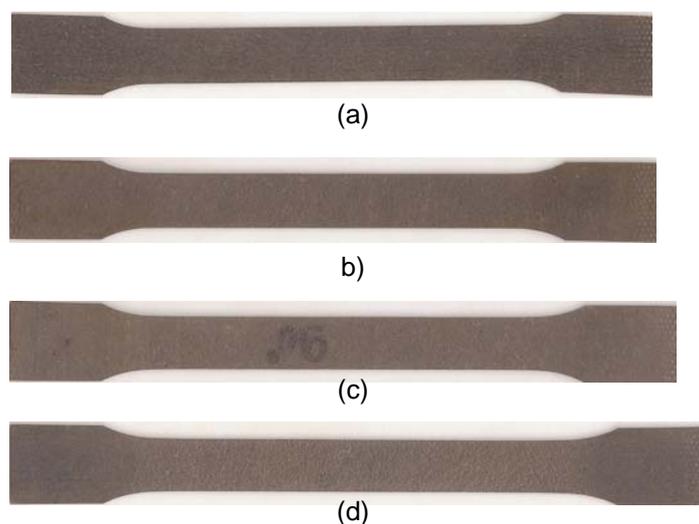
### 3.2 Deformação em Tração Versus “Casca de Laranja”

A figura 6 exhibe o aspecto dos corpos de prova de tração após a aplicação da pré-deformação de 0,015 (Figura 6a), 0,018 (Figura 6b), 0,033 (Figura 6c) e 0,189 (Figura 6d) de deformação verdadeira.

Verifica-se que o aumento da quantidade de deformação acentua a formação das estrias no aço GNO, sendo isso mais nítido para a amostra deformada de 0,189 (deformação efetiva).

A mudança da rugosidade superficial dos corpos de prova de tração é percebida visualmente somente a partir de 0,018 de deformação efetiva (Figura 6c), embora se saiba que a rugosidade do material foi modificada com a deformação plástica em tração. Considerando isso, no item 3.4 será apresentada a variação da rugosidade média ( $R_A$ ) dos corpos de prova de tração deformados em tração, em tração-cisalhamento e em três valores de taxa de deformação ( $0,001s^{-1}$ ,  $0,01s^{-1}$  e  $0,1s^{-1}$ ).

O aspecto visual dos corpos de prova de tração sugere que o aumento da quantidade de deformação prévia (pré-deformação) favorece o aparecimento do fenômeno “casca de laranja”, sendo isso relacionado à maior mobilidade dos grãos até o encontro com uma barreira física (contornos do material), como resultado da aplicação do esforço mecânico.

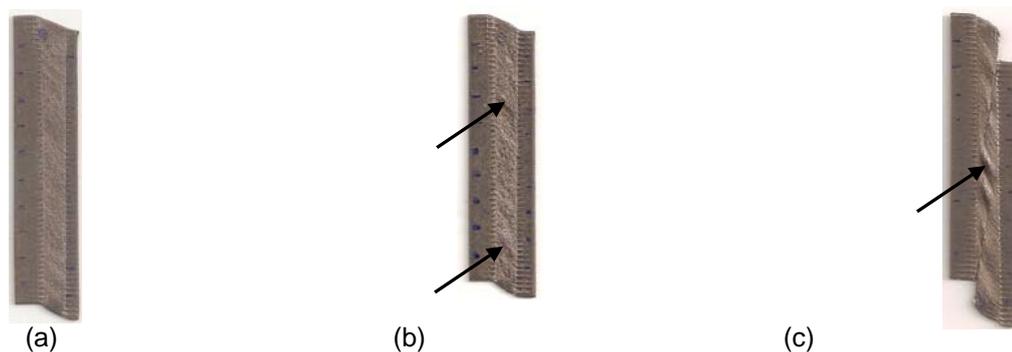


**Figura 6.** Corpos de prova pré-deformados em tração (deformação verdadeira) de: (a) 0,015 (b) 0,018, (c) 0,033 e (d) 0,189.

### 3.3 Taxa de Deformação Versus “Casca de Laranja”

O carregamento monotônico em cisalhamento até 0,50 de deformação efetiva ocasionou a formação da “casca de laranja” para o aço GNO, assim como observado quando o esforço aplicado foi a tração.

A Figura 7 revela o aspecto dos corpos de prova de cisalhamento submetidos a ensaios monotônicos para três valores de taxa de deformação:  $0,001s^{-1}$ ,  $0,01s^{-1}$  e  $0,1s^{-1}$ . Nesta condição, assim como observado no item 3.2 referente ao efeito da quantidade de deformação plástica em tração à ocorrência do fenômeno “casca de laranja”, o aumento da taxa de deformação também alterou acentuadamente o aspecto superficial do aço GNO (verifica-se o aparecimento de ondulações na região cisalhada, sendo isso indicado pelas setas apontadas na Figura 7).



**Figura 7.** Corpos de prova de cisalhamento após aplicação de diferentes valores de taxa de deformação: (a)  $0,001s^{-1}$ , (b)  $0,01s^{-1}$  e (c)  $0,1s^{-1}$ .

### 3.4 Esforços Mecânicos Combinados Versus “Casca de Laranja”

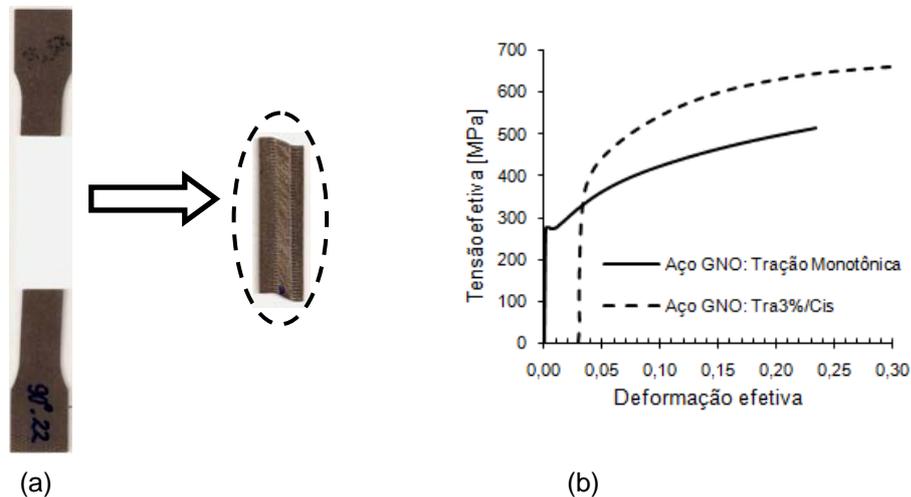
A combinação dos esforços de tração uniaxial e de cisalhamento planar simples também contribuiu para a formação da “casca de laranja”, como revelado pela análise da Figura 8(a). Nesta condição, o aço GNO foi pré-deformado em tração de  $\epsilon_{\text{efet}} = 0,03$  e, em seguida, deformado monotonicamente em cisalhamento (na mesma direção do esforço de tração) até 0,50 de deformação efetiva acumulada.

Embora a pré-deformação em tração de  $\epsilon_{\text{efet}} = 0,03$  não tenha modificado de modo significativo o aspecto visual do aço GNO, esse esforço mecânico permitiu que, durante a deformação monotônica subsequente (em cisalhamento), as estrias também apresentassem a tendência de ondulação ao longo da superfície do material, como verificado após a deformação sob taxa de deformação de  $0,01s^{-1}$ .

Este fato sugere que para a mesma quantidade de deformação efetiva ( $\epsilon_{\text{efet}} = 0,50$ ) aplicada nos carregamentos monotônico em cisalhamento e em tração-cisalhamento, que neste último, a ocorrência do fenômeno “casca de laranja” foi maior. Este comportamento pode ser relacionado à mudança do encruamento do aço GNO devido à execução de um carregamento complexo em relação ao observado pelas curvas de referência dos carregamentos monotônicos conduzidos em tração e em cisalhamento (Figura 8b).

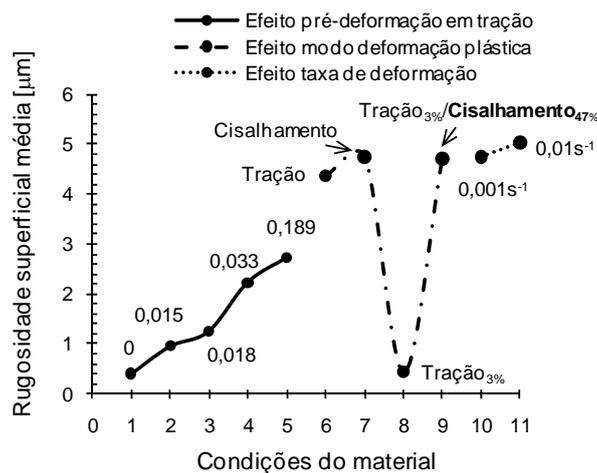
O traçado da curva de fluxo após a mudança da trajetória de deformação (tração para cisalhamento) revela que essa condição de carregamento modificou o encruamento do aço GNO. Esta característica é percebida na Figura 8 (b) pelo aumento da inclinação da curva de fluxo referente à rota tração-cisalhamento.

A rota tração-cisalhamento é uma condição de carregamento onde se observa uma mudança brusca do modo de deformação plástica.<sup>(10)</sup> Assim, a obstrução à movimentação das linhas de discordâncias provocada pela mudança do modo de deformação plástica tende a ser maior, provocando o aumento da resistência ao escoamento durante o recarregamento em cisalhamento, além de acentuar o fenômeno “casca de laranja”.



**Figura 8.** (a) Aspecto do corpo de prova de cisalhado após a pré-deformação em tração de 0,03 de deformação verdadeira e (b) curvas tensão efetiva-deformação efetiva para os carregamentos monotônico e combinado tração3%/cisalhamento.

Com o objetivo de analisar quantitativamente a ocorrência das estrias no aço GNO, as Figuras 9(a) e 9(b) apresentam a evolução da rugosidade média superficial, padrão  $R_A$ , em função das condições de carregamento impostas a este material. Nota-se a ausência do valor de  $R_A$  para o cisalhamento monotônico sob taxa de deformação de  $0,1s^{-1}$  pelo fato de não ser possível realizar a leitura a partir do rugosímetro utilizado nos testes.



**Figura 9.** Variação da rugosidade superficial do aço GNO em função das condições de solicitação mecânica: (a) 1: como recebido, 2: deformado de  $\epsilon_{efet} = 0,015$ , 3: deformado de  $\epsilon_{efet} = 0,018$ , 4: deformado de  $\epsilon_{efet} = 0,033$ , 5: deformado de  $\epsilon_{efet} = 0,189$ , 6: tração monotônica ( $\epsilon_{efet} = 0,26$ ), 7: cisalhamento monotônico ( $\epsilon_{efet} = 0,50$ ), 8: cisalhamento monotônico taxa  $0,001s^{-1}$ , ( $\epsilon_{efet} = 0,50$ ), 9: cisalhamento monotônico taxa  $0,01s^{-1}$ , ( $\epsilon_{efet} = 0,50$ ), 10: tração<sub>3%</sub> da rota tração<sub>3%</sub>/cisalhamento<sub>47%</sub> e 11: cisalhamento<sub>47%</sub> da rota tração<sub>3%</sub>/cisalhamento<sub>47%</sub>.

## 4 CONCLUSÕES

As condições de processamento mecânico aplicadas ao aço GNO neste trabalho revelaram os seguintes resultados com relação à formação do fenômeno “casca de laranja”:

- o aumento da incidência do defeito superficial com o aumento da quantidade de deformação plástica em tração e em cisalhamento (mais acentuado) e da taxa de deformação;
- o desenvolvimento da “casca de laranja” pela análise visual a partir de 0,018 de deformação verdadeira em tração;
- a formação de uma superfície ondulada para o cisalhamento conduzido sob taxa de deformação de  $0,01s^{-1}$  e após a combinação dos esforços de tração e de cisalhamento;
- a fratura rápida do material para os testes de cisalhamento monotônico conduzidos sob taxa de deformação de  $0,1s^{-1}$  e a mudança do encruamento (aumento da resistência ao escoamento) e a intensificação do fenômeno “casca de laranja” após a aplicação da rota tração<sub>3%</sub>/cisalhamento.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pelo suporte para a concretização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 CUNHA, M.A., ZWIRMAN, N.C.S.B., WOLGIEN, V.W., GERMANO, R.S., LANDGRAF, F.J.G., YANOMINE, R., TAKANOHASHI, N.B.L. *21st Conference on Properties and Applications of Magnetics Materials, Illinois Institute of Technology*, 2002;
- 2 YONAMINE, T., HENRIQUE, M.L., TAKANOHASHI, R., CHAGAS, F.C., WOLGIEN, V., ZWIRMAN, N., SERNA, M., LIMA, N.B., VILELA, J.M.C., ANDRADE, M.S., LANDGRAF, F.J.G. *Anisotropia das propriedades magnéticas de aços semi-processados*. Anais do 57º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo/SP, p. 913-931, Julho de 2002;
- 3 CARDOSO, R.F.A., BRANDÃO, L.P.M., CUNHA, M.A. *Influence of grain size and Al and Mn additions on the magnetic properties of non-oriented electrical steels with 3% Si*. Materials Research, v.11, p. 51-55, (2008);
- 4 SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; MATSUMURA, K.; FUKUDA, B. *Recent development on non-oriented electrical steel sheets*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.26, p. 57-64, (1982);
- 5 LÖW, M., LIMA, N. B., KUNIOSHI, C.T. *Estudo do desenvolvimento da textura durante a recristalização primária de aços ferríticos por difração de raios-X e difração de elétrons retroespalhados*. III Workshop sobre textura, São Paulo, p. 36-46, (2006);
- 6 MAGELLA, M.A., TORRE, R.V.B.D., KÜHN, I. *Estudo do comportamento ao cisalhamento na estampagem de aços para fins elétricos – Parte 1: caracterização mecânica*. CONAMET/SAM – Simpósio Materia, p. 1-6, (2002);
- 7 BAYRAKTAR, E., ALTINTAS, S. *Some problems in steel forming processes*. Journal of Materials Processing Technology, v. 80-81, p. 83-89, (1998);
- 8 LOPES, W., CORRÊA, E.C.S., CAMPOS, H.B., AGUILAR, M.T., CETLIN, P.R. *Estudo do encruamento anisotrópico do latão CuZn34 sob carregamento Bauschinger*. Anais do 65º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Rio de Janeiro/RJ, p. 1-12, 26 a 30 de Julho de 2010;
- 9 RAUCH, E.F. *The flow law of mild steel under monotonic or complex strain path*. Solid State Phenomena, v.23 - 24, p. 317-334, (1992).