

# COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE UMA CHAPA DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO<sup>1</sup>

Marcelo Costa Cardoso<sup>2</sup>  
 Luciano Moreira Pessanha<sup>3</sup>  
 Guilherme Almeida Monteiro<sup>4</sup>  
 Andersan dos Santos Paula<sup>5</sup>

## Resumo

Neste trabalho, o comportamento plástico de uma chapa de aço inoxidável AISI 304L foi primeiro avaliado por meio de ensaios de tração uniaxial realizados em duas velocidades, nos quais foram realizadas medidas simultâneas de deformação, temperatura e fração volumétrica de martensita  $\alpha'$  induzida por deformação plástica. Ademais, a curva limite de conformação foi determinada por meio de ensaios com punções de fundo plano e hemisférico. Com bases em um modelo fenomenológico, a plasticidade induzida por transformação de fases foi descrita a partir dos resultados dos ensaios de tração uniaxial. Com o aumento da taxa de deformação, observou-se primeiro um aumento da tensão de escoamento no domínio de pequenas deformações e, em seguida, uma queda em razão do aumento de temperatura, que, por sua vez, reduziu a transformação martensítica no domínio de grandes deformações acumuladas. As deformações limites foram analisadas nas condições de estricção localizada e fratura, indicando boa conformabilidade da chapa de aço inoxidável AISI 304L.

**Palavras-chave:** Taxa de deformação; Plasticidade induzida por deformação; Curva limite de conformação; Aço inoxidável austenítico.

## PLASTIC BEHAVIOR OF AN AUSTENITIC STAINLESS STEEL SHEET

### Abstract

In this work, the plastic behavior of an austenitic stainless steel AISI 304L sheet was first evaluated by means of uniaxial tensile testing performed at two strain-rates, during which simultaneous measurements of strain, temperature as well as plastic strain deformation-induced  $\alpha'$ -martensite volume fraction were carried out. Besides, the forming limit curve was determined from both flat and hemispherical punch tests. Based on a phenomenological model, the kinetics of phase transformation-induced plasticity was obtained from the uniaxial tensile data. With the strain-rate increase, an increase of the uniaxial flow stress is first observed in the small strains range and, after that, a cross effect due to the temperature rise was observed which, in turn, decreased the martenistic transformation in the large accumulated strains domain. The limit strains were analyzed in both localized necking and fracture conditions, showing the good formability of the austenitic stainless steel AISI 304L sheet

**Keywords:** Strain-rate; TRIP; Forming limit curve; Austenitic stainless steel.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil

<sup>2</sup> Mestrando, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

<sup>3</sup> Professor Associado, D. Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

<sup>4</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

<sup>5</sup> Professor Adjunto, D. C., Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Av. Dos Trabalhadores n.º 420, Volta Redonda – RJ

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são divididos em três grupos de acordo com a microestrutura básica formada, a saber: (1) martensítica, (2) ferrítica, (3) austenítica. Na verdade, existe ainda o grupo de aços duplex com estrutura mista composta por ferrita e austenita. Os aços austeníticos, em particular, devido à presença de elemento de ligas como níquel, conseguem estabilizar a austenita a temperatura ambiente. Tais aços apresentam maior resistência à corrosão combinando baixos limites de escoamento com alta resistência a tração e bons níveis de alongamento. Os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente usados na construção civil em produtos como, por exemplo, revestimento interno em elevador, cubas, cabideiros de banheiro, torneiras, entre outros. Nas indústrias náutica para escadas, âncoras e suportes e acabamentos para barcos. Na indústrias hospitalar e hoteleira como carrinhos de refeição, baixelas, bandejas, panelas, talheres. E em meios agressivos em geral, como tanques para reservatório de cloro, resíduos nucleares e produtos químicos. Muitos destes produtos são fabricados a partir de chapas por meio do processo de estampagem, ou seja, deforma-se o esboço com um ferramental punção-matriz segundo uma geometria desejada.

Os aços inoxidáveis austeníticos, objeto de estudo desse trabalho, são nobres e quando processado suas características são afetadas pelas transformações martensíticas induzidas pela deformação, que podem ocorrer de duas formas: (1) transformação martensítica induzida por tensão e (2) transformação martensítica induzida pela deformação plástica.<sup>(1)</sup> Os aços que estão sujeitos a essas transformações são chamados de aços com efeito TRIP, "Transformation Induced Plasticity". O presente estudo foi realizado em uma chapa de aço inoxidável AISI 304L de 1 mm de espessura com bases em ensaios de tração uniaxial e Curva Limite de Conformação (CLC). Os ensaios de tração uniaxial foram realizados primeiro para determinação das propriedades mecânicas e, em seguida, com duas velocidades diferentes para avaliação da influência do efeito da taxa de deformação na cinética de transformação de fases induzida por deformação. Os ensaios para determinação da curva limite de conformação foram realizados com punção plano<sup>(2)</sup> e hemisférico<sup>(3)</sup> proporcionando a avaliação das deformações limites na estricção (CLCE) e fratura (CLCF) com auxílio de equipamentos de aquisição e correlação de imagens digitais. A avaliação da transformação de fases austenita ( $\gamma$ )  $\rightarrow$  martensita ( $\alpha'$ ) foi realizada com auxílio de um ferritoscópio. Os resultados dos ensaios de tração uniaxial permitiram a identificação de parâmetros de um modelo fenomenológico adotado para descrever a cinética dos efeitos TRIP do aço inoxidável AISI 304L, possibilitando assim investigações futuras com bases em simulações numéricas por elementos finitos que possam auxiliar a aplicação destes aços em novos produtos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Material

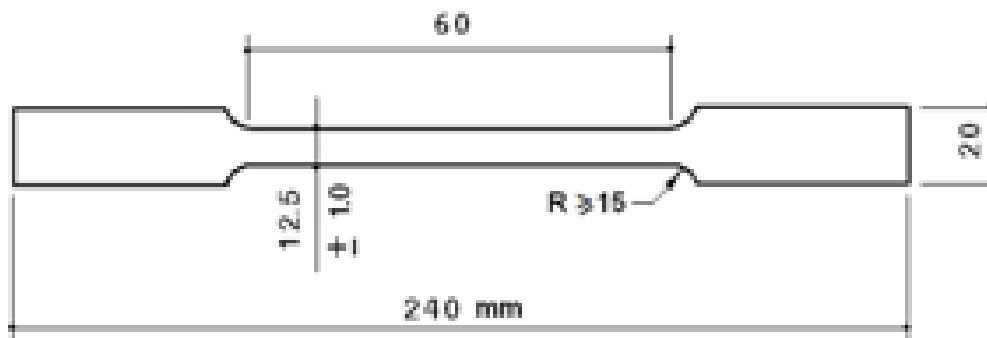
O material estudado é um aço inoxidável austenítico AISI 304L e foi processado pela empresa Arcelor Mittal Brasil que cedeu 77 chapas com medidas de 494 mm x 450 mm com a espessura de 1 mm com direção de laminação paralela a medida de 450 mm. Esse material é uma liga de Cr-Ni com baixo teor de carbono, cuja composição química está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1**– Composição química do aço inox austenítico 304L (Arcelor Mittal Brasil)

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
% Peso	0,018	1,2693	0,4786	0,0303	0,0015	18,3639	8,0221	0,0261	0,0032
Elemento	Cu	Co	V	Nb	Pb	B	Ti	Sn	W
% Peso	0,0428	0,1015	0,0418	0,0071	0,001	0,006	0,0018	0,0044	0,0146

## 2.2 Ensaio de Tração Uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial foram realizados no Centro de Pesquisas da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) com auxílio de uma máquina universal de ensaios INSTRON modelo 5585 H com célula de carga de 30 KN e vídeo-extensômetro AVE (Advanced Video Extensometer). Para todos os ensaios foram separadas 15 chapas de 450 mm x 494 mm do aço inoxidável austenítico AISI 304L, com direção de laminação paralela a medida de 450 mm. Todos os corpos de prova foram primeiramente cortados em retângulos de 25 mm de largura por 245 mm de comprimento por meio de uma guilhotina hidráulica e, posteriormente fresados atendendo as dimensões do corpo de prova de tração uniaxial segundo a norma NBR-6673 (Figura 1).



**Figura 1** – Dimensões em mm do corpo de prova para os ensaios de tração uniaxial.

Para avaliar as propriedades mecânicas por meio de ensaios de tração uniaxial foram utilizadas 10 chapas, das quais foram confeccionados três corpos de prova com três orientações angulares, a saber, 0, 45 graus, 90 graus em relação à direção de laminação. Para realizar as medições do alongamento e variação de largura, foram marcados pontos nos corpos de prova formando uma base de 50 mm no sentido longitudinal e 12,5 mm no sentido transversal. O sistema AVE reconhece as marcações por luz infravermelho registrando as suas posições durante o ensaio. A velocidade do ensaio foi de 1 mm/min e os corpos de prova foram levados até a ruptura para determinação do limite de escoamento a 0,2% de deformação plástica, expoente de encruamento, anisotropia plástica, alongamento e limite de resistência.

## 2.3 Cinética de Transformação de Fases

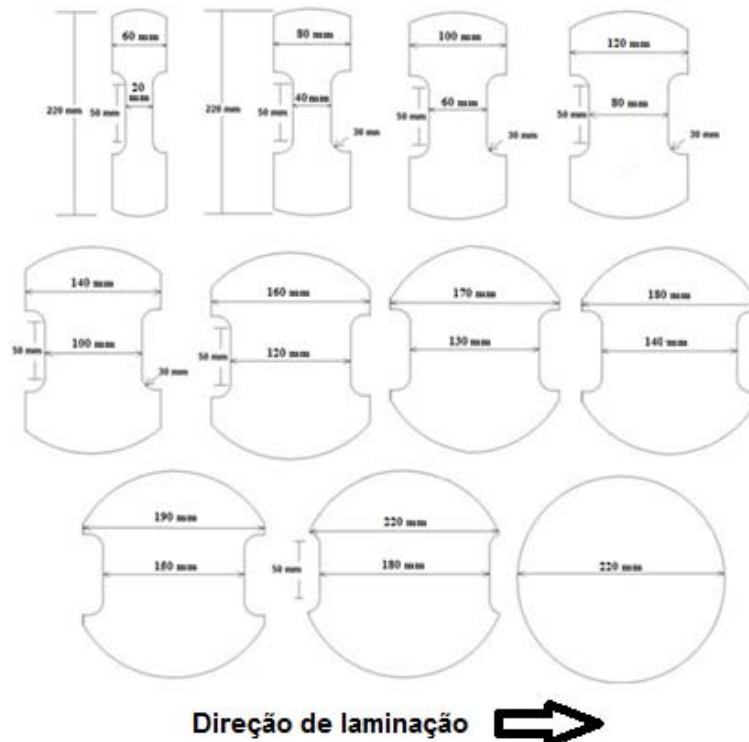
A determinação da cinética de transformação de fases foi feita por meios de ensaios de tração uniaxial, nos quais foram avaliados somente corpos de prova retirados no sentido de laminação da chapa. Para tal, acoplou-se ao corpo de prova uma sonda do equipamento ferritoscópico Fischer modelo FMP30, possibilitando a medição por indução magnética em tempo real da fração volumétrica de martensita- $\alpha'$  transformada devido a deformação plástica. Para monitorar a variação de temperatura, adaptou-se um sistema de aquisição de dados Fluke Hydra a um termopar acoplado ao corpo de prova. As fixações destes equipamentos foram

realizadas com auxílio de elásticos ortodônticos e suportes de arames finos de aço. O ferritoscópio e o termopar foram acionados ao mesmo tempo em que foi acionado o movimento da barra móvel da máquina de ensaios. Estes ensaios foram realizados nas velocidades de 0,25 mm/min e 25 mm/min, que fornecem taxas de deformação nominais de aproximadamente de  $8 \times 10^{-5}$  e  $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

## 2.4 Curva Limite de Conformação

Para determinação da Curva Limite de Conformação (CLC) foram realizados ensaios segundo as metodologias de Marciniak (punção cilíndrico plano 100 mm) e Nakazima (punção hemisférico 100 mm). Os ensaios de CLC foram realizados no Centro de Tecnologia da empresa USIMINAS por meio de uma máquina de ensaios de embutimento Erichsen modelo 242 equipada com um sistema de aquisição e correlação de imagens digitais ViaLUX para depuração das deformações nos corpos de prova com o software Autogrid. Para ambas as metodologias, foram separadas cinquenta e oito chapas de 450 mm x 494 mm do aço inoxidável 304L com 1 mm de espessura para confecção dos corpos de prova. Estes foram primeiro cortados em retângulos de 225 mm x 247 mm, com a direção de laminação paralela a dimensão de 225 mm. Em seguida, por meio de operações de usinagem de torneamento e fresamento, foram confeccionados corpos de prova com larguras na região central iguais a 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm, 130 mm, 140 mm, 150 mm e 180 mm, todos com comprimento de 220 mm segundo a direção perpendicular ao sentido de laminação da chapa. Já os corpos de prova para os ensaios de expansão biaxial simétrica foram usinados com diâmetro de 220 mm. De acordo com a metodologia Marciniak, foi necessário a confecção de máscaras que devem ser posicionadas entre o punção e corpo de prova de modo a garantir que a fratura ocorra na zona central. Estas máscaras foram usinadas com as mesmas dimensões dos corpos de prova e com o aço AISI 304L avaliado neste trabalho. Máscaras bipartidas obtidas por corte em guilhotina foram empregadas para os corpos de prova com larguras de 20 mm, 40 mm, 60 mm e 80 mm. Máscaras com furo central usinado com diâmetro igual a 44 mm foram confeccionadas para os corpos de prova com larguras de 100 mm, 120 mm, 130 mm e 140 mm. Já para os corpos de prova com largura 150 e 180 mm e diâmetro 220 mm foram usinados furos centrais com diâmetros iguais a 36 mm, 34 mm e 32 mm, respectivamente. Os desenhos e as dimensões dos corpos de prova estão apresentados na Figura 2.

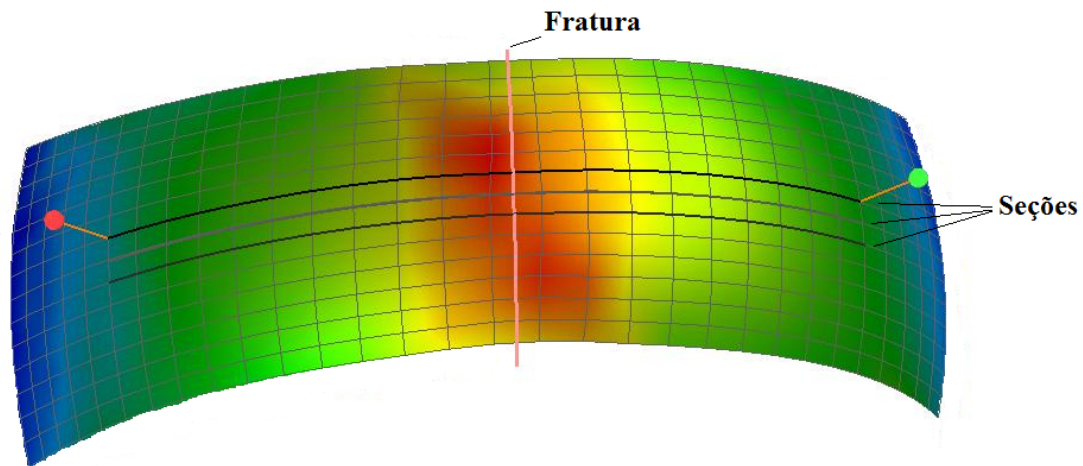
Para realizar a análise de deformações superficiais, os corpos de provas foram previamente gravados por processo eletrolítico com grade de quadrados de 2,5 mm de lado. A lubrificação nos ensaios com punção plano foi feita somente entre a máscara e o punção com uma película de teflon de 0,1 mm de espessura com diâmetro de 100 mm. A lubrificação do ensaio com punção hemisférico foi feita com um disco de PVC com 50 mm de diâmetro e 5 mm de espessura em conjunto com graxa em ambas as superfícies do disco e um filme de PVC com 50 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura. Em todos os ensaios de Curva Limite de Conformação, empregou-se a força de aperto no prensa-chapas igual a 500 kN e velocidade de punção de 60 mm/min. A máquina de ensaios de embutimento registra o deslocamento e força do punção e interrompe automaticamente os ensaios após a fratura dos corpos de prova por detecção da força máxima.



**Figura 2** – Corpos de prova dos ensaios de Curva Limite de Conformação.

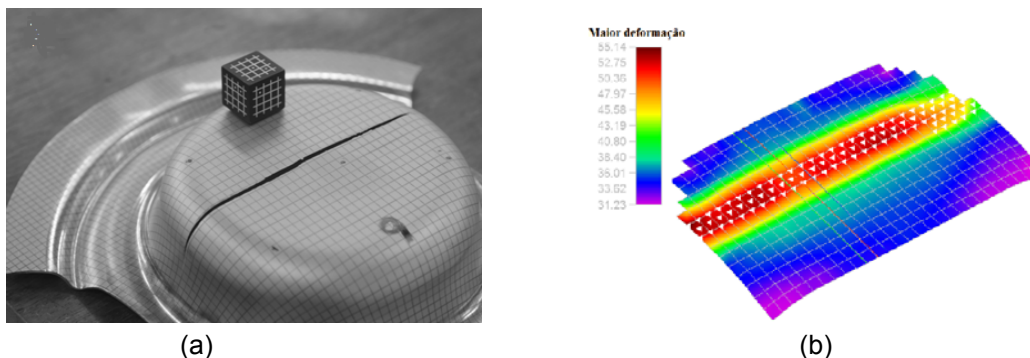
As deformações nos corpos de prova foram obtidas com o sistema ViaLUX por meio de 4 câmeras CCD (Charge-Coupled Device) acopladas a máquina de ensaios de embutimento. A análise das deformações limites foram realizadas de acordo com a norma ISO 12004-2.<sup>(4)</sup> Segundo esta norma, três a cinco seções devem ser definidas em um sentido perpendicular a fratura conforme mostrado na Figura 3 para o corpo de prova 40 mm x 220 mm. Em cada uma das seções devem ser construídas curvas das deformações principais no plano ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ) com 10 pontos localizados a esquerda e a direita da fratura. Em seguida, são realizados ajustes com polinômios do 2º grau com 5 pontos situados a esquerda e a direita da fratura, excluindo-se os pontos de máxima e mínima deformação. A segunda derivada de cada polinômio do 2º grau é realizada e com a mudança de seu sinal define-se uma janela para descarte dos pontos entre a máxima ou mínima deformação. Depois, os pares de pontos de deformação restantes, em ambos os lados da fratura ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ), são então ajustados com polinômios do 6º grau. As deformações na condição de estricção em cada seção são definidas pela substituição dos pontos ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ) referentes a fratura nestes polinômios. Por fim, as deformações limites em cada corpo de prova são determinadas pelos valores médios das deformações definidas nas três seções. Esta metodologia é realizada automaticamente com o software Autogrid do sistema ViaLUX.

Para a definição da Curva Limite de Conformação na fratura (CLCF) foi empregado o software de análise e correlação de imagens digitais ASAME. Primeiro, posiciona-se um alvo contendo um padrão de grade de quadrada 2,5 mm sobre o corpo de prova, conforme mostrado na Figura 4(a). Em seguida, com uma câmera digital Nikon D300 são tomadas duas fotos com angulações que variam de 60° a 90°. A partir destas imagens, a região da fratura é reconstruída conforme mostrado na Figura 4(b). De modo análogo a norma ISO 12004-2,<sup>(4)</sup> foram criadas três seções perpendiculares a fratura para definir as deformações principais na fratura.



**Figura 3** – Definição das seções para depuração das deformações limites.

Para análise da transformação de fases em função das deformações na condição de estrição, foram adotadas as mesmas seções perpendiculares à fratura obtidas com o software ASAME. As frações transformadas foram medidas com o auxílio da sonda do ferritoscópio em pontos adjacentes a fratura. Os resultados são definidos pelos valores médios de fração transformada de martensita- $\alpha'$  em função dos valores da menor deformação principal determinados para a condição de estrição em conformidade com a norma ISO 12004-2.<sup>(4)</sup>



**Figura 4** – Definição de deformações na fratura no corpo de prova 150 mm x 220 mm: (a) tomada de imagens digitais e (b) iso-valores da maior deformação principal.

## 2.5 Modelamento

Neste trabalho, o comportamento plástico da chapa de aço AISI 304L foi descrito pelo modelo de Iwamoto, Tsuta e Tomita,<sup>(5)</sup> no qual a tensão efetiva de escoamento é definida pela seguinte lei de mistura definida em função da fração transformada  $f_m$ :

$$\bar{\sigma} = f_m \bar{\sigma}_m + (1 - f_m) \bar{\sigma}_a \quad (1)$$

onde os índices "a" e "m" correspondem as fases da austenita e martensita, respectivamente. A tensão de escoamento de cada fase é descrita por:

$$\bar{\sigma}_i = \sigma_{y_i} + C_{1i} \left\{ 1 - \exp \left[ -C_{2i} \bar{\epsilon}^p \right] \right\}^{C_{3i}} \left[ \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\bar{\epsilon}}_y} \right]^m \quad (2)$$

onde  $\bar{\epsilon}^p$  e  $\dot{\epsilon}^p$  são as medidas de deformação e taxa de deformação plástica de deslizamento,  $m$  é a sensibilidade a taxa de deformação e  $\dot{\epsilon}_y$  é a taxa de deformação de referência. Na Eq. (2), o limite de escoamento é definido em função da temperatura  $T$  por:

$$\sigma_{y_i} = C_{4_i} \exp[-C_{5_i} T] \quad (3)$$

onde  $C_J(i)$  ( $J = 1, \dots, 5$ ) são parâmetros que descrevem o comportamento mecânico das fases  $i$  ( $a =$  austenita e  $m =$  martensita). O modelo de cinética de transformação de fases austenita ( $\gamma$ )  $\rightarrow$  martensita ( $\alpha'$ ) proposta por Iwamoto, Tsuta e Tomita<sup>(5)</sup> é baseada nas hipóteses que a formação de embriões de martensita induzida por deformação plástica se dá na interseção de bandas de cisalhamento e que as duas fases estão submetidas a mesma deformação plástica. Este modelo é descrito por:<sup>(5)</sup>

$$\dot{f}_m = (1 - f_m) [A \dot{\epsilon}^p + B \dot{g}] \quad (4)$$

com

$$A = \alpha n p \eta (f_{sb})^{n-1} (1 - f_{sb}) \quad (5)$$

e

$$B = \eta \frac{dp}{dg} (f_{sb})^n H(\dot{g}) \quad (6)$$

onde  $n$  e  $\eta$  são constantes geométricas enquanto que  $H$  é a função de Heaviside. A fração volumétrica de bandas de cisalhamento é definida em função da taxa de deformação plástica por escorregamento por:

$$\dot{f}_{sb} = \alpha (1 - f_{sb}) \dot{\epsilon}^p \quad (7)$$

onde  $\alpha$  é um parâmetro material associado à energia de falha de empilhamento que controla o número de bandas de cisalhamento e é definido por:

$$\alpha = \left[ \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 - \alpha_4 \Sigma \right] \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_y} \right)^M \quad (8)$$

onde  $\alpha_i$  ( $i = 1, 4$ ) são parâmetros materiais,  $M$  é o expoente de sensibilidade à taxa de deformação e  $\Sigma$  é o fator de triaxialidade de tensões definido por  $\Sigma = \sigma_{ii} / 3 \bar{\sigma}$ . Ainda, a função probabilidade  $p$  de formação de embriões de martensita nas interseções de bandas de cisalhamento é definida por:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_g} \int_{-\infty}^g \exp \left[ -\frac{(g' - g_0)^2}{2\sigma_g^2} \right] dg' \quad (9)$$

na qual a força motriz  $g$  para a transformação martensítica é dada por:

$$g = -T + g_1 \Sigma \quad (10)$$

onde  $\sigma_g$ ,  $g_0$  e  $g_1$  denotam o desvio padrão, o valor médio e uma constante relacionados com a força motriz  $g$ , respectivamente. O modelo de Iwamoto et al. [5] foi implantado no programa de elementos finitos ABAQUS/Standard por meio da sub-rotina UMAT aberta ao usuário.<sup>(6)</sup>

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

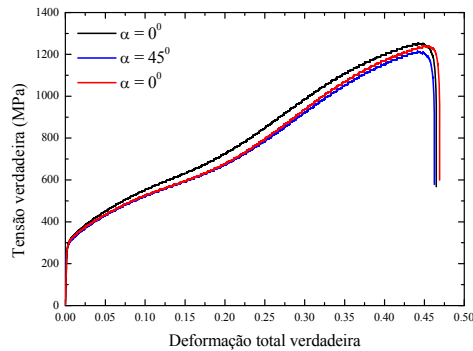
### 3.1 Propriedades Mecânicas

Os valores médios e correspondentes desvios padrão das propriedades mecânicas determinadas nos ensaios de tração uniaxial estão listados na Tabela 2, onde  $\sigma_e$ ,  $\sigma_r$ ,  $n$ ,  $\varepsilon_u$ ,  $\varepsilon_T$  e  $R$  são o limite de escoamento a 0.2% de deformação plástica, o limite de resistência, o expoente de encruamento, a deformação total uniforme %, a deformação total (%) e o coeficiente de anisotropia plástica, respectivamente. Primeiro, pode-se observar que o valor médio da tensão limite de escoamento é maior na direção de laminação em comparação com os valores médios nas orientações  $\alpha = 45$  e  $90$  graus. Ademais, as tensões limites de escoamento e resistência obedecem à relação  $\sigma_0 > \sigma_{90} > \sigma_{45}$ . Entretanto, há de se ressaltar que essa diferença não é tão significativa, ficando em torno de 5% considerando o desvio padrão, e em relação ao limite de resistência em torno de 3%. Por outro lado, os valores do coeficiente de anisotropia plástica no plano da chapa obedecem a relação  $R_{45} > R_0 > R_{90}$ , com valor médio de anisotropia plástica normal  $R = 1,03$ , refletindo as pequenas variações dos limites de escoamento e resistência em função da orientação angular. A Figura 5 apresenta as curvas tensão verdadeira-deformação total verdadeira em função da orientação angular onde é possível observar um aumento considerável da tensão de escoamento em razão da transformação de fases  $\gamma \rightarrow \alpha'$  induzida por deformação.

**Tabela 2** – Propriedades mecânicas determinadas nos ensaios de tração uniaxial

Orientação (graus)	$\sigma_e$ (MPa)	R	$\varepsilon_u$ (%)	n	$\varepsilon_T$ (%)	$\sigma_r$ (MPa)
0	300,46	0,900	42,04	0,320	46,44	1231,74
	1,011	0,0283	0,573	-	0,168	3,359
45	281,17	1,200	43,25	0,310	46,24	1199,03
	4,851	-	0,198	0,007	0,029	3,429
90	293,2	0,820	43,45	0,300	46,85	1223,77
	0,156	0,021	0,389	0,007	0,038	3,224

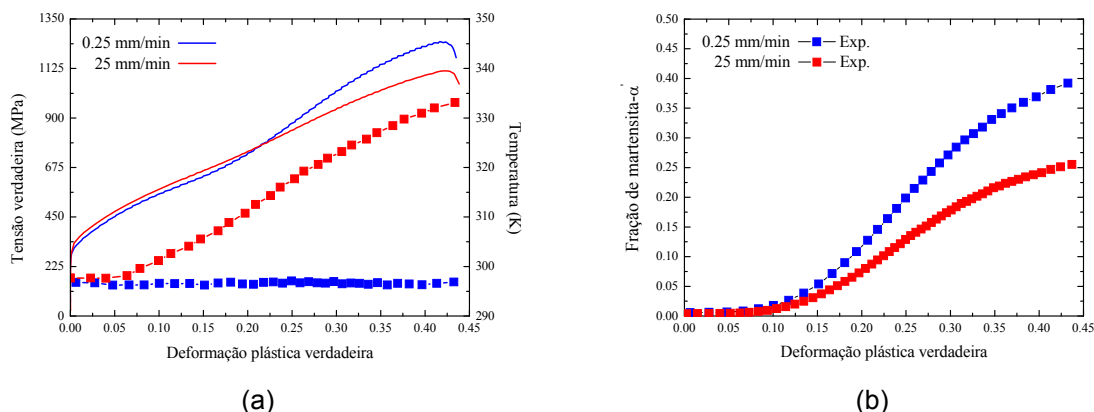




**Figura 5** – Comportamento da chapa de aço AISI 304 L em tração uniaxial em função da orientação angular com relação à direção de laminação. Velocidade = 1 mm/min.

### 3.2 Cinética de Transformação de Fases

Observa-se pela Figura 6(a) que com o aumento da taxa de deformação há uma elevação na tensão de escoamento no domínio de pequenas deformações e, em seguida, uma inversão de comportamento com uma queda desta tensão sem perda de ductilidade no domínio de grandes deformações. Esse comportamento é atribuído ao aumento da temperatura no domínio de grandes deformações, o qual, por sua vez, ocorre devido ao calor gerado pelo trabalho de deformação plástica e a transformação de fases em um intervalo curto de tempo que não permite perdas por convecção com o ambiente e na região de contato do corpo de prova com as garras, vide evolução de temperaturas na Figura 6(a). Os efeitos de temperatura em razão do aumento da taxa de deformação inibem a transformação de fases da martensita- $\alpha'$  induzida por deformação plástica, como pode ser observado na Figura 6(b).



**Figura 6** – Efeitos da taxa de deformação no comportamento plástico do aço AISI 304L: (a) tensão verdadeira e temperatura e (b) fração de martensita- $\alpha'$  induzida por deformação.

### 3.3 Curva Limite de Conformação

A Figura 7 mostra as imagens dos corpos de prova deformados empregando-se as metodologias de Marciniak (punção plano) e Nakazima (punção hemisférico). A fratura ocorreu na região central dos corpos de prova ensaiados com o punção plano ao passo que esta condição não foi observada em algumas geometrias deformadas com o punção hemisférico, vide as fraturas obtidas para as larguras de 120 mm, 130 mm e 140 mm na Figura 7(b). Ademais, as fraturas ficaram alinhadas



com o comprimento dos corpos de prova de 150 mm e 180 mm ensaiados com punção hemisférico. Estas variações ora de posição ora de orientação da fratura podem ser atribuídas as condições de atrito e lubrificação sob elevadas pressões de contato. As deformações limites definidas para chapa de aço AISI 304L estão apresentadas nas Figuras 8(a) e 8(b) segundo os métodos Marciniak e Nakazima, respectivamente. Pode-se observar que as duas curvas na condição de estrição apresentam a mesma tendência. Entretanto, as deformações limites definidas a partir dos ensaios com punção hemisférico atingem valores um pouco mais elevados no domínio de estampagem. Esta diferença pode ser atribuída aos efeitos de flexão que tem lugar nos ensaios com punção hemisférico. Ainda, é possível observar uma diferença maior entre as deformações na estrição e na fratura definidas com o punção plano. Isto pode ser atribuído ao modo de deformação em estado plano de tensões isento de efeitos de flexão que produz efeitos de gradientes de deformação de longo alcance comparados as restrições de contato nos ensaios com punção hemisférico.

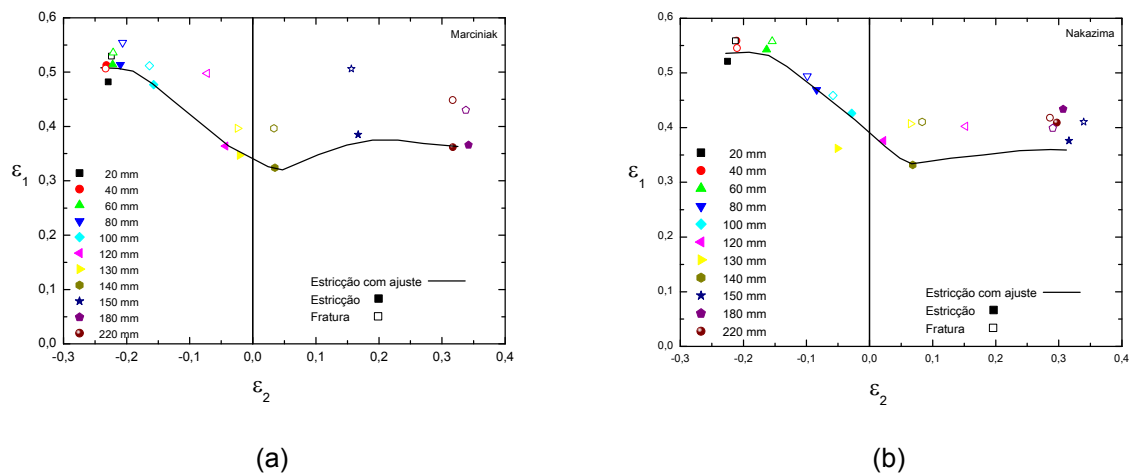


(a)



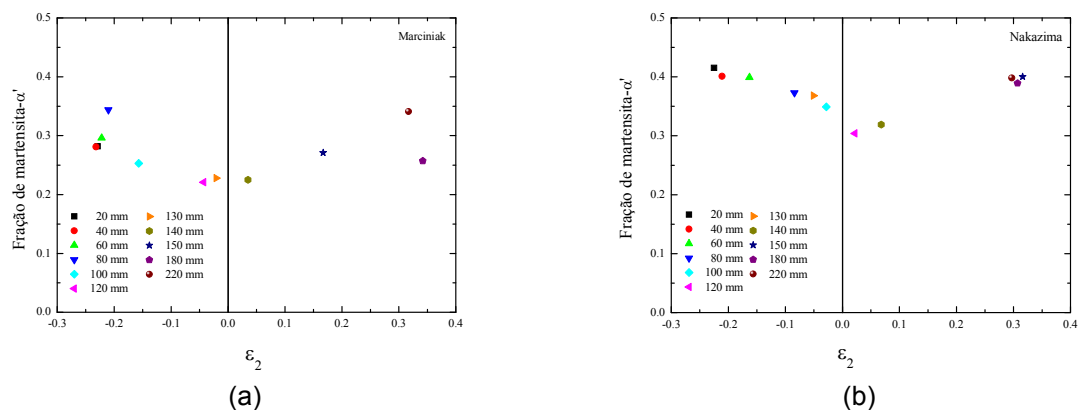
(b)

**Figura 7** – Corpos de prova deformados: (a) punção plano e (b) punção hemisférico.



**Figura 8** – Curva Limite de Conformação da chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L: (a) punção cilíndrico plano (Marciniak) e (b) punção hemisférico (Nakazima).

A Figura 9 apresenta a fração de martensita- $\alpha'$  induzida por deformação em função da menor deformação determinada para a chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L a partir dos ensaios realizados com os punções plano e hemisférico. Observa-se que a transformação de fases se dá em valores mais altos no ensaio realizados com punção hemisférico, o que pode estar relacionado com os maiores níveis de deformação plástica efetiva obtidos nesta metodologia visto os maiores valores da maior deformação principal em comparação com os resultados obtidos nos ensaios do punção plano, vide Figura 8. Ademais, é possível que temperaturas mais elevadas tenham sido alcançadas nos ensaios com punção plano visto que neste o punção tem que deslocar o conjunto corpo de prova - máscara e, portanto, inibindo a transformação de fases devido ao mecanismo de transferência de calor por contato.

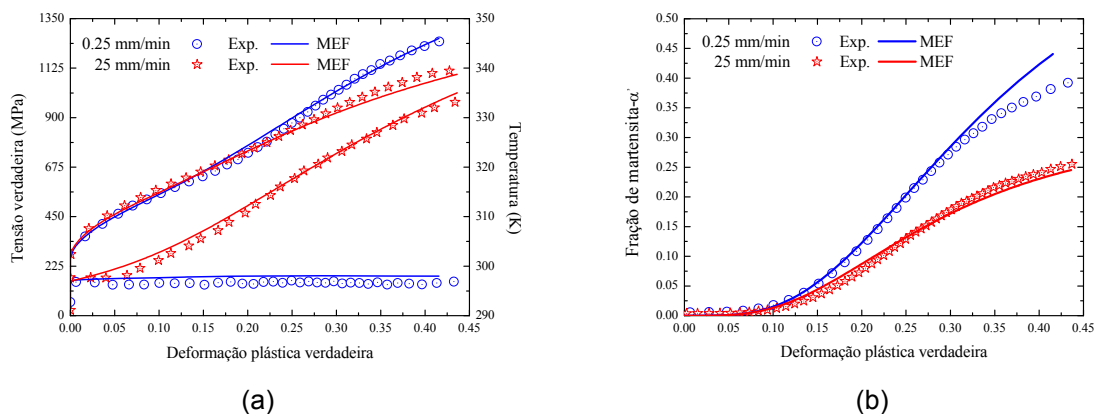


**Figura 9** – Martensita- $\alpha'$  induzida por deformação em função da menor deformação determinada para a chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L: (a) punção plano (Marciniak) e (b) punção hemisférico (Nakazima).

### 3.4 Modelamento

Com bases em simulações termomecânicas foi possível identificar os parâmetros de cinética de transformação de fases do modelo de Iwamoto, Tsuta e Tomita,<sup>(5)</sup> conforme as comparações apresentadas na Figura 10 entre medidas

experimentais e previsões numéricas por elementos finitos dos ensaios de tração uniaxial.



**Figura 10** – Comparações entre medidas experimentais e previsões numéricas dos ensaios de tração uniaxial da chapa de aço AISI 304L realizados em função da taxa de deformação: (a) curvas de tensões verdadeiras e temperaturas versus deformação plástica verdadeira e (b) fração de martensita- $\alpha'$  em função da deformação plástica verdadeira.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, o comportamento plástico de uma chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L foi caracterizado por meio de ensaios de tração uniaxial e Curva Limite de Conformação. A partir das análises de resultados experimentais foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

- 1) o aço AISI 304L apresentou elevados valores de resistência mecânica e ductilidade em razão da transformação de fases  $\gamma \rightarrow \alpha'$  induzida por deformação plástica, porém, com baixos valores de anisotropia plástica normal;
- 2) a transformação de fases  $\gamma \rightarrow \alpha'$  induzida por deformação plástica é inibida com o aumento da taxa de deformação em decorrência do aumento de temperatura durante o ensaio de tração uniaxial;
- 3) as deformações limites na definidas pelas metodologias Marciniak (punção plano) e Nakazima (punção hemisférico) tem mesma tendência na condição de estrição, porém, maiores níveis de deformação foram obtidos nos ensaios com punção hemisférico em razão de efeitos de flexão e atrito que influenciam a cinética de transformação de fases  $\gamma \rightarrow \alpha'$  induzida por deformação plástica;
- 4) foram identificados parâmetros de um modelo fenomenológico que possibilita a descrição dos efeitos de plasticidade induzida por transformação de fases  $\gamma \rightarrow \alpha'$  em simulações de processos de conformação de chapas de aços AISI 304L.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos as empresas Arcelor Mital do Brasil (fornecimento de chapas de aço AISI 304L), CSN (realização de ensaios de tração uniaxial) e USIMINAS (realização de ensaios de Curva Limite de Conformação). MCC agradece a CAPES pelas bolsas de estudos de Mestrado. GAM agradece ao CNPq pelas bolsas de Iniciação Científica PIBIC. LPM agradece ao CNPq (Bolsa de Produtividade PQ2 e Edital Universal 2010) e a FAPERJ (JCNE 2008) pelo fomento a pesquisa.



## REFERÊNCIAS

- 1 Antunes, A. E. B. e Antunes, K. M. D., Comportamento plástico do aço inoxidável austenítico em baixa temperatura; Revista Escola Minas, Ouro Preto. Vol. 60, N. 1, 2007.
- 2 Marciniak, Z. e Kuczynski, K., Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 9, N. 9, 1967, pp. 609-620.
- 3 Nakazima, K. , Kikuma, T. e Hasuka, T., Study on the formability of steel sheets, Yawata Technical Report Nr. 284, 1968, pp. 140–141.
- 4 International Organization for Standardization. ISO 12004-2: Metallic materials-sheet and strip-determination of forming limit curves – part 2: determination of forming limit curves in laboratory. Geneva, 2007.
- 5 Iwamoto, T., Tsuta, T. e Tomita, Y., Investigation on deformation mode dependence of strain-induced martensitic transformation in trip steels and modelling of transformation kinetics, International Journal of Mechanical Sciences, v. 40, pp. 173-182, 1998.
- 6 Moreira, L. P. e Medeiros, N., Modelamento por elementos finitos da estampagem de aços com efeitos TRIP. In: 47º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 2010, Belo Horizonte, MG, ABM.