

ESTUDO DA RUGOSIDADE E ONDULAÇÕES NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO INTERSTITIAL FREE – IF ¹

Ricardo Kirchhof Unfer²
José Divo Bressan³

Resumo

O objetivo do trabalho é avaliar a evolução dos parâmetros de rugosidade e ondulação na deformação em tração simples e deformação plana de chapas de aço Interstitial Free - IF. Avaliaram-se os vários parâmetros de rugosidade tais como a rugosidade média Ra, distância máxima pico-vale Rt e parâmetros da ondulação: distância máxima pico-vale da ondulação Wt, ondulação média Wa, altura do pico máximo da ondulação Pp e profundidade máxima do vale Pv. Foram confeccionados e ensaiados corpos de prova de tração simples aço IF, considerando 0°, 45° e 90° de direção da laminação e corpo de prova tipo IRSID de deformação plana. Durante os ensaios de tração, foram medidas as deformações principais no plano da chapa, ε_1 deformação longitudinal e ε_2 deformação transversal. Por meio destes dados experimentais foi possível obter os pontos necessários para se traçar as curvas dos parâmetros de rugosidade e ondulação versus deformação equivalente $\bar{\varepsilon}$ e determinar a equação da evolução desses parâmetros. As curvas dos parâmetros Ra, Rt, Wa, Wt, Pv e Pp versus a deformação equivalente $\bar{\varepsilon}$ foi do tipo equação fenomenológica do terceiro e quarto grau. A seguir, avaliou-se a evolução das taxas de crescimento de Wa, Wt, Pv e Pp com a deformação equivalente. A partir dessas curvas de taxa de crescimento traçadas foi também possível propor um critério de surgimento da estrição local visível na superfície da chapa.

Palavras-chave: Ensaio de tração; Aço IF; Rugosidade; Direção de laminação.

ROUGHNESS AND WAVINESS STUDIES IN SHEET METAL FORMING OF INTERSTITIAL FREE STEEL - IF

Abstract

The goal of present work is to evaluate the evolution of roughness and waviness parameters in tensile and plane strain deformation tests of interstitial free steel – IF steel. Various roughness parameters such as arithmetic average Ra, maximum pick-valley distance Rt and waviness parameters: total height peak-valley Wt, arithmetic average waviness Wa, waviness maximum peak height Pp and maximum valley depth Pv were measured during the tests. Tensile test specimens at 0°, 45° and 90° to the direction of rolling and plane strain IRSID type specimens at 0° and 90° of IF steel were fabricated and tested. During the tests, the in-plane surface strains, ε_1 longitudinal strain and ε_2 transverse strain, were measured. From these experimental results, it was possible to obtain the necessary points to plot the curves of roughness and waviness parameters versus equivalent strain $\bar{\varepsilon}$ and to find the evolution equation for these parameters. The parameters Ra, Rt, Wa, Wt, Pv and Pp versus equivalent strain evolution curves obtained were type phenomenological equation of third and fourth degree. Next, the growth rate evolution of Wa, Wt, Pv and Pp with equivalent strain were evaluated. From this curves of growth rate it was possible to propose a criterion for the onset of visible local necking in the sheet surface.

Key-words: Tensile test; IF steel; Roughness; Rolling direction.

¹ Contribuição técnica ao 50° Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Eng. Mec., M.Eng., , Centro de Ciência tecnológicas, Departamento de Química, Universidade do Estado de Santa Catarina Joinville, Santa Catarina, Brazil, ricardo.unfer@joinville.udesc.br

³ Eng. Mec., M.Sc., Ph.D., Centro de Ciência tecnológicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, Brazil, dem2jdb@joinville.udesc.br

1 INTRODUÇÃO

As chapas de aço livre de interstícios, aço IF, são comumente utilizadas na fabricação das peças externas dos automóveis devido a suas excelentes características de conformabilidade na temperatura ambiente. As operações de estiramento biaxial, embutimento profundo e dobramento são os principais processos de conformação de chapas empregadas para fabricar essas peças. Porém, a fabricação de peças de chapa com forma geométrica complexa por conformação pode ser uma operação difícil de ser realizada devido a ocorrência de ruptura em pontos críticos ou defeitos superficiais tais como a estrição local visível, casca de laranja ou elevada rugosidade superficial.

Tradicionalmente, no projeto de peças por conformação de chapas, emprega-se o “Mapa das Deformações Principais Limites – MDPL” ou DLC⁽¹⁾ que é uma informação importante do material e necessária para se obter uma peça conformada com sucesso tanto na fase inicial da operação de try-out na prensa de conformação como na etapa de simulação numérica no desenvolvimento do produto.

A CLC, curva limite de conformação, é uma curva média traçada no mapa MDPL através dos pontos experimentais medidos das deformações principais na superfície da chapa, ϵ_1 e ϵ_2 , próximos da estrição local ou da ruptura por cisalhamento puro.⁽²⁾ Dois tipos principais de mecanismos de falhas podem ocorrer na peça conformada: estrição local visível e ruptura por cisalhamento a longo da espessura da chapa. Portanto, dois tipos de CLC podem ser traçadas no mapa MDPL: curva limite de deformação da estrição local visível, CLC-N, e a curva limite de deformação por cisalhamento puro, CLC-S.⁽³⁾

Em 1967, Marciniak e Kuczynski⁽⁴⁾ propuseram um método numérico, modelo M-K, para levantamento teórico da CLC-N no estiramento biaxial de chapas, baseado num defeito inicial na espessura da chapa que evoluía para uma estrição local visível na superfície da chapa durante a operação de conformação. Posteriormente, em 1968, Goodwin⁽⁵⁾ desenvolveu uma técnica experimental para determinar a CLC-N experimental, para aços de alta estampabilidade, baseada na medição de malha impressa na superfície de chapas. Esta curva foi posteriormente estabelecida como critério de ruptura para vários processos de conformação de chapas.

Os métodos experimentais de obtenção da CLC-N ou CLC-S, como os métodos de Nakazima, IRSID e de Marciniak, são técnicas bem estabelecidas que tem sido utilizadas frequentemente para se relacionar as deformações limites obtidas em escala de laboratório com as deformações superficiais máximas permitidas nas peças em escala industrial.

Vários outros autores propuseram modelos teóricos para a previsão da ruptura por cisalhamento e da estrição local visível na conformação de chapas. O presente Bressan e Willians⁽⁶⁾ propuseram em 1985 um modelamento matemático para o surgimento da estrição local a partir de um defeito inicial na espessura da chapa, utilizando o conceito de gradiente de deformação plástica localizada. A ocorrência da estrição local visível é devido a evolução de um defeito inicial de espessura que é assumida exibir suaves variações e consideradas como ondulação da rugosidade superficial.

Um parâmetro que é extremamente importante para se avaliar a qualidade da superfície de chapas de aço usada na indústria automobilística é a rugosidade superficial do material. Neste contexto, considera-se que as rugosidades e ondulações da superfície do material são governadas por diversos fatores importantes, tais como as propriedades do metal da chapa, a técnica de laminação

utilizada na produção em massa, tamanho de grão, etc.. Pesquisas sobre este assunto tem sido realizadas e expressões matemáticas empíricas foram propostas para relacionar tamanho de grão, deformação limite e parâmetros de rugosidade.⁽⁷⁾

Para chapas metálicas que se comportam essencialmente com uma única fase policristalina de microestrutura uniforme, concluiu-se que os limites de deformação em estiramento biaxial variam sistematicamente com a razão da espessura da chapa t_0 e o tamanho médio de grão d_0 , de acordo com a razão $t_0/d_0 < \approx 20$.⁽⁷⁾ Outros trabalhos teóricos publicados que consideram a influencia da anisotropia do grão no estiramento biaxial foram os trabalhos desenvolvidos por Yamaguchi e Mellor⁽⁷⁾ e Parmar, Mellor e Chakrabarty (P-M-C).⁽⁸⁾ Nestes trabalhos foi assumido que no estiramento até a fase da instabilidade plástica de Swift, a rugosidade média R_a da superfície cresce de acordo com a equação proposta por Fukuda et al.,⁽⁹⁾

$$R_a = R_{a0} + k d_0 \bar{\epsilon} \quad (1)$$

onde R_{a0} é a rugosidade média aritmética inicial da superfície, k é a constante do material que depende da combinação das características, d_0 , tamanho médio do grão e da deformação equivalente $\bar{\epsilon}$.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a evolução dos parâmetros de rugosidade e ondulação da rugosidade na deformação de chapas de aço IF nos ensaios de tração simples e deformação plana. Investigar e propor uma equação fenomenológica que correlacione os parâmetros de ondulação da rugosidade W_a, W_t, P_v e P_p com a deformação equivalente $\bar{\epsilon}$. Além disto, derivar uma equação matemática para a evolução da taxa de crescimento da ondulação durante a deformação plástica afim de correlacioná-la com a redução da espessura do material da chapa.

Corpos de prova de tração simples e deformação plana nas direções $0^\circ, 45^\circ$ e 90° da direção de laminação de chapa de aço IF foram ensaiados sob tração. Em cada etapa de deformação incremental, foram medidas as deformações principais e os parâmetros de rugosidade e ondulação. A partir destes dados experimentais, foi possível traçar a curva média da evolução da ondulação versus deformação plástica equivalente. Por meio de um ajuste de uma curva matemática, obteve-se a taxa de crescimento da ondulação durante o processo de deformação plástica. Estas análises serviram de referência para se compreender na prática como ocorrem os processos de estricção local na conformação de chapas de aço IF no processo industrial.

2 MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados ensaios de tração simples e deformação plana nos corpos de prova de chapa de aço livre de interstícios, Interstitial Free – IF, de 0,82 mm de espessura. Os corpos de prova foram obtidos de chapas laminadas nas direções de $0^\circ, 45^\circ$ e 90° em relação a direção de laminação. Os corpos de prova de tração simples tinham a geometria de acordo com a norma japonesa JIS-Z-2241-1998 com largura de 25 mm. Já as amostras para deformação plana foram do tipo IRSID com uma tira de 40 mm de largura e um entalhe lateral de raio 25 mm no meio do corpo de prova. Os ensaios foram realizados com 3 corpos de prova de cada tipo e conduzidos de modo incremental em vários estágios de deformação plástica, intercalada com as medições de rugosidade, ondulações e deformação da malha impressa na superfície do corpo de prova. Adotou-se inicialmente um incremento de

2 mm no alongamento do corpo de prova. Este alongamento foi reduzido para 1 mm após atingir a carga máxima do ensaio e até o surgimento da estricção local.

Após cada realização de cada etapa do ensaio de tração simples, foram realizadas medições em um projetor de perfil com precisão de 1 µm para se obter os valores do aumento do comprimento (L em mm), redução da largura (W em mm) da malha impressa no corpo de prova. As medições da rugosidade e ondulações da superfície do material foram realizadas em três pontos na região central do corpo de prova com um rugosímetro de alta sensibilidade, Talysurf 25 com precisão de 0,01 µm. Foram registrados os seguintes parâmetros de rugosidade: média aritmética Ra (µm), distância máxima pico-vale Rt (µm) e parâmetros da ondulação da rugosidade: média aritmética Wa (µm), altura total pico-vale Wt (µm), altura máxima de pico Pv (µm) e profundidade máxima do vale Pp (µm). Nas tabelas 1 e 2 apresentam-se os tamanhos médios de grãos e composição química da chapa de aço IF.

Tabela 1. Tamanho médio de grão medidos na superfície e ao longo da espessura da chapa de aço IF a 0° e 90° da direção de laminação, DL, e com aumento de 100x (ASTM E112-10)

Amostra	Tamanho de grão na superfície da chapa (d ₀ - µm)	Tamanho de grão ao longo da espessura da chapa (d ₀ - µm)
DL 0°	18	15
DL 90°	19	16

Tabela 2. Composição química da chapa de aço IF

Elemento	C	Mn	P	S	Si	N	O
% peso	0.003	0.192	0.027	0.005	0.011	0.0025	0.005
Elemento	Ni	Cr	Mo	Al	Nb	V	Ti
% peso	0.004	0.002	0.002	0.049	0.001	0.003	0.069

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização de todos os ensaios foram traçados gráficos, considerando os parâmetros de rugosidade e ondulação versus deformação plástica equivalente $\bar{\varepsilon}$. A equação da deformação equivalente $\bar{\varepsilon}$ utilizada foi a equação de Hill 1979, dada por,

$$\bar{\varepsilon} = \frac{[2(1+r_m)]^{\frac{1}{2}}}{2} \left[\frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{(1+2r_m)} + |\varepsilon_1 + \varepsilon_2|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

onde a anisotropia média r_m é dada pela expressão: $r_m = (r_0 + 2 r_{45^\circ} + r_{90^\circ})/4$, sendo $r_0 = 2,09$; $r_{45^\circ} = 1,95$; e $r_{90^\circ} = 2,46$ para o presente aço IF [10]. Isto resulta numa anisotropia média normal de $r_m = 2,112$, que substituindo na equação (2) resulta na seguinte expressão:

$$\bar{\varepsilon} = 1.247 \left[\frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|^2}{5.225} + |\varepsilon_1 + \varepsilon_2|^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Os pontos para traçar as curvas dos gráficos das figuras abaixo foram retirados sempre na mesma região determinada, 3 pontos medidos em cada corpo de prova, onde começaria aparecer a estricção difusa e que mais tarde teve-se o surgimento da estricção local, ponto no qual serviu de referência para concluir o ensaio de

tração simples. As trajetórias da deformação plástica dos ensaios de tração simples e deformação plana são vistos na Figura 1: a trajetória é razoavelmente linear.

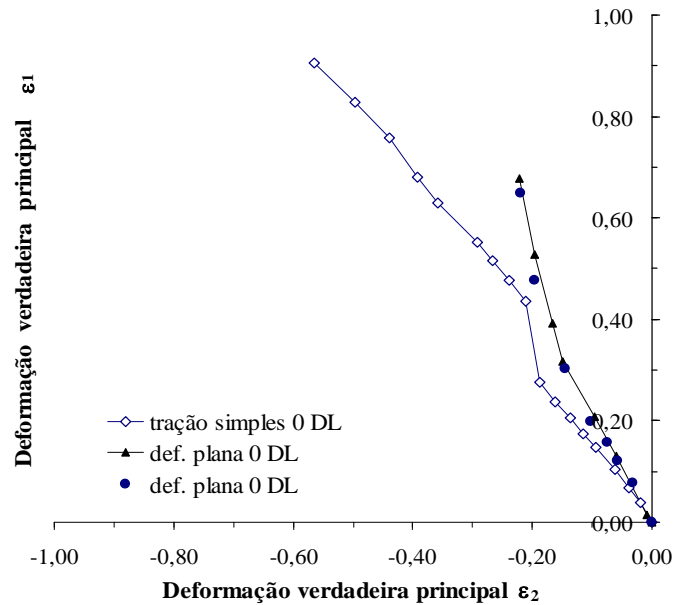


Figura 1. Trajetória incremental nos ensaios de tração simples e deformação plana de corpo de prova à 0° da direção de laminação.

Na Figura 2, apresentam-se os gráficos da evolução dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t na tração simples para corpo de prova de aço IF nas direções 0°, 45° e 90° da direção de laminação. As medidas foram obtidas no local esperado do surgimento da estricção local. Os pontos experimentais estão próximos da reta média, porém nota-se que existem duas linhas retas inclinadas que descrevem a evolução dos parâmetros de rugosidade: a primeira reta é até o ponto de transição cuja deformação equivalente é $\bar{\epsilon} = 0,65$ e uma segunda linha reta com inclinação maior vai até o ponto final da estricção local. A estricção difusa⁽¹⁰⁾ começa no ponto $\bar{\epsilon}_d = 0,22$, bem abaixo do ponto de transição $\bar{\epsilon} = 0,65$ que é considerado o início da estricção local.

A linhas retas médias traçadas no primeiro estágio das Figuras 1a e 1b, sendo possível obter uma equações fenomenológicas que descreve o comportamento da evolução da rugosidade média R_a (μm) e a distancia máxima pico-vale R_t (μm) em função da deformação equivalente $\bar{\epsilon}$, resultaram nas seguintes expressões para o primeiro estágio:

$$R_a = 1,45 + 0,75 \bar{\epsilon} \quad (\mu\text{m}) \quad (4)$$

$$R_t = 10,00 + 5,83 \bar{\epsilon} \quad (\mu\text{m}) \quad (5)$$

A partir destas curvas obtiveram-se as constantes k da equação (1) de Fukuda da evolução da rugosidade média R_a , conforme mostrado na Tabela 3. Esses valores são bem diferentes dos valores vistos na literatura⁽⁸⁾ cujo valor citado de k é 1,0.

No presente trabalho, a constante k foi calculada empregando-se $k = \frac{R_a - R_{a0}}{d_o \cdot \bar{\epsilon}}$,

onde os valores de R_a (1,9 μm) para deformação equivalente $\bar{\epsilon} = 0,65$ e R_{a0} (1,3 μm) foram obtidos da figura 2 e tamanho médio de grão obtidos da Tabela 1.

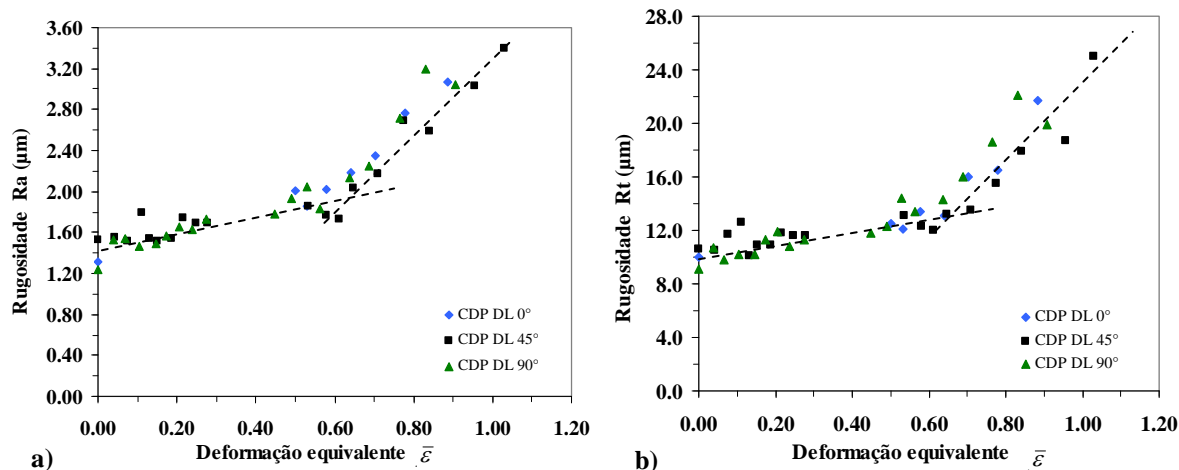


Figura 2. Gráficos de parâmetros de rugosidade versus deformação plástica equivalente $\bar{\epsilon}$, para a tração simples do aço IF a 0°, 45° e 90° da DL: a) rugosidade média Ra e b) distância máxima pico-vale Rt.

Tabela 3. Constante k da chapa de aço IF para a superfície e direções 0° e 90° DL calculados Para o primeiro estágio da deformação, usando a equação de Fukuda ET AL.⁽⁹⁾ $Ra = R_{a0} + k\bar{\epsilon}$

Corpo de prova de aço IF	Constante k do material para a superfície da chapa
DL 0°	0,049
DL 90°	0,047

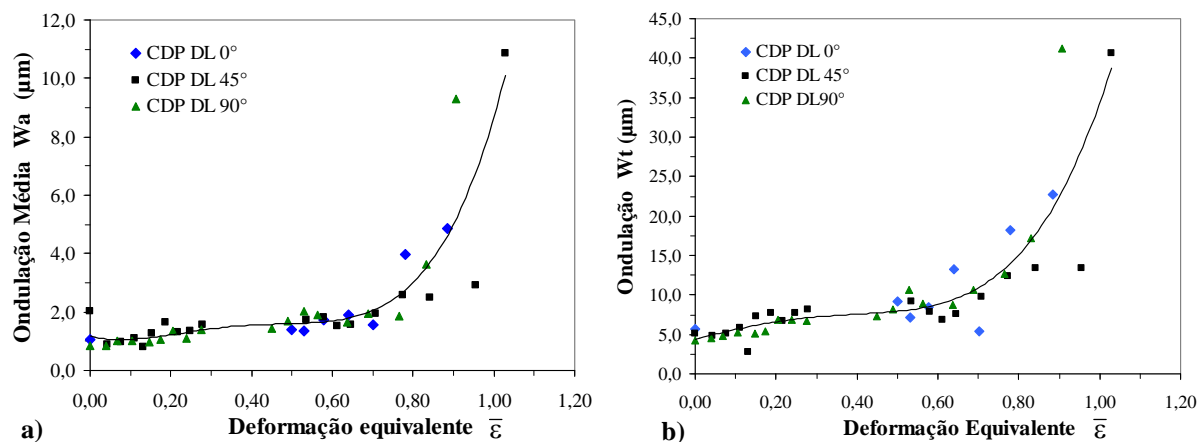


Figura 3. Curvas dos parâmetros de ondulação versus deformação plástica equivalente $\bar{\epsilon}$ para a tração simples de chapas de aço IF a 0°, 45° e 90° da DL: a) ondulação média Wa e b) distancia máxima do pico-vale Wt.

De acordo com a Figuras 3a e 3b, foram traçados as curvas médias entre os pontos obtidos nos ensaios de tração simples e foi possível ajustar uma equação fenomenológica de um polinômio de 4° grau que descrevem o comportamento da evolução dos parâmetros Wa (µm) e Wt (µm) em função da deformação equivalente $\bar{\epsilon}$ e que resultaram nas seguintes expressões:

$$Wa = 47,33 (\bar{\epsilon})^4 - 66,38 (\bar{\epsilon})^3 + 29,99 (\bar{\epsilon})^2 - 3,44(\bar{\epsilon}) + 1,17 \quad (4)$$

$$Wt = 83,57 (\bar{\epsilon})^4 - 68,78(\bar{\epsilon})^3 + 2,624(\bar{\epsilon})^2 + 12,48(\bar{\epsilon}) + 4,40 \quad (5)$$

Para estes parâmetros de ondulação, observa-se que o ponto onde a taxa de crescimento acelera situa-se na deformação equivalente $\bar{\epsilon}$ igual a 0,70. Antes deste ponto a ondulação é razoavelmente estável de $\bar{\epsilon} = 0,22$ a 0,70 com a taxa de crescimento próximo de zero. Portanto, o plato de crescimento zero inicia-se no ponto de estricção difusa $\bar{\epsilon}_d = 0,22$ e continua até $\bar{\epsilon} = 0,70$ que assume-se ser o início da estricção local na tração simples.

Nas Figuras 4a e 4b, foi possível ajustar um polinômio do 3º grau como a curva média entre os pontos experimentais, descrevendo-se o comportamento da evolução dos parâmetros de ondulação do altura máxima de pico P_p (μm) e da profundidade máxima do vale P_v (μm) em função da deformação equivalente, de acordo com,

$$P_p = 24,5(\bar{\epsilon})^3 - 15,5(\bar{\epsilon})^2 + 5,0(\bar{\epsilon}) + 5,0 \quad (6)$$

$$P_v = 67,83(\bar{\epsilon})^3 - 71,25(\bar{\epsilon})^2 + 23,49(\bar{\epsilon}) + 5,94 \quad (7)$$

Na Figura 4b, observa-se também um plato de crescimento zero do parâmetro de ondulação P_v , mostrando que uma estricção local incipiente mantém-se constante nesta faixa de deformação plástica. Nota-se que a taxa de crescimento aumenta exponencialmente a partir da deformação plástica equivalente $\bar{\epsilon}$ igual a 0,70 até o valor de 1,0. Portanto, o surgimento de uma estricção local visível ocorre no ponto de deformação plástica equivalente $\bar{\epsilon}$ igual a 0,70.

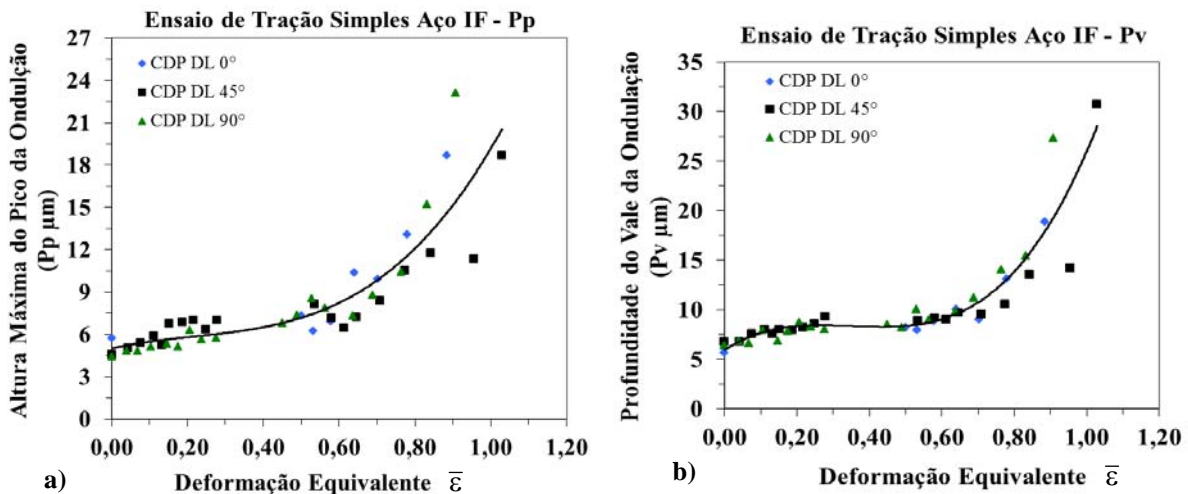


Figura 4. Curvas de parâmetros de ondulação versus deformação plástica equivalente $\bar{\epsilon}$ para o ensaio de tração simples de chapas de aço IF a 0°, 45° e 90° da DL: a) altura máxima de pico P_p (μm) e b) profundidade máxima do vale P_v (μm).

Para os corpos de prova de deformação plana do tipo IRSID mostrados nas Figuras 5a e 5b, a evolução dos parâmetros de ondulação seguiram os mesmos padrões da tração simples. Porém, o plato de crescimento zero dos parâmetros W_a e W_t aconteceram até a deformação equivalente de $\bar{\epsilon} = 0,50$, inferior ao ocorrido na tração simples.

A equação fenomenológica da curva média através dos pontos experimentais para as amostras de deformação plana é representada por um polinômio do 4º grau, relacionando o comportamento dos parâmetros de ondulação W_a (μm) e W_t (μm) em função da deformação plástica equivalente $\bar{\epsilon}$ são descrita por,

$$Wa = 530(\bar{\varepsilon})^4 - 500(\bar{\varepsilon})^3 + 140(\bar{\varepsilon})^2 - 8(\bar{\varepsilon}) + 1 \quad (8)$$

$$Wt = 2070(\bar{\varepsilon})^4 - 2000(\bar{\varepsilon})^3 + 600(\bar{\varepsilon})^2 - 51(\bar{\varepsilon}) + 7.5 \quad (9)$$

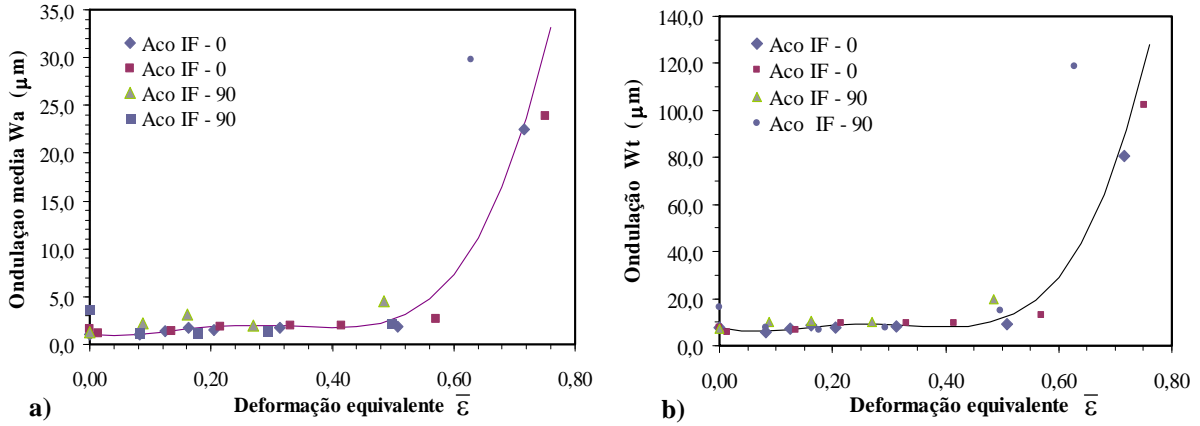


Figura 5. Curvas de parâmetros de ondulação versus deformação plástica equivalente $\bar{\varepsilon}$ para ensaio de deformação plana do tipo IRSID de chapas de aço IF a 0°, 45° e 90° da DL: a) ondulação média Wa e b) distância máxima do pico-vale Wt .

Afim de se investigar a evolução da taxa de crescimento dos parâmetros de ondulação com a deformação plástica equivalente, derivou-se as Eq.(4) e Eq.(5), resultando nas seguintes equações,

$$\frac{\partial Wa}{\partial \bar{\varepsilon}} = 189,3(\bar{\varepsilon})^3 - 199,1(\bar{\varepsilon})^2 + 60(\bar{\varepsilon}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial Wt}{\partial \bar{\varepsilon}} = 334,28(\bar{\varepsilon})^3 - 206,34(\bar{\varepsilon})^2 + 5,25(\bar{\varepsilon}) + 12,48 \quad (11)$$

Estas equações das razões ou taxas de crescimento da ondulação média e da altura máxima pico-vale com a deformação plástica da chapa estão traçadas nas Figuras 6 e 7. O gráfico da Figura 6 mostra três regiões distintas da curva da taxa de crescimento da ondulação média, $\partial Wa/\partial \bar{\varepsilon}$: estágio I de crescimento acelerado da taxa até um ponto de máximo, estágio II de crescimento negativo da taxa até um ponto de mínimo e estágio III de crescimento exponencial da taxa. O ponto de mínimo encontra-se na deformação equivalente igual a $\bar{\varepsilon}_{\min} = 0,50$.

Já a curva da Figura 7 mostra que a taxa de crescimento da altura total pico-vale de ondulação, $\partial Wt/\partial \bar{\varepsilon}$, com a deformação plástica equivalente é decrescente do início da deformação plástica até o ponto de mínimo de $\bar{\varepsilon}_{\min} = 0,40$. Portanto, as curvas das Figuras 6 e 7 mostram que os parâmetros de ondulação Wa e Wt tendem inicialmente a estabilizar com a deformação plástica até um ponto após o surgimento da instabilidade plástica ou estrição difusa. Isto é, qualquer defeito inicial existente na espessura não evolui até atingir a deformação equivalente $\bar{\varepsilon}_{\min} = 0,40$, contrariando o modelo teórico de M-K. No caso do ensaio de deformação plana tipo IRSID, o ponto de mínimo da taxa de Wt e Wa também é para deformação equivalente aproximadamente igual a $\bar{\varepsilon}_{\min} = 0,40$, conforme Figuras 5a e 5b.

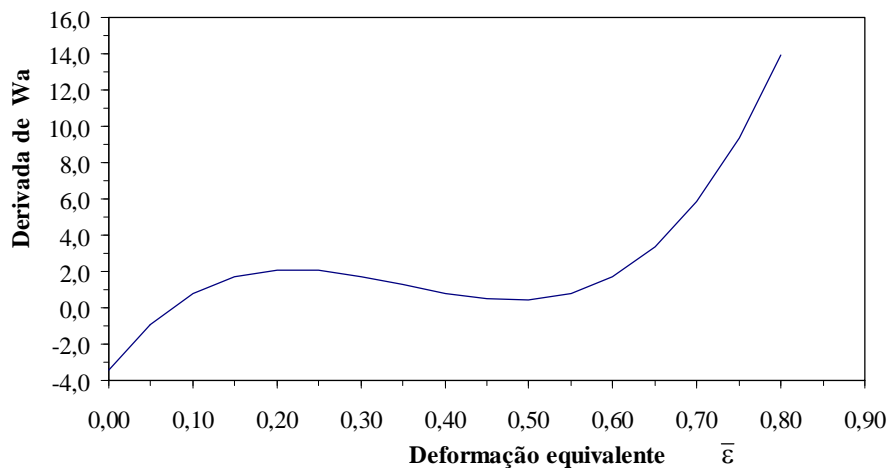


Figura 6. Gráfico da curva da taxa de crescimento do parâmetro de ondulação média, $\partial W_a/\partial \bar{\epsilon}$, em função da deformação equivalente $\bar{\epsilon}$, para corpo de prova de tração simples.

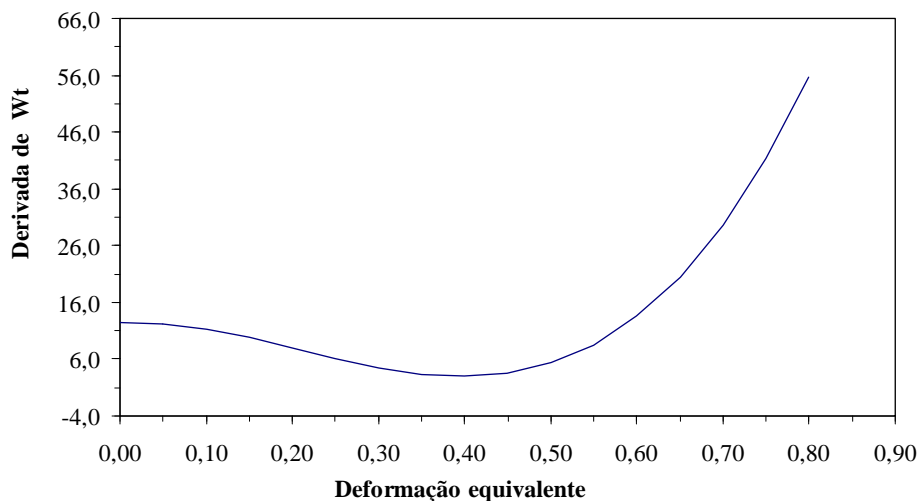


Figura 7. Gráfico da curva da taxa de crescimento do parâmetro altura total pico-vale da ondulação, $\partial W_t/\partial \bar{\epsilon}$, em função da deformação equivalente $\bar{\epsilon}$, para corpo de prova de tração simples.

4 CONCLUSÕES

Da análise dos gráficos de evolução dos parâmetros de ondulação da rugosidade W_a , W_t , P_p e P_v de chapas de aço IF deformadas em tração simples e deformação plana tipo IRSID, as seguintes conclusões podem ser ditas:

- O surgimento da estricção local visível na superfície de chapas metálicas pode ser monitorado por meio de medidas de parâmetros de ondulação da rugosidade como W_a , W_t , P_p e P_v .
- O método de medição dos parâmetros da ondulação é preciso e constitui um método alternativo ao uso comum de correlação de imagem digital para se obter a curva CLC, porém é mais trabalhoso.
- A evolução dos parâmetros W_a , W_t , P_p e P_v com a deformação plástica da chapa pode ser modelada matematicamente por meio de polinômios de quarto e terceiro graus.
- A curva da razão ou taxa de crescimento da ondulação média, $\partial W_a/\partial \bar{\epsilon}$, com a deformação plástica equivalente da chapa apresentou três estágios distintos:

estágio I de crescimento acelerado da taxa até um ponto de máximo, estágio II de crescimento negativo da taxa até um ponto de mínimo e estágio III de crescimento exponencial da taxa até a ruptura.

- A curva da razão ou taxa de crescimento da altura total máxima pico-vale da ondulação, $\partial Wt/\partial \bar{\epsilon}$, com a deformação plástica equivalente da chapa apresentou somente dois estágios distintos: estágio I de crescimento negativo da taxa até um ponto de mínimo e estágio II de crescimento exponencial da taxa até a ruptura.
- As curvas das taxas de crescimento da ondulação mostram que os parâmetros de ondulação da rugosidade W_a e W_t tendem inicialmente a estabilizar com a deformação plástica até um ponto bem após o surgimento da instabilidade plástica ou da estrição difusa $\bar{\epsilon}_d = 0,22$.
- Portanto, qualquer defeito inicial existente na espessura da chapa não evolui até atingir a deformação equivalente $\bar{\epsilon}_{min} = 0,40$, contrariando o modelo teórico de M-K.
- O surgimento da estrição local na tração simples e na deformação plana de amostras de chapa de aço IF é previsto ocorrer na deformação equivalente igual a $\bar{\epsilon}_{el} = 0,40$ que está bem após o início da estrição difusa. A estrição visível foi observada ocorrer para aproximadamente $\bar{\epsilon}_{vis} = 0,60$.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao apoio da empresa Usiminas pelo fornecimento de amostras para os ensaios realizados, da Universidade do Estado de Santa Catarina pela utilização dos laboratórios e do CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 S.P. Keeler, Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. SheetMetal Industries, p. 683-691, 1965.
- 2 J.D. Bressan, Influence of Thickness Size in Sheet Metal Forming. In: 11th ESAFORM Conference on Material Forming, p. 499-502, 2008.
- 3 J.D. Bressan; Luiz M. V. Tigrinho; Ricardo A. dos Santos; Paulo, Previsão Teórica da Curva CLC e Comparação com Resultados Experimentais de Chapas do Aço Dc 06 Obtidos com Ensaios de Nakazima e Marciniak. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Caxias do Sul, 2011.
- 4 Z. Marciniak and K. Kuczynski, Limits Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal. Int. J. Mech. Sci., vol. 9, p. 609-620, 1967.
- 5 G.M. Goodwin, Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop. SAE technical paper n°. 680093, 1968.
- 6 J.D. Bressan and J.A. Williams, Limit Strains in the Sheet Forming of Strain and Strain-Rate Sensitive Materials, J. Mech. Working Tech., Vol. 11, p. 291-317, 1985.
- 7 K. Yamagushi and P.B. Mellor, Thickness and grain size dependence of limit strains in sheet metal stretching, Int. J. Mech. Sci., vol. 18, p. 85-90, 1976.
- 8 A. Parmar; P.B. Mellor and J. Chakrabarty, A new model for the prediction of instability and limit strains in thin sheet metals. Int. J. Mech. Sci., vol. 19, p. 389, 1977.
- 9 M. Fukuda; K. Yamaguchi; N. Takakwa and Y. Sakano. Roughening phenomenon on free surface of products in sheet metal forming J. Japan Soc. Technol. Plasticity, vol. 15, p. 994, 1974.

10 J.D. Bressan and R.K. Unfer, Evolution of Roughness on Straining of Interstitial Free - IF Steel Sheet. In: 15th ESAFORM Conference on Material Forming, Erlangen/Germany, 2012.