

CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO INDEPENDENTE DA TRAJETÓRIA DE DEFORMAÇÃO: DESCRIÇÕES NOS ESPAÇOS DE TENSÕES E DE DEFORMAÇÕES*

Jetson Lemos Ferreira¹
José Osvaldo Amaral Tepedino¹
Marco Antonio Wolff²
Luciano Pessanha Moreira³

Resumo

O presente estudo teve por objetivo verificar a independência tanto da Curva Limite de Tensão (CLT), quanto da Curva Limite de Deformação Plástica Efetiva (CLDPE) em relação à trajetória de deformação. Para tal, foram utilizadas Curvas Limite de Conformação (CLC) de aço livre de intersticiais (*Interstitial Free* - IF), determinadas, primeiramente, por meio de trajetórias lineares e, posteriormente, por trajetórias bi-lineares estabelecidas por níveis de pré-deformação nos modos de tração uniaxial e estiramento biaxial simétrico. As previsões da CLT e da CLDPE, calculadas a partir das deformações limites da CLC convencional em trajetórias lineares e bi-lineares, mostraram-se independentes em relação à trajetória de deformação. Entretanto, verificou-se que o critério de escoamento adotado tem grande influência na forma e posição destas curvas limites.

Palavras-chave: Curva limite de conformação; Curva limite de tensão; Curva limite de deformação plástica efetiva; *Interstitial free*.

STRAIN-PATH INDEPENDENT FORMING LIMIT CURVE: DESCRIPTIONS IN STRESS AND IN STRAIN SPACES

Abstract

The present study aimed to validate the independence of both Forming Limit Stress (FLS) and Effective Plastic-Strain Limit Curve (EPSLC) in relation to the strain-path. For this purpose, Forming Limit Curve (FLC) tests were performed on an Interstitial Free steel (IF), firstly by means of linear strain-paths and, secondly, by bi-linear strain paths under uniaxial tension and equibiaxial stretching modes. The FLS and EPSLC predictions, calculated from strain limits of the conventional FLC in linear and bi-linear paths, showed a strain-path independence. However, it was verified a strong influence yield criterion of the adopted upon the shape and position of these curves.

Keywords: Forming limit curve; Forming limit stress; Effective plastic-strain limit curve; Interstitial free.

¹ Eng. Metalúrgico, M. Sc., MBA, Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Eng. Mecânico, M. Sc., Pesquisador, MBA, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Eng. Mecânico, D. Sc., Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Por décadas, as empresas voltadas para a conformação de chapas de aço têm dedicado grandes esforços no desenvolvimento de metodologias confiáveis para determinar a conformabilidade destes materiais. A técnica considerada mais efetiva para essa previsão é a chamada Curva Limite de Conformação (CLC). Essa curva, descrita no espaço de deformações, estabelece o limite entre as condições de estampagem que podem ser utilizadas sem a falha do componente e as que irão acarretar nas ocorrências de instabilidade plástica e/ou de fratura. Essas são utilizadas durante o ciclo de vida de produtos estampados, ou seja, desde a concepção das ferramentas, passando pela operação de *tryout* e pelo monitoramento do ferramental de estampagem até o seu descarte.

A CLC, que pode ser determinada experimentalmente por diferentes técnicas de ensaios, usualmente sob trajetórias lineares, apresenta limitações para a previsão de ocorrência de falhas na peça quando submetida a trajetórias complexas de deformação. Nesse contexto, desvios da trajetória de deformação podem acarretar em queda ou em aumento da capacidade de estampagem, dependendo da quantidade e do modo de deformação predominantes nos estágios de conformação [1]. Ademais, a adoção da CLC definida em trajetória simples como critério de falha de *softwares* de simulação de estampagem de peças com geometria complexa ou em mais de uma etapa pode acarretar em imprecisões de previsibilidade da ocorrência de fraturas e, com isso, aumentar o tempo de *tryout*. Por outro lado, a representação no espaço de tensões, ou seja, a Curva Limite de Tensão (CLT) tem-se mostrado como independente da trajetória de deformação e, portanto, torna-se útil na previsão de processos de conformação de peças com geometria complexa ou estampadas em mais de uma etapa [2]. Contudo, a avaliação direta das tensões a que cada porção do material está sendo submetida durante estampagem é bastante complexa. Desse modo, a CLT é calculada a partir das deformações, que definem a CLC, por meio de equações constitutivas da teoria clássica de plasticidade.

Outro tipo de representação da CLC, que tem demonstrado ser independente da trajetória de deformação, é o expresso em deformação plástica efetiva (CLDPE). Como esta representação é determinada a partir do conceito de tensão, tem-se que a CLDPE também é insensível a mudanças no modo de deformação. Esta curva pode ser representada em coordenadas polares, com os modos de deformação situados em posições similares aos da CLC convencional. Isso torna sua interpretação bem mais intuitiva em comparação com a CLT [3]. Cabe ressaltar, no entanto, que as razões para a independência destas curvas limites, quanto à trajetória de deformação, ainda não estão bem esclarecidas [2,3].

Visou-se no presente estudo, a avaliação dos modelos para representar as deformações limites da CLC, nos espaços de tensão e de deformação plástica efetiva. Para essa avaliação, foram utilizadas como referência deformações limites experimentais de um aço *Interstitial Free* (IF) determinadas a partir de amostras pré-deformadas por tração uniaxial e por estiramento biaxial simétrico [4].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O aço utilizado para a análise do efeito da alteração da trajetória de deformação no posicionamento da CLC é referente à classe *Interstitial Free*, com 0,65 mm de espessura, que foi avaliado por Ferreira e colaboradores [4]. Esse aço é especificado para aplicações automotivas que demandam elevada conformabilidade.

A faixa de composição química especificada para o aço avaliado é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de composição química especificada para o aço IF avaliado.

Composição química (% em massa)				
C	Mn	P	S	Al
≤0,002	≤0,25	≤0,020	≤0,020	≥0,015

As propriedades mecânicas do aço IF, avaliadas por tração uniaxial a partir de corpos de prova tipo 2 da norma EN 10.002-1, estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço IF avaliado.

Orientação ^I	LE (MPa)	LR (MPa)	Al ^{uniforme} ^{II} (%)	Al ^{total} ^{III} (%)	R _{20%} ^{IV}	n _{10%-eu} ^V
90°	158	289	22,9	44,6	2,76	0,24
45°	160	293	23,1	45,7	2,24	0,24
0°	154	291	23,8	46,4	2,04	0,25

^I Orientação do comprimento do corpo de prova em relação à direção de laminação;

^{II} Alongamento uniforme;

^{III} Alongamento total determinado com base de medida de 80 mm;

^{IV} Coeficiente de anisotropia de Lankford, determinado a 20% de deformação de engenharia;

^V Expoente de encruamento avaliado entre 10% e a deformação do alongamento uniforme.

Ferreira e colaboradores [4] determinaram experimentalmente CLC em trajetórias linear e composta, a partir de corpos de prova confeccionados segundo a metodologia de Nakajima e com avaliação das deformações, conforme a técnica proposta por Hecker (ASTM E2218-2) [5,6]. O efeito do emprego de trajetórias bilineares, a partir de pré-deformações utilizando a técnica de Marciniak por tração uniaxial (0,05 e 0,1) e por estiramento biaxial simétrico (0,048 e 0,09), na CLC do aço IF [4] é mostrado nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Nota-se nos resultados obtidos por Ferreira e colaboradores [4] que:

- A capacidade do material se deformar sob estiramento biaxial aumentou e diminuiu após pré-deformações por tração uniaxial e estiramento biaxial, respectivamente;
- O menor valor da CLC (CLC₀), quando da pré-deformação por tração uniaxial, foi deslocado para a esquerda e para maiores valores em ϵ_1 ;
- O valor CLC₀ após a pré-deformação por estiramento biaxial simétrico sofreu um decréscimo e se deslocou para direita do diagrama.

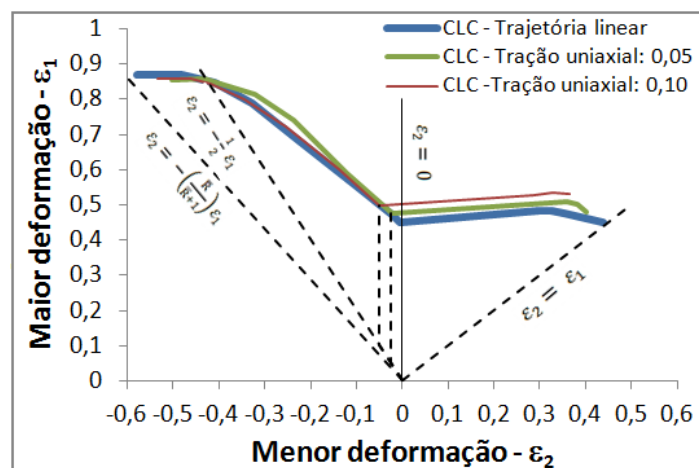


Figura 1. Influência dos valores de pré-deformação por tração uniaxial (0,05 e 0,1) na Curva Limite de Conformação (metodologias de Nakajima e Hecker) de aço IF [4].

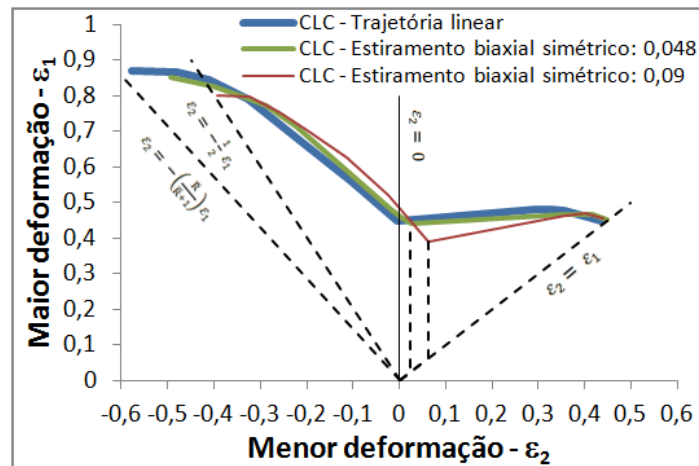


Figura 2. Influência dos valores de pré-deformação por estiramento biaxial simétrico (0,048 e 0,09) na Curva Limite de Conformação (metodologias de Nakajima e Hecker) de aço IF [4].

2.1 Trajetórias lineares e bi-lineares no espaço de tensões

A partir das representações da Curva Limite de Conformação do aço IF determinadas em trajetórias linear e bi-linear [4], foram calculadas as previsões da CLT em função dos critérios de escoamento de von Mises (isotrópico) e Hill 1948 (anisotrópico). O encruamento do aço IF foi avaliado a partir de ensaios de tração uniaxial nas orientações paralela, diagonal (45°) e transversal à direção de laminação da chapa [4]. Foi adotada a hipótese de encruamento isotrópico descrito pelas equações de Hollomon e de Swift, cujos parâmetros (Hollomon: k e n ; Swift: k , ϵ_0 e n) foram ajustados a partir da curva de tração uniaxial na orientação longitudinal à direção de laminação. Na figura 3 estão resumidas as equações necessárias para os cálculos da CLT.

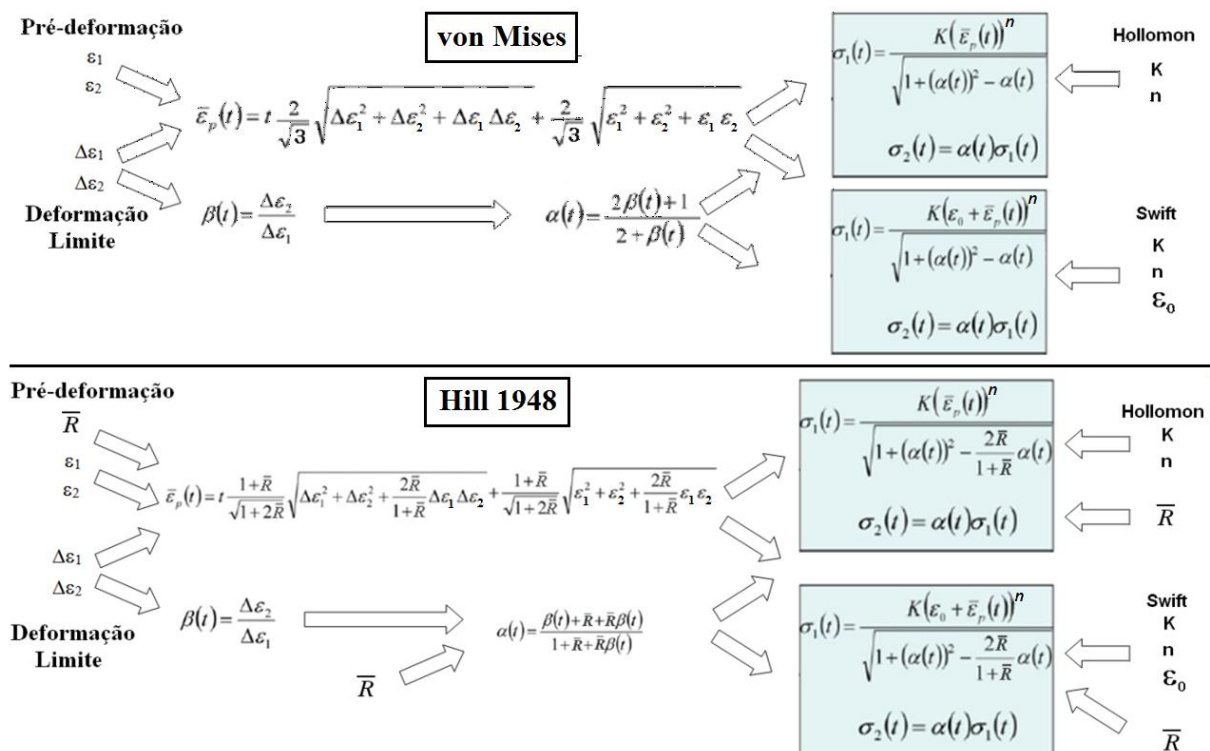


Figura 3. Resumo das equações para a determinação da CLT, a partir dos critérios de von Mises e de Hill 1948. Para maiores detalhes sobre as equações, verificar referência [3].

2.2 Trajetórias lineares e bi-lineares no espaço de deformação plástica efetiva

Da mesma forma do que no caso da CLT, a CLDPE foi determinada em trajetórias linear e bi-lineares, a partir da CLC experimental. Foi adotada a representação em coordenadas polares da CLDPE. Na Figura 4 estão resumidas as equações necessárias aos cálculos da CLDPE.

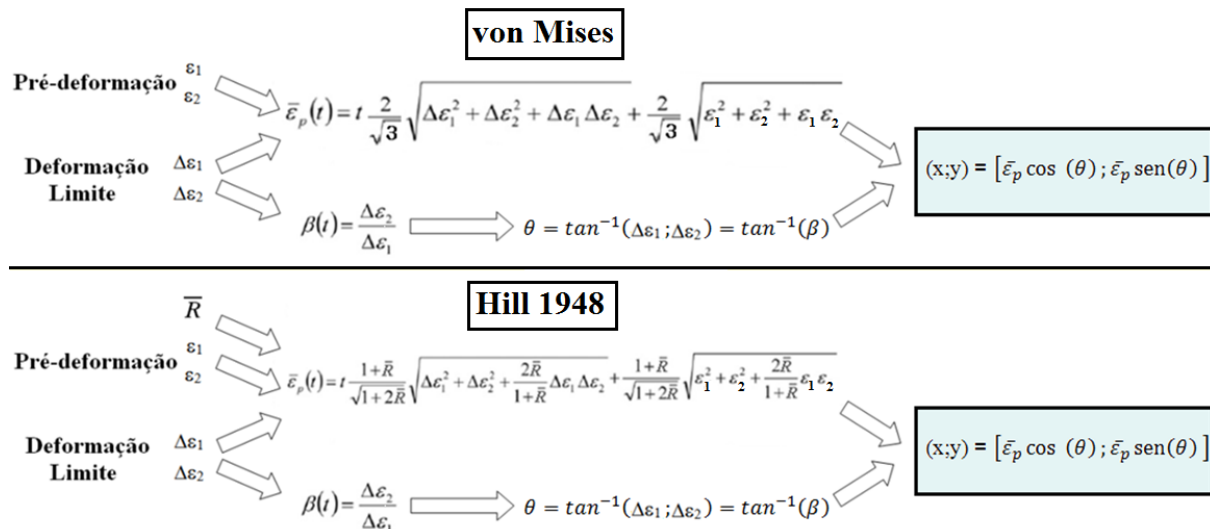


Figura 4. Resumo das equações para a determinação da CLDPE, a partir dos critérios de von Mises e de Hill 1948. Para maiores detalhes sobre as equações, verificar referência [3].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Curva Limite de Tensão (CLT)

Os parâmetros das equações de encruamento de Hollomon e de Swift, obtidos após ajuste polinomial a partir da curva de escoamento do ensaio de tração uniaxial, Figura 5, estão listados na Tabela 3.

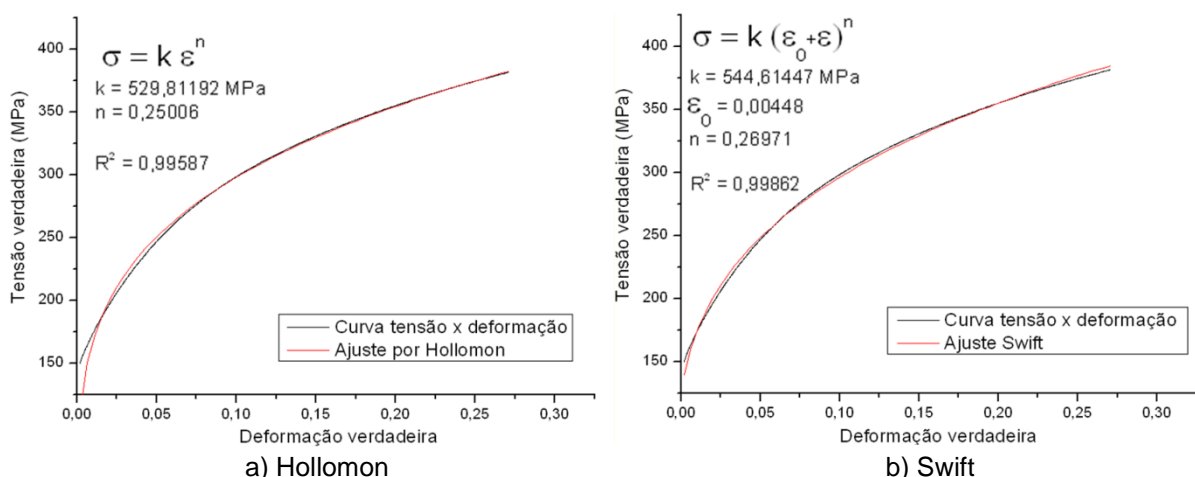
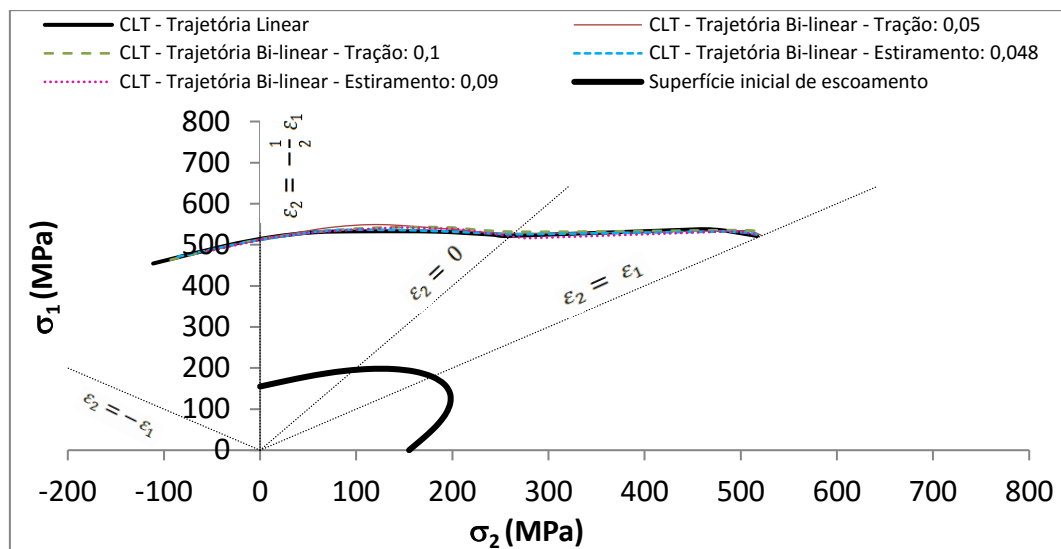


Figura 5. Ajustes da curva tensão x deformação plástica em tração uniaxial na direção de laminação do aço IF, utilizando as equações de encruamento a) de Hollomon e b) de Swift.

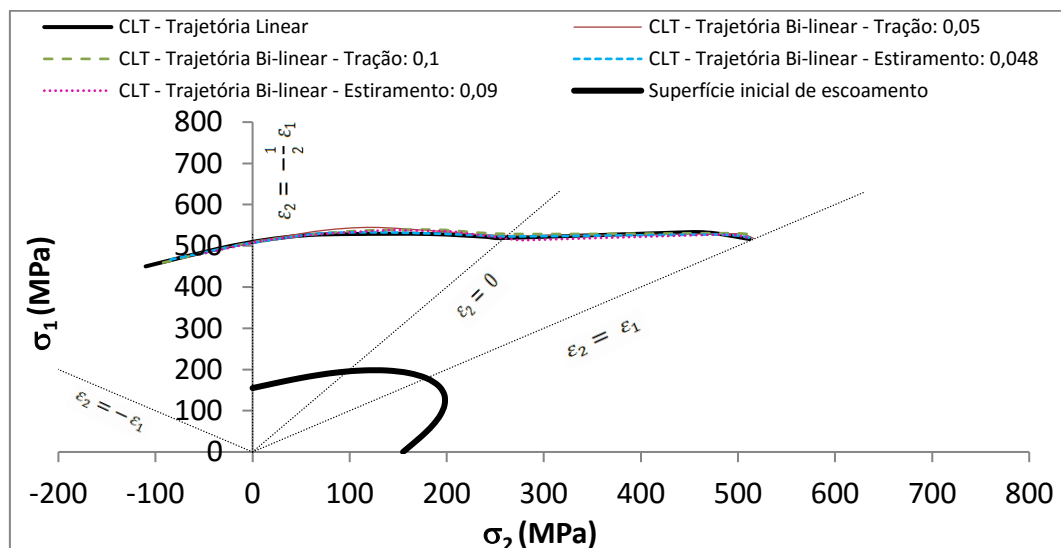
Tabela 3. Parâmetros das equações de Hollomon e de Swift determinados para o aço IF.

Equação de encruamento	Parâmetros e coeficiente de correlação de Pearson (R^2)			
	k	n	ϵ_0	R^2
Hollomon	529,8	0,2501	-	0,99587
Swift	544,6	0,2697	0,00448	0,99862

As previsões da CLT, calculadas com os critérios de escoamento de von Mises e Hill 1948, Figuras 6 e 7, respectivamente, não apresentaram mudanças significativas em função da trajetória de deformação (linear e bi-linear). Esses resultados corroboram com os encontrados em literatura, que demonstram a independência da CLT da trajetória de deformação [2,3].

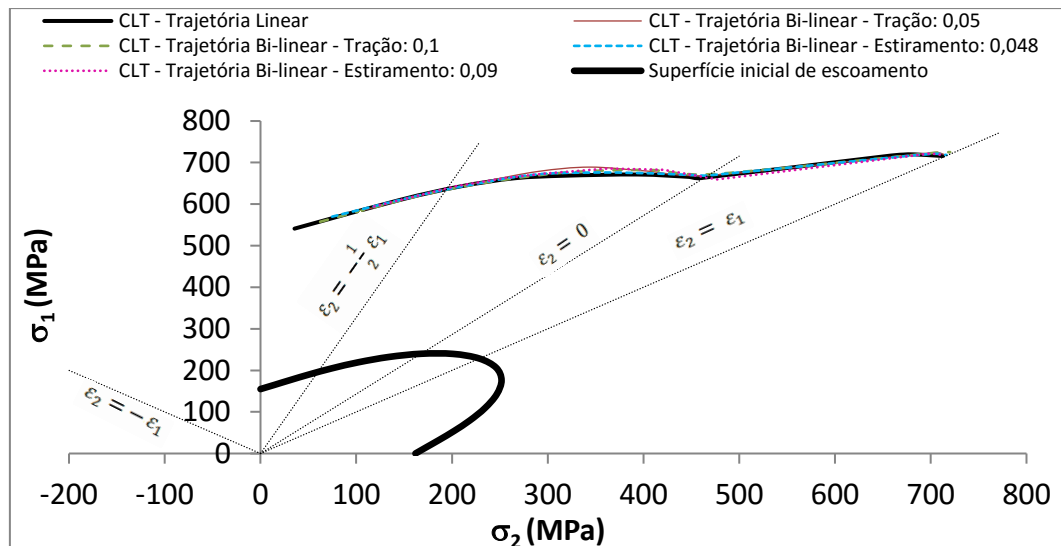


a) CLT - Modelo von Mises - Swift

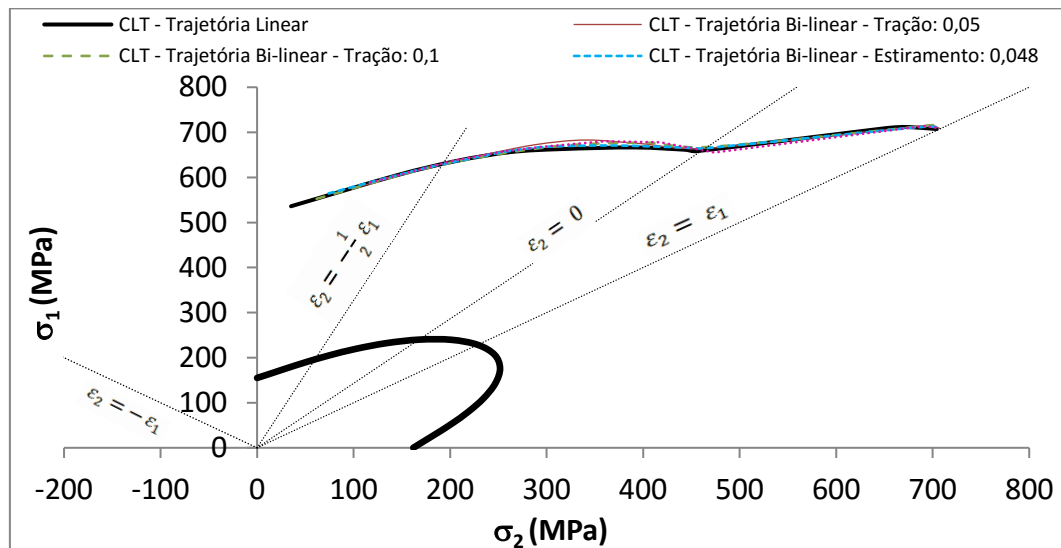


b) CLT - Modelo von Mises-Hollomon

Figura 6. Curvas Limites de Tensão determinadas com o critério de von Mises, a partir da CLC experimental para trajetórias lineares e bi-lineares em função de equações de encruamento a) Swift e b) Hollomon.



a) CLT – Modelo de Hill-Swift



b) CLT - Modelo Hill-Hollomon

Figura 7. Curvas Limites de Tensão determinadas com o critério de Hill 1948, a partir da CLC experimental para trajetórias lineares e bi-lineares em função de equações de encruamento a) Swift e b) Hollomon.

Por outro lado, verifica-se na Figura 8 que o critério de escoamento adotado exerce influência na previsão da CLT. O emprego do critério de escoamento de von Mises tornou a CLT mais conservadora (menores valores da maior tensão principal, σ_1) em relação à determinada por Hill 1948. Nota-se igualmente que, com a adoção do critério de von Mises, foram obtidas tensões no domínio negativo da menor tensão principal, σ_2 . Tais previsões são reflexo da presença na CLC convencional, de regiões mais negativas na menor deformação principal, ϵ_2 do que a trajetória de deformação em estado de tração uniaxial ($\epsilon_2 = -\epsilon_1/2$). Nas curvas obtidas pelo modelo de Hill 1948, não foram obtidos valores negativos em σ_2 devido ao efeito da anisotropia plástica que translada a CLT em direção a maiores valores de tensões principais, tal como observado nas superfícies iniciais de escoamento. As utilizações das equações de encruamento de Swift e de Hollomon não acarretaram em alterações significativas na CLT. Estudos para a avaliação do modelo de plasticidade mais adequado para a determinação da CLT ainda devem ser realizados.

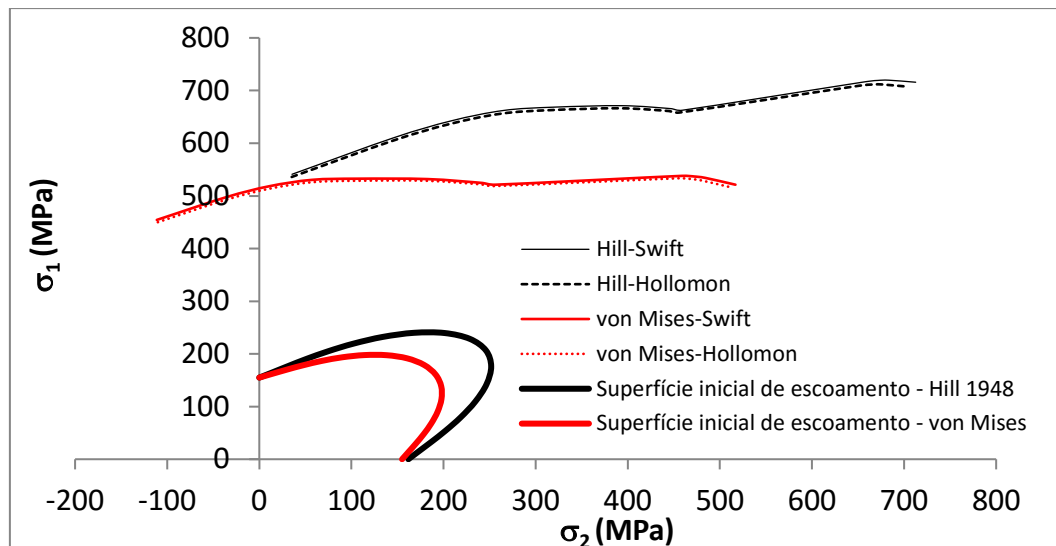


Figura 8. Efeito dos critérios de escoamento e equações de encruamento adotados na previsão da Curva Limites de Tensão, a partir das deformações limites do aço IF determinadas em trajetórias lineares de deformação.

3.2 Curva Limite de Deformação Plástica Efetiva (CLDPE)

As previsões de deformações limites determinadas em trajetórias lineares e compostas, descritas em termos de deformação plástica efetiva, são mostradas nas Figuras 9 e 10, a partir dos critérios de escoamento de von Mises e de Hill 1948, respectivamente. Nota-se que, apesar do ligeiro espalhamento das curvas, atribuído a incertezas experimentais, pode-se observar que ambos os critérios de escoamento foram capazes de gerar a CLDPE insensível à alteração da trajetória de deformação. Como era de se esperar, os modos de deformação da CLDPE situaram-se em locais similares aqueles encontrados na CLC convencional, facilitando a interpretação dos resultados.

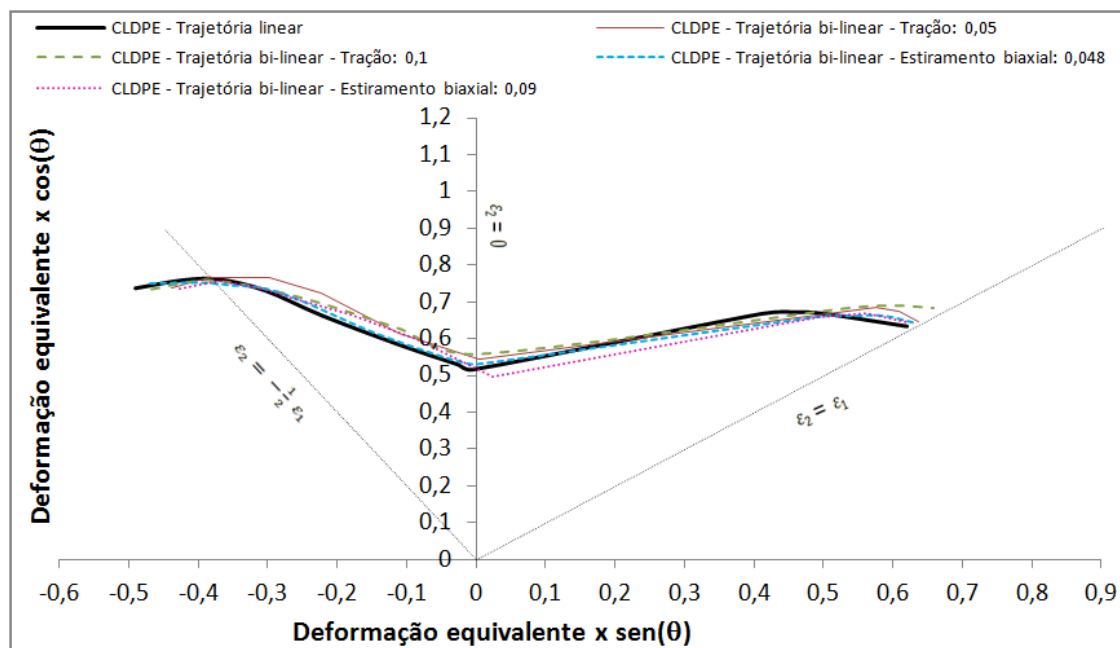


Figura 9. Curvas Limites de Deformação Plástica Efetiva do aço IF calculada pelo critério de von Mises, a partir da CLC convencional determinada em trajetórias lineares e bi-lineares.

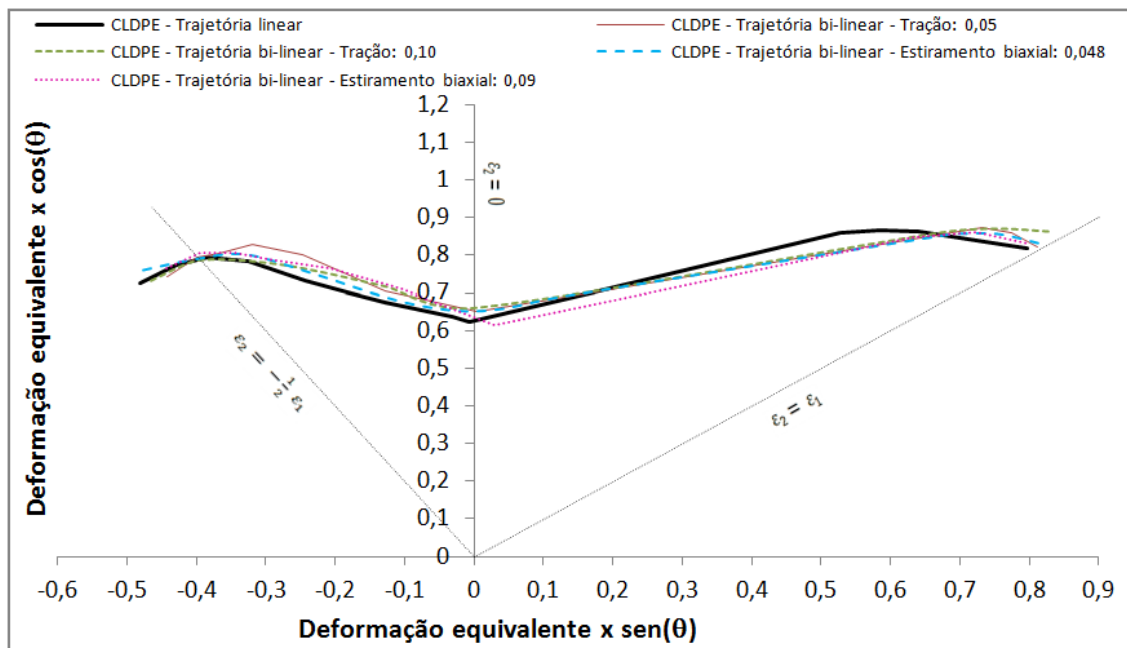


Figura 10. Curvas Limites de Deformação Plástica Efetiva do aço IF calculada pelo critério de Hill 1948, a partir da CLC convencional determinada em trajetórias lineares e bi-lineares.

Verifica-se na Figura 11, que a CLDPE calculada pelo critério de von Mises é mais conservadora (menores valores no eixo vertical). Essa diferença entre as curvas é novamente atribuída ao efeito da anisotropia plástica, considerado nesse caso por meio do coeficiente de anisotropia normal, \bar{R} . Assim como no caso da CLT, verificou-se que o critério de plasticidade tem grande influência no posicionamento da CLDPE. Isto implica que são necessários estudos complementares para a avaliação de qual critério de escoamento mais adequado para o cálculo da CLDPE, sobretudo quando do emprego de maiores níveis de pré-deformação.

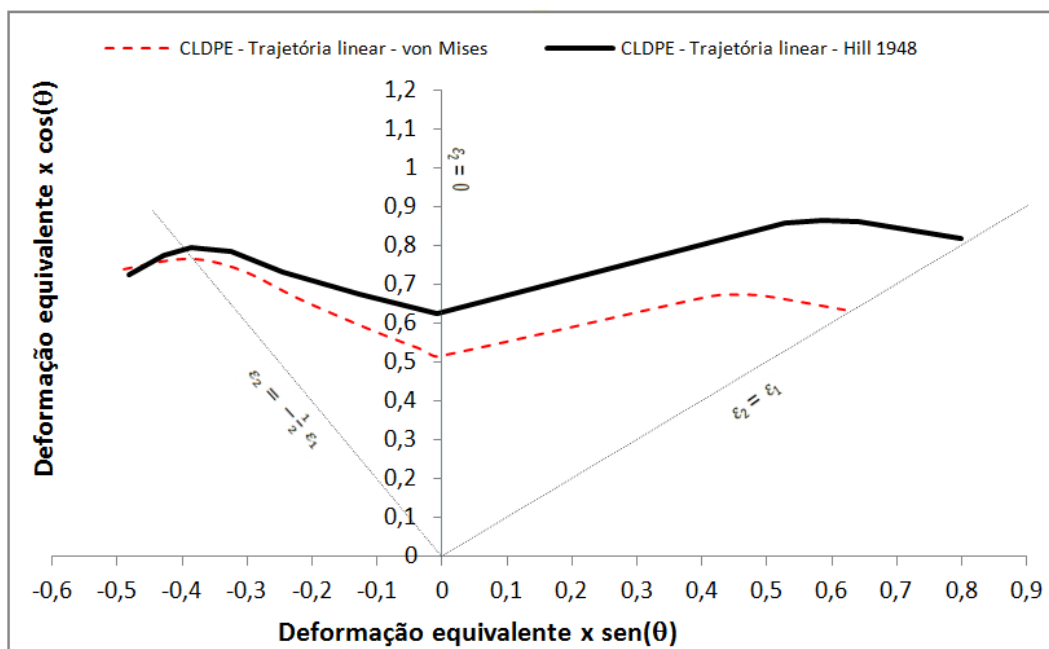


Figura 11. Efeitos dos critérios de escoamento adotados para a previsão da Curva Limite de Deformação Plástica Efetiva do aço IF, a partir da CLC convencional determinada em trajetórias lineares e bi-lineares.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisadas as representações das Curvas Limite de Tensão (CLT) e de Deformação Plástica Efetiva (CLDPE), calculadas por equações constitutivas a partir dos pontos experimentais da Curva Limite de Conformação (CLC) de aço *Interstitial Free* (IF), obtidas em trajetórias lineares e bi-lineares de deformação. Foi verificado que estas representações não foram afetadas pela alteração da trajetória de deformação. Contudo, percebeu-se que o posicionamento e o formato dessas curvas são dependentes do critério de escoamento adotados para descrever o comportamento do aço IF. Em particular, o critério isotrópico de von Mises fornece previsões mais conservadoras tanto para a CLT, quanto para a CLDPE. Em virtude da independência verificada da CLT e da CLDPE, em relação à trajetória de deformação, entende-se que estas são mais adequadas para serem utilizadas como critério de falha de processos de estampagem com trajetórias de deformações compostas. Por sua interpretação bem mais intuitiva, com o mesmo posicionamento dos modos de deformação da CLC convencional, recomenda-se a utilização da CLDPE. Nesse contexto, propõe-se aos desenvolvedores de *softwares* de processos estampagem que disponibilizem, de forma adicional, uma análise que utilize a CLDPE como critério de falha nas simulações numéricas de processo de conformação de chapas.

Agradecimentos

Luciano Pessanha Moreira agradece o apoio do CNPq por meio do programa de Bolsa Produtividade em Pesquisa (PQ2).

REFERÊNCIAS

- 1 Freitas MCS, Moreira LP, Velloso RG. Experimental Analysis and Theoretical Predictions of the Limit Strains of a Hot-dip Galvanized Interstitial-free Steel Sheet, *Materials Research*. 2013; 16(2): 351-366.
- 2 Stoughton TB, Zhu X. Review of Theoretical Models of the Strain-Based FLD and their Relevance to the Stress-Based FLD, *International Journal of Plasticity* 20, pp. 1463–1486, 2004.
- 3 Stoughton TB, Yoon JW. Path Independent Forming Limits in Strain and Stress Spaces, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 49, p. 3616–3625, 2012.
- 4 Ferreira JL, Tepedino JOA, Wolff MA, Moreira LP. Strain-path effects on the formability behavior of Interstitial-Free steel, 18th International Esaform Conference on Material Forming, 2015, Graz, Austria.
- 5 ASTM E2218-02. Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves, American Society for Testing and Materials, may, 2008.
- 6 Tepedino JOA, Ferreira JL. Avaliação de metodologias para determinação de curva limite de conformação (CLC) de aços de alta resistência. SAE International, USA, 2009.