Unisanta Science and Technology, 2025, 1, September
Published Online 2025 Vol.14 Nº1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Curva Limite de Conformação (CLC) e sua Aplicação em Simulações de Estampagem

Flavio Sargon [1], Willy Ank de Morais [1,2]

ENGENHARIA SIGMA [1]
Rua Dr. Baeta Neves, 77 Sala 2 - São Bernardo do Campo-SP, Brasil - CEP: 09751-030

WILLY ANK – SOLUÇÕES PARA O SETOR METAL-MECÂNICO [2]
Rua Onze de Junho, 316 A.102 - São Vicente-SP, Brasil - CEP: 11320-160

UNISANTA[3] – Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Graduação em Engenharia Mecânica
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

E-mail*:* willyank@unisanta.br
Received Augst, 2025

Resumo: A Curva Limite de Conformação (CLC) é uma das principais ferramentas para avaliar a estampabilidade de chapas metálicas. Este artigo revisa seus fundamentos e os métodos experimentais clássicos de obtenção, como os ensaios de Nakazima e de Marciniak, discutindo suas vantagens e limitações. Também é apresentada a aplicação da CLC em softwares de simulação de estampagem, como o AutoForm, destacando sua importância para prever falhas, otimizar parâmetros de processo e reduzir custos de desenvolvimento. Por fim, são discutidas as restrições da CLC tradicional, fortemente dependente do caminho de deformação, e os avanços recentes com a CLC baseada em deformação plástica equivalente (ep-FLC), que amplia a precisão em trajetórias não lineares de conformação.

Palavras-chave: Curva Limite de Conformação, Estampagem, Simulação Numérica, Conformabilidade.

Forming Limit Curve (FLC) and its Application in Stamping Simulations

Abstract: The Forming Limit Curve (FLC) is one of the main tools for assessing sheet metal formability. This article reviews its fundamentals and the classic experimental methods for obtaining it, such as the Nakazima and Marciniak tests, discussing their advantages and limitations. The application of FLC in stamping simulation software, such as AutoForm, is also presented, highlighting its importance for predicting failures, optimizing process parameters, and reducing development costs. Finally, the limitations of traditional FLC, which is highly dependent on the deformation path, are discussed, as well as recent advances in FLC based on equivalent plastic deformation (ep-FLC), which improves accuracy in nonlinear forming paths.

Keywords: Forming Limit Curve, Stamping, Numerical Simulation, Conformability.

1. Introdução

A conformação plástica de chapas metálicas desempenha papel fundamental na indústria automotiva, aeroespacial e de bens de consumo, sendo essencial prever a ocorrência de falhas e garantir a qualidade do produto final.

O desempenho de uma chapa metálica durante processos de estampagem está diretamente relacionado às suas propriedades mecânicas, que determinam a capacidade do material de se deformar plasticamente sem ocorrência de falhas. Algumas dessas propriedades, são o limite de escoamento ($\mathbf{S_{LE}}$), o expoente de encruamento (**n**) e os coeficientes de anisotropia de Lankford médio ($\mathbf{R_m}$) e planar (**ΔR**), que influenciam de maneira decisiva o

Copyright © 2025 ISESC.

comportamento do material frente a diferentes estados de tensão e deformação [1, 2].

1.1. Emprego de Parâmetros Plásticos Obtidos em Ensaios de Tração para Quantificar a Capacidade de Conformação

Os parâmetros plásticos, especialmnente os obtidos em um ensaio de tração, permitem avaliar o desempenho de um metal sob conformação plástica. Porém, ao se utilizar tais parâmetros, deve-se levar em consideração as condições de carregamento, o modo de deformação específicos do ensaio empregado e a representatividade de cada parâmetro como discutido a seguir.

O **limite de escoamento (S_{LE})** representa a tensão necessária para o início da deformação plástica do material. Em estampagem, um limite de escoamento mais baixo tende a favorecer a conformabilidade, pois o material pode se deformar mais facilmente sob menores esforços. Por outro lado, materiais com limite de escoamento elevado, embora apresentem maior resistência, requerem forças mais altas de conformação e podem aumentar o desgaste das ferramentas. Esse equilíbrio entre resistência e conformabilidade deve ser cuidadosamente considerado no projeto do processo [3, 4].

Outro parâmetro relevante é o **expoente de encruamento (n)**, associado à lei de Hollomon:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

O valor de *n* indica a capacidade do material em distribuir uniformemente a deformação plástica: quanto maior o expoente, maior a resistência ao estriccionamento localizado, o que contribui para uma melhor estampabilidade. Materiais com baixo valor de *n* são mais suscetíveis à formação de estricções prematuras, reduzindo sua aplicabilidade em geometrias complexas [5, 6].

O **coeficiente de anisotropia de Lankford (R)**, obtido em ensaios de tração uniaxial em diferentes direções da chapa (0, 45 e 90°). Em cada ensaio é medida a relação entre deformação na largura e na espessura do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 1 e definida pela equação [4]:

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2)$$

Destes resultados é calculada a anisotropia média ou normal ($\mathbf{R_m}$), que indica a tendência do material em resistir ao afinamento durante a conformação profunda, sendo valores mais elevados desejáveis para minimizar o risco de ruptura por afinamento excessivo:

$$\overline{R} = \frac{R_{0°}+2R_{45°}+R_{90°}}{4} \quad (3)$$

Já a anisotropia planar (**ΔR**) avalia as variações de deformação entre diferentes direções do plano da chapa, e valores elevados estão associados ao surgimento de orelhas (earing) na estampagem profunda, um defeito característico que impacta o acabamento e o aproveitamento do material [1, 7].

$$\Delta R = \frac{R_{0°}-2R_{45°}+R_{90°}}{2} \quad (4)$$

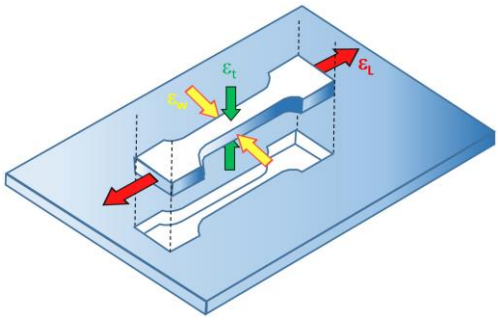


Figura 1. Formas de deformação em um corpo de prova de tração empregado para obter o índice de anisotropia de Lankford (R) [4].

A **relação elástica** (**RE**) ou ***yield ratio*** **(*YR*)** é definida como a razão entre o limite de escoamento ($\mathbf{S_{LE}}$) e o limite de resistência ($\mathbf{S_{LR}}$) de um material metálico. Em algumas áreas, como na engenharia civil, pode-se encontrar a definição inversa desse parâmetro. No entanto, no contexto da conformação plástica de metais, a convenção adotada é descrita pela razão:

$$RE = \frac{S_{LE}}{S_{LR}} \quad (5)$$

Essa relação é um parâmetro muito usado para caracterizar a capacidade de deformação plástica útil de chapas metálicas em processos de conformação, incluindo a estampagem profunda:

1. Relação elástica afastada da unidade: Indica que há uma diferença significativa entre o limite de escoamento e de resistência. Nesse caso, após o início da deformação plástica ($\mathbf{S_{LE}}$), o material ainda suporta um aumento considerável de tensão até atingir a ruptura ($\mathbf{S_{LR}}$). Essa diferença é chamada de **reserva de encruamento** (*work*

Copyright © 2025 ISESC

hardening capacity), que favorece uma maior distribuição de deformações sem ocorrência imediata de estricção. Nesta condição, chapas tendem a apresentar **maior conformabilidade** e resistência a defeitos como rasgamentos e estricção localizada [3, 6].

2. Relação elástica próxima à unidade: Indica que o limite de escoamento está próximo ao limite de resistência, o que significa que o material possui **pequena margem de deformação plástica uniforme** antes da ocorrência de estricção. Em estampagem, isso se traduz em uma menor capacidade de conformação e maior risco de falha prematura. Esse comportamento é comum em aços de alta resistência e ligas endurecidas, que exigem maiores forças de conformação e apresentam menor ductilidade [1], conforme ilustrado na Figura 2.

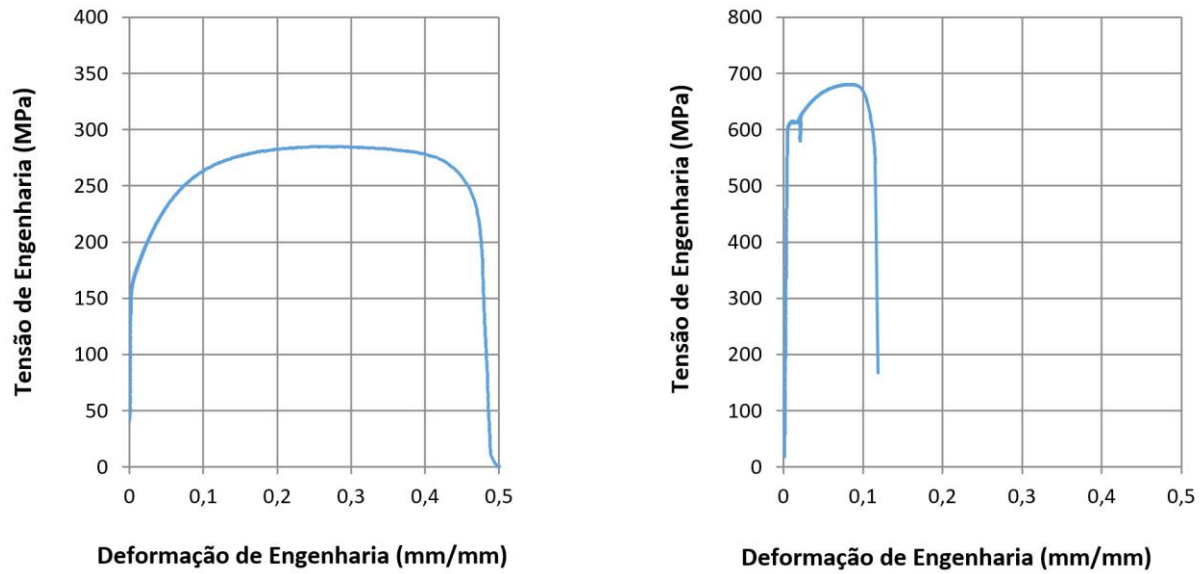
O valor da relação elástica pode ser usado como um **indicador indireto da estampabilidade**. Quanto **menor o RE**, maior a ductilidade disponível para o processo, favorecendo operações de alongamento e embutimento profundo. Por isso, ligas e aços destinados à estampagem automotiva — como os aços intersticiais livres (IF steels) — são produzidos com **baixo limite de escoamento e baixa RE**, o que garante maior uniformidade de deformações e reduz a incidência de falhas [2, 3].

De modo prático, a relação elástica se correlaciona diretamente com o **comprimento da região de encruamento uniforme** da curva tensão–deformação. Valores baixos de **RE** indicam que a chapa pode acumular mais deformação antes da estricção, enquanto valores altos restringem severamente essa margem, tornando a estampagem mais crítica.

O desempenho de chapas metálicas em processos de estampagem depende diretamente da capacidade do material de distribuir deformações de forma homogênea antes do início da estricção localizada. Nesse contexto, o **alongamento uniforme máximo** (**%Along$_{unuif}$**) obtido em ensaios de tração é considerado um parâmetro mais confiável do que o alongamento total. O alongamento uniforme corresponde ao limite até o qual o material consegue se deformar de maneira homogênea ($\boldsymbol{\varepsilon_u}$) em todo o corpo de prova, ou seja, até o ponto de tensão máxima na curva tensão–deformação, conhecido como **limite de Considère** [2, 3].

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \tag{6}$$

A Equação (6) estabelece que a estricção inicia-se quando a tensão verdadeira atinge o valor da inclinação da curva tensão versus deformação real ($\sigma \times \varepsilon$). Aplicando esta condição para um material que segue a relação de Hollomon, Equação (1), obtém-se a Equação:



(a) S_{LE} = 150 MPa; S_{LR} = 284,9 MPa; RE = 0,526; K = 517,9 MPa; n = 0,249; R_m = 1,84; ΔR = 0,68

(b) S_{LE} = 603 MPa; S_{LR} = 680,9 MPa; RE = 0,886; K = 938,2 MPa; n = 0,095; R_m = 0,61; ΔR = 0,23

Figura 2. Curvas tensão versus deformação e parâmetros plástico de uma amostra de aço: (a) EN 10130 DC04/ B53 3312 E275 D e (b) NBR 6650 LNE 500/ JFS A 3011 JAC 590R [8]

Copyright © 2025 ISESC

$\varepsilon_u = n$ (7)

Em contrapartida, o **alongamento total** (**%Along**) inclui não apenas a parcela de deformação uniforme, mas também a deformação localizada associada à estricção. Essa porção depende fortemente da **geometria do corpo de prova** (área útil e comprimento da seção calibrada) e da evolução da estricção até a ruptura. Como consequência, dois corpos de prova do mesmo material, mas com diferentes dimensões, podem apresentar valores distintos de alongamento total, mascarando a capacidade plástica real do material testado [4, 6].

Do ponto de vista da estampagem, a porção do alongamento após o início da estricção não é tecnicamente aproveitável, pois a **estricção localizada representa a iminência de falha**. Portanto, o parâmetro que realmente interessa é o quanto o material consegue se deformar de forma estável e uniforme antes da instabilidade. Assim, o alongamento uniforme máximo é diretamente associado à **resistência do material à estricção localizada**, sendo mais representativo da estampabilidade em comparação ao alongamento total [1].

A Figura 2 apresenta dois gráficos obtidos a partir de ensaios de tração com uso de extensometria nos corpos de prova. Neste caso estão ilustrados os resultados de uma uma amostra de aço aço EN 10130 DC04 (Fig. 2.a) e NBR 6650 LNE 500 (Fig. 2.b). Nota-se uma diferença significativa nestes dois material pelo que pode ser apreciado pelos valores dos parâmetros plásticos descritos e das respectivas curvas de tração apresentadas.

Assim, o alongamento uniforme máximo (**$\%Along_{unuif}$**) é um parâmetro relevante para a seleção de materiais e o projeto de processos de conformação. Associado a variáveis como o expoente de encruamento (**n**), a relação elástica (**RE**) e os coeficientes de anisotropia (**R_m** e **ΔR**), ele fornece uma visão mais realista da capacidade de deformação plástica útil da chapa metálica, aumentando a confiabilidade das previsões de desempenho em processos industriais de estampagem profunda.

1.2. Limitações dos Parâmetros Plásticos Oriundos dos Ensaios de Tração

Os parâmetros clássicos de tração são úteis como indicadores preliminares, mas insuficientes para caracterizar completamente a estampabilidade de uma chapa [5, 9-11], conforme os cincos pontos apresentado a seguir.

1ª) **Caráter uniaxial dos ensaios de tração**

A maior parte desses parâmetros é obtida em ensaios de tração uniaxial, enquanto os processos de estampagem envolvem **estados multiaxiais de tensão e deformação** (tração biaxial, cisalhamento, compressão local). Assim, valores de plasticidade como o limite de escoamento (S_{LE}) e o alongamento uniforme máximo ($\%Along_{unuif}$) só representam de maneira aproximada o desempenho real de uma chapa metálica em conformações complexas [3].

2ª) **Dependência geométrica e metodológica**

Como já explicado, parâmetros como o **alongamento total** (**%Along**) podem variar conforme as dimensões do corpo de prova e as condições de ensaio, reduzindo a comparabilidade entre materiais e dificultando sua aplicação direta no projeto de estampagem [1].

3ª) **Ausência de interação entre parâmetros**

O desempenho em estampagem resulta da interação entre várias propriedades. Por exemplo, um baixo limite de escoamento pode favorecer a conformabilidade, mas se acompanhado de baixo expoente de encruamento (**n**) e alta relação elástica (**RE**), o material ainda terá tendência à estricção localizada. A análise isolada de cada parâmetro pode levar a conclusões equivocadas [6].

4ª) **Não consideram anisotropias complexas**

Embora o coeficiente de Lankford (**R_m**, **ΔR**) forneça informações relevantes sobre a anisotropia, ele simplifica o comportamento direcional. Nos aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels*, *AHSS*), a resposta anisotrópica pode ser **não-linear e dependente do estado de tensão**, exigindo critérios mais avançados, como modelos constitutivos anisotrópicos [7, 10]

5ª) **Desconexão com a prática industrial**

A principal crítica é que esses parâmetros, isoladamente, **não predizem com segurança os limites reais de conformação** em processos industriais. Por isso, a engenharia de estampagem moderna adota ferramentas integradoras, como a **Curva Limite de Conformação (**CLC**)**, que relaciona deformações principais em condições biaxiais e se aproxima mais das situações reais de processo [5].

Nesse contexto, a Curva Limite de Conformação (CLC), exemplificada na Figura 3, é amplamente reconhecida como critério de falha em processos de estampagem [5, 9-14]. Sua integração a ferramentas computacionais, como o AutoForm, ampliou significativamente a capacidade de avaliar o processo antes mesmo da fabricação de ferramentas físicas [12, 13].

Copyright © 2025 ISESC

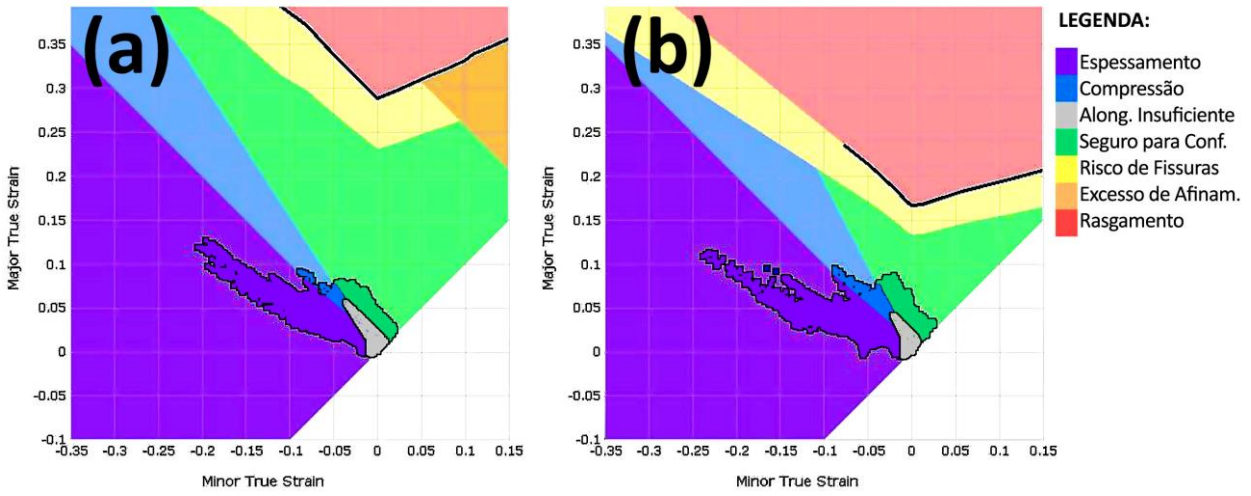


Figura 3. Curvas Limite de Conformação para os aços: (a) EN 10130 DC04 e (b) NBR 6650 LNE 380 como empregadas no software *AutoForm* [13].

Assim sendo, este artigo objetiva analisar a Curva Limite de Conformação (CLC) como ferramenta para a caracterização da estampabilidade de chapas metálicas, apresentando seus fundamentos, métodos experimentais de determinação e aplicação prática. Busca-se ainda discutir sua incorporação em *softwares* de simulação de estampagem, como o *AutoForm*, destacando vantagens, limitações e avanços recentes.

2. A Curva Limite de Conformação

A Curva Limite de Conformação (CLC), ou *Forming Limit Curve* (*FLC*), teve sua origem na indústria automobilística, entre as décadas de 1950 e 1960, de prever falhas de estampagem em chapas metálicas sem depender exclusivamente de métodos empíricos ou de tentativa e erro em ferramentais de alto custo.

Seu surgimento resultou da constatação de que os parâmetros plásticos obtidos em ensaios de tração — conforme discutido no item 1.2 — eram insuficientes para representar a capacidade real de conformação de chapas sob estados de deformação biaxial [2, 6]. O seu histórico de desenvolvimento pode ser descrito em quatro etapas:

1ª Fase) **Década de 1960 – Experimentos iniciais**: Os primeiros trabalhos sistemáticos foram conduzidos por Keeler e Backofen, em 1963 [5], que estudaram o comportamento de chapas de aço esticadas sobre punções hemisféricos. Eles observaram que existia um limite bem definido de deformações principais além do qual ocorria estricção localizada, e que esse limite variava com a razão entre as deformações principais. Esse foi o primeiro passo na definição do conceito da CLC.

2ª Fase) **Métodos experimentais – Nakazima e Marciniak**: para determinar de forma mais controlada os limites de conformação, surgiram dois métodos ainda hoje consagrados:

- **Marciniak e Kuczynski, em 1967 [9]**: propuseram um método alternativo em que a estricção é induzida artificialmente por uma inserção (defeito geométrico) no corpo de prova, gerando falha localizada sob diferentes estados de deformação biaxial.
- **Nakazima et al., em 1968 [11]**: deformaram chapas usando punções hemisféricos e corpos de prova com larguras diferentes, obtendo curvas de limite a partir de estricções localizadas.

3ª Fase) **Formulação teórica:** Na mesma época (1952; 1963), Hill [7] desenvolveu modelos teóricos de plasticidade anisotrópica e critérios de instabilidade plástica. O critério de Considère de 1885, originalmente formulado para tração uniaxial [4], foi expandido para estados biaxiais de deformação, servindo de base teórica para a interpretação da CLC.

4ª Fase) **Consolidação (décadas de 1970–1980):** Nos anos seguintes, diversos estudos confirmaram que a CLC era uma ferramenta robusta de predição de falhas em estampagem, especialmente na indústria automotiva, sendo incorporada em normas e posteriormente em softwares de simulação [1, 6].

Assim sendo, historicamente, a CLC foi fundamentada na observação experimental de que existe um limite de deformações principais para o aparecimento da estricção localizada em chapas metálicas. Hoje, a CLC é uma das

Copyright © 2025 ISESC

ferramentas mais aceitas para avaliação da estampabilidade de chapas metálicas.

2.1. Geração Experimental da CLC

A CLC foi introduzida por Keeler [14] (lado relativo ao estado de embutimento) e por Goodwin [15] (lado relativo ao estado de estiramento) de forma a possibilitar a avaliação conjunta da conformabilidade de chapas, tanto em condições de estiramento biaxial quanto em operações de embutimento. O **estiramento**, **estampagem profunda**, **dobramento** e **corte** são processos fundamentais da conformação de chapas. Cada um desses modos de carregamento imprime características distintas ao material, influenciando a distribuição de deformações e a espessura final da chapa.

Enquanto o estiramento promove redução significativa da espessura, a estampagem profunda preserva ou até aumenta a espessura local, devido à ação combinada de compressão e tração. Já no dobramento, a distribuição de esforços de tração e compressão em torno da linha neutra leva a uma diminuição localizada da espessura, enquanto o corte envolve tensões cisalhantes até a ruptura.

A construção da CLC envolve a determinação experimental dos pares de deformações principais (ε_1 e ε_2 ou ε_3) em diferentes estados de carregamento associado aos modos de deformação comentados anteriormente. Normas técnicas, como a ASTM E2218 [16], estabelecem procedimentos para a medição dessas deformações e o levantamento do diagrama. Na prática, a CLC é traçada a partir do ponto em que a deformação crítica se manifesta visualmente como estricção localizada, fornecendo limites que permitem diferenciar regiões seguras de conformação daquelas que levam à falha.

Para a determinação da CLC, corpos de prova padronizados são utilizados. O ensaio classicamente empregado para esta finalidade é o de **Nakazima** [11], no qual amostras retangulares, com mesmo comprimento e diferentes larguras, como as ilustrados na Figura 4 [17], são conformadas por um **punção hemisférico** até a ocorrência da estricção localizada ou rasgamento. Essa variação geométrica induz diferentes estados de deformação, desde o estiramento biaxial puro até condições próximas de estampagem profunda.

Outra variação deste método é pelo **ensaio de Marciniak** [9], que utiliza um **punção plano** em contato com a chapa e, para induzir a localização da deformação, introduz-se uma inserção ou defeito geométrico (geralmente um entalhe ou lâmina) na região central do corpo de prova. Essa configuração promove uma estricção localizada controlada, permitindo mapear deformações até estados próximos da tração biaxial. A Figura 5 ilustra uma típica configuração destes corpos de prova após o ensaio para obtenção das condições de deformação para gerar a CLC.

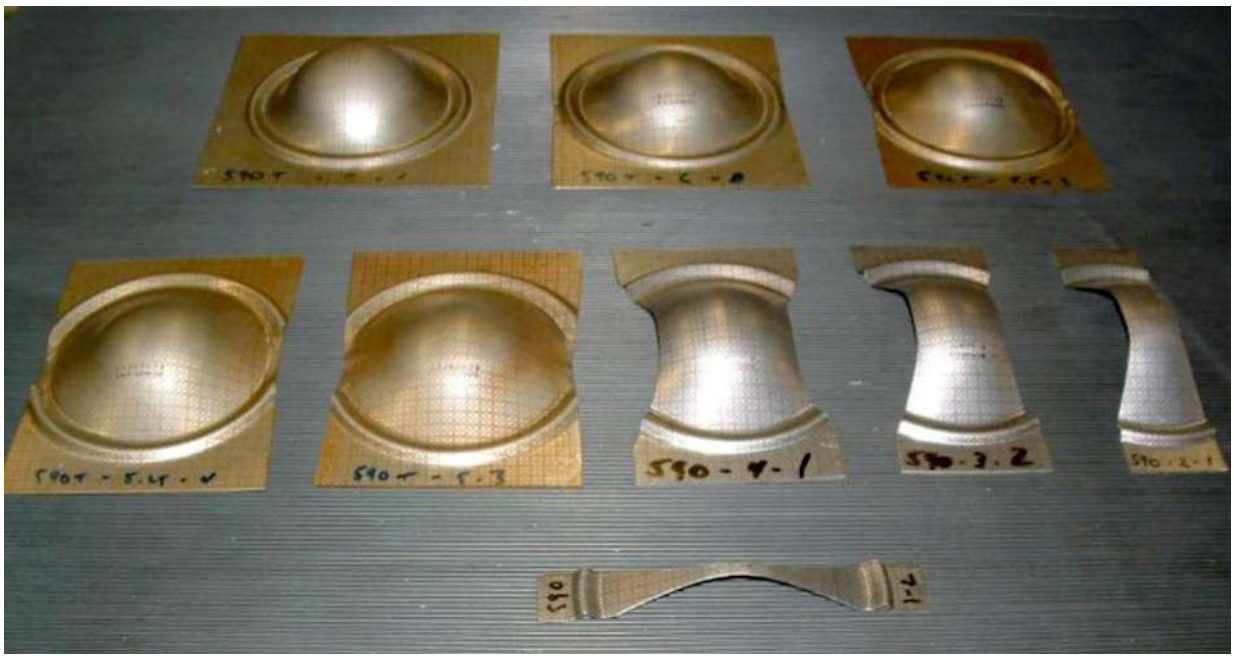


Figura 4. Exemplo de um conjunto de amostras marcadas superficialmente e formadas por um punção hemisférico para obtenção da CLC [17].

Copyright © 2025 ISESC



Figura 5. Exemplo de um conjunto de amostras marcadas superficialmente e formadas por um punção plano para obtenção da CLC [20].

A medição das deformações é realizada a partir de redes de formas (círculos ou quadrados) gravados na superfície dos corpos de prova, preferencialmente de forma eletrolítica, que após a deformação se convertem em elipses ou retângulos, possibilitando a medição de suas dimensões e cálculo das deformações ε_1 e ε_2 ou ε_3 conforme ilustrado na Figura 6.

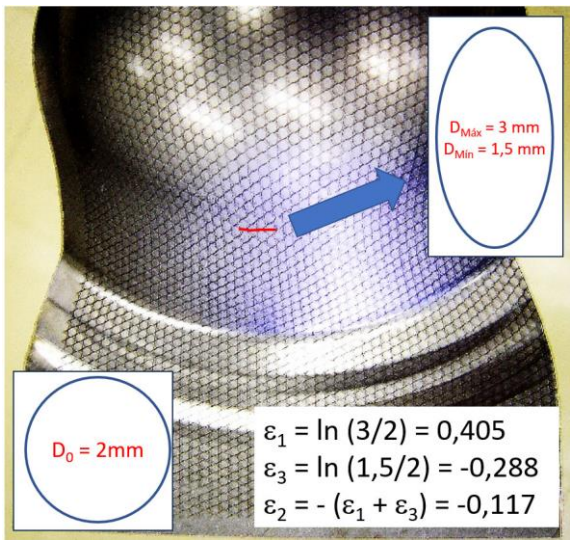


Figura 6. Exemplo da medição dimensional em um dos corpos de prova para determinação da CLC.

Ambos os métodos forneceram curvas limite de conformação (CLCs) com a mesma tendência no domínio da estricção, confirmando a consistência dos resultados. No entanto, os ensaios com punção hemisférico (Fig. 4) apresentaram valores ligeiramente mais elevados de deformação limite, principalmente nas condições próximas ao estiramento biaxial [9, 11], assim como maior tendência de induzir transformação por deformação, conforme ilustrado na Figura 7 [20].

Empregando o punção hemisférico adotado por Nakazima [11], observaram-se variações na posição e orientação da fratura, especialmente em corpos de prova mais largos, atribuídas às condições de atrito e lubrificação sob altas pressões de contato. Além disso, um punção hemisférico introduz efeitos adicionais de flexão, que aumentam os níveis de deformação plástica efetiva, resultando em maiores valores da deformação principal maior (ε_1).

Já nos ensaios com punção plano, as fraturas ocorreram de forma centralizada e bem definida, devido ao uso de máscaras que induzem a estricção na região de interesse. No método de Marciniak [9], a diferença entre as deformações na estricção e na fratura tende a ser mais acentuada devido ao estado plano de tensões empregado, que é praticamente isento de flexão, o que gera gradientes de deformação mais homogêneos e amplia a distinção entre os limites de estricção e de ruptura.

Copyright © 2025 ISESC

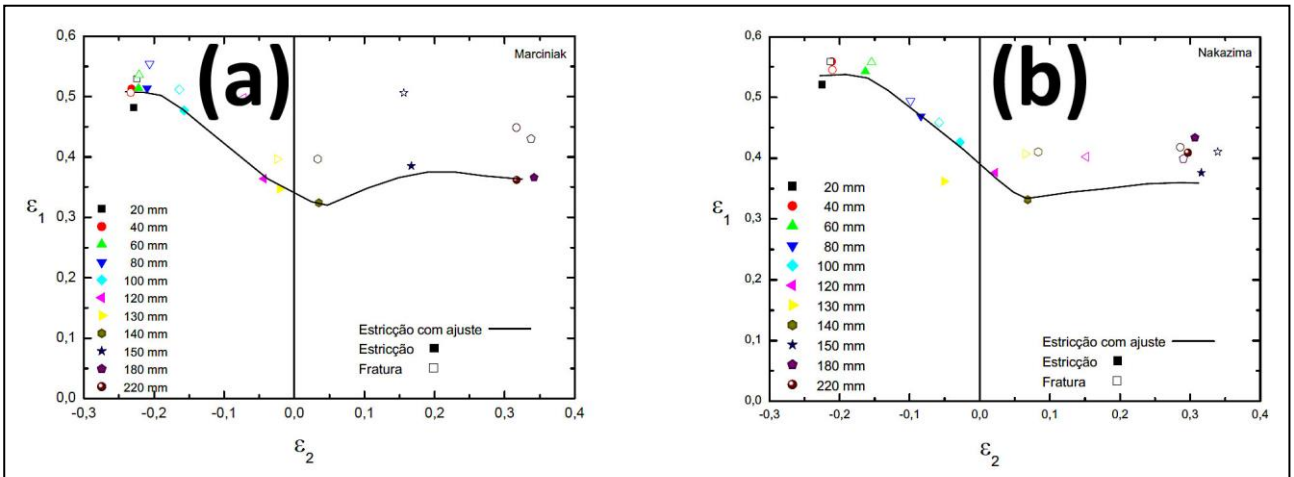


Figura 7. CLCs de uma chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304L como obtida pelo emprego de corpos de prova conformados por um: (a) punção cilíndrico plano (Fig. 5) e (b) punção hemisférico (Fig. 4) [20].

Estas condições explicam o porquê da obtenção de limites mais elevados no método Nakazima em comparação com Marciniak.

Diversos outros fatores afetam a posição e o formato da CLC, entre os quais o expoente de encruamento (**n**), a sensibilidade à taxa de deformação (**m**), o coeficiente de anisotropia (**R**), a espessura (**t**) e orientação do material. Condições de atrito, inclusões, composição química e até mesmo o caminho de deformação seguido durante a estampagem também afetam seus resultados [18, 19]. Esses aspectos reforçam o caráter multifatorial da estampabilidade, mostrando que a CLC deve ser interpretada em conjunto com parâmetros metalúrgicos e geométricos. Particularmente devido ao efeito do atrito, o método de Nakazima com punção hemisférico é mais adequado para determinar o lado esquerdo da curva (vide Fig. 3), nas condições próximas ao embutimento.

Apesar destas influências conhecidas, pequenas variações nos parâmetros de processamento (ex.: recozimento, laminação de encruamento) não alteraram significativamente a posição da CLC, demonstrando a robustez da metodologia [21]. Dessa forma, a curva se mostrou útil tanto para diferenciar materiais quanto para validar condições de processo em escala industrial

Atualmente, a CLC é utilizada não apenas como ferramenta experimental, mas também como critério de falha em softwares de simulação de estampagem, tornando-se um elo essencial entre ensaios laboratoriais e análises computacionais aplicadas à indústria automotiva e de transformação de metais. A Figura 8 apresenta algumas CLCs de aços laminados especialmente para aplicação em estampagem de peças automotivas [23].

2.2. Aplicação da CLC

Diferentemente dos parâmetros uniaxiais obtidos em ensaios de tração, como discutido nos itens 1.1 e 1.2, a CLC permite analisar o comportamento do material sob diversos estados de deformação, variando de tração biaxial a tração-compressão, refletindo de forma mais realista as condições encontradas na estampagem industrial.

A forma mais direta de se aplicar a Curva Limite de Conformação (CLC) em análises de estampagem consiste em se comparar as deformações principais medidas ou calculadas na peça estampada (ε_1 e ε_2 ou ε_3) com os limites definidos pela curva, como as exemplificadas na Figura 8. Nesse procedimento, após a conformação, registra-se a malha de deformações na superfície da chapa, normalmente por meio de uma rede de círculos previamente gravados (vide Fig. 6) que, ao serem deformados, tornam-se elipses. As deformações principais (ε_1 e ε_2 ou ε_3) são calculadas a partir das dimensões dos eixos dessas elipses e plotadas no diagrama de deformações principais junto à CLC previamente determinada para o material [1, 9, 11].

Se os pontos experimentais referentes à peça estiverem abaixo da curva, a conformação é considerada segura; se estiverem acima da curva, indica-se risco de estricção localizada ou ruptura. Essa metodologia fornece uma ferramenta prática para correlacionar diretamente a condição do processo com a capacidade de conformação do material, permitindo ao engenheiro identificar regiões críticas da peça e adotar medidas de correção, como ajustes na pressão do prensa-chapas, lubrificação diferenciada ou modificação do raio de matriz [14, 15].

Copyright © 2025 ISESC

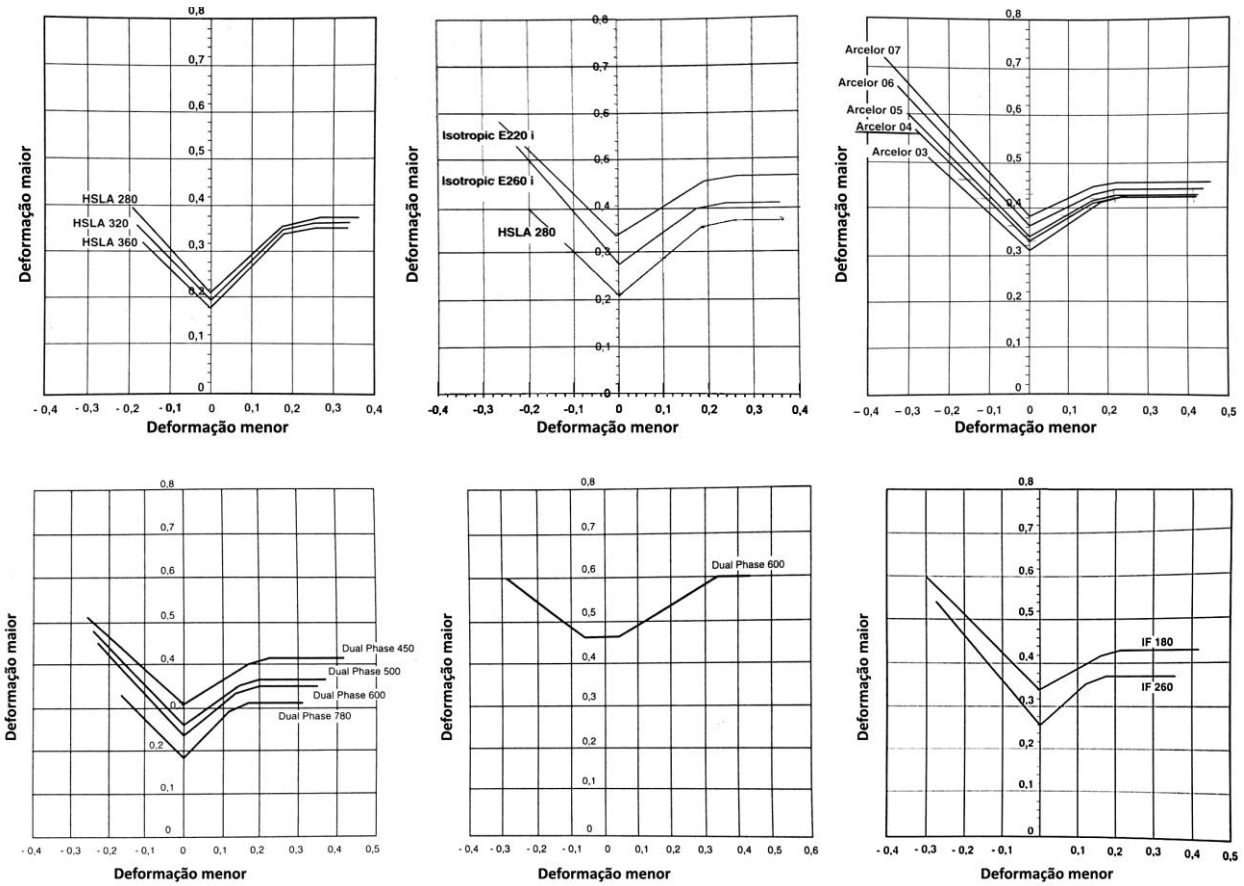


Figura 8. Curvas Limites de Conformação calculadas para diferentes tipos de aços empregáveis na estampagem de peças para a indústria automobilística, adaptado de [23].

Além disso, a simplicidade da aplicação torna a CLC particularmente útil em ambientes industriais, nos quais o tempo de resposta é essencial. Uma vez determinada experimentalmente para cada material, a curva pode ser incorporada a simulações numéricas, ampliando a capacidade preditiva sem a necessidade de repetir ensaios laboratoriais extensivos [10, 23]. Dessa forma, a CLC constitui um elo direto entre caracterização experimental e validação de processos industriais de estampagem.

A CLC é amplamente utilizada como critério de falha em softwares de simulação de estampagem, entre os quais se destaca o *AutoForm*. Esses programas empregam o método dos elementos finitos (MEF) para reproduzir virtualmente o processo de conformação de chapas metálicas, permitindo avaliar estados locais de tensão e deformação em cada elemento da malha computacional [10-12].

Na prática, o *AutoForm* calcula em cada incremento de carregamento as deformações principais (ε_1 e ε_2 ou ε_3) nos elementos da chapa simulada. Esses valores são projetados no diagrama de deformações principais, onde são comparados com a CLC do material previamente fornecida pelo usuário, conforme exemplificado pela Figura 9, que apresenta um resultado de uma simulação de estampagem de uma peça empregando-se dois diferentes tipos de aços. Com base nessa comparação, o software classifica as regiões da peça em:

- Zona segura: deformações abaixo da curva;
- Zona de alerta: deformações próximas à curva, indicando risco iminente de estricção localizada;
- Zona de falha: deformações acima da curva, caracterizando ruptura ou perda de estampabilidade.

O resultado da simulação é apresentado em forma de mapas coloridos sobre a geometria da peça, como ilustrado na Figura 9, facilitando a identificação de áreas críticas e permitindo ao engenheiro tomar decisões sobre ajustes de parâmetros do processo, como pressão do

Copyright © 2025 ISESC

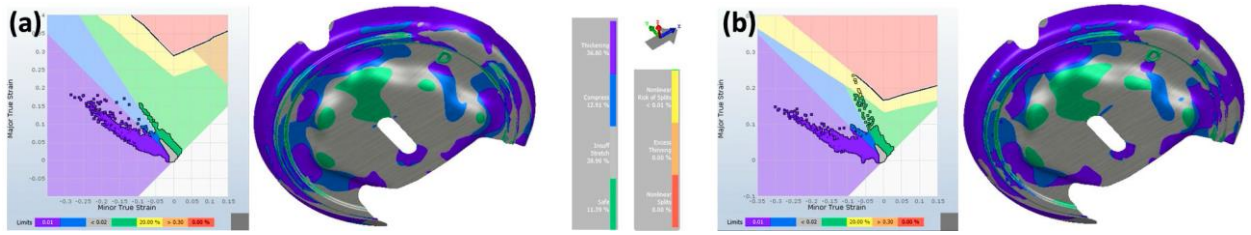


Figura 9. Simulação de um processo de estampagem com avaliação pela Curva Limite de Conformação para os aços: (a) EN 10130 DC04 e (b) NBR 6650 LNE 380, como empregadas no software AutoForm [13].

prensa-chapas, atrito, raio de punção ou até seleção de material [12, 13]. Essa abordagem reduz custos e tempo de desenvolvimento, já que evita sucessivas tentativas em ferramental real.

Além disso, a integração da CLC no *AutoForm* possibilita avaliar a viabilidade de novos materiais (como aços avançados de alta resistência – AHSS ou ligas de alumínio automotivas), comparando sua resposta sob diferentes condições de carregamento. Mais recentemente, metodologias avançadas como a ep-FLC (equivalent plastic strain-based FLC) vêm sendo incorporadas, superando limitações da FLC tradicional em processos multietapas e trajetórias não lineares de deformação [24, 25]

Assim, a aplicação da CLC em softwares como o *AutoForm* representa uma ferramenta essencial para a integração entre caracterização experimental e prática industrial, permitindo prever falhas, otimizar parâmetros de processo e selecionar materiais de forma mais assertiva, em consonância com as demandas da Indústria 4.0.

2.3. Desafios no Uso da CLC

A Curva Limite de Conformação (CLC) continua sendo uma das ferramentas mais empregadas para avaliar a conformabilidade de chapas metálicas, sendo amplamente utilizada em simulações numéricas e validações experimentais [20-22].

A CLC tradicional funciona bem para avaliar conformabilidade na maioria dos casos industriais, mas apresenta uma limitação relevante: **é fortemente dependente do caminho de deformação**. Segundo Nurcheshmeh e Green [24, p.2]:

> "Embora cerca de 80% das peças estampadas possam ser avaliadas de forma confiável com a CLC tradicional, existem diversas peças complexas e aquelas conformadas em processos multietapas em que a CLC não é adequada para a análise da estampabilidade."

Assim, em condições específicas de carregamento mais complexas — como no caso de pré-estiramento seguido de embutimento durante a estampagem multietapas de aços bifásicos laminados a quente — a previsão baseada na CLC tradicional pode tornar-se imprecisa, reduzindo sua confiabilidade na identificação de falhas em processos desse tipo.

Para superar essa limitação, foi proposta a Curva Limite de Conformação baseada na deformação plástica equivalente (CLC-ep ou ep-FLC), que utiliza a deformação plástica acumulada em vez das deformações principais individuais. Por ser considerada independente do caminho de deformação, essa abordagem permite avaliar a estampabilidade com maior precisão em processos complexos e multietapas. Estudos recentes, como o de Chen et al. [25], demonstraram que a CLC-ep apresenta melhor concordância entre simulações numéricas e resultados experimentais em componentes de geometria crítica, como discos de roda de aços bifásicos.

A CLC-ep não substitui a CLC tradicional, mas a complementa nos *softwares* de simulação de estampagem. Seu uso amplia a precisão em situações críticas, como trajetórias não lineares e processos multietapas, embora ainda dependa de dados experimentais avançados e de uma implementação comercial restrita. No caso específico do *AutoForm* [12, 13], a adoção da CLC-ep pode ser vista ao mesmo tempo como um recurso complementar e como um fator limitante, conforme descrito a seguir:

Complementaridade

- O *AutoForm* tradicionalmente utiliza a **CLC clássica** ($\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$ ou ε_3) como critério de falha. Essa abordagem é consagrada e cobre a maior parte das aplicações industriais (estima-se que ~80% das estampagens podem ser avaliadas de forma confiável com a CLC tradicional).

Copyright © 2025 ISESC

- Entretanto, em peças de geometria complexa ou submetidas a trajetórias não lineares de deformação (como multietapas, pré-estiramento seguido de embutimento, etc.), a CLC clássica perde precisão.
- A introdução da **CLC-ep** nesses *softwares* funciona como uma ferramenta complementar, ampliando a capacidade de previsão em cenários onde o modelo tradicional falharia. Assim, a CLC-ep fornece ao *AutoForm* (e a outros softwares) um critério mais robusto, que melhora a correlação entre simulação e realidade.

Limitações

- A CLC-ep ainda não é universalmente implementada em softwares comerciais; muitas vezes ela aparece como módulo avançado, estudo em P&D ou em versões customizadas do *solver*.
- Para usá-la corretamente, ‘é necessário alimentar o *software* com dados experimentais (ensaios de caminhos não lineares), o que aumenta a complexidade e o custo de calibração do material.

Assim, no contexto atual, a CLC-ep pode ser vista como um limitador prático, pois exige ensaios adicionais e um nível maior de conhecimento do usuário para que os resultados sejam confiáveis.

3. Conclusões

A Curva Limite de Conformação (CLC) constitui-se em uma ferramenta essencial para a caracterização da estampabilidade de chapas metálicas e a previsão de falhas em processos industriais de conformação. Sua incorporação em softwares de simulação, como o *AutoForm*, possibilita prever regiões críticas da peça, otimizar parâmetros de processo e reduzir custos com ferramental físico, encurtando o tempo de desenvolvimento e aumentando a confiabilidade do projeto.

Constatou-se, entretanto, que a CLC tradicional apresenta limitações devido à sua dependência do caminho de deformação, sendo adequada principalmente para trajetórias aproximadamente lineares. A CLC-ep surge como uma evolução relevante, pois oferece maior precisão na análise de processos complexos e multietapas, embora ainda demande maior base experimental e adaptação em *softwares* comerciais.

No âmbito acadêmico, a aplicação da CLC em análises experimentais e computacionais contribui para consolidar os conceitos de plasticidade, anisotropia e instabilidade plástica, tornando-se um recurso pedagógico eficaz para aproximar a teoria do comportamento real dos metais em serviço. Dessa forma, a CLC permanece como elo entre pesquisa, ensino e prática industrial, ao mesmo tempo em que novas metodologias ampliam seu alcance e confiabilidade.

Referências

1 ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook Volume 14B: Metalworking – Sheet Forming. Materials Park: ASM International, 2006.

2 DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

3 HOSFORD, W. F.; CADDEL, R. M. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy. 4. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN: 978-0521881210.

4 MORAIS, W. A.. ENSAIOS MECÂNICOS DOS MATERIAIS Volume 1. 1. ed. São Vicente: WILLY ANK Soluções para o Setor Metal Mecânico, 2018. v. 1.. ISBN: 978-8594420039.

5 KEELER, S. P.; BACKOFEN, W. A. Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. Transactions of the ASM, v. 56, p. 25-48, 1963.

6 GOSH, A. K.; HECKER, S. S. Stretch forming and drawing of sheet metals: a review. Journal of Engineering Materials and Technology, v. 98, n. 2, p. 177-188, 1976.

7 HILL, R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society A, v. 193, n. 1033, p. 281-297, 1948.

8 SILVA, F. C.; VERBURG, T. J. C. F.; OLIVEIRA, A. R. C.; GANANÇA, D. L. S.; MORAIS, G. T.; MORAIS, W. A.. Avaliação da Deformação Plástica Através da Geração de Calor Quantificada por Termografia, p. 156-168. In: 18th ENEMET - National Meeting of Metallurgical, Materials and Mining, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-4711, DOI: http://dx.doi.org/10.5151/2594-4711-31873.

9 MARCINIAK, Z.; KUCZYNSKI, K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. International Journal of Mechanical Sciences, v. 9, n. 9, p. 609-620, 1967.

10 BANABIC, D. Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation. Springer, 2010.

Copyright © 2025 ISESC

11 NAKAZIMA, K.; KIUCHI, H.; IKEDA, S. Study on the formability of steel sheets. Yawata Technical Report, v. 264, p. 8517-8530, 1968.

12 AUTOFORM ENGINEERING. Theory Manual: Forming Limit Curves. Zurich: AutoForm Engineering GmbH, 2021.

13 AUTOFORM ENGINEERING. AutoForm Engineering GmbH. Disponível em: https://www.autoform.com/pt/. Acesso em: 5 set. 2025.

14 KEELER, S. P., Determination of Forming Limits in Automotive Stampings, Sheet Met. Ind., p. 683-691, Sept.(1965).

15 GOODWIN, G. M., Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming. Problems in the Press Shop, La Metalurgia Italiana, 8, p. 767-774 (1968).

16 ASTM INTERNATIONAL. ASTM E2218-23: Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves. West Conshohocken: ASTM International, 2023.

17 HUANG, G., SADAGOPAN, S., and SCHREIER, H., "Determination of Forming Limit and Fracture Limit Curves Using Digital Image Correlation," SAE Int. J. Mater. Manf. 7(3):574-582, 2014. DOI: https://doi.org/10.4271/2014-01-0982.

18 MARCINIAK, Z. et al., Influence of the Plastic Properties of a Material on the Forming Limit Diagram for Sheet Metal in Tension, Int. J. Mech. Sci., 15, p.789-805 (1973).

19 MELANDER, A. et al., A Theorical and Experimental Study of the Forming Limit Diagrams of Deep Drawing Steels, Dual Phase Steels, Austenitic and Ferritic Stainless Steels and Titanium, Scand. J. Metal., 14, p. 127-148 (1985).

20 PESSANHA, L. M.; PAULA., A. S.; CARDOSO, M. C.; MONTEIRO, G. A.. Comportamento Plástico de uma Chapa de Aço Inoxidável Austenítico, p. 77-89. In: 49º Seminário de Laminação, Rio de Jabeiro, 2012. ISSN: 2594-5297, DOI: http://dx.doi.org/10.5151/2594-5297-22506.

21 FONSECA, T. C.. Estampabilidade de chapas de aços IF após relaminação de encruamento e recozimento. 2003. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Escola de Engenharia, 2003.

22 MORAIS, W. A.; MAGNABOSCO, A. S.; NETTO, E. B. M.. METALURGIA FÍSICA E MECÂNICA APLICADA (Vol. 2). 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. v. 2. 456p. ISBN: 978-8577370276.

23 ARCELOR AUTO. Catálogo Automóvel. Arcelor Group, 2003.

24 NURCHESHMEH, M., GREEN, D.E. On the use of effective limit strains to evaluate the forming severity of sheet metal parts after nonlinear loading. Int J Mater Form 7, 1–18 (2014). https://doi.org/10.1007/s12289-012-1104-9.

25 CHEN, W.; SONG, H.; LAZARESCU, L.; XU, Y.; ZHANG, S.; BANABIC, D. Formability analysis of hot-rolled dual-phase steel during the multistage stamping process of wheel disc. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 110, p. 1563–1573, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-020-05963-x.

Copyright © 2025 ISESC