

## **ESTUDO DO FABRICO DE UM COMPONENTE PARA A INDÚSTRIA AUTOMÓVEL RECORRENDO A CURVAS LIMITE DE ESTAMPAGEM DE EXTENSÕES E TENSÕES**

**Cravo S. M. R., susana.cravo@gmail.com<sup>1</sup>**

**Gouveia B. P. P., bgouveia@ist.utl.pt<sup>2</sup>**

**Rodrigues J. M. C., jrodrigues@ist.utl.pt<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal,

<sup>2</sup> IST, IDMEC, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

**Resumo:** As curvas limite de estampagem (CLE) baseadas em extensões têm sido amplamente utilizadas na concepção e projeto de ferramentas destinadas ao fabrico de componentes estampados para controlar fenômenos de estrição localizada. Uma das limitações da utilização das CLE baseadas em extensões consiste no fato de estas só poderem ser aplicadas quando as trajetórias de deformação no plano da chapa forem lineares ou aproximadamente lineares. Esta limitação torna a sua utilização particularmente crítica em operações de estampagem onde as trajetórias de deformação são complexas como, por exemplo, o fabrico de componentes em mais do que uma operação de estampagem. Mais recentemente surgiram estudos sobre a utilização de curvas limite de estampagem baseadas em tensões, cujas conclusões demonstraram que estas curvas são independentes da trajetória de deformação.

Neste trabalho efectua-se o estudo do fabrico de um componente para a indústria automóvel em chapa de aço de baixa liga e elevado limite elástico (S420MC) produzido fundamentalmente através de duas operações de estampagem, nas quais se verificam reduções de espessura inadmissíveis e/ou aparecimento de fratura. O estudo das duas operações de estampagem foi conduzido com o objetivo de eliminar/minimizar os defeitos acima referidos, introduzindo alterações quer na geometria das ferramentas, quer nos parâmetros de fabrico. Este trabalho foi efetuado recorrendo à simulação numérica utilizando um programa comercial de elementos finitos com formulação dinâmica explícita e simultaneamente apoiado nas curvas limite de estampagem de tensões e de extensões. O modelo teórico considerado para as curvas limite de estampagem foi o proposto por Stören e Rice. A validação dos resultados foi efetuada através de comparações teórico-experimentais.

**Palavras-chave:** estampagem, simulação numérica, curvas limite de estampagem de extensões e de tensões

### **1. INTRODUÇÃO**

O conhecimento do limite de enformabilidade é fundamental nas fases de concepção e de projeto das ferramentas de qualquer processo de estampagem, uma vez que o nível de deformação plástica que o material pode sofrer durante o processo encontra-se limitado pela ocorrência de fenômenos de estrição localizada, entre outros. As curvas limite de estampagem (CLE) baseadas em extensões têm sido amplamente utilizadas para resolver este problema, porém a sua utilização encontra-se limitada às operações onde as trajetórias de deformação são lineares ou aproximadamente lineares. Deste modo, a sua utilização torna-se particularmente crítica em operações de estampagem onde as trajetórias de deformação são complexas como é, por exemplo, o caso do fabrico de componentes em estampagem múltipla. No entanto, estudos recentes sobre a utilização de CLE baseadas em tensões vieram mostrar que estas curvas são independentes da trajetória de deformação.

Neste trabalho apresenta-se o estudo do fabrico de um componente para a indústria automóvel produzido fundamentalmente através de duas operações de estampagem, no qual são sugeridas alterações à geometria das ferramentas, de modo a evitar os atuais problemas de enformabilidade, expresso pela existência de zonas da peça onde a redução de espessura atinge valores inaceitáveis e ainda pelo aparecimento de estrições localizadas, que degeneram em fraturas, noutras regiões. A metodologia de análise assentou na interpretação dos modos de deformação das operações de deformação plástica, obtidas por simulação numérica, através de diagramas de extensões/tensões principais, com informação das respectivas curvas limite de estampagem. O modelo teórico usado para estabelecer as CLE foi o proposto por Stören e Rice (1975). Contudo, como, segundo os autores, este modelo subestima o início da estrição localizada nas regiões em que quociente entre as extensões principais no plano da chapa,  $\beta = \epsilon_2 / \epsilon_1$ , se situa entre -1 e

0, optou-se por utilizar o modelo teórico proposto por Hill (1952) para esta zona. Nestas condições, a CLE das extensões foi calculada através de:

$$\varepsilon_1 = \frac{n}{1+\beta} \quad \varepsilon_2 = \beta \left( \frac{n}{1+\beta} \right) \quad \text{para } -1 < \beta \leq 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{2(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)} \quad \varepsilon_2 = \beta \left( \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{2(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)} \right) \quad \text{para } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (2)$$

Por seu lado, as curvas limite de estampagem baseadas em tensões foram obtidas seguindo a metodologia proposta por Stoughton (2004), podendo ser calculadas através das Eq. (3) e (4).

$$\sigma_1 = \frac{K(2+\beta)}{\sqrt{3(1+\beta^2)}} \left( \frac{2n(3(1+\beta^2))^{1/2}}{3(1+\beta)} \right)^n \quad \sigma_2 = \frac{K(1+2\beta)}{\sqrt{3(1+\beta^2)}} \left( \frac{2n(3(1+\beta^2))^{1/2}}{3(1+\beta)} \right)^n \quad \text{para } -1 < \beta \leq 0 \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \frac{K(2+\beta)}{\sqrt{1+\beta+\beta^2}} \left( \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{(2+\beta)\sqrt{1+\beta+\beta^2}} \right)^n \quad \sigma_2 = \frac{K(1+2\beta)}{\sqrt{1+\beta+\beta^2}} \left( \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{(2+\beta)\sqrt{1+\beta+\beta^2}} \right)^n \quad \text{para } 0 < \beta \leq 1 \quad (4)$$

em que K e n são as constantes do modelo empírico de Hollomon (ver §3.2.1).

## 2. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O caso de estudo que se apresenta consiste no fabrico de um componente para a indústria automóvel atualmente em produção numa empresa portuguesa. O componente é um apoio de suspensão obtido a partir de chapa de aço de elevado limite elástico e baixa liga (S420MC-EN 10149-2 (1995)), com 2 mm de espessura, produzido em três fases distintas. A primeira consiste numa operação de estampagem em que é dada uma pré-forma à chapa (Fig. (1) (a)). Segue-se uma segunda operação de estampagem para obter a forma quase final da peça (Fig. (1) (b)). A terceira etapa consiste em operações de retificação, calibração e corte para obtenção da forma definitiva. Neste trabalho serão unicamente analisadas as duas primeiras etapas de fabrico, onde se verifica que os componentes podem fraturar agravado por zonas da peça com reduções de espessura superiores aos 10~15% geralmente adotado para este tipo de componentes.

Um dos constrangimentos impostos pela empresa consiste em procurar uma solução para o fabrico mantendo, tanto quanto possível, o material da chapa, em virtude de existir material em estoque. Para a realização deste trabalho a empresa disponibilizou provetes de chapa para caracterização mecânica do material, desenhos das ferramentas correspondentes às duas etapas de estampagem e peças produzidas na primeira e segunda operação.



**Figura 1. Componentes obtidos no final da (a) primeira e da (b) segunda operação de estampagem, exibindo fracturas.**

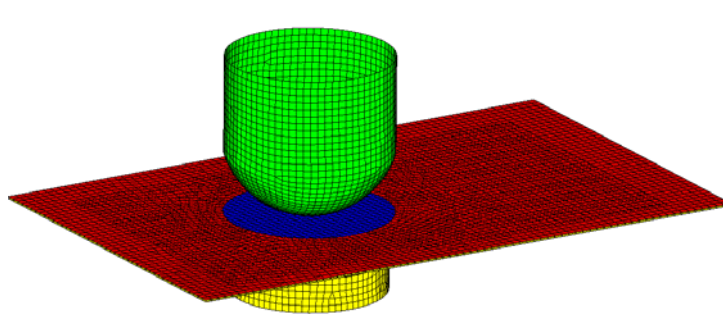
A metodologia adotada neste estudo divide-se em três fases: a primeira consiste na caracterização mecânica do material da chapa, através de ensaios de tracção uniaxial. A segunda fase consiste em reproduzir as condições atuais de fabrico das operações de estampagem por simulação numérica e, desse modo, determinar de modo inverso os parâmetros de fabrico não fornecidos/conhecidos. Para tal, comparam-se quer os valores da espessura em secções características, quer a geometria e dimensões dos contornos das peças estampadas. Nesta fase procura-se ainda avaliar o desempenho do programa na simulação das etapas de estampagem. As ferramentas informáticas usadas na simulação numérica foram o Hypermesh<sup>TM</sup> (pré-processador), o Dytran<sup>TM</sup> (programa de elementos finitos dinâmico explícito) e o Patran<sup>TM</sup> (pós-processador). A terceira fase surge na seqüência dos resultados obtidos na fase anterior, e consiste na

definição de uma nova geometria para a primeira operação de estampagem que permita obter melhorias de enformabilidade e de redução de espessura. A análise dos resultados numéricos será efetuada recorrendo às curvas limite de estampagem de extensões e de tensões das Eq. (1) e (2) e Eq. (3) e (4), respectivamente (ver §1.).

### 3. METODOLOGIA

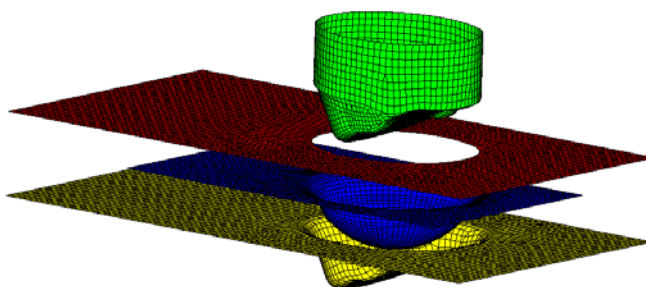
#### 3.1. Modelação Numérica

O modelo de elementos finitos foi criado discretizando a chapa com uma malha estruturada constituída por elementos de casca lineares de quatro nós, com três pontos de integração em espessura. Embora não tenham sido efetuados estudos exaustivos de sensibilidade da malha, a definição da dimensão dos elementos foi feita estabelecendo um compromisso entre os tempos de computação e a qualidade da solução. Por seu lado, as ferramentas foram discretizadas com elementos de casca rígidos. A Figura (2) e a Figura (3) mostram, respectivamente, a discretização usada nas ferramentas para as duas operações de estampagem. No caso da primeira operação usaram-se 2100 elementos na chapa, 1440 elementos no cunho, 4307 elementos na matriz e 2329 elementos no encostador, enquanto que no caso da segunda operação manteve-se a malha da chapa da primeira operação e o cunho, a matriz e o encostador foram discretizados com 4858, 12817 e 11728 elementos, respectivamente.



**Figura 2. Modelo de elementos finitos da primeira operação de estampagem.**

A modelação do atrito nas interfaces ferramenta/chapa foi efetuada através do atrito de Coulomb, tendo o valor do coeficiente de atrito de 0,15 sido obtido de forma inversa conforme se descreve no §3.2.2. Relativamente às condições de fronteira aplicadas, considerou-se que na primeira operação o cunho atua com uma velocidade constante, a matriz não tem movimento, nem forças aplicadas e que a força de atuação do encostador sobre a chapa é constante. Na segunda operação, o cunho mantém a velocidade, a matriz passa a ter um movimento contrário ao do cunho, com uma velocidade igual em módulo, e o encostador aplicará na chapa com uma força constante. Tanto as forças, como as velocidades desenvolvem-se segundo o eixo  $zz$ , o que significa que o movimento das ferramentas foi estrangido nas restantes direções.



**Figura 3. Modelo de elementos finitos da segunda operação de estampagem.**

O valor da velocidade do cunho foi estabelecido em 500 mm/s, por forma a satisfazer a condição de estabilidade nos métodos dinâmicos explícitos (Chung, 1998). Uma vez que o cunho percorre 75 mm na primeira operação e 86 mm na segunda operação, o tempo total das duas operações será de 0,324 s. Por outro lado, o número de incrementos do processo iterativo foi estabelecido automaticamente pelo programa. Quanto à força a aplicar pelo encostador em cada uma das operações os valores são determinados no §3.2.2, em conformidade com o referido anteriormente, sendo a distribuição pelos nós que contactam a chapa feita automaticamente pelo programa. Resta acrescentar que os valores das tensões principais que atuam no plano da chapa usados para construir os diagramas de tensões foram calculados a partir dos valores das extensões fornecidas pelo programa, em virtude dos valores das tensões determinados pelo programa se terem revelados incompatíveis (excetuando-se os valores da tensão efetiva) com os modos de deformação associados, fato que é comum para a generalidade dos programas dinâmicos explícitos (Yang, 1995 e Chung, 1998). A metodologia seguida na determinação das tensões pode ser consultada em Cravo, 2008.

### 3.2. Experimental

#### 3.2.1. Caracterização Mecânica do Material da Chapa

A caracterização mecânica do material da chapa, em associação com um modelo empírico para modelação da curva tensão-extensão efetiva, foi efetuada através da realização de ensaios de tração uniaxial (segundo a norma NP EN 10002-1), apresentando-se na Tab. (1) os principais parâmetros usados na simulação numérica.

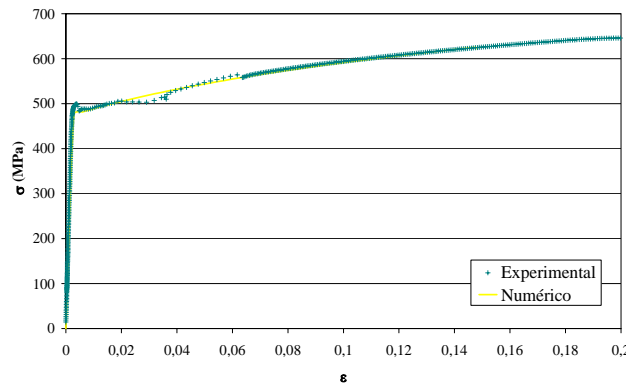
**Tabela 1. Características mecânicas do aço S420MC (K e n são as constantes do modelo empírico de Hollomon).**

E (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	$\sigma_R$ (MPa)	n	K (MPa)
198534	498,81	539,39	0,1269	795,68

Uma vez que o programa de elementos finitos Dytran usa o modelo empírico de Krieg (1975) para modelar a curva tensão-extensão efetiva, apresenta-se de seguida, para o aço S420MC, a respectiva equação rígido-plástica (Eq. (5)).

$$\sigma = b(\epsilon + c)^n = 797,15(\epsilon + 0,01)^{0,1269} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

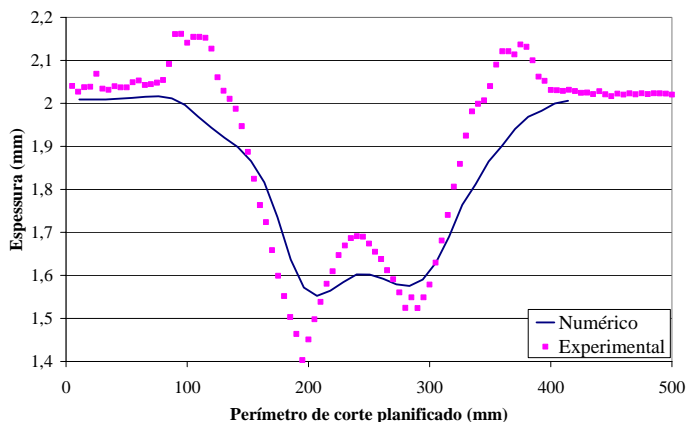
Com o objetivo duplo de avaliar a qualidade da aproximação e de testar o valor da tensão efetiva determinada pelo programa foi feita a simulação numérica do ensaio de tração. A Figura (4) confronta os dados experimentais com os resultados obtidos na simulação e permite concluir sobre a boa correlação dada pelo modelo de Krieg (Eq. 5).



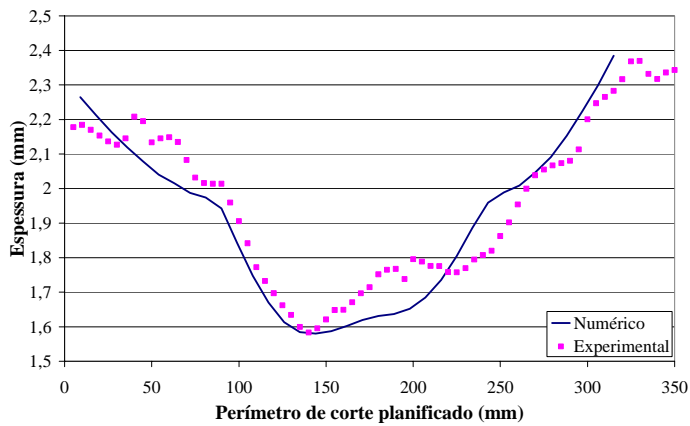
**Figura 4. Curvas tensão-extensão efectiva obtidas experimental e numericamente no ensaio de tracção uniaxial.**

#### 3.2.2. Determinação das Variáveis Processuais

Não sendo conhecidos os valores de força do encostador, nem as condições tribológicas, optou-se por determinar estas variáveis por via indireta, comparando a evolução numérico-experimental da espessura em secções características do componente, bem como os contornos que as pré-formas adquirem depois de estampadas. A Figura (5) e a Figura (6) ilustram, para a primeira operação, os resultados obtidos para a evolução da espessura, respectivamente, para os cortes longitudinal e transversal da peça, onde se pode observar a boa concordância global conseguida.



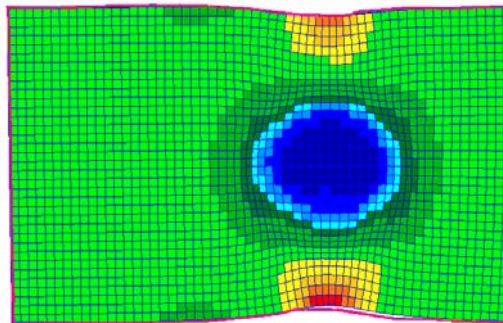
**Figura 5. Final da primeira operação de estampagem. Comparação numérico-experimental entre as espessuras obtidas segundo o corte longitudinal (identificado no lado direito).**



**Figura 6. Final da primeira operação de estampagem. Comparação numérico-experimental entre as espessuras obtidas segundo o corte transversal (identificado no lado direito).**

No entanto, para o corte longitudinal verifica-se que a simulação numérica suaviza não só as zonas de dobra em nos cantos da matriz, como as zonas de maior propensão ao aparecimento das estricções localizadas. Acredita-se que este fato se deve às características dos elementos utilizados na simulação numérica, agravado eventualmente por uma deficiente discretização destas zonas. Estes mesmos motivos são válidos para justificar, no corte transversal, a maior suavidade que os resultados numéricos apresentam na transição entre as zonas onde podem surgir as estricções. De referir, ainda, que a maior redução de espessura que se verifica existir na direção do corte longitudinal deve-se ao fato de existir maior constrangimento ao movimento da chapa para o interior da matriz segundo esta direção, o que leva a que o aparecimento da fratura se dê segundo direções perpendiculares a esta. Importa, no entanto, referir que o local onde na simulação numérica surgem as maiores reduções de espessura coincide efetivamente com as zonas onde experimentalmente foram detectadas estricções/fratura. Resta acrescentar que a boa reprodutibilidade obtida tanto na evolução da espessura, como na geometria do contorno do componente, foi conseguida usando um valor de força de atuação do encostador de 50 kN e um coeficiente de atrito de 0,15 para as diferentes interfaces de contacto.

A Figura (7) compara a geometria da chapa obtida numérica e experimentalmente (resultante da média de três medições) igualmente no final da primeira operação de estampagem.



**Figura 7. Final da primeira operação de estampagem. Comparação entre o contorno medido experimentalmente e o obtido numericamente.**

À semelhança da primeira operação de estampagem foi igualmente necessário determinar as variáveis processuais a utilizar na simulação numérica da segunda operação. A metodologia seguida assentou em usar os valores determinadas na primeira operação e avaliar a evolução da espessura em secções previamente selecionadas, uma vez que esta foi a variável que se revelou mais sensível no estudo anterior. Assim, a força de atuação do encostador da segunda operação foi calculada usando o valor da pressão específica na interface chapa/encostador da primeira operação, uma vez que este valor de pressão se revelou eficiente em termos de engelhamento da chapa. Os resultados numéricos e experimentais da evolução da espessura da chapa em diferentes secções do componente obtido na segunda operação de estampagem revelaram-se bastantes satisfatórios (Cravo, 2008), permitindo validar os valores das variáveis processuais.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Estudo das Atuais Condições de Fabrico do Componente

Para sugerir alterações à geometria da ferramenta da primeira operação, com vista a aumentar a enformabilidade e minimizar as reduções de espessura, torna-se necessário conhecer as deformações induzidas pelo atual processo de



fabrico. Este estudo foi desenvolvido analisando conjuntamente os diagramas de extensões/tensões principais obtidos numericamente, com as respectivas curvas limites de estampagem. Os resultados obtidos encontram-se representados na Fig. (8) para o final da primeira operação. Como se pode observar esta etapa de fabrico caracteriza-se por introduzir na chapa deformações críticas entre as zonas de deformação plana e de expansão biaxial simétrica (primeiro quadrante do plano de extensões principais). Esta deformação origina uma elevada redução de espessura e sugere condições para o aparecimento de estricções, como se pode inferir pelo fato de diversos elementos ultrapassarem as curvas limite de estampagem. Na Figura (9) encontram-se assinalados a vermelho os elementos que ultrapassaram as CLE na primeira operação de estampagem, notando-se a sua localização aproximadamente simétrica em relação ao pólo. Este fato, para além de confirmar que o processo se desenvolve com atrito, permite concluir que a zona preferencial para a rotura do componente é a do lado direito do pólo, conforme se pode constatar na peça que se mostra na Fig. (1) (a).

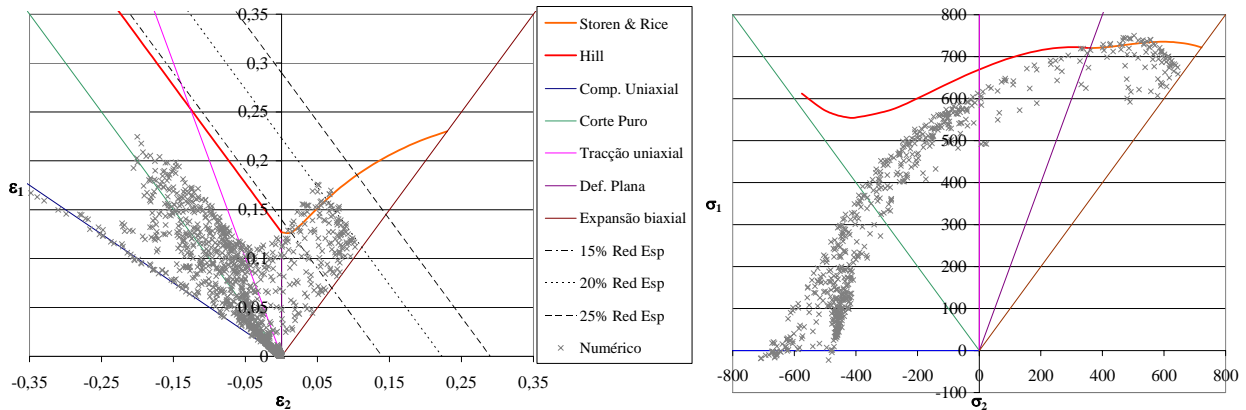


Figura 8. Diagramas de extensões (esquerda) e de tensões (direita) principais no plano da chapa obtidos numericamente no final da primeira operação de estampagem.

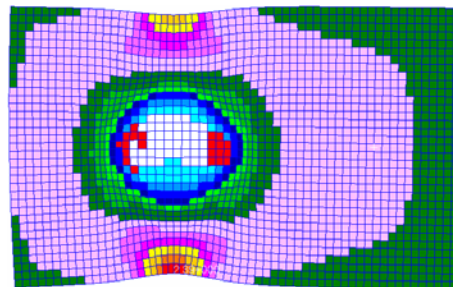


Figura 9. Localização dos elementos situados acima das curvas limite de estampagem (encarnado).

Na Figura (10) apresentam-se os diagramas das extensões e das tensões principais no plano da chapa, obtidos no final da segunda operação de estampagem. Com base nestes diagramas é possível verificar que esta segunda operação caracteriza-se essencialmente por introduzir deformações entre a deformação plana e a expansão biaxial simétrica, tal como já se tinha verificado na operação anterior, com a conseqüente elevada redução de espessura e aparecimento de estricções localizadas. Os resultados do diagrama de tensões são compatíveis com os resultados relativos às extensões.

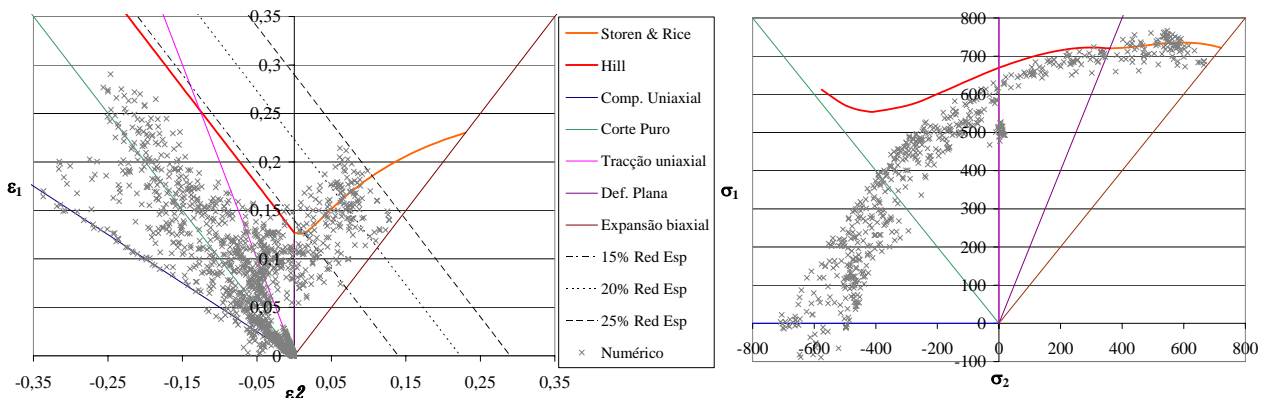
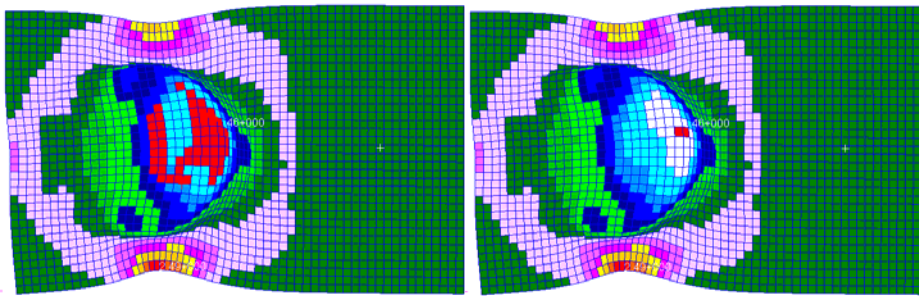


Figura 10. Diagramas de extensões e de tensões principais no plano da chapa obtidos numericamente no final da segunda operação de estampagem.

No que respeita à aplicação das CLE das extensões, embora esta se devesse limitar à primeira operação a sua utilização foi igualmente considerada no estudo da segunda operação de estampagem. Como se acabou de constar os pontos materiais que na segunda operação apresentam um comportamento mais crítico em termos de enformabilidade no processo atual de fabrico, têm estados de deformação entre a deformação plana e a expansão biaxial simétrica. De acordo com trabalhos realizados por Graf e Hosford (1993), quando se aplicam pré-extensões entre a deformação plana e a expansão biaxial simétrica, a nova CLE das extensões mantém aproximadamente a sua geometria e sofre uma translação para o lado direito (segundo oitante) do plano das extensões principais, levando a que a curva limite de estampagem inicial tenha um comportamento mais conservador do que o da nova. Este motivo, associado ao fato de não ter sido possível determinar experimentalmente a CLE, para além da dificuldade que acarreta a sua obtenção para segundas operações de estampagem (Stoughton, 2000), levou a que se adotasse a mesma curva limite de estampagem das extensões para analisar a segunda etapa de fabrico, tendo sempre presente as limitações desta generalização.

Na Figura (11), do lado esquerdo, assinalam-se a vermelho os elementos que ultrapassam a CLE, os quais se situam na zona mais profunda da peça, junto ao raio do canto do cunho, numa região que já se tinha revelado crítica durante a primeira operação (ver Fig. (9)). Se compararmos a localização dos elementos onde a deformação é mais intensa (ver Fig. (11), do lado direito) com a posição das fendas que sobrevêm no componente real (ver Fig. (1) (b)), podemos verificar que são praticamente coincidentes. Estes resultados reforçam o bom desempenho do programa de simulação e do modelo teórico de CLE proposto por Stören e Rice na análise dos fenômenos de estricção localizada.



**Figura 11. Identificação dos elementos (a encarnado) que se situam acima das CLE correspondentes à Fig. 10. No lado direito assinalam-se a encarnado apenas os dois elementos que apresentam maior afastamento das CLE.**

Em termos de enformabilidade, a análise das condições atuais de fabrico revela que para a zona mais solicitada da chapa a segunda operação de estampagem é uma continuação da primeira, na medida em que as deformações introduzidas nessas regiões da chapa são do mesmo tipo (expansão biaxial e deformação plana). Observa-se igualmente que logo na primeira operação as deformações introduzidas na chapa levam-na ao limiar da estricção, bastando pequenas variações processuais, como sejam pequenas variações das características mecânicas do material, para que a peça possa vir a apresentar fenômenos de estricção não admissíveis. Em face destes resultados, a estratégia utilizada para alterar as atuais condições de fabrico passou por definir uma primeira operação com uma intensidade de deformação em expansão biaxial menor, de modo a ficar com uma margem de deformação para a segunda operação.

#### 4.2. Ferramenta Proposta Para a Primeira Operação de Estampagem

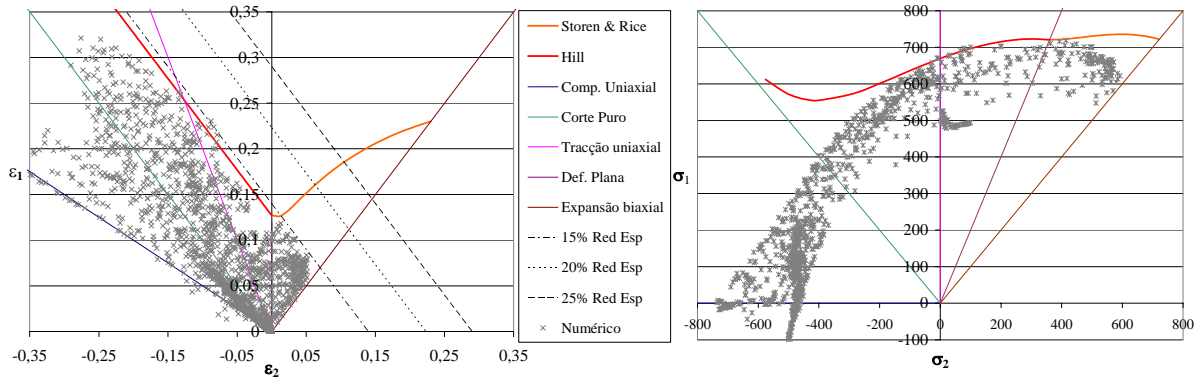
Do estudo sistemático de diferentes geometrias da ferramenta, concluiu-se que o aumento do diâmetro do cunho para 200 mm (o diâmetro atual é 182 mm) revelou-se adequado para a segunda operação e que o aumento do raio do canto da matriz para 25 mm beneficia o escoamento da chapa para o interior da matriz, sem que isso acarrete o aparecimento de fenômenos de engelhamento. Por outro lado, os níveis de deformação induzidos por modos de deformação em expansão biaxial foram controlados redesenhando a geometria do cunho, conforme se mostra na Fig. (12) (do lado esquerdo).



**Figura 12. Geometria proposta para a ferramenta da primeira operação (lado esquerdo). Sobreposição das geometrias dos cunhos da primeira e da segunda operação de estampagem (lado direito).**

Para determinar as dimensões mais adequadas para o raio do canto do cunho,  $R_{cc}$ , e para o raio do fundo do cunho,  $R_f$ , atendeu-se à seguinte constatação: o aumento do raio do canto do cunho origina um agravamento das deformações na zona da expansão biaxial e no sentido da deformação plana, com diminuição das extensões no segundo quadrante do diagrama de extensões principais. Relativamente à influência do raio do fundo verificou-se que quanto maior for o seu valor, tanto menor será a expansão biaxial, em detrimento das extensões no segundo quadrante do diagrama de extensões principais. Este resultado justifica-se devido ao acréscimo das forças de atrito na interface de contato, em consequência do aumento da área de contacto entre o cunho e a chapa. Este fato, limita a expansão da chapa do fundo em contacto com o cunho, passando a penetração do cunho a induzir fundamentalmente deformação na parede da taça, a qual se dá em condições de deformação plana. Desta análise, resultou para a primeira operação um cunho com raio de fundo de,  $R_f = 125$  mm, e um raio do canto de,  $R_c = 50$  mm (Fig. (12), do lado direito).

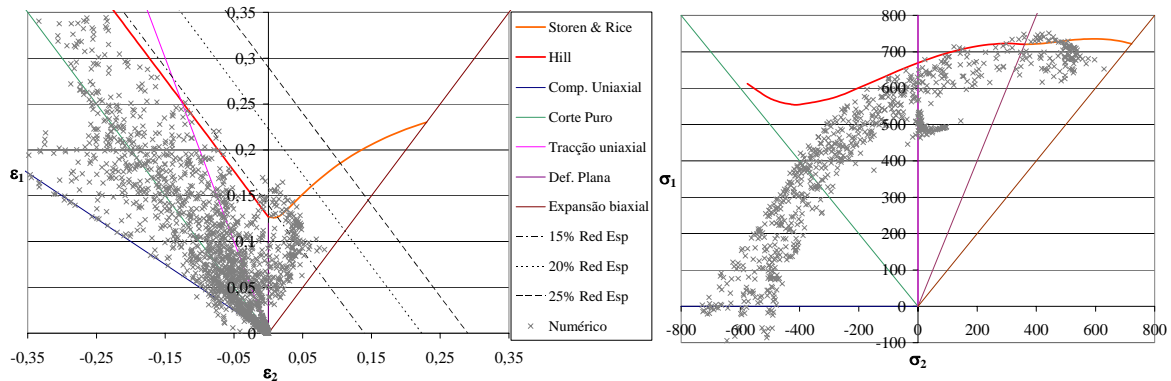
O procedimento adotado para a simulação numérica desta primeira operação de estampagem foi análogo ao usado na simulação numérica da primeira operação de estampagem do processo real de fabrico, descrito no §3.1, excetuando a força do encostador que teve que ser aumentada para obviar a fenômenos de engelhamento.



**Figura 13 . Diagramas de extensões e de tensões principais no plano da chapa obtidos numericamente no final da primeira operação de estampagem com a ferramenta proposta.**

A simulação da primeira etapa de fabrico nestas novas condições (ver Fig. (13)) mostrou que a deformação da chapa se caracteriza pela expansão biaxial (na zona mais profunda da peça) logo no início da operação. Porém, a partir de metade do curso do cunho, esta deformação cessa, passando a deformação a localizar-se na parede da taça com deformações localizadas no 2º quadrante do diagrama de extensões principais. Em consequência, a redução de espessura do componente sofre diminuições significativas, atingindo agora valores habituais na indústria automóvel (inferior a 15%), com a vantagem adicional de minimizar o número de elementos que se encontram no limiar da estricção. Deste modo, e para aproximar a geometria da pré-forma da geometria final da peça optou-se por aumentar a profundidade na primeira operação. Através do diagrama de extensões da Fig. (13) (correspondente a 80 mm de profundidade), verifica-se uma redução máxima da espessura da chapa de 13.6% (espessura de 1.73 mm), bastante inferior à que foi obtida no final da primeira operação de estampagem realizada com a ferramenta original (21.2%) para uma profundidade de estampagem inferior de 75 mm.

Na Figura (14) estão representados os diagramas de extensões e de tensões principais no plano da chapa e as respectivas curvas limites de estampagem obtidos numericamente no final da segunda operação de estampagem.



**Figura 14 . Diagramas de extensões e de tensões principais no plano da chapa obtidos numericamente no final da segunda operação de estampagem para a ferramenta proposta.**

Tal como seria de esperar em face dos resultados obtidos anteriormente (secção 4.1.) a segunda operação caracteriza-se também por introduzir deformações de expansão biaxial. Contudo, o fato conjugado de na primeira



operação se ter conseguido limitar a expansão biaxial no fundo da taça e do cunho desta segunda operação ter um curso menor, a redução máxima de espessura do componente melhorou significativamente, passando de 25,1% para 16,9%. Embora no final da segunda operação existam ainda elementos que ultrapassam a curva limite de estampagem, o seu número é bem mais reduzido do que na seqüência de fabrico original, indicando que a área crítica diminuiu.

### 4.3. Alteração do Material da Chapa

Com a seqüência de fabrico anteriormente apresentada, apesar de se ter obtido uma melhoria nos resultados, o sucesso do fabrico pode não estar garantido, pois existem ainda alguns elementos que no final do processo ultrapassam as CLE. Para garantir uma seqüência de fabrico independente de pequenas variações processuais (material, força do encostador ou lubrificação) procurou-se na mesma classe de aços um outro material para a chapa (contrariando um dos pré-requisitos). A escolha recaiu sobre o material HSLA S355, que embora tenha um valor da tensão de cedência inferior, surge com um coeficiente de encruamento superior, o que irá permitir alargar o domínio de enformabilidade das operações de estampagem. Adicionalmente, verificou-se que apenas a alteração do material, mantendo a ferramenta atualmente utilizada no fabrico, não é suficiente para atingir os objetivos estabelecidos, pelo que se decidiu conjugar a utilização do aço HSLA S355 com a seqüência de fabrico proposta em 4.2 e cujos resultados se apresentam na Fig. (15) para o final da primeira operação de estampagem. Os resultados sugerem que este material apresenta vantagens relativamente ao HSLA S420, já que no final da primeira operação deixam de existir pontos a ultrapassar as CLE, para além do nível de expansão biaxial ter sido reduzido, com a conseqüente diminuição da redução de espessura da chapa.

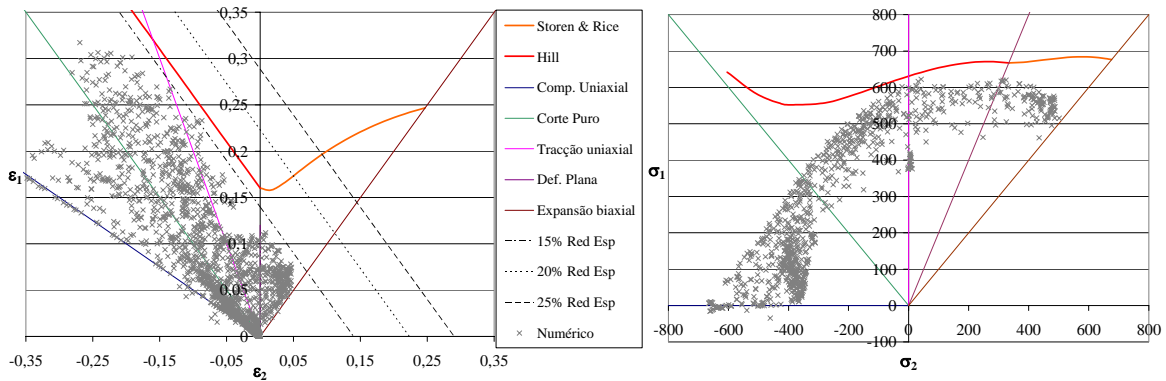


Figura 15 . Diagramas de extensões e de tensões principais no plano da chapa obtidos numericamente no final da primeira operação de estampagem. Material da chapa HSLA S355.

No que respeita à segunda operação de estampagem, os resultados revelam-se também mais favoráveis (ver Fig. (16)), observando-se que, embora a deformação na zona de expansão biaxial seja acrescida, a margem de segurança para a realização desta segunda operação é efetivamente superior.

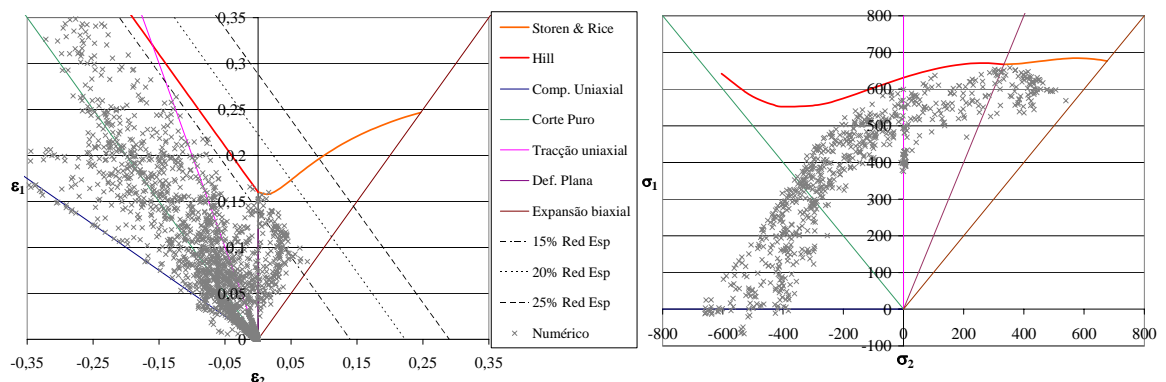


Figura 16 . Diagramas de extensões e de tensões principais no plano da chapa obtidos numericamente no final da segunda operação de estampagem. Material da chapa HSLA S355.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho efectuou-se o estudo do fabrico de um componente para a indústria automóvel produzido através de duas operações de estampagem, tendo como objetivo sugerir alterações à geometria das ferramentas de modo a evitar os atuais problemas de redução de espessura e de aparecimento de estrições localizadas. O modelo teórico proposto por Stören e Rice para determinação das CLE revelou-se adequado na identificação dos atuais problemas de

enformabilidade. Com as alterações propostas à geometria da ferramenta da primeira operação conseguiu-se melhorar significativamente o valor das reduções de espessura. Relativamente aos fenômenos de estricção, face à proximidade dos valores obtidos na simulação numérica às curvas limite de estampagem, apenas a realização de ensaios experimentais poderá vir a confirmar a efetividade destas alterações. Uma vez que estes fenômenos de enformabilidade têm origem em deformações de expansão biaxial sugere-se para a superação deste problema que o material seja substituído por outro da mesma classe mas com maior coeficiente de encruamento.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa MCG, Lda. e ao CEIIA (Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel) o apoio prestado na realização deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

- Chung, W.J., Cho J.W., Belytschko T., 1998, "On the dynamic effects of explicit FEM in sheet metal forming analysis", Computational Mechanics., Vol.15, pp. 750–776.
- Cravo, S., 2008, "Estudo do fabrico de um componente para a indústria automóvel com base na utilização de curvas limite de estampagem", Tese de Mestrado (entregue para discussão), Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Graf, A.F., Hosford, W., 1993, "Calculation of the forming limit diagrams for changing strain paths", Metall. Trans. A, Vol. 24, pp. 2497–2501.
- Hill, R., 1952, "On Discontinuous Plastic States, With Special Reference to Localized Necking in Thin Sheets", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 1, pp. 19-30.
- Krieg, R.D., 1975, "A practical two surface plasticity theory", Journal of Applied Mechanics", Vol. 42, pp. 641-646.
- Stören, S., Rice, J. R., 1975, "Localized Necking in thin sheets", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 23, pp. 421-441.
- Stoughton, T.B., 2000, "A general forming limit criterion for sheet metal forming", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, pp. 1–42.
- Stoughton, T.B., Zhu, X., 2004, "Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress-based FLD", International Journal of Plasticity, Vol. 20, pp. 1463–1486.
- Yang, D.Y., Jung, D.W., Song, I.S., Yoo, D.J.;Lee, J.H., 1995, "Comparative investigation into implicit, explicit, and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 39-53.
- NP EN 10002-1, 2006, "Materiais metálicos. Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente", Instituto Português da Qualidade.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# STUDY OF AN AUTOMOTIVE COMPONENT PRODUCTION THROUGH THE UTILIZATION OF THE FORMING LIMIT STRAIN AND STRESS DIAGRAMS

Cravo S. M. R., [susana.cravo@gmail.com](mailto:susana.cravo@gmail.com)<sup>1</sup>

Gouveia B. P. P., [bgouveia@ist.utl.pt](mailto:bgouveia@ist.utl.pt)<sup>2</sup>

Rodrigues J. M. C., [jrodrigues@ist.utl.pt](mailto:jrodrigues@ist.utl.pt)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal,

<sup>2</sup> IST, IDMEC, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

**Abstract:** Strain based forming limit diagram is well known and widely applied in sheet metal forming operations to prevent the occurrence of localized necking. The strain-path dependent nature of the FLD causes the method to become ineffective in the analysis of complex forming operations such as multi-step forming. In recent years, forming limit stress diagrams have been intensively studied and have been considered being path-independent.

This paper presents the utilization of forming limit strain and stress diagrams on the production of an industrial automotive part. This component is produced in two operations and exhibits excessive thickness reduction and fractures in both operations. The aim of this work was to propose a new tool geometry for the first operation in order to produce components with no such defects. The study was conducted using a commercial explicit dynamic finite element software. Forming limits based on strain and stress diagrams were determined using Stören and Rice model. The work is supported by experimental observations and data measurements.

**Keywords:** sheet metal forming, finite element analysis, forming limit strain and stress diagrams