

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS USANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA INTEGRADA NO DESENVOLVIMENTO DE CARROCERIAS AUTOMOTIVAS

DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL SHEET METAL FORMING PROCESS USING COMPUTER SIMULATION AS AN INTEGRATED TOOL IN THE CAR BODY DEVELOPMENT

Gleiton Luiz Damoulis¹, Gilmar Ferreira Batalha²

¹Volkswagen do Brasil S/A – Via Anchieta Km 23 - São Bernardo do Campo – SP - Brazil

e-mail: gleiton.damoulis@volkswagen.com.br

²Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dept. Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da USP
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508.900 São Paulo _SP e-mail: gilmar.batalha@poli.usp.br

ABSTRACT

Successful industrial applications of the explicit finite element simulation of crash events in the automotive industry triggered a similar demand for the simulation of the stamping process of thin walled components cars are made of. In the car body development the design of body panels and production of tools as well, can be supported effectively by the simulation of the sheet metal forming process with the finite element method (FEM). This paper describes how an explicit finite element program has been applied to lay out industrial deep drawing processes, accomplished by optimization of the methodology, the integration into the development and the updating procedure for the model data and the computational process. The main part of the paper discusses the simulation results and explains the influences of the process parameters (i.e. lubrication conditions and blank holder/ punch force), sheet size and the shape of reverse draw. Finally it is explained how the parameters and geometry were adjusted to achieve a simulation with relevant results.

Keywords: Metal sheet, forming, simulation

RESUMO

A aplicação bem sucedida do método dos elementos finitos para simulação de eventos de contato e choque em aplicações industriais levantou uma demanda similar para a simulação de componentes de chapas finas com as quais são fabricados componentes automotivos. No desenvolvimento de carrocerias automotivas o desenvolvimento de painéis bem como a produção de ferramentas pode ser efetivamente apoiada pela simulação de processos de conformação de chapas metálicas pelo método dos elementos finito (FEM). Este trabalho descreve como um programa de elementos finitos explícito foi aplicado no desenvolvimento de processos industriais de estampagem profunda, sendo realizado e possibilitando uma otimização da metodologia, e sua integração dentro do procedimento de desenvolvimento e atualização dos dados do modelo e do processo computacional. A parte principal deste trabalho discute os resultados da simulação e explica as influências dos parâmetros do processo (i.e.: condições de lubrificação e força no punção e prensa chapas), tamanho da chapa e forma da estampagem reversa. Finalmente é explicado como os parâmetros e geometria são determinados visando a otimização dos resultados.

Palavras Chave: chapas, conformação, simulação.

1 - INTRODUÇÃO

Carrocerias veiculares apresentam geralmente peças estampadas com geometrias complexas e irregulares. A conformação destas peças é normalmente uma combinação de estampagem, estiramentos e dobramentos. Uma detalhada análise e julgamento do processo de conformação via metodologias convencionais requer, na maioria dos casos, um grande esforço. Neste sentido, a simulação de processos de conformação com o método dos elementos finitos (MEF) torna se uma ferramenta eficiente e de custo razoável para a simulação de processos de conformação antes da fabricação do ferramental. Durante todas as etapas do processo de simulação a abordagem MEF possibilita um julgamento detalhado do material que está sendo conformado, uma forma ótima do ferramental e o controle do processo. O nível atual de desenvolvimento

do MEF já pode ser considerado satisfatório para estas aplicações. Uma variedade de efeitos tais como ortotropia plástica e dependência da taxa de deformação do material bem como diferentes condições de atrito estão atualmente disponíveis em alguns destes programas. Ao usuário resta ainda a tarefa de estabelecer valores adequados para as variáveis de contorno para cada efeito descritível. A determinação destes parâmetros requer muitas vezes ensaios e experimentos especiais, alguns de realização difícil. O presente estudo deseja demonstrar que o grau de comparação e concordância pode ser obtido entre os resultados da simulação e os resultados experimentais. Através da simulação com o método dos elementos finitos podem ser feitas as seguintes determinações :

- Geometria conformada e evolução da chapa estampada;
- Distribuição de espessura da chapa;
- Deformação plástica equivalente;

- Fluxo de material;
- Força no punção e prensa chapas;
- Falha (rasgamento e enrugamento).

O uso conseqüente da simulação de processos de estampagem possibilita:

Melhoria da qualidade da peça estampada por meio da otimização do processo de estampagem, parâmetros do processo, escolha do material, blanks e etapas de conformação.

Economia de tempos de desenvolvimento, assegurando o curso de desenvolvimento e redução de custos.

2 - ANÁLISE EXPLÍCITA POR ELEMENTOS FINITOS

2.1 Características Básicas

Os cálculos foram realizados com o programa de elementos finitos PAM-STAMP© que pode tratar geometrias complexas com um tempo de processamento razoável. Conforme Heath et al (1993) [1], o sistema de equações é integradas em um método explícito dinâmico, o qual ao contrário da abordagem implícita, não envolve a solução de complexas equações não lineares acopladas. Junto com um algoritmo robusto, o contato é representado por uma superfície mestre – escravo baseada em um algoritmo de busca de um lado com um fator de penalidade K (Figura 1) e uma constante de amortecimento C proporcional a velocidade relativa de ambas as áreas de contato, o que permite que problemas complexos com muitos elementos sejam tratados de modo eficiente e confiável. A simulação de processos de conformação é um dos principais desafios para uma análise MEF não linear, bem como toda a não linearidade concernente a geometria com grandes deslocamentos e rotações, materiais sob grandes deformações e contato com atrito.

2.2. A questão da velocidade

Segundo Haug et al (1991) [2], uma desvantagem potencial das soluções explícitas é sua inerente incapacidade de fornecer uma solução rápida para problemas estruturais. Isto se deve ao fato de que os métodos explícitos operam uma equação dinâmica

$$M\ddot{x} = F \quad (1)$$

Onde M é a matriz de massa (diagonal), \ddot{x} é a aceleração dentro dos graus de liberdade da estrutura e F são as carga externas e as forças de resistência internas. Junto com um algoritmo de solução dinâmica por diferenças centrais condicionalmente estáveis, as velocidades e deslocamentos podem ser calculados em intervalos discretos de tempo, considerando um tamanho estável dos intervalos, os quais estão relacionados com o menor tempo de deslocamento das ondas de tensão elástica entre os pontos de um modelo discreto (velocidade do som no material). Modelos FEM para choque automotivos típicos chegam a tempos de estabilização da ordem de $1 \mu s$, para um evento de 100 ms a simulação poderia requerer até 100.000 etapas. Como pode então uma solução dinâmica explícita ser aplicada

eficientemente a um processo de estampagem? Na maioria dos casos práticos a velocidade do punção pode ser aumentada seguramente por fatores substanciais sem que os efeitos inerciais dos pontos móveis da chapa afetem significativamente os resultados. Estudos anteriores mostraram que velocidades de punções podem chegar a 15-20 m/s ou mais, antes que os efeitos inerciais tenham uma influência nos resultados do processo de estampagem. Portanto, seria possível realizar simulações de estampagem em velocidades ligeiramente maiores que as reais, quando se calcula apenas os efeitos dependentes da velocidade ou efeitos da taxa de deformação são calculados, baseando-se na velocidade real do punção.

2.3. Efeito rampa e amortecimento

Um outro meio de reduzir os efeitos inerciais indesejáveis seria aplicar cargas e velocidades no punção de modo não brusco, mas mediante uma função tipo rampa na elevação da carga com uma escolha cuidadosa das funções de tempo, reduzindo, portanto efeitos espúrios resposta em alta frequência nos dados de saída. Uma aplicação racional do amortecimento interno e externo pode também reduzir tais efeitos e conduzir a uma solução quase estática assintoticamente estável.

3 - CONTATO E ATRITO

Dentre as maiores melhorias em programas de simulação de choque que se fazem necessária para uma simulação bem sucedida de processos de conformação, estão uma descrição adequada do comportamento do material e os fenômenos de contato / atrito entre o blank (chapa) e a ferramenta (punção, prensa-chapas e matrizes). Uma lei de atrito de Coulomb não descreve adequadamente a dependência dos coeficientes de atrito em função da pressão normal, velocidade de deslizamento, etc (Batalha et al. 2000)[3]. Os populares algoritmos de contato com funções de penalidade podem não ser robusto ou exato o suficiente para se chegar a valores estáveis e precisos das pressões de contato, tendo de ser modificados para adicionar termos de amortecimento para o calculo da estabilidade e das áreas, visando resultados precisos da pressão de contato. Pois apenas quando as pressões normais puderem ser calculadas de modo preciso e estável, se pode aproveitar a precisão adicional embutida nas novas leis de atrito. O contato entre as ferramentas e chapa é identificado por meio de algoritmos de busca eficientes. As forças de contato são calculadas com um método de penalidade e força que é equivalente ao sistema mostrado na figura 1. Uma melhoria neste algoritmo seria a consideração da área correta em torno de cada no penetrante, que resulta no calculo mais preciso da pressão de contato ao longo das arestas e malhas não uniformes. Além disto o algoritmo foi refinado pela consideração da espessura real instantânea, que permite com que a estricção do blank causada pelo aumento da pressão possa ser simulada. O algoritmo de penalidade é robusto e pode tratar leis de atrito complexas sem dificuldades. O programa fornece tanto a lei de atrito de Coulomb e como

uma interface para definição de leis gerais de atrito na forma $\mu = f(\sigma_n, v)$, onde μ é o coeficiente de atrito, σ_n é a pressão normal e v é a velocidade de deslizamento.

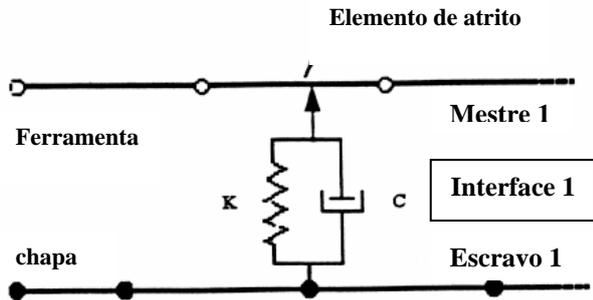


Figura 1. Equivalente mecânico do algoritmo de contato.

3.1 Leis de Atrito

Quando uma descrição exata do comportamento do material surge como requisito para uma simulação de estampagem bem sucedida, uma descrição precisa do comportamento do atrito toma igual importância, uma vez que a natureza das forças tangenciais criadas pelo atrito entre o blank e ferramenta pode ser um fator decisivo para conformabilidade de peças estampadas.

As leis de atrito relacionam uma tensão de contato tangencial τ com a pressão normal de contato σ_n , via um coeficiente de atrito μ , o qual pode também depender da pressão normal de contato σ_n , e a velocidade tangencial de deslizamento v e do lubrificante, temperatura, distância deslizada, direção de deslizamento e deformação da chapa, conforme:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad (2)$$

em princípio $\tau = 0$ para $\sigma_n = 0$ exceto na simulação simplificada de anti-rugas (freios esticadores) com a atrito planar equivalente, onde:

$$\tau_b = \tau_y + \mu \cdot \sigma_n \quad (3)$$

sendo a distância deslizada τ_b criada pela resistência ao dobramento da chapa sobre a matriz. Também $\tau = \tau_y$ tensão de escoamento por cisalhamento e $\mu = 0$ para $\sigma_n \rightarrow \infty$.

4 - LEIS CONSTITUTIVAS DO MATERIAL

O material das chapas é geralmente um aço de grande ductilidade que tem uma certa anisotropia, devida ao trabalho a frio durante o processo de laminação ou devido a tensões residuais. De acordo com Hill (1948) [4] a anisotropia plástica pode tanto ser considerada estacionária (critérios de von Mises / Hill) ou evolucionárias (por exemplo: modelo ICT, da teoria de translação do centro de anisotropia). Ambas as formulações são incorporadas ao programa e destacada abaixo, bem como as hipóteses de encruamento e taxa de deformação.

4.1 Leis de plasticidade do tipo Von Mises e Hill – Funções de escoamento ortotrópica

Quando o material da chapa é considerado com um comportamento plástico ortotrópico normal, então a função de escoamento para estado plano de tensão pode ser expressa por um critério tipo Hill como se segue:

4.1.1. Material ortotrópico

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 2Y^2 \quad (4)$$

Coefficiente de Hill para parâmetro de Lankford $r = 0$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} [2(2 + F - G)\sigma_{22}^2 + 2\sigma_{11}^2 - 2(2 - G)\sigma_{11}\sigma_{22} + N\sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (5)$$

Coefficiente de Hill para parâmetro de Lankford $r = 1$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{P(R+1)}} [R(P+1)\sigma_{22}^2 + P(R+1)\sigma_{11}^2 - 2RP\sigma_{11}\sigma_{22} + (2Q+1)(R+P)\sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (6)$$

4.1.2. Material com anisotropia normal (Lankford > 0)

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{RL+1}} [(RL+1)(\sigma_{22}^2 + \sigma_{11}^2) - 2RL\sigma_{11}\sigma_{22} + (2Q+1)(R+P)\sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (7)$$

onde :

$$\text{Lankford} = RL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RLi \quad (8)$$

4.1.3. Material com anisotropia normal (Lankford = 0)

$$\sigma = [(\sigma_{22}^2 + \sigma_{11}^2) + (\sigma_{11} + \sigma_{22})^2 + 3\sigma_{12}^2]^{1/2} \quad (\text{von Mises}) \quad (9)$$

4.1.4. Comportamento isotrópico: Lankford = 0.

Onde 1, 2 e 3 são as direções axial, transversal e normal de um ensaio com um corpo de prova cortado com um ângulo α em relação a direção de laminação (ou pré - tensão); P, Q e R são os coeficientes de Lankford, onde: $r_\alpha = \epsilon_{22}(\alpha) / \epsilon_{33}(\alpha)$ para ângulos $\alpha = 90^\circ, 45^\circ$ e 0° respectivamente, os quais são determinados por meio de ensaio de tração multiaxial; ϵ_{22} e ϵ_{33} são determinados experimentalmente mediando deformações plásticas verdadeiras transversal e perpendicular do material; σ_{11} , σ_{12} e σ_{22} são as tensões de cisalhamento e normais no plano do material da chapa, (F, G, H, L, M, N) são constantes e σ_{ij} é o tensor de tensões. Um algoritmo de plasticidade baseado nestes critérios está incorporado ao programa de elementos finitos, incorporando uma suposição inicial de que Y é uma função da deformação plástica efetiva ϵ^p e ϵ_0 :

$$\epsilon^p = \sqrt{(2/3 \epsilon_{ij}^p \epsilon_{ij}^p)} \quad (10)$$

sendo ε_{ij}^p é o tensor de deformação plástica. O valor Y pode ser definido tanto via pontos experimental como pela equação de Krupkovski

$$Y = K(\varepsilon^p + \varepsilon_0)^n \quad (11)$$

onde K é o fator de resistência, ε_0 é uma deformação inicial e n é o expoente de encruamento. Estes parâmetros do material podem ser obtidos de curvas de tensão deformação uniaxiais.

4.2. Algoritmo de plasticidade com translação do centro de anisotropia

Uma formulação alternativa do comportamento plástico considerando ortotropia (ou a anisotropia), bem adaptada a chapas metálicas é teoria de translação do centro de anisotropia. Segundo Mazilu et al (1990) [5], esta teoria, o invariante da tensão desviadora da função de escoamento isotrópico translada mutuamente independentemente no espaço de tensões, produzindo translações e distorções da superfície de escoamento, seguindo qualquer pré-deformação. A distorção é devida à anisotropia induzida pela textura do agregado policristalino microscópico. Dentre as tentativas históricas recentes para elaborar modelos de superfícies de escoamento, capazes de descrever a rotação e distorção em adição ao crescimento e translação nas leis de encruamento plástico cinemático e isotrópico convencional, a teoria ICT tem a vantagem de estar formulada com suporte direto de micro plasticidade, mas neste caso será necessário determinar 27 parâmetros do material. De acordo com a teoria da translação do centro de anisotropia (ICT), a função de escoamento de metal pré-deformado a frio tem a seguinte forma:

$$f \equiv E(J_\alpha, K_\beta) - F(L_\gamma) = 0 \quad (12)$$

Aqui os parâmetros J e K são proporcionais ao segundo e ao terceiro invariante do tensor de tensões $S_{ij} = \sigma_{ij} - (1/3)\delta_{ij}\sigma_{kk}$ e apresenta os valores independentes α_{ij} , β_{ij} e γ_{ij} no campo de tensões:

$$J_\alpha = (S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij}) \quad (13)$$

$$K_\beta = \det(S_{ij} - \beta_{ij}) \quad (14)$$

$$J_\gamma = (S_{ij} - \gamma_{ij})(S_{ij} - \gamma_{ij}) \quad (15)$$

$$K_\gamma = \det(S_{ij} - \gamma_{ij}) \quad (16)$$

onde

$$L_\gamma = K_\gamma / J_\gamma^{3/2} \quad (17)$$

Um algoritmo baseado nestas equações foi desenvolvido, onde $E(J_\alpha, K_\beta)$ e $F(L_\gamma)$ são considerados polinomiais. O encruamento e a taxa de deformação são tratados de modo análogo ao algoritmo de Hill, isto é, os parâmetros do modelo ICT são tratados como funções de ε^p .

5 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO INDUSTRIAL

Alguns estudos anteriores foram realizados para avaliar a precisão da simulação via comparação com experimentos [6]. As peças estudadas incluíram geometrias simples de benchmarks (perfis em U, pratos cilíndricos, esféricos e retangulares) bem como componentes mais complexos de carrocerias automotivas, tais como painéis, portas e outros. Os parâmetros de comparação foram a forma da chapa deformada, distribuição de espessuras e deformação, e a história da força de conformação.

5.1. Discretização do modelo

Para realizar esta simulação, tomou-se como exemplo um painel lateral externo de um carro pequeno e uma área de estampagem profunda crítica (Figura 2) para o qual foi implementado um modelo MEF a partir da geometria fornecida. As dimensões da chapa metálica são 250 x 150 mm. Usou-se uma chapa de aço St 1405, um material de uso comum na indústria automotiva. A identificação do material é apresentada na Tabela 1. Um coeficiente de atrito coulombiano, $\mu = 0,1$ foi empregado, caracterizando uma operação de conformação com presença de um filme lubrificante e definido um modelo equivalente de anti-ruga. A carga escolhida foi de 1200 kN para o punção. A ferramenta foi considerada um corpo rígido, descrita por uma malha de 11048 nós para a matriz, 1219 elementos para o prensa chapas e 10023 elementos para o punção. Na obtenção dos resultados, os calculo foram realizados em três estágios diferentes de conformação. O primeiro demonstra o comportamento da chapa após o contato entre matriz e prensa chapas. O segundo demonstra o processo estampagem até que o punção tenha alcançado o topo da matriz e o terceiro corresponde após a análise dos resultados do estágio dois, proceder a correções em algumas áreas que necessitem um refinamento local da malha para melhorar a precisão local da análise.

5.2. Etapas de conformação

Para descrever os modelos foi usado o pré-processador do programa PAM-GENERIS©. Foi preparado um offset a partir do modelo da matriz e do prensa chapas (Figura 3a). O prensa chapas está fixo e amortecido ao solo visando prevenir oscilações dinâmicas indesejáveis e a velocidade é aumentada até um máximo de 10 m/s; O estágio inicial da chapa foi representado por uma malha com 16759 elementos de casca. Para a segunda etapa de conformação, após a ação do prensa chapa, um segundo modelo foi preparado com os dados de saída da etapa 1, considerando neste modelo o punção entrando na matriz (Figura 3b). Por razões de representação o modelo (b) é mostrado aberto, porém considerando o prensa chapas em contato com a chapa metálica pré-conformada. A velocidade do punção no estágio 2 é aumentada até um máximo de 10 m/s. Neste cálculo, o programa de refinamento automático da malha permitiu um limite superior de 30798 elementos para realizar o estágio 2. Na área onde foram detectadas grandes deformações procederam-se refinamentos da malha e as

mesmas seqüências como da etapa 2 foram realizadas novamente (Etapa de conformação 3). A chapa foi refinada até 36000 elementos de casca.

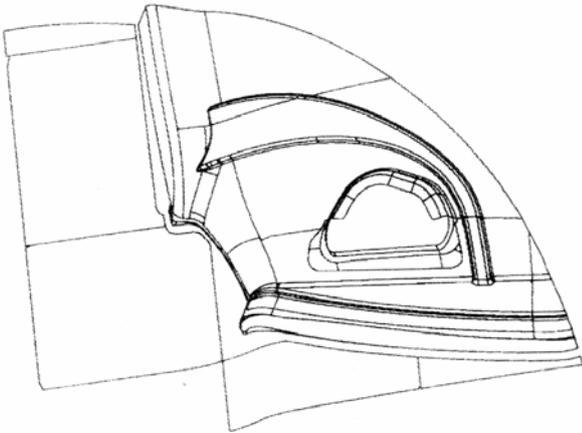


Figura 2. Área crítica de um painel lateral externo de uma carroceria automotiva.

Tabela 1 – Propriedades do material da chapa testada

E [GPa]	210	Coef. de Lankford	
ν	0,30	P	1,8
K	0,5673	Q	1,5
ϵ_0	0,0073	R	2,3
n	0,264	μ_{db}	0,1
Espessura da chapa [mm]	1,00		

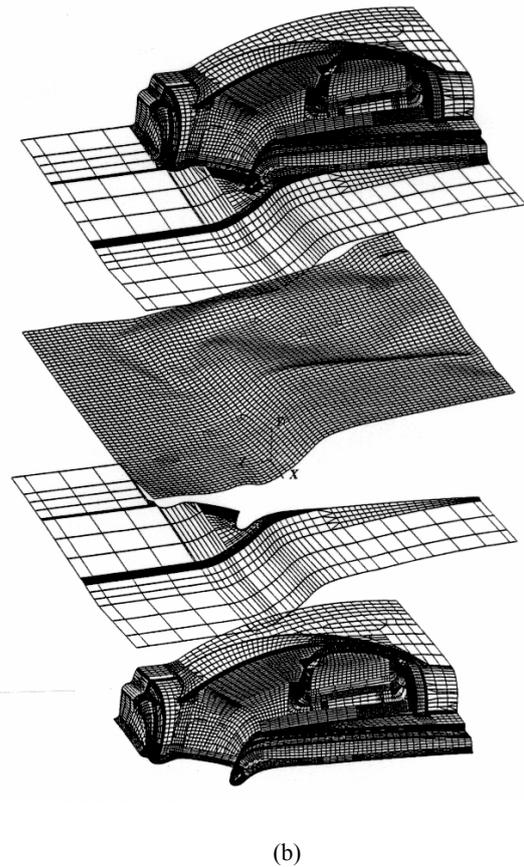
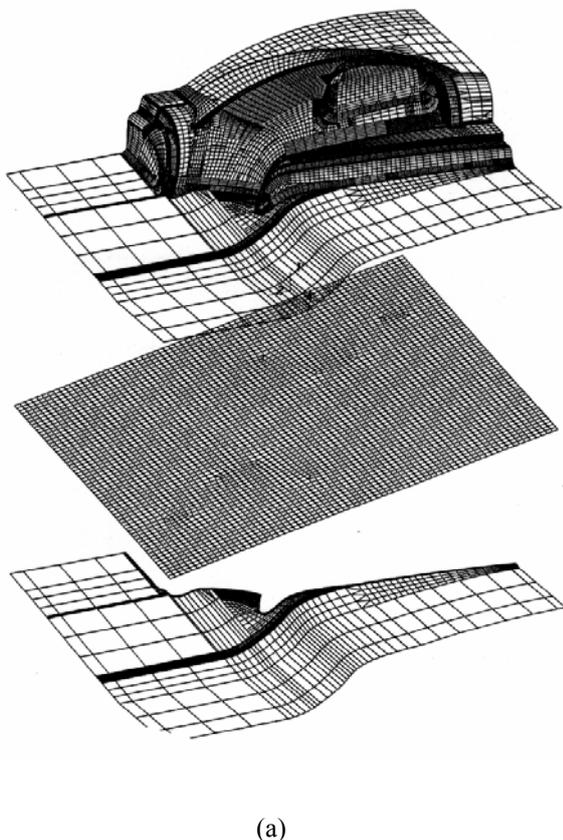


Figura 3. Modelos de discretização das etapas 1 e 2.



5.3. Resultados da simulação

Após a simulação do estágio 1 (Figura 3.a) já se pode notar a capacidade de simulação do enrugamento da chapa sobre o prensa chapas, devido à baixa pressão de prensa chapas. Aqui pode se ver também a direção indesejada da chapa pré-conformada contra o punção que pode levar a um comportamento indesejado da chapa dentro da ferramenta. Não se deve esquecer que esta é a superfície da peça, e, (portanto um maior nível de qualidade superficial é requerido por razões de pintura). Na figura 4 pode se avaliar a distribuição de deformações sobre a peça e na figura 5 o diagrama limite de conformação correspondente é exibido visando determinar os pontos críticos onde as deformações plásticas estão plotadas junto com o critério de deformação, isto é, a tendência à formação de pontos de rasgamento. Um critério muito importante para esta avaliação é o diagrama limite de conformação (curva FLD), onde cada elemento finito é representado com sua respectiva deformação principal. Todos os pontos acima do limite de conformação representam pontos de ruptura por rasgamento durante o processo de estampagem. Na figura 6 a distribuição de espessuras é mostrada. Em duas áreas a espessura mínima decresce de 0,48 o que leva a uma alta probabilidade de ruptura por rasgamento no local. Neste local é necessário um refinamento da malha para melhorar a precisão da análise local (Etapa 3, figura 7). Considerando os resultados do cálculo do fluxo de material

e a falha na chapa estão em boa concordância com os resultados experimentais. Os resultados mostram que uma comparação entre os valores simulados e os medidos experimentalmente (Figura 8), foram encontrados nas mesmas áreas críticas.

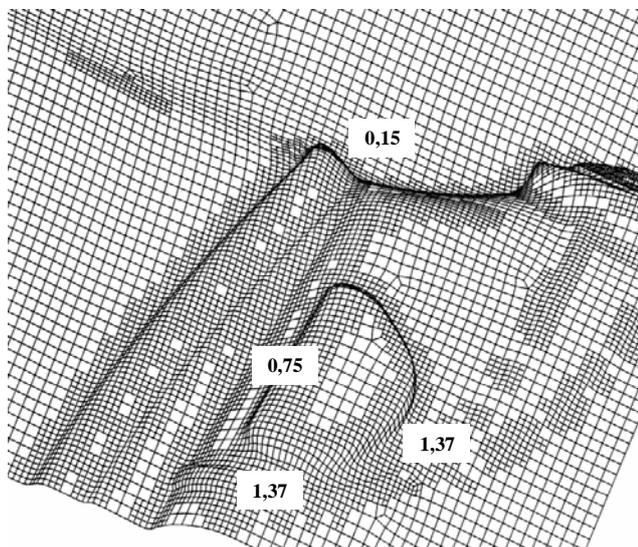


Figura 4. Distribuição de deformações (etapa 2)

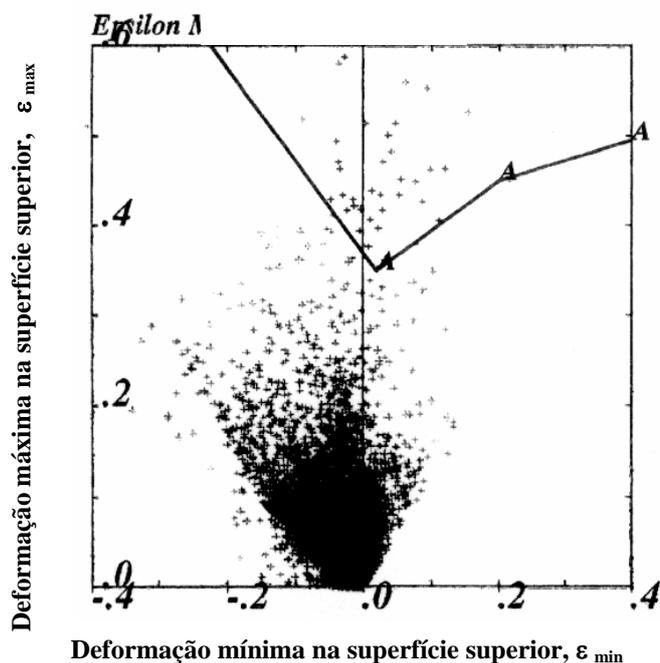


Figura 5. Diagrama limite de conformação

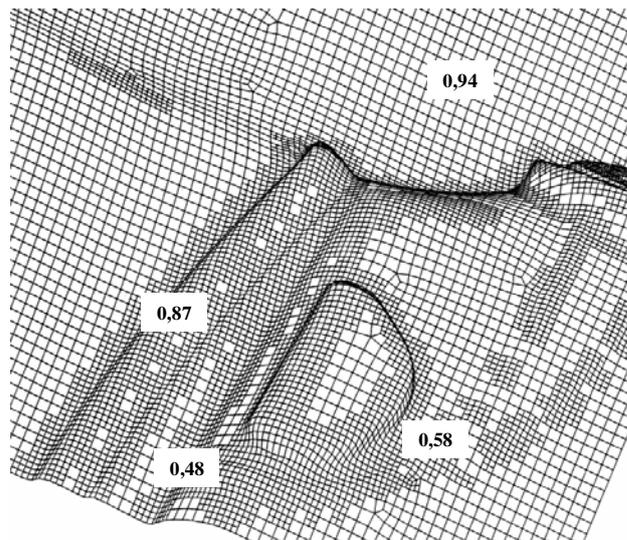


Figura 6. Distribuição de espessuras após a segunda etapa de conformação. (etapa 2)

5.4. Otimização do ferramental

Os critérios para uma espessura limite foram atingidos, devido ao elevado coeficiente de atrito entre o punção e prensa chapas. Uma modificação da geometria na área crítica pode ser predita. Neste caso uma modificação do raio da ferramenta (Figura 7) foi recomendada, visando melhorar a distribuição de espessuras e deformações. Após as modificações, uma nova simulação foi realizada. Nas áreas críticas foram calculados as espessuras mínimas de 0,71 mm (Figura 7) e o enrugamento e rasgamento (veja peça estampada na figura 8) foi evitado.

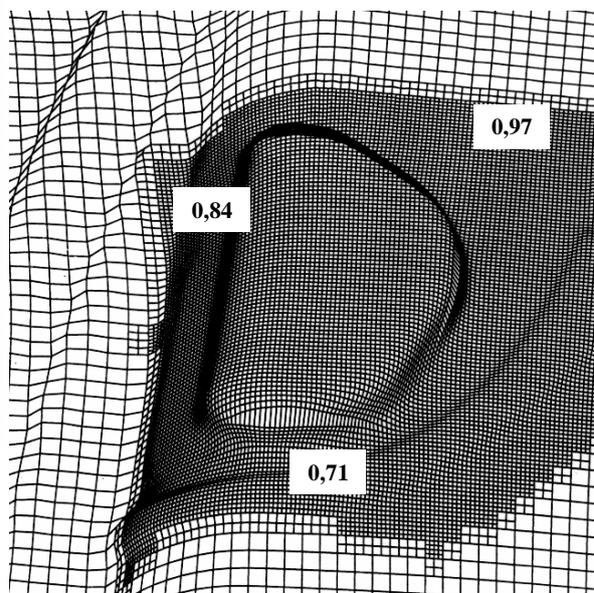


Figura 7 Distribuição de espessuras após etapa 3.

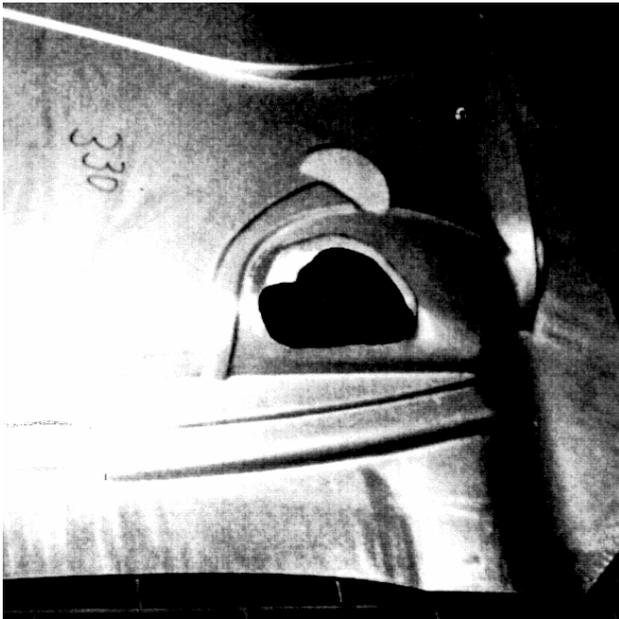


Figura 8. Protótipo da peça prensada.

6 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Analisou se uma aplicação prática de simulação e comparação dos resultados experimentais de processos de conformação de peça automobilística, neste sentido a tendência futura de melhoria do processo de simulação pode ser:

- Estabelecimento do melhor contorno para o blank inicial da peça.
- Otimização da geometria da ferramenta,
- Melhoria do processo pela otimização do fluxo de material.

- Calculo da distribuição de espessuras da chapa.
- Calculo da deformação plástica equivalente.
- Indicação de falha (rassamento ou enrugamento)
- Trabalhando neste caminho, a simulação de processos de estampagem profunda pode se tornar uma ferramenta comparativa para otimização e para estudar a influencia da variação dos parâmetros do processo. Com o aumento da experiência e melhoria dos modelos teóricos e práticos, as simulações de processos de conformação tornam-se uma ferramenta poderosa para a redução do tempo de desenvolvimento e dos custos e melhoria da qualidade.

7 - REFERÊNCIAS

- [1]HEATH A.N., PICKETT A.K. E ULRICH, D. 1993, "Development of Industrial Sheet Metal Forming Process Using Computer Simulation", *Proc. Dedicated Conference on Lean Manufacturing in Automotive Industries*, Aachen, Alemanha, 1993
- [2]HAUG E., PASCALE E.DI, PICKETT A.K., ULRICH, D. ESI: 1991, "Industrial Sheet Metal Forming Simulation Using Explicit FE-Methods", *VDI Bericht* n. 894, Alemanha.
- [3]BATALHA, G. F. & STIPKOVIC FILHO, M., 2000, "Estimation of contact conditions and its influences on the interface_friction in forming processes", in: M. Pietrzyk et al. (Eds.), *Metal Forming 2000*, Balkema, Rotterdam, pp. 71-78.
- [4]HILL, R. 1948, "Theory of Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", *Proc. Roy. Soc.. A* 193,
- [5]MAZILIU, LUO S. E KURR, J., 1990, "Anisotropy Evolution by Cold Prestrained Metals Described by ICT-Theory". *J. of Material Processing Technology*, V. 24, pp.303-11.
- [6]DAMOULIS G. E KLEINHANS U. 1996, "Simulation of Sheet Metal Forming Using a FEM Program as Integrated Tool in the Car Body Development". *Proc. V International Mobility Technology Conference and Exhibition*, São Paulo, Brasil