

CORRELAÇÃO ENTRE A MODELAGEM NUMÉRICA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA ANÁLISE DO DANO NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO A FRIO ¹

Antônio Alves Machado ²
Jánes Landre Junior ³

Resumo

Verificar a acuracidade da aplicação do método de elementos finitos no levantamento do dano envolvido no processo de conformação a frio quando confrontado com dados experimentais de campo. O trabalho contará com as etapas de análise experimental e numérica, sendo que a última será desenvolvida pelo método dos elementos finitos (software DEFORM). Serão coletados e verificados os dados de geometria nas diversas etapas do processo, seguido de pesquisa, identificando a região e a etapa em que ocorreu. De posse dos dados experimentais, as medidas da geometria permitirão o ajuste dos modelos numéricos, quanto à malha e coeficiente de atrito. Com isto, são pesquisados os dados obtidos pelo estudo numérico e confrontado com a fase experimental. Como resultado, pretende-se validar o método numérico bem como avaliar a influência dos parâmetros de entrada necessários à simulação computacional.

Palavras-chave: Conformação; Elementos finitos; Dano.

CORRELATION AMONG NUMERIC SIMULATIONS AND THE TEST SPECIMEN IN THE ANALYSIS OF THE DAMAGE IN THE COLD FORMING PROCESS

Abstract

The purpose of this work is verify the acuity of the application of the method of finite elements in the rising of the damage involved in the cold forming process when confronted with experimental data. The work will count with the stages of experimental and numeric analysis, and the last will be developed by the method of the finite elements (software DEFORM). These data will be collected and verified the geometry data in the several stages of the process, followed by research, identifying the area and the stage in that happened. Of ownership of the experimental data, the measures of the geometry will allow the adjustment of the numeric models, with relationship to the mesh and friction coefficient. With this, they are researched the data obtained by the numeric study and confronted with the experimental phase. As result, intends to validate the numeric method as well as to evaluate the influence of the necessary entrance parameters to the computational simulation.

Key words: Cold-forming; Finite elements; Damage.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de Julho de 2007, Vitória – ES, Brasil

² Engenheiro Mecânico, Acument Global Technologies

³ Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG (2001)

1 INTRODUÇÃO

A Multiplicidade de produtos exigida pelo mercado ou as diferentes opções por um determinado produto, vêm paulatinamente obrigando as empresas a se ajustarem no sentido de ter cada vez mais flexibilidade com o mínimo de custo possível. Isso as obrigou a passarem por mudanças radicais, iniciando pelas máquinas, que até então eram construídas para grandes séries e até mesmo para operações específicas. A constante busca da diminuição dos tempos de produção associada ao avanço tecnológico, fez com que fosse desenvolvido o processo de forjamento a frio.

A fabricação consiste na deformação a frio de fio metálico em bobina. A grande produtividade desse processo, a economia de material e a qualidade das peças obtidas, fazem do processo a frio um procedimento muito econômico.

O forjamento é o termo genérico usado para descrever a aplicação prática da deformação plástica de diversos metais dentro de uma enorme variedade de formas controladas tecnicamente. O material é forçado a fluir dentro de preformadoras sobre o impacto de punções, admitindo assim a forma da matriz a qual foi submetida. Dependendo da forma desejada, a sua conformação requer vários estágios, sendo que cada estágio é responsável por uma parte da deformação. O forjamento difere de outros métodos convencionais de conformação, por se tratar da deformação do material que flui por vezes em diferentes direções, fazendo-se necessário, portanto, uma combinação de avanços, regressos e extrusões sucessivas de uma única operação, necessárias a se obter a forma desejada.



Figura 1. Seqüência de deformação de parafuso

Todos os materiais são capazes de se deformar plasticamente. Para que isso ocorra, é necessário aplicar uma força que exceda o ponto de deformação permanente do material. A força empregada para a deformação plástica deve ser limitada entre o ponto de deformação permanente e a tensão de ruptura do material. Se a tensão de ruptura for excedida o material irá se romper.

Esta indesejada operação pode ser minimizada ou evitada por um forjamento mais preciso que resulte em um menor número de operações e um menor custo operacional. No entanto, a obtenção da seqüência de produção ideal é complicada e muitas vezes obtida através de métodos empíricos, o que leva a realização de muitos testes e ajustes, que tornam o projeto caro e dependente dos recursos humanos muitas vezes não disponíveis.

Conseqüentemente não há um teste definitivo a fim de se avaliar convenientemente a conformabilidade dos metais. Uma das restrições mais severas da conformação a

frio é a limitação imposta pela plasticidade do material. Um método científico baseado em princípios da conformação a frio se mostra necessário na prevenção destes problemas.

Por isso a escolha do método ou teste se mostra importante para se avaliar a conformabilidade do material. Com o advento dos métodos numéricos, especificamente aqueles baseados no método de elementos finitos para grandes deformações, tem sido possível com relativo sucesso, a análise do processo de forjamento a frio bem como sua otimização ainda na fase de projeto.

Neste trabalho iremos usar para a avaliação da conformabilidade do material, o teste de compressão cujos resultados serão discutidos a seguir.

2 MATERIAL

A matéria-prima utilizada neste trabalho foi fio-máquina produzido através de lingotamento contínuo, laminação de barra e, em seguida, trefilação e fosfatização para a dimensão de 16,80mm de diâmetro. As análises químicas das ligas foram obtidas em espectrômetro ótico de emissão e Leco. Os elementos químicos carbono e enxofre foram analisados no Leco a partir de limalhas obtidas com brocas de 3/16" retiradas no fio-máquina de 16,80mm.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 1038

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Cu	%B
0,409	0,270	0,920	0,017	0,004	0,280	0,07	0,030	0,029	0,140	0,000

Fonte: Aços Villares

Método Químico Utilizado:

Carbono: NBR 5604

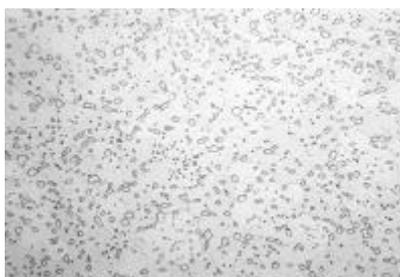
Manganês, Cromo: Espectrometria de Absorção Atômica

Molibdênio: Espectrometria UV – Visível

Tamanho do Grão Austenítico: 6/8

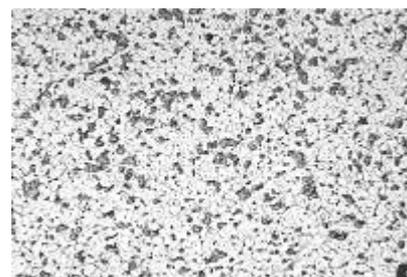
Limite de resistência: 59,5 / 61,5 kgf/mm²

Redução de Área: 73,7%



Fonte: Acument Global Technologies

Figura 2. Estrutura de Esferoidização Anelada



Fonte: Acument Global Technologies

Figura 3. Granulação Fina

As amostras para análise metalográfica foram cortadas no sentido perpendicular à direção da laminação. Essas amostras foram fresadas e, posteriormente, polidas em lixas com granulometrias de 180, 240, 320, 400, 500, 600 e 1000 mesh. Em seguida, foi feito polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta diamante com dimensões 7, 3 e 1 μm . Após o polimento de acabamento, as amostras foram analisadas sem ataque em microscópio ótico e microscópio eletrônico de varredura, marca Jeol e tensão de 20kV. Essas amostras foram analisadas em microscópio

ótico, marca Leitz, com aumento de 200X. As inclusões foram observadas sem ataque, em microscópio ótico.

Para análise da microestrutura, essas amostras foram atacadas com nital 5%. Utilizou-se o software Quantikov para determinação da porcentagem volumétrica de perlita e ferrita, bem como diâmetro médio de grão (Figuras 2 e 3).

Foi feito ensaio de microdureza Vickers em microdurômetro, marca Leitz, carga de 100gf.

3 MÉTODO

3.1 Critério para Análise da Conformabilidade

O dano do material é o processo físico progressivo pelo qual ele se rompe e a mecânica do dano é o estudo destes mecanismos quando o material é submetido a cargas.⁽¹⁾

- a) O acúmulo de micro-tensões nas vizinhanças dos defeitos ou na interface dos pontos de ruptura, ambos em micro-escala;
- b) A propagação de trincas pela estrutura do material;
- c) O crescimento desta trincas em macro-escala.

Os itens (a) e (b) podem ser estudados por meio de variáveis de dano da mecânica do contínuo. O item (c) é normalmente estudado pela mecânica da fratura.

Existem várias literaturas que sugerem diferentes modos de se calcular os valores críticos do dano afim de se descobrir o momento em que se inicia o surgimento de trincas no material. Porém a idéia básica de todos os modos sugeridos é a mesma, encontrar um número que expresse o valor crítico alcançado pelo material. O valor crítico ao qual fratura inicia varia substancialmente de material a material, e pode variar até mesmo para um determinado material com tratamentos térmicos diferentes.

O critério de dano pode ser dividido em dois tipos:

- a) Fratura instantânea
Procura-se um certo valor crítico de um dos parâmetros de processo para se detectar iniciação da trinca.
- b) Fratura integral
São desenvolvidos levando-se em conta a história do material. A maioria destes critérios integra o valor particular em relação à tensão.

3.2 Critério de Dano Usando Modelos Empíricos e Semiempíricos

O critério habitualmente utilizado para se avaliar a fratura dúctil é baseado nas combinações de tensão e deformação ou taxa de deformação. O critério de tensão deformação seja ele empírico ou semi-empírico, é baseado no trabalho “Deformação Plástica por Unidade de Volume” de Freudenthal.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}^f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_i$$

onde $\bar{\sigma}$ é a tensão efetiva, $d\bar{\varepsilon}$ é o incremento da deformação efetiva e $\bar{\varepsilon}^f$ é a deformação efetiva da fratura.

C_i , onde i : 1, 2, 3,..... são valores críticos, calculados usando este critério.

Devido a importância da tensão principal, Cockcroft e Latham sugeriram um critério de fratura alternativo baseado em um valor crítico da energia de tensão elástica por unidade de volume.⁽²⁾

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}^f} \bar{\sigma}_1 d\bar{\varepsilon} = C_2$$

onde $\bar{\sigma}_1$ é a tensão principal

A versão normalizada deste critério pode ser escrito como:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}^f} \frac{\bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} = C_3$$

Uma dependência entre a tensão principal, σ_1 , e a tensão hidrostática, σ_m , foi proposto por Brozzo por meio de uma modificação empírica do processo acima mencionado.⁽³⁾

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}^f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_m)} d\bar{\varepsilon} = C_4$$

Finalmente, o critério de dano sugerido por Ayada é:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}^f} \frac{\sigma_m}{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_5$$

3.3 Critério De Dano Aplicado Ao Método De Elementos Finitos

Em simulações realizadas através do método de elementos finitos, várias etapas são analisadas. Para cada etapa, taxa de deformação, tensão, deformação e outros parâmetros como dano são calculados.

Se ocorrer uma distorção muito grande, uma nova malha pode ser gerada e a partir da malha antiga os dados são interpolados para a nova malha. Considerando que alguns dados podem ser perdidos em virtude à perda de volume ou efeitos de arredondamento, o objetivo é controlar este número de mudanças e usar um número limitado de criação de novas malhas.

Neste estudo foi utilizado o programa DEFORM 2D Versão 8.1, para se modelar os corpos de prova. O DEFORM é um dos softwares comerciais de elementos finitos, em que o critério de dano está implementado. Há diferentes modelos de dano implementados no DEFORM. Há também a possibilidade de escrever sub-rotinas que possam implementar o nosso próprio modelo. Os modelos disponíveis no DEFORM são:

- Cockcroft & Latham
- Cockcroft & Latham normalized
- McClintock
- Freudenthal
- Rice & Tracy
- Oyane
- Ayada
- Brozzo
- Maximum effective stress / ultimate tensile strength

Estes critérios são utilizados em vários estudos para calcular o valor crítico do dano em que se inicia a trinca.

3.4 O Dano Segundo O Deform

Dano geralmente se relaciona à probabilidade de fratura em uma peça. A definição específica de dano é dependente no método de cálculo usado. Dano é um bom indicador de que a peça poderá apresentar uma fratura durante o forjamento. Porém, deveriam ser usados componentes de tensão para análise de fratura de uma peça e/ou matriz. Dano, particularmente o modelo de Cockcroft-Latham (o modelo de dano padrão do DEFORM), tem se mostrado um bom indicador para certos tipos de fratura dúcteis para peças forjadas a frio (Trincas devido a deformação por estiramento, como “chevron” ou trincas de superfície que aparecem durante o processo de extrusão, ou trincas superficiais que aparecem em peças que sofrem operações de recalque). O valor de dano ao qual fratura inicia varia substancialmente de material para material, e pode variar até mesmo para um determinado material, com tratamentos térmicos diferentes. Porém, para um determinado material com um tratamento térmico definido, o valor de dano crítico a fratura é razoavelmente repetível.

Pode ser usado valor de dano de dois modos:

1 . Avaliando-se alternativas: Na solução de trabalhos em que a fratura é conhecida ou na análise de um trabalho em que há suspeita em que a fratura é um risco potencial. Várias alternativas podem ser analisadas através do DEFORM. A alternativa com o mais baixo valor de dano é a melhor alternativa por minimizar a probabilidade de fratura.

2 . Comparando-se um projeto com um valor crítico conhecido. Podem ser calculados valores de dano críticos de experiências anteriores com um determinado material em uma peça, em que a fratura é conhecida. Através da simulação do processo que já se sabe que apresentará uma fratura no DEFORM pode-se modelá-lo de forma a se obter a forma desejada sem que ocorra a tão indesejada fratura na peça. Através da simulação no DEFORM torna-se possível a máxima deformação sem que ocorra a fratura na peça. O ideal é que tenhamos um processo que: não ocorra a fratura, porém estas podem acontecer ocasionalmente. Sendo assim, conhecendo-se o valor crítico, projeta-se um processo cujo valor crítico fique ainda cerca de 10 a 20% abaixo do máximo obtido na simulação, como forma de se precaver, contra o aparecimento de trincas.

3.5 Teste de Compressão

Se o teste de tração nos fornece o valor mais baixo da conformabilidade do material, o teste compressão nos permite encontrar os valores de tensão mais altos.⁽⁴⁾

O teste consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico a uma força de compressão entre duas superfícies paralelas e planas com a superfície sem qualquer espécie de lubrificante.

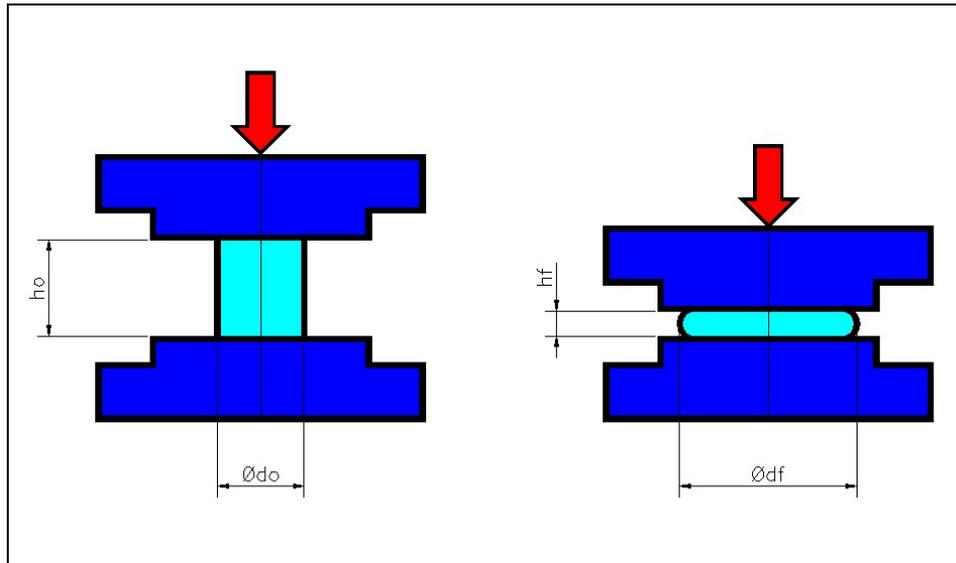


Figura 4. Esquema do teste de compressão

a deformação verdadeira é obtida através da equação,

$$\varepsilon(f) = \ln \frac{h(f)}{h_o} < 0$$

onde, $h(f)$ é a altura atual do corpo de prova correspondente ao qual é aplicado a carga F . Que pode ser escrito como:

$$h(u) = h_o - u$$

onde, u é a variação da altura do corpo de prova.

O valor da tensão verdadeira pode ser calculada levando-se em conta a força F e a redução da altura u do corpo de prova.

$$\sigma_f(u) \approx \frac{F(u)}{\pi r^2(u)}$$

4 RESULTADOS

Corpos de prova de diferentes geometrias são usados para testes de compressão para criar estados de tensão diferentes. Lubrificação não é usada para aumentar o embarrilhamento dos corpos de prova, de forma que o aumento de forças de tração no equador dos corpos de prova acelera a formação de trincas de superfície.

Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova

FORMA	CILÍNDRICO	FLANGEADO	ABAULADO
H (mm)	18,00	18,00	18,00
h (mm)	-	8,00	8,00
D (mm)	16,00	16,00	16,00
d (mm)	-	12,00	12,00

Corpos de prova cilíndricos, flangeados e abaulados são comprimidos usando-se uma prensa hidráulica Sack & Kiesselbach de 600 Tons. Os corpos de prova são comprimidos até:

- As trincas serem visíveis a olho-nu;
- O limite da carga da prensa ser excedida sem que ocorra a trinca.

Um dos problemas que surgem nos testes para se determinar o dano é se determinar o momento exato e o local em que a trinca irá surgir na superfície do material. A exata detecção do dano do material por métodos óticos consome um determinado tempo. Por isso a carga deve ser aplicada passo a passo com o objetivo de se determinar o momento em que a trinca se inicia.

Durante o ensaio de compressão o operador da prensa pode perceber o início da trinca através de uma leve variação na carga aplicada. Mas esta variação não pode ser relatada graficamente ou mesmo passível de ser detectada por algum meio digital. A fim de se diminuir o possível erro causado pela detecção tardia do início da trinca, a carga é aplicada lentamente causando uma variação mínima na altura do corpo de prova.



Figura 5. Corpos de prova submetidas ao teste de compressão

4.1 Modelamento no Deform

O passo seguinte ao teste de compressão é a análise pelo método de elementos finitos. Com o auxílio do AutoCAD os corpos de prova foram modelados e em seguida simulados no software DEFORM.

Tabela 3. Configurações da simulação no DEFORM

Opções do Modelamento	Software	DEFORM 3D V8.1
	Método de iteração	Newton Raphson
	Tipo de material dos corpos de prova	Plástico
	Tipo de material das matrizes	Rígido
	Taxa de convergência	Erro limite da força: 0,01 Erro limite da velocidade: 0,001
	Número de elementos na malha	50000
	Remesh	Automática quando a distorção de um elemento é severa e também a cada 20-30 passos
	Número de passos	175
	Tempo por passo	0,01 s
	Velocidade do punção	1 mm/s
Controle do contato	Modelo de atrito	Shear
	Coefficiente de atrito	0,12
	Velocidade relativa de deslizamento	Default
Material	Cilíndrico Flangeado Abaulado	corrigido (efeito do atrito eliminado) curva de compressão
	Módulo de elasticidade	210.000 Mpa
	Coefficiente de Poisson	0,3

5 DISCUSSÃO

O ponto onde, no modelamento, o valor do dano se aproxima do máximo, foi relacionando com os dados experimentais obtidos com os ensaios de compressão. Tal critério então se mostrou confiável na prevenção do surgimento de trincas na região crítica da deformação. Todo o critério utilizado nos cálculos do dano se mostrou satisfatório para todas as geometrias utilizadas.

Ao se proceder com o teste de compressão, pode-se posteriormente reproduzi-lo através da simulação através do método de elemento finitos encontrando assim o valor do dano através do método Cockcroft & Latham.⁽⁵⁾ Conhecido este número, é possível, portanto, aplicá-lo a simulações afins com o objetivo de minimizar ou precaver o aparecimento de trincas.

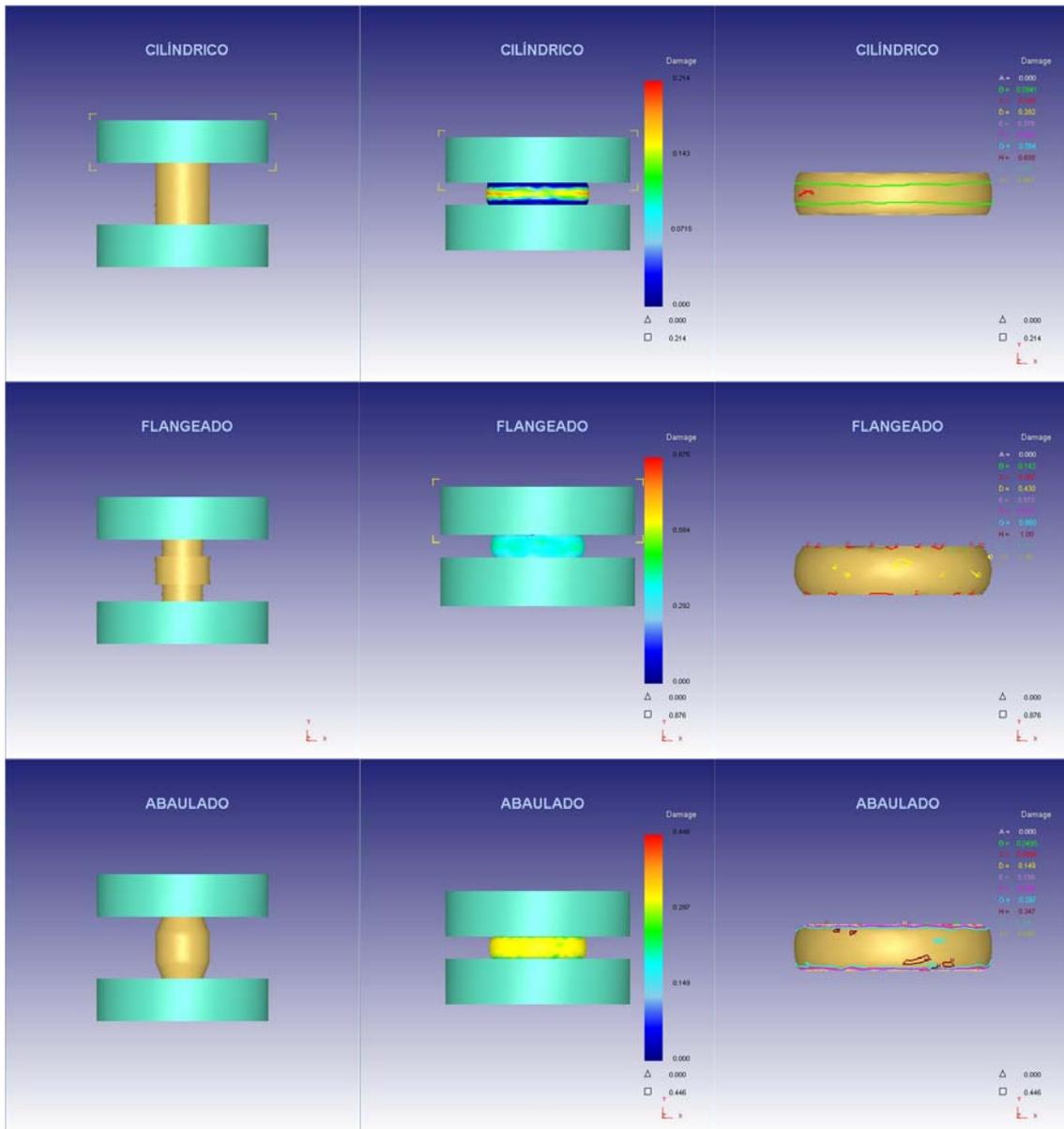


Figura 6. Simulações do software DEFORM

6 CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi de se tentar estabelecer uma relação entre o teste prático de compressão e modelamento matemático através do método de elementos finitos, onde pôde-se identificar um método consistente, onde os resultados conseguidos venham de fato se tornar cada vez mais uma ferramenta de maior acuracidade na prevenção do aparecimento indesejável de trincas durante o processo de forjamento a frio.

Porém, abre-se um espaço para um posterior aprimoramento e um desenvolvimento deste trabalho. Uma complementação deste, seria a implementação de demais métodos matemáticos de estudos do aparecimento de trincas, a fim de se confrontar os resultados e tornar cada vez mais eficaz o modelamento matemático.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ACUMENT Global Technologies do Brasil – Contagem – MG, por terem dado suporte significativo na utilização de seus equipamentos e laboratórios na realização dos ensaios práticos bem como do uso de seus recursos de informática na realização das simulações numéricas.

REFERÊNCIAS

- 1 J. Lema.Ktre, A Course on Damage Mechanics, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1996.
- 2 M.G. Cockcroft, D.J. Latham, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Metals 96 (1968) 33.
- 3 J. Landre et al. On the utilisation of ductile fracture criteria in cold forging, Finite Elements in Analysis and Design 39 (2003)
- 4 Lange K., 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill
- 5 T. Altan, S.OH, H. Gegel, Metal Forming Fundamentals and Applications, ASME Press, OH, 1983.