

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE FORJAMENTO A FRIO

Ricardo do Prado¹; Valesca Correa Alves²; Luiz Eduardo do Patrocínio Nunes³

Resumo

A conformação mecânica está presente em vários processos industriais e classificam-se em diversas categorias com base em critérios como: o tipo de esforço que provoca a deformação do material, a variação da espessura da peça, o regime de operação de conformação, a temperatura de trabalho, e o propósito da deformação. Com a evolução tecnológica muito tem se utilizado das simulações virtuais visando obter resultados mais rápidos, confiáveis e econômicos, destacando o Método dos Elementos Finitos (MEF) que considera a região de solução do problema formada por pequenos elementos conectados entre si, onde a região em estudo é analiticamente modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos. Esse trabalho utiliza métodos de modelagem e simulação com Elementos Finitos na conformação mecânica de peças visando à redução de custos e otimização do projeto.

Palavras-chave: Conformação Mecânica, Elementos Finitos, Forjamento a Frio, Modelagem e Simulação.

Abstract

The mechanical conformation is present in many industrial processes and are classified into several categories based on criteria such as: the type of stress that causes the deformation of the material, the relative variation of the thickness of the part, the scheme forming operation, the temperature work, and the purpose of deformation, with technological progress also has used faster computational simulations due to more rapid, reliable and economical results, highlighting the Finite Element Method (F.E.M.) considers the field of solution of the problem formed by small elements connected to each other, where the region under buy studies are modeled analytically or approximated by a set of pre-defined discrete elements, This work uses modeling and simulation methods with finite element in metal forming parts in order to reduce costs and design optimization.

Keywords: Mechanical Forging, Finites Elements, Cold Forging, Modeling and Simulation.

Introdução

Os processos de conformação mecânica alteram a geometria do material através de forças aplicadas por ferramentas adequadas que podem variar desde pequenas matrizes até grandes martelos. A conformação mecânica está presente em diversos processos industriais visando à obtenção do metal na forma desejada e melhoria de suas

¹ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica; E-mail: rickar10@ig.com.br.

² Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho-Unesp; professora da Pós-Graduação em de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté; E-mail: valesca.correa@unitau.com.br.

³ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho-Unesp; professora da Pós-Graduação em de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté; E-mail: luiz@unitau.br.

propriedades mecânicas. O número de diferentes processos unitários de conformação mecânica, desenvolvidos para aplicações específicas, atinge atualmente algumas centenas, sendo possível classificá-los em categorias, com base em critérios como: o tipo de esforço que provoca a deformação do material, a variação relativa da espessura da peça, o regime de operação de conformação, a temperatura de trabalho, e o propósito da deformação (BRESCIANI et al., 1985).

O desenvolvimento dos recursos de computação nas últimas décadas resultou em um avanço significativo nas mais diversas áreas do conhecimento. A produção de computadores com maior poder de processamento e custo reduzido, torna viável a utilização de modelos sofisticados para análise e solução de problemas complexos. O progresso tecnológico no campo da computação torna possível a obtenção de recursos gráficos, ambientes virtuais e novas possibilidades de aplicações práticas, em várias áreas surgem a cada ano (LAGERGREN, 2002). Dentre elas a modelagem e a simulação computacional, que são ferramentas capazes de reproduzirem diversos processos e estimar os seus respectivos resultados com um nível de precisão muito próximo dos valores obtidos em uma situação real de trabalho. Com a modelagem correta, os problemas podem ser otimizados com ferramentas de CAD (Computer Aided Drawing) para a definição das geometrias, e com o uso de ferramentas de CAE (Computer Aided Engineering), onde é possível simular a realização do processo de conformação mecânica visando à prevenção de possíveis falhas no projeto ou durante o processo de fabricação.

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a utilização de ferramentas computacionais com a finalidade de simular um processo de conformação mecânica de um determinado produto através do M.E.F. (Método dos Elementos Finitos), obtendo como resultados a extinção do método empírico de tentativa e erro, geralmente praticado durante o desenvolvimento de novos produtos, e as sucessivas correções de ferramentas que ocorrem neste processo; e concluindo que são justificáveis os altos custos dos investimentos em softwares avançados de engenharia como sendo mais uma ferramenta para a redução dos desperdícios de: matéria prima, tempo de projetos e processos.

1 Revisão de Literatura

1.1 Conformação mecânica

Os processos de manufatura de produtos metálicos são classificados dentro de seis principais grupos: fundição, conformação mecânica, usinagem, soldagem, tratamento térmico e tratamento superficial (BRESCIANI et al., 1985).

Dentre esses processos, destaca-se o grupo de conformação mecânica no qual um componente simples como um tarugo ou uma chapa metálica, por exemplo, é plasticamente conformado entre as ferramentas (matriz ou estampo) para que se obtenha a configuração final desejada. Portanto, um componente de geometria simples é transformado num outro de geometria complexa, conformado por ferramentas que guardam a geometria desejada e aplicam pressão ao material metálico deformando-o (BRESCIANI et al., 1985).

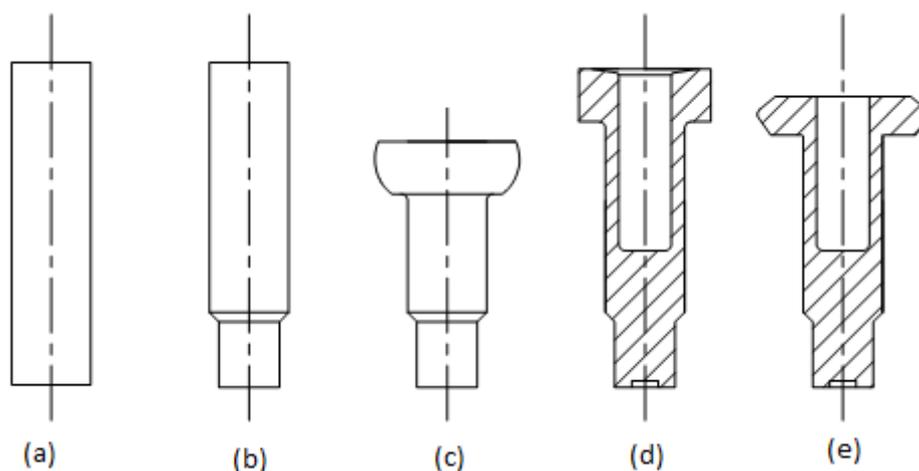
1.2 Forjamento a frio

De acordo com Button, et al., (1995), o processo de forjamento a frio é denominado um processo de conformação plástica, ou seja, que ocorre no campo plástico da liga metálica, sem remoção do material. Segundo Regner e Schaeffer (1983) a designação a frio refere-se ao fato de que durante o processamento, o material conformado encontra-se em temperaturas que não provocam seu recozimento. Assim, os produtos forjados a frio apresentam-se encruados, com um nível de resistência mecânica elevado.

1.3 Tipos de processos de forjamento

O forjamento a frio de peças de aço consiste de dois processos básicos: o recalque e a extrusão. No recalque, a área da seção transversal da peça forjada é aumentada durante o processo, por meio de esforços de compressão que promovem o escoamento radial do material forjado, já na extrusão, a área da seção transversal do forjado é reduzida ao ser empurrada através de uma ferramenta (matriz) que define as dimensões e a geometria da seção do produto (BUTTON, et al., 1995). Conforme a representação da Figura 1: (a) tarugo, (b) extrusão, (c) recalque, (d) extrusão inversa e (e) recalque final.

Figura 1 - Representação das operações de conformação a frio



Fonte: Lange, (1985).

1.4 Limitações do processo

Respeitadas as limitações impostas pelo equipamento e pelas ferramentas, deve-se considerar as características específicas do processo que restringem a obtenção dos produtos forjados.

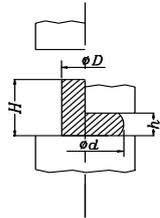
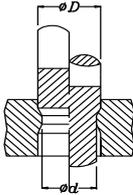
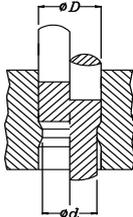
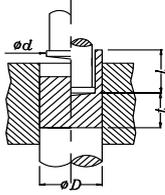
No recalque há duas limitações principais: uma relacionada com as dimensões do tarugo e outra com a máxima deformação possível (BUTTON, et al., 1995).

A esbeltez do tarugo, ou seja, a razão entre a sua altura e seu diâmetro é limitada pela possibilidade de flambagem do tarugo.

No caso da extrusão aberta, o limite da redução de área deve-se a duas restrições: a possibilidade de recalque do tarugo à frente da matriz no caso de tarugos curtos e a possibilidade de flambagem do tarugo do início da extrusão no caso de tarugos longos. Para a extrusão confinada (direta ou inversa), a limitação de redução de seção deve-se principalmente às elevadas tensões desenvolvidas durante o processo que transmitidas às ferramentas podem causar sua falha, mesmo que essas ferramentas sejam adequadamente dimensionadas e reforçadas. Nesse caso, a lubrificação eficiente da interface tarugo-ferramenta promove a redução dessas tensões, a elevação da vida útil do ferramental e possibilidade de aumento da redução de seção (VILLAS BÔAS, 1999).

A Figura 2, apresenta os valores limites de deformação para as operações de extrusão direta livre e confinada, indireta para o recalque a frio de peças cilíndricas.

Figura 2 - Limitações de deformação para os processos de forjamento a frio

<i>Processo</i>	<i>Limite</i>
	$H < 2.5D$ $d < 2D$ $h > 0.25H$
	$d > 0.85D$
	$d > 0.5D$
	$0.5D < d < 0.85D$ $l < 2.5d$ $t > 0.5(D-d)$

Fonte: National, (1986).

1.5 Simulação computacional

A simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação (PEGDEN et al., 1990).

A simulação computacional dá uma maior compreensão de detalhes do processo de conformação, incluindo o escoamento do material, as distribuições de tensão/deformação/temperatura, etc., o que agrega ao projetista a obtenção de melhores resultados. A efetiva aplicação da tecnologia de simulação pelo Método dos Elementos Finitos reduz o número efetivo de tentativas para se chegar ao projeto final, conduzindo a uma redução significativa de tempo e custo (HATTANGADY, 2003).

A simulação numérica computacional hoje é frequentemente aplicada na elaboração de projetos ou análises dos processos de conformação plástica dos metais (MARTINS, 2012).

(JUDICE, 2012), apresentou uma análise numérica com o software DEFORM sobre a distribuição da densidade relativa, o comportamento de fechamento, os mecanismos de deformação e as distribuições de tensão-deformação em torno de vazios internos para varias condições de laminação.

1.6 Custos

Custos totais de produção: total das despesas realizadas pela firma a partir da combinação mais econômica dos fatores que resultará em determinada quantidade do produto.

2 Materiais e Métodos

Serão apresentados os métodos e materiais empregados para a realização da simulação numérica por MEF relacionados ao forjamento a frio, e a análise do produto forjado obtido, o objeto desse estudo será uma porca sextavada M10.

2.1 Descrição da empresa

O problema alvo do estudo foi observado em uma empresa localizada no estado de São Paulo, do ramo metalúrgico (metal-mecânica) que fornece elementos de fixação para os segmentos de veículos automotores de duas e quatro rodas, linha branca e mercado de reposição, de médio porte com aproximadamente 400 funcionários que tem como foco de trabalho o processo de conformação a frio de metais tendo como matéria prima de partida rolos de arame.

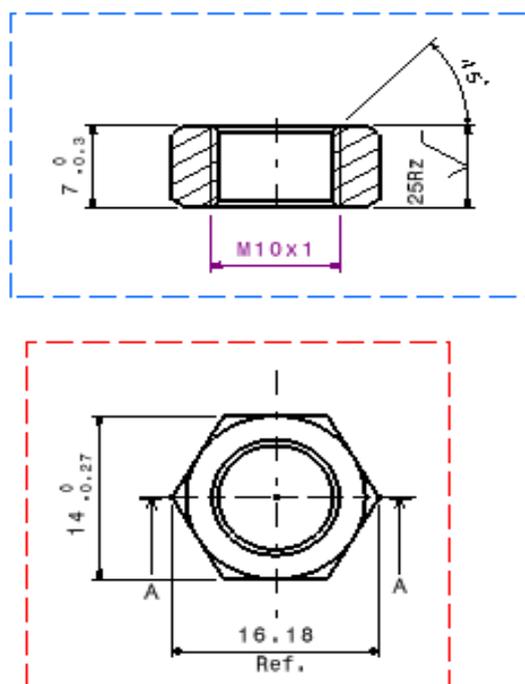
2.2 Descrição do problema

Na fabricação de elementos de fixação é prática comum o emprego do método empírico de tentativa e erro no desenvolvimento de novos produtos, onde o projetista se utiliza da sua experiência para definir o processo a ser adotado na fabricação de um determinado produto e as ferramentas a serem construídas para a fabricação do mesmo, entre as etapas de montagem das ferramentas, regulagem da máquina e a apresentação das peças no setor de controle de qualidade para que seja autorizada a fabricação do produto, são feitas correções nas ferramentas, no processo e por vezes até mesmo no equipamento a ser utilizado.

Para ser utilizado neste estudo foi escolhido uma porca sextavada de chave 14,0 mm, rosca M10x1,0 e altura 7,0 mm, que por tratar-se de um produto genérico, pode ser

utilizado em uma grande variedade de aplicações e conseqüentemente na sua produção serão fabricados lotes com grande quantidade de peças. A Figura 3 mostra o desenho em 2D do produto adotado para o estudo.

Figura 3 - Desenho em 2D do produto escolhido para estudo



Notas: Peças isenta de rebarbas e deformações
Caract. mecânicas conf. DIN 267-24

Fonte: Os autores, (2014).

2.3 Recursos computacionais utilizados

Para a realização deste trabalho foram utilizados os softwares comerciais:

- Autodesk – AutoCAD 2014 – Software gráfico 2D utilizado na geração de desenhos bidimensionais.
- Autodesk – Inventor Professional 2014 – Software gráfico 3D utilizado na geração de desenhos tridimensionais.
- SFTC – Deform 3D V6.1 – Software baseado no método dos elementos finitos, destinado à simulação do processo de forjamento.

2.4 Ferramental

Para a conformação da porca foi necessária a confecção de um ferramental no qual se utilizaram os seguintes materiais: Conjunto Punção e Extrator.

O material utilizado foi o aço AISI M2, aço rápido ligado ao molibdênio, vanádio e tungstênio; que em função do balanceamento químico apresenta alta temperabilidade, alta tenacidade, alta resistência ao desgaste e excelentes propriedades de corte, produzido em barra redonda recozida laminada, cuja composição química encontra-se no Quadro 1 e as propriedades mecânicas no Quadro 2.

Quadro 1 - Composição química do aço AISI M2 (% em peso)

C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	V
0,90	0,41	0,29	0,027	0,001	0,08	4,09	4,81	0,28	1,89
W	Cu	Ti	Nb	Al	Pb	Sn	Ca	N	O
6,11	0,13	0,011	0,01	0,058	0,00	0,0124	0,0014	0,029	0,002

Fonte: Os autores, (2014).

Quadro 2 - Propriedades Mecânicas do aço AISI M2

Propriedades	Dureza (HV10)	RT (MPa)	LE (MPa)	Al (%)	Est (%)	Descarb. (mm)
Especificação	249,8	781	398	14,6	-	-

Fonte: Os autores, (2014).

- Matriz de estampagem

O material utilizado foi o Metal Duro G5, material que consiste em carbonetos metálicos de tungstênio, titânio, tântalo ou molibdênio, tendo como aglomerante o cobalto, produzido em buchas cuja composição química típica encontra-se no Quadro 3 e as propriedades mecânicas no Quadro 4.

Quadro 3 - Composição química típica do Metal duro (% em peso)

W	C	Co (WC-3Co)
81	6	13

Fonte: Os autores, (2014).

Quadro 4 - Propriedades Mecânicas do Metal duro WC-3Co

Propriedades	Dureza (Hv)	Resist. Compr. (MPa)	Resist. Rup. Trans. (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Tenacidade a Fratura (MPa-m ^{1/2})	Coefficiente de Expansão Térmica (W/m-K)	Densidade (g/cm ³)
Especificação	1900	7100	1600	673	8,5	5,0	15,25

Fonte: Os autores, (2014).

2.5 Material do produto

O aço empregado como matéria-prima para o forjamento foi o SAE 10B22, aço ligado de excelente forjabilidade e soldabilidade, com baixa usinabilidade e esferoidizado fornecido em arames, cuja composição química é apresentada no Quadro 5 e as propriedades mecânicas no Quadro 6.

Quadro 5 - Composição química do SAE 10B22 (% em peso)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	B
Máx.	0,17	0,70	0,35	0,040	0,050	0,200	0,250	0,060	0,350	0,010	0,003
Mín.	0,24	1,30	-	-	-	-	-	-	-	0,08	0,0005

Fonte: Os autores, (2014).

Quadro 6 - Propriedades Mecânicas do SAE 10B22

Propriedades	Dureza (HB)	RT (MPa)	LE (MPa)	Al (%)	Est (%)	Descarb. (mm)
Especificação	141	496	302	33	64	0,04

Fonte: Os autores, (2014).

A composição química dos aços apresenta forte influência sobre a conformabilidade. Segundo a norma VDI 3138 (v.1), tanto para os aços sem liga como para os ligados, a resistência à deformação pode ser associada diretamente ao teor de carbono, devido à relação direta com a proporção de perlita na microestrutura do aço. Essa norma define que deve se dar preferência a aços com baixo teor de carbono, devendo evitar aços com teor de carbono equivalente superiores a 0,5%. Para atender aos requisitos da norma VDI 3138 (v.1), utilizando os valores do Quadro 5 obteve-se o valor de 0,32% como mostra a Equação 1.0, que demonstra que o material SAE 10B22 se encontra dentro dos limites aceitáveis de conformação a frio.

$$C_1 = 0,2 + \frac{1,0 - 0,6}{4} + \frac{0,2}{20} + \frac{0,25}{20} = 0,32\% \quad (1.0)$$

2.6. Determinação do processo de conformação da porca forjada a frio

A escolha das dimensões da porca procurou representar uma peça de utilização comercial, que deve atender a indústrias de diversos seguimentos.

Para que haja uma correta fabricação do produto desejado, as definições do processo e o projeto do ferramental são de suma importância, devendo-se levar em

consideração alguns critérios para a correta determinação dos mesmos. O primeiro passo a ser considerado para o dimensionamento do forjado a frio é o estudo das características técnicas do produto informadas pelo cliente, onde devem constar informações como:

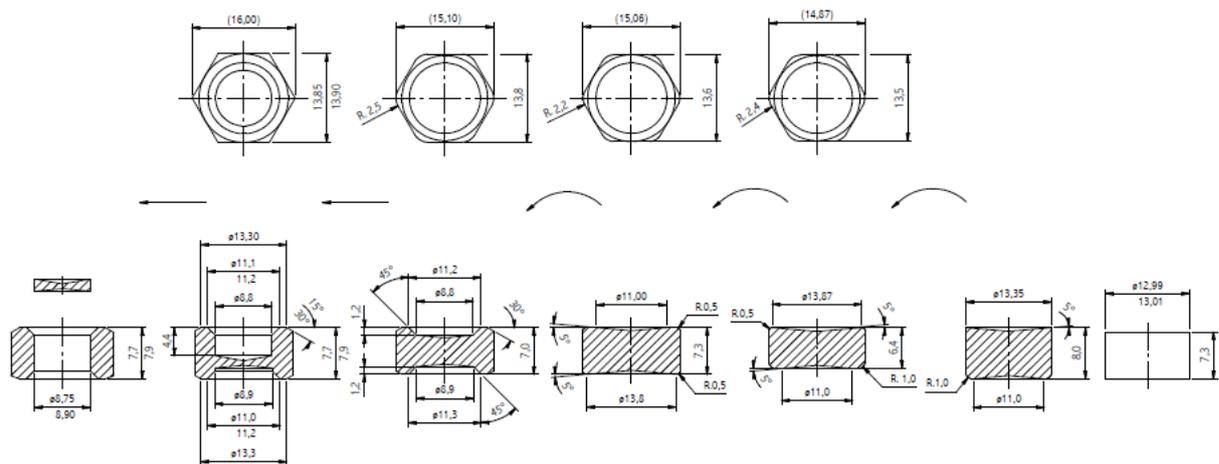
- material empregado;
- detalhes geométricos;
- dimensões características, tolerâncias dimensionais e geométricas;
- acabamento superficial;
- propriedades mecânicas.

O processo de conformação deve ser definido com base nas limitações do forjamento a frio de peças de aço referentes a aspectos econômicos, e á própria natureza do processo em si como:

- A limitação da capacidade do equipamento em termos de energia e dimensões do produto;
- As propriedades mecânicas dos materiais usados na confecção das ferramentas.

Esses aspectos são utilizados para a determinação do equipamento necessário para a confecção de peças com relação à energia de conformação, quantidade de estágios necessários e a geometria possível de ser alcançada em um determinado equipamento. A Figura 4 mostra o desenho da sequência de estampagem.

Figura 4 - Desenho da sequência de estampagem



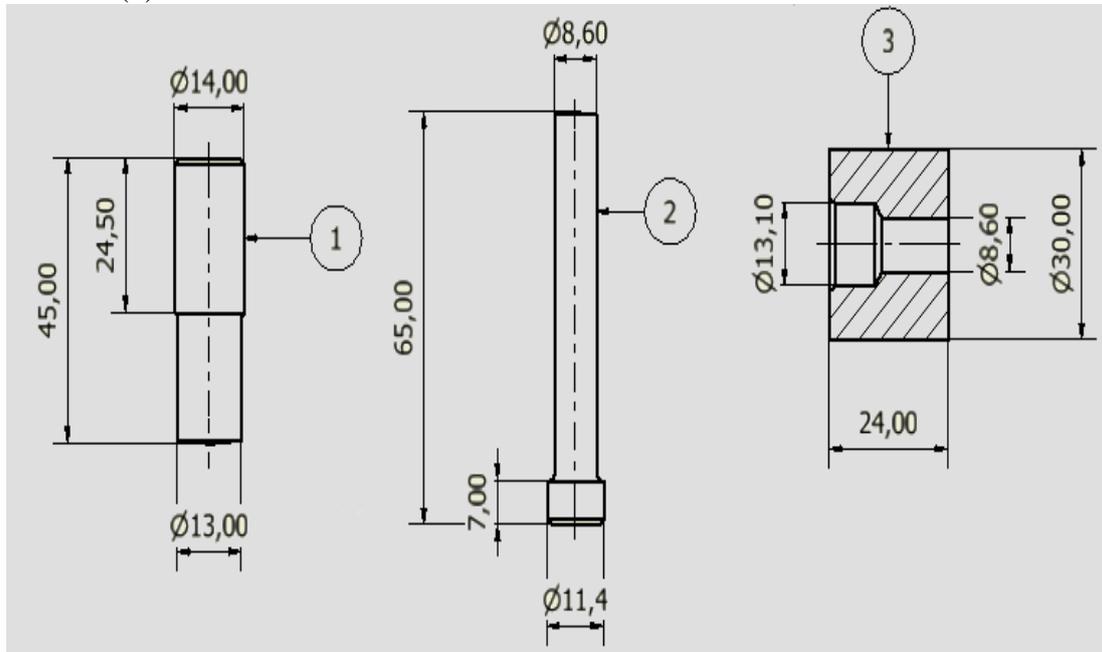
Fonte: Os autores, (2014).

2.7. Elaboração dos modelos das ferramentas

Foram gerados os desenhos em 2D das ferramentas a serem utilizadas na simulação do processo de forjamento a frio. A Figura 5 apresenta as dimensões

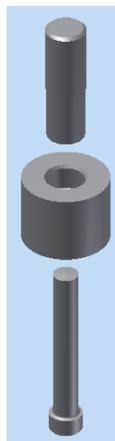
empregadas para a construção desses modelos tridimensionais e a Figura 6 apresenta os modelos gerados.

Figura 5 - Dimensional dos componentes usados para a simulação (1) punção, (2) extrator e (3) matriz.



Fonte: Os autores, (2014).

Figura 6 - Modelo em 3D do conjunto punção, matriz e extrator

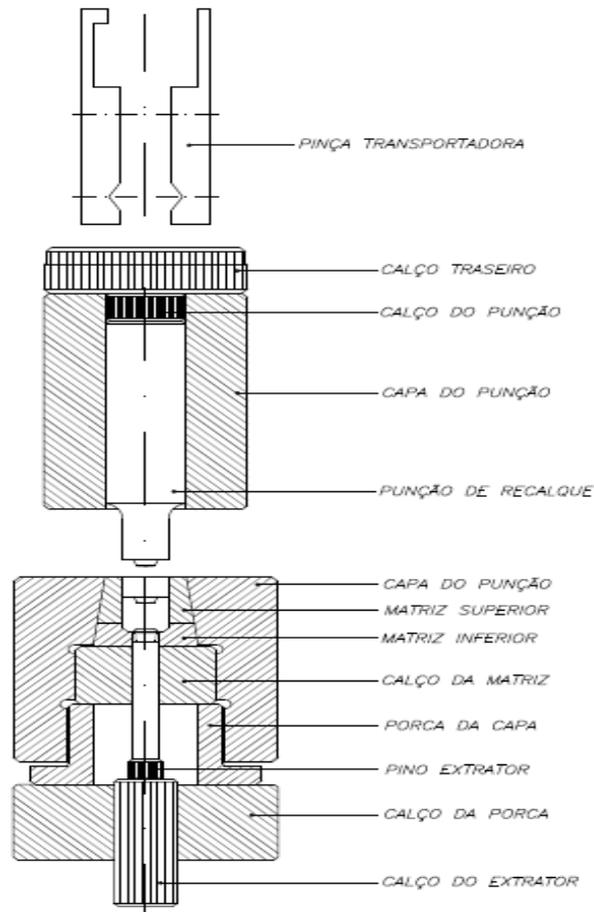


Fonte: Os autores, (2014).

2.8 Montagem de um ferramental de conformação

A Figura 7 mostra uma típica montagem de um ferramental de conformação usado em prensas estampadoras horizontais de múltiplos estágios.

Figura 7 - Montagem completa de um ferramental para conformação

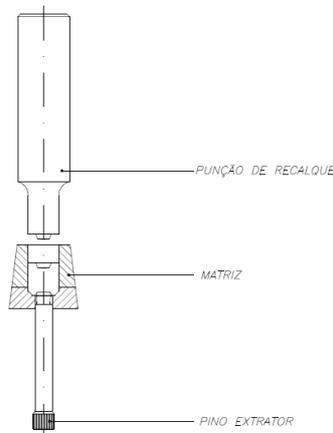


Fonte: Os autores, (2014).

2.9 Montagem dos componentes usados na simulação

A Figura 8 mostra a montagem usada efetivamente na simulação, onde são usados somente os componentes que atuam diretamente na conformação do produto.

Figura 8 - Montagem dos componentes usados na simulação



Fonte: Os autores, (2014).

2.10 Preparação da simulação

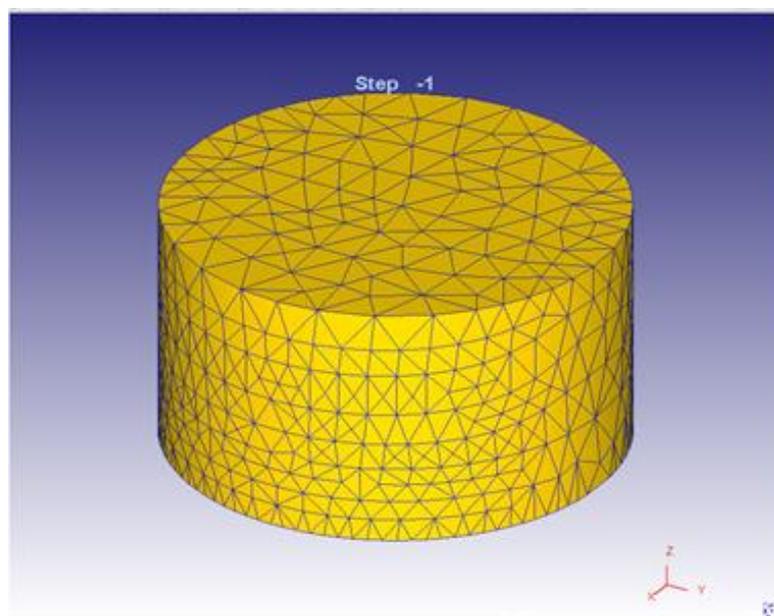
Após a geração dos componentes pode-se dar início a preparação da simulação no *software* de simulação por elementos finitos. O *software* disponibilizado foi o DEFORM, que utiliza três etapas para o trabalho de simulação: pré-processamento (preparação da simulação), onde são inseridos os componentes e suas respectivas características, processamento (execução da simulação), onde se dá a simulação do processo de conformação e pós-processamento (análise da simulação), onde é possível visualizar a simulação já concluída e acessar os resultados referentes a ela.

2.10.1 Inserção dos componentes

Para que haja uma correta realização da simulação, a inserção dos componentes é um item de grande importância, pois um posicionamento incorreto de algum dos componentes pode comprometer o resultado do trabalho de simulação.

Após a inserção do tarugo, o passo seguinte é a geração da malha conforme Figura 9. A quantidade de nós da malha é um item importante na realização da simulação.

Figura 9 - Tarugo com a malha



Fonte: Os autores, (2014)

Para a realização deste trabalho foram estudadas 5 configurações de malha com a variação do número de elementos padrão conforme mostra o Quadro 7, e foi adotado o número de elementos de 8000 para a realização do estudo, por apresentar uma quantidade de nós adequada em relação ao tempo de simulação.

Quadro 7 - Estudo da malha de elementos finitos

Nº de Elementos (Padrão)	Nº de Nós	Nº de Elementos (Real)	Distância entre nós (mm)	Vol. Da Malha (mm ³)	Vol. Da Geometria (mm ³)	Diferença entre Vol. (mm ³)
2000	388	1578	3.00338	918.539	928.539	-1.10
4000	742	3048	2,11465	923.761	928.539	-0,51
8000	1529	6305	1.88175	926.128	928.539	-0.26
16000	3531	15369	0.756917	927.434	928.539	-0.12
24000	4839	21316	0.746185	927.752	928.539	-0.085

Fonte: Os autores, (2014)

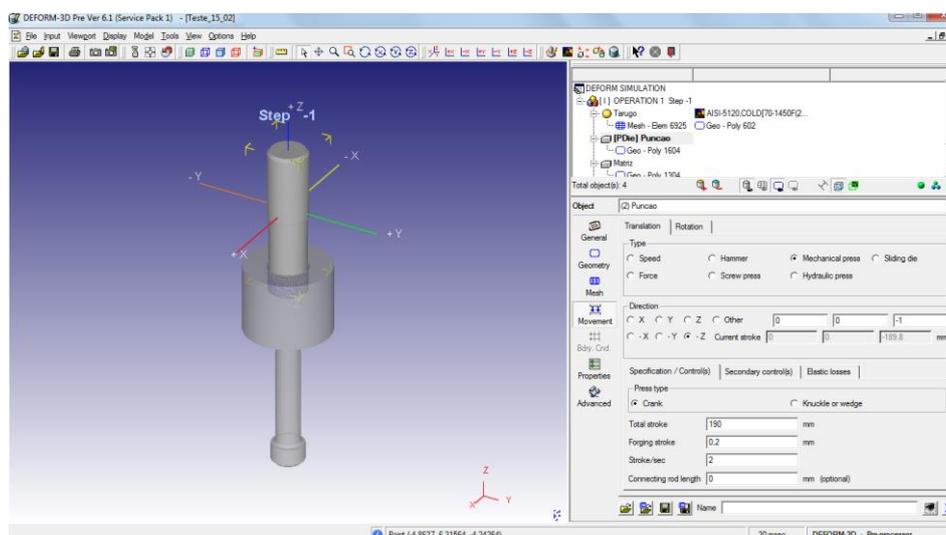
Para a simulação foi selecionado da biblioteca do software o material: AISI 5120.COLD [70-1450F(20-200°C)], pois sua curva de escoamento se assemelha a do material SAE 10B22, em suas propriedades características, conforme comprovado pela experiência no chão de fábrica.

O tarugo estando com todas as características definidas e, portanto pronto para a simulação, deve-se prosseguir então com a inserção dos demais componentes.

Quando os demais componentes são inseridos no ambiente de pré-processamento eles estão na posição final de simulação (fechado) e o tarugo encontra-se fora da sua posição de trabalho, devemos então fazer o posicionamento do conjunto.

Em uma simulação de conformação em matriz fechada na grande maioria dos casos o componente que tem o movimento que produz a deformação no produto é o punção, e é neste campo em que se informa o tipo de equipamento utilizado e suas características funcionais conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Definição do movimento



Fonte: Os autores, (2014)

Neste ponto o *software* possui a opção de visualização do movimento para que seja possível certificar-se de que a simulação foi montada de forma correta e está pronta para ser executada. Após a verificação deve-se então gerar um banco de dados, onde é feita a verificação dos passos realizados até então e caso não haja inconsistências nas informações, é gerado um arquivo que será usado para a execução da simulação, após a realização deste passo, a montagem está completa e pode-se sair do ambiente de pré-processamento e seguir para o próximo passo, o processamento que ocorre de forma automática.

2.10.2 Pós-processamento

O pós-processamento é usado para mostrar os dados após o término da simulação, que oferece uma interface gráfica para a visualização da geometria, campo de dados como a deformação, temperatura, tensão e outros dados da simulação, como as cargas atuantes nos componentes. O pós-processamento pode ser usado também para a extração de gráficos ou dados numéricos para o uso em outras aplicações.

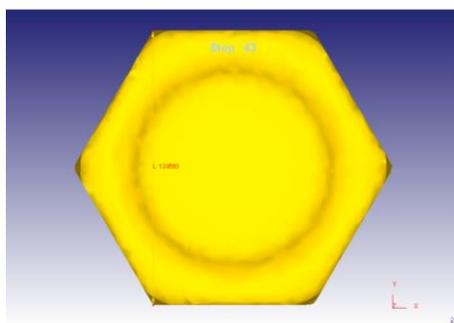
3 Análise dos Resultados

Serão apresentadas as análises sobre os resultados obtidos durante a simulação, com ênfase em algumas características mecânicas e dimensionais.

3.1 - Características dimensionais

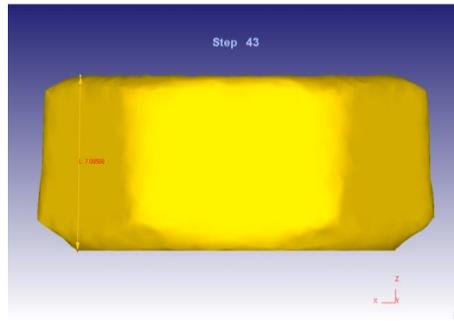
O *software* de simulação possui em seu módulo de pós-processamento diversas opções de análises do resultado final da simulação, como a visualização do produto conformado, que permite que seja feita uma avaliação das características dimensionais e visuais do produto. Conforme mostram as Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Vista superior da simulação



Fonte: Os autores, (2014)

Figura 12 - Vista frontal da simulação



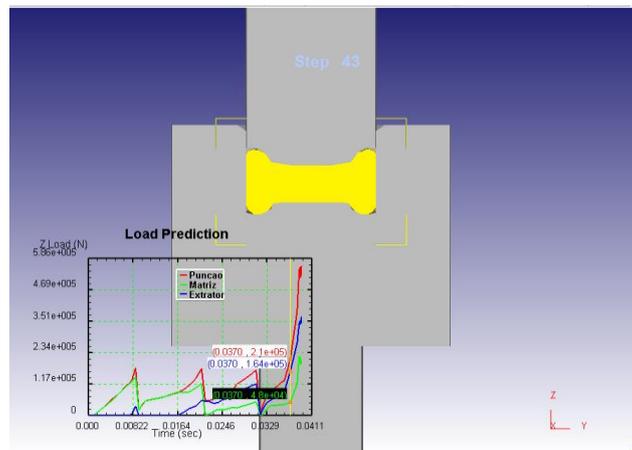
Fonte: Os autores, (2014)

Este recurso é muito útil no auxílio às tomadas de decisões relativas à definição das características dimensionais do ferramental, pode-se prever a necessidade de modificações no ferramental de um único estágio ou até mesmo de toda uma sequência de conformação, sem que seja necessária a construção física da ferramenta, concluindo que o produto atingiu suas principais características dimensionais dentro das especificações exigidas da porca, não havendo a necessidade de correção das ferramentas envolvidas no processo.

3.2 Previsão de carga

Para o caso estudado foi realizado um comparativo da força obtida no recalque, onde através do resultado obtido no gráfico foi mostrado que os valores mantiveram-se dentro dos limites das tensões que devem girar em torno de (200 N/mm²). Conforme Figura 13.

Figura 13 - Previsão de carga

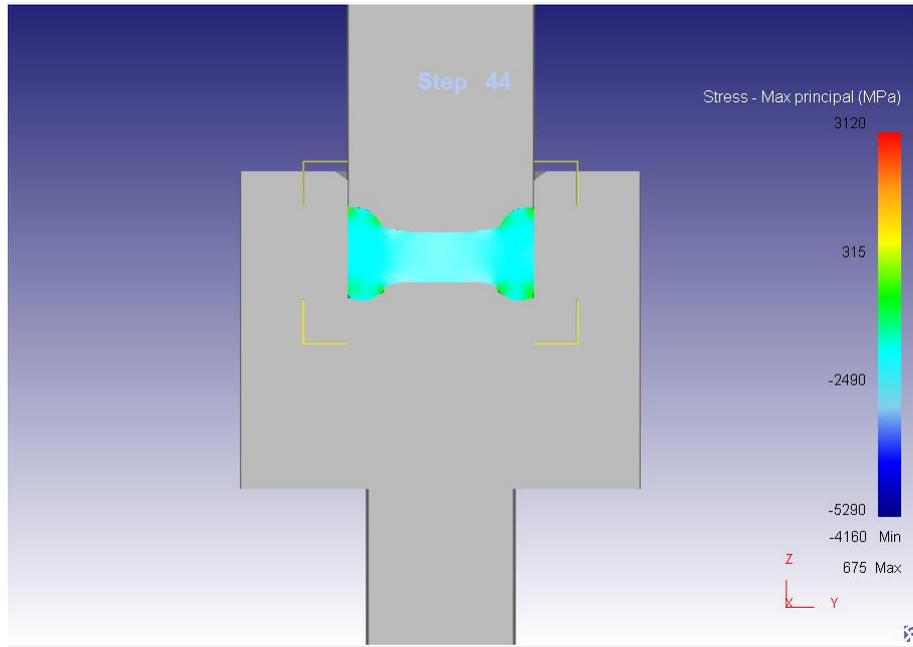


Fonte: Os autores, (2014)

3.3 Tensão máxima principal

Para o estudo em questão, a tensão máxima principal manteve-se com valores entre -4160 e 675 (Mpa), utilizando o gráfico de cores mostrado na Figura 14, observa-se que estes valores encontram-se em uma área intermediária do gráfico, indicando que não haverá a necessidade da realização de um alívio de tensões no produto.

Figura 14 - Tensão máxima principal



Fonte: Os autores, (2014)

3.4 Estimativa de custos do processo

Ao considerar-se o processo de fabricação dos componentes diretamente envolvidos no trabalho de conformação e os seus custos, chegou-se aos resultados mostrados no Quadro 8.

Custo da Matéria prima (M.P.):

- Aço AISI M2= R\$ 65,13 / Kg.
- Metal Duro G-5 Ø30,0 x 26,0 = R\$ 233,41 / Pç.
- SAE 10B22= R\$ 3,25 / Kg.

Custo por operações:

- Tornear (C.N.C.)= R\$ 37,04 / h
- Temperar e revenir= R\$ 12,02/ h
- Retificar= R\$ 51,41 / h
- Erudir= R\$ 260,0 / h

- Estampar= R\$ 88,53 / h

Quadro 8 - Custo de confecção dos componentes

Componentes	Operações de fabricação										Custo Total (R\$)
	Mat. Prima		Tornear		Trat. Térmico		Retificar		Erudir		
	Peso (Kg)	Custo (R\$)	Tempo (Min.)	Custo (R\$)	Tempo (h)	Custo (R\$)	Tempo (Min.)	Custo (R\$)	Tempo (h)	Custo (R\$)	
Punção Rec.	0,08	5,21	10	6,17	10	120,20	10	8,57	-	-	140,15
Pino Extrator	0,06	3,90	20	12,35	10	120,20	10	8,57	-	-	145,02
Matriz Sext.	Pç	233,41	10	6,17	-	-	-	-	1,5	390,00	629,58

Fonte: Os autores, (2014)

Os valores obtidos referem-se ao custo de confecção das ferramentas para apenas um estágio de conformação, que é a somatória dos custos individuais dos componentes totalizando R\$ 914,75, como a prensa indicada para a fabricação do item foi uma prensa horizontal multi-estágios contendo 6 estágios de conformação, o custo total do ferramental foi de R\$ 5.488,50.

3.5 - Estimativa de custos de componentes estampados

O objetivo básico da Empresa é maximizar os resultados quando da realização da atividade produtiva, podendo ser conseguida quando for alcançada: maximização da produção para um dado custo total ou maximização do custo total para um dado nível de produção.

O Quadro 9 mostra os custos fixos de produção referente ao ferramental de conformação.

Quadro 9 - Custo fixo total

CUSTO FIXO		
Custo do ferramental de estampagem		
Unidades produzidas	Custo do ferramental (R\$)	Custo do ferramental por unidade
1	5488,50	5488,50
10	5488,50	548,85
100	5488,50	54,88
1000	5488,50	5,49

Fonte: Os autores, (2014)

O Quadro 10 mostra os custos variáveis de produção referente à matéria prima do produto.

Quadro 10 - Custo variável total

Custo variável		
Custo do material do componente		
Unidades produzidas	Custo unitário do material (R\$)	Custo total do material (R\$)
1	0,02	0,02
10	0,02	0,20
100	0,02	2,00
1000	0,02	20,00

Fonte: Os autores, (2014)

4 Conclusões

Após a realização da simulação da conformação da porca pode-se concluir que a simulação computacional usando o Método dos Elementos Finitos é altamente viável para o desenvolvimento de produtos fabricados por meio de conformação mecânica, onde se procura conseguir redução de tempo e custos durante as definições do processo de fabricação e do projeto de ferramentas, uma vez que até a definição das condições finais de fabricação do produto não são confeccionadas nenhuma ferramenta, quando comparado com o método empírico de tentativa e erro ainda muito usado atualmente fica muito clara essa vantagem, já que pelo método tradicional são confeccionadas todas as ferramentas necessárias para a fabricação do produto, onde são gastos os tempos de projeto, ferramentaria e produção, e ao não alcançar-se os resultados esperados durante o processo de regulação da máquina, as ferramentas são descartadas e novas ferramentas serão confeccionadas.

Com as novas ferramentas usadas para a modelagem virtual em 3D pode-se ter uma ideia clara da montagem do ferramental e de possíveis erros que possam acontecer durante a definição da geometria, e das dimensões dos componentes. Através das análises pelo Método dos Elementos Finitos é possível saber com antecedência quais os pontos críticos de uma ferramenta e prever eventuais problemas que podem ocorrer durante o trabalho de conformação da peça, com a aplicação da simulação a princípio haverá um aumento da ordem de 20% a 30% no tempo de desenvolvimento de projetos, porém há uma redução significativa na quantidade de revisões nos projetos, correções em ferramentas, e no tempo de *try-out* de máquina.

Referências

BRESCIANI, E., ZAVAGLIA, C.A.C, NERY, F.A.C., BUTTON, S.T.; **Conformação Plástica dos Metais**. Ed. UNICAMP, 2ª ed., 1985, V1 e V2.

BUTTON, S.T., ROQUE, C.M., CAPORALLI, A. **Planejamento do processo e projeto de ferramentas para o forjamento a frio de eixos de aço.** Apostila do curso de graduação, UNICAMP, 1995.

HATTANGADY, N.V. **Automated modeling and remeshing in metal forming simulation. 2003.** Thesis of doctor of philosophy, Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute. New York.

JUDICE, G.H. **Análise numérica da propagação de defeitos internos na laminação transversal com cunha.** 2012. 127 f. Dissertação (Faculdade de engenharia mecânica área de materiais e processos de fabricação) – Universidade Estadual de Campinas, SP, 2012.

LANGE, K. **Handbook of Metal Forming,** McGraw-Hill Book Co, 1985.

MARTINS, M.M. **Análise da extrusão de metais pelo método dos volumes finitos.** 2012. 206 f. Tese (Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, departamento de materiais e processos de fabricação) – Universidade Estadual de Campinas, SP, 2012.

NATIONAL MACHINERY, Tool seminar, 1986

PEGDEN, C.D., SHANNON, R.E., SADOWSKI, R.P. **Introduction to simulation using SIMAN.** New York, USA: McGraw-Hill, v.2. 1990.

REGNER, P. e SCHAEFFER, L.; Aspectos gerais sobre forjamento. **Anais do Seminário Nacional de Forjamento,** Porto Alegre, 1983, 301p.

VASCONCELLOS, M.A.S. e GARCIA, M.E. **Fundamentos de economia.** Ed. Saraiva, 3ª ed. Cap. 6, 2009.

VILLAS BÔAS, D. **Estudo do Processo de forjamento a Frio de Peças Automotivas.** 1999. 116 f. Dissertação (Comissão de pós-graduação em engenharia mecânica departamento de engenharia de materiais) – Universidade Estadual de Campinas, SP, 1999.