

ESTUDO DO SPRINGBACK NA CONFORMAÇÃO DE SEGMENTOS COMPLEXOS ATRAVÉS DE MODELAMENTO EM 3D, ANÁLISE NÃO LINEAR E O USO DO LASER TRACKER¹

Celso Kotinda²
Daniele Dias Araújo³
Leonardo Camilo dos Reis⁴

Resumo

Na busca de se compreender o efeito do *springback* na conformação mecânica de segmentos toroidais em chapas grossas numa empresa de bens de capital, através de meios numéricos de simulação, este estudo tem por objetivo mostrar a eficiência, ganhos de produtividade e capacitação da mão de obra no processo de conformação mecânica de segmentos complexos que constituem equipamentos da indústria de bens de capital através do uso de CAD/CAE/CAM. Além disso, a interação de tecnologias de última geração em modelagem, análise não linear e dimensionamento de peças facilitam o processo de conformação minimizando os efeitos do *springback*, gerando resultados satisfatórios. Para a utilização da simulação numérica foram necessários inúmeros dados como a geometria do produto, tipo de material, além de informações sobre todo o processo. Assim, desenvolveu-se uma metodologia simples utilizando os softwares *UNIGRAPHICS*, *ANSYS/LS-DYNA/MECHANICAL* e a ferramenta *Laser Tracker*. Obteve-se, com este estudo, aperfeiçoamento do processo de conformação a frio de segmentos complexos, redução dos custos e melhoria da qualidade das peças acabadas, com produtividade e rentabilidade.

Palavras-chave: *Springback*; Análise não linear; Modelamento; *Laser tracker*.

SPRINGBACK'S STUDY AT FORMING OF COMPLEX PARTS THROUGH 3D MODELING, NON LINEAR ANALYSIS AND THE LASER TRACKER APPLICATION

Abstract

In order to understand the springback's effect in the mechanical forming of toroids' segments in thick plates at metal mechanic industry, through the numeric means of simulation, the present speech purposes to show the efficiency, profit productivity and co-workers improvement in the mechanical forming process of complex parts of equipments at metal mechanic industry through of CAD/CAE/CAM application. Moreover, the technologies interaction of latest generation in modeling, the non linear analysis and peaces measurement it becomes easy the forming process decreasing the springback effect, obtaining good results. For use the numeric simulation it was necessary several datas as product geometry, material type, and even informations about all the process. This way, it has developed a simple methodology by utilizing the software Unigrafics NX, ANSYS and the Laser Tracker tool. With this study it was possible to achieve improvement on the cold forming process of complex segments, costs reduction ant better quality of the completely peaces with productivity and profitability.

Key words: Springback; Non linear analysis; Modeling; Laser tracker.

¹ Contribuição técnica ao 8º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 11 e 12 de agosto de 2010, São Paulo, SP.

² Engenheiro Mecânico/UFU/1975.

³ Engenheira de Produção/UFOP/2004. Mestre em Engenharia de Materiais/REDEMAT/2007. MBA em Gerenciamento de Projetos/FGV-GV/2009.

⁴ Engenheiro Mecânico/UFMG/1995. Mestre em Engenharia Metalúrgica com ênfase em Metalurgia Física/UFMG/2002.



1 INTRODUÇÃO

No contexto em que as indústrias estão inseridas atualmente, com a globalização de fronteiras, concorrência entre empresas e negócios, a busca pelo conhecimento, tecnologia, melhoria dos processos, entre outros, faz-se necessário estar sempre atento às tendências do cenário mundial, atendendo e antecipando necessidades dos clientes, estando preparados para concorrência severa, clientes mais exigentes e produtos ou serviços substitutos.

A Usiminas Mecânica, empresa de grande porte do setor Metal Mecânico, de bens de capital, segmentada em negócios como pontes e viadutos, blanks, estruturas metálicas, equipamentos, fundição, forjaria, manutenção, fabricação de vagões, entre outros, busca excelência no atendimento aos seus clientes através do fornecimento de serviços. Precisamente a Gerência de Equipamentos, área de estudo do presente trabalho, transforma produtos (basicamente metais) em equipamentos, agregando valor através de sua sólida estrutura industrial, sua alta capacidade produtiva, constituída de um corpo de profissionais de Engenharia de Projetos e Engenharia de Fabricação, integrado e em constante desenvolvimento e capacitação profissional.

A indústria de bens de capital tem demandado produção de equipamentos visando atender necessidades na indústria petroquímica, hidro-mecânicos e siderúrgica, principalmente.

A linha de estudo do presente artigo é o “efeito mola”, também conhecido como *Springback*, uma ocorrência indesejável, em que a chapa que está sendo conformada não assume o formato desejado, retornando, parcialmente, à sua posição original.

O correto diagnóstico do *springback* após o processo de conformação é essencial para determinar projetos de ferramentas (matrizes) em processos que exigem peças com formatos complexos.

O estudo tem por objetivo mostrar a eficiência, ganhos de produtividade e capacitação da mão de obra no processo de conformação mecânica de segmentos complexos que constituem equipamentos da indústria de bens de capital através do uso de CAD/CAE/CAM. Além disso, como a interação de tecnologias de última geração em modelagem, análise não linear e dimensionamento de peças facilitam o processo de conformação minimizando os efeitos do *springback*, gerando resultados satisfatórios.

Assim, foi desenvolvida uma metodologia simples, mas eficiente, para facilitar o diagnóstico do *springback* no estágio inicial do projeto de geometria dos produtos de conformação utilizando recursos existentes na unidade de engenharia de equipamentos na Usiminas Mecânica.

Os métodos e procedimentos aqui propostos restringem-se à estampagem de segmentos de peças de revolução, denominados toróides.

Neste estudo tomar-se-á a suposição, conforme Cetlin,⁽¹⁾ de que o termo plasticidade reserva-se aos casos que a deformação não é função do tempo. Será feita ainda uma suposição de que os corpos apresentam as mesmas propriedades mecânicas em todas as suas direções, ou seja, são isotrópicos e de que a deformação plástica não introduz anisotropia no material que está sendo conformado. Tomar-se-á a temperatura ambiente para execução do estudo, ou seja, trabalho a frio, e se aceita que esta temperatura permanece constante durante a deformação, salvo quando mencionado o inverso.

Supõe-se também que o material em estudo será considerado homogêneo, isto é, que suas propriedades mecânicas são também independentes do ponto considerado.

A seguir tem-se uma síntese dos conceitos necessários para o melhor entendimento da metodologia adotada para fabricação de matrizes de conformação mecânica de segmentos toroidais.

1.1 Tensões Residuais

Em Beer,⁽²⁾ quando várias partes ligadas de uma peça sofrem deformações plásticas de valores diferentes, as tensões nessas partes não caem para zero quando se retira o carregamento. Algumas partes da estrutura continuarão apresentando tensões chamadas tensões residuais.

As tensões residuais se calculam por superposição das tensões causadas pela fase de descarregamento com aquelas tensões inversas do descarregamento.

Com relação à recuperação elástica durante uma deformação plástica, que é o foco desse estudo, em Callister⁽³⁾ afirma-se que com a liberação da carga durante o curso de um ensaio tensão-deformação, uma fração da deformação total é recuperada na forma de deformação elástica. Esse comportamento está mostrado na Figura 1, numa curva esquemática de tensão-deformação. Durante o ciclo de descarga, a curva é representada pela trajetória próxima à de uma linha reta, a partir do ponto de descarga (ponto D), e a sua inclinação é virtualmente idêntica ao módulo de elasticidade, ou seja, paralela à porção elástica, que é recuperada durante a descarga e corresponde à recuperação da deformação conforme mostrado na Figura 1. Se a carga for reaplicada, a curva irá percorrer a mesma porção linear da curva, porém na direção oposta àquela percorrida durante a descarga.

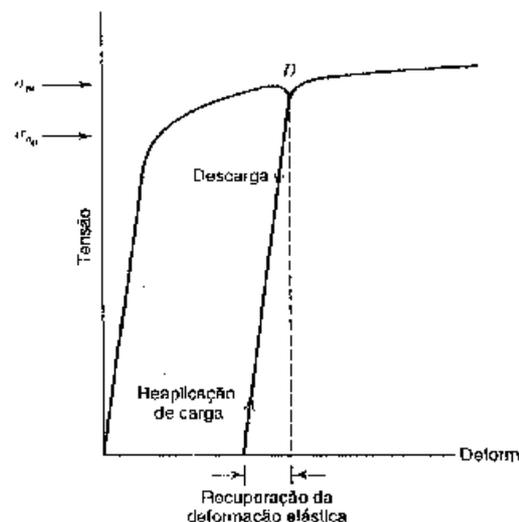


Figura 1: Curva tensão-deformação evidenciando a recuperação da deformação elástica após liberação da carga durante um ensaio de tração.⁽³⁾

1.2 Springback

Na maioria das operações de conformação mecânica de metais, o processo de deformação não linear tende a gerar uma grande quantidade de energia elástica residual no metal conformado. Esta energia, que fica estocada na peça durante o carregamento, é moderadamente aliviada no descarregamento. Este alívio da energia imposta à peça causa na mesma um retorno a uma suposta posição de equilíbrio, como se fosse um retorno à sua posição inicial. Conseqüentemente, o formato final da peça no processo de deformação não apenas depende do contorno da matriz, mas também da quantidade de energia elástica estocada na peça enquanto ela está sendo plasticamente deformada.

Assim, Wagoner e Carden⁽⁴⁾ conceituam *springback* como a mudança em regime elástico da forma de uma peça após sua deformação. Em Liu,⁽⁵⁾ tem-se a mesma definição referenciando o *springback* como a discrepância de forma entre o carregamento total e as configurações de descarregamento. O desafio maior é como diagnosticar o ângulo do *springback* e daí projetar uma ferramenta para compensar a quantidade desse *springback*.

O *springback* também pode ser definido como a mudança dimensional da peça deformada pela matriz no qual ocorre um retorno elástico durante a fase de descarregamento.

Em um estudo realizado por Gedeon,⁽⁶⁾ argumenta-se que quando uma peça é conformada, a ferramenta de estampagem dobra o metal em um certo ângulo caracterizando o dobramento. Uma vez que a ferramenta é removida, o metal sofre o efeito do *springback* abrindo este ângulo e aumentando o raio. A relação do *springback* é definida como o ângulo final depois do *springback* dividido pelo ângulo de estampagem inicial. (Figura 2). Esta citação também afirma que para compreender o *springback* é necessário observar a curva de tensão-deformação do material. Quando um dobramento é realizado, o material é consideravelmente sobre-tensionado acima de seu limite de escoamento de forma a induzir uma deformação permanente. Quando a carga é removida, a tensão retorna a zero ao longo de uma curva paralela ao módulo de elasticidade (Figura 3). Entretanto, com algumas exceções, a deformação permanente será menor que o perfil desejado. Assim, o *springback* será igual à quantidade de deformação elástica recuperada quando a matriz é removida.

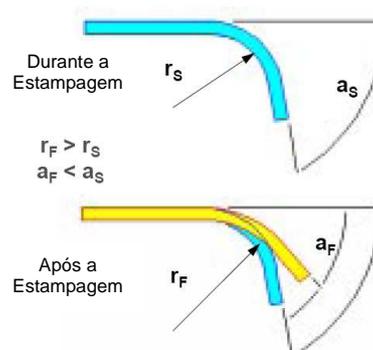


Figura 2: Relação do ângulo após carregamento, a_f , com o ângulo durante a estampagem, a_s e do raio durante e após carregamento, r_s e r_f , respectivamente.⁽⁶⁾

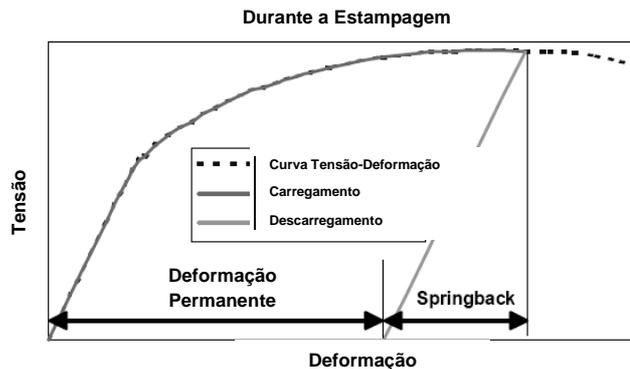


Figura 3: Quando a carga é removida, após o processo de estampagem, a tensão do material, induzido a deformação, retorna a zero ao longo de uma curva paralela ao módulo de elasticidade do material.⁽⁶⁾

O *springback* é um efeito indesejado no processo de conformação e é um grande problema para projetistas de matrizes que têm que diagnosticá-lo ao fazer o projeto de uma matriz de conformação.

Com relação às variáveis que influenciam na quantidade de *springback*, em Gedeon⁽⁶⁾ é mencionado que um material com um alto limite de escoamento terá uma maior relação entre deformação elástica/plástica e exibirá maior efeito de *springback* que um material com menor limite de escoamento. Por outro lado, um material com um alto módulo de elasticidade mostrará menor *springback* que um material com maior módulo de elasticidade.

1.3 Segmentos Toroidais

Toróide é uma superfície descrita pelo movimento de uma circunferência não centralizada na origem em torno de um eixo de rotação. Ou seja, o toróide possui dois raios: o raio maior, longitudinal, referente ao diâmetro do equipamento, e um raio menor, transversal, cujo centro é diferente do centro do equipamento.

Uma indústria mecânica de bens de capital fabrica inúmeros equipamentos que possuem formas toroidais em sua estrutura como vasos de pressão, fundo de convertedores, fundo de painéis de aço e gusa, coletor de pó, fundo de precipitadores de alumina, entre outros.

Geralmente, os toróides assumem forma côncava, também denominado *Knuckle radius*, salvo em alguns equipamentos que possuem sua região toroidal convexa, neste caso o toróide é chamado de toróide invertido ou *flair radius*. Este estudo apresenta a análise de uma peça com as duas formas toroidais.

1.4 Análise Não Linear

Atualmente, está disponível no mercado uma diversidade de softwares que desenvolvem análise não-linear de peças e estruturas em geral. Estes softwares, também denominados CAD/CAE (*Computer Aided Design/Computer Aided Engineering*), possibilitam o projeto em três dimensões (3D) de peças, conjuntos, estruturas em tamanho real, bem como estabelecer modelos que se assemelham às condições reais, e o software calcula através de equações não-lineares.

A análise não-linear se distingue da análise linear por exigir maiores esforços tanto na formulação teórica de modelos matemáticos e nos tratamentos numéricos necessários à resolução de sistemas discretos resultantes, como também por exigir uma grande experiência do profissional que analisa estes resultados.

Assim, se torna essencial análise com grande número de graus de liberdade como aquelas com poucos graus de liberdade; a primeira fornecendo resultados mais precisos e gerais e a segunda permitindo uma análise qualitativa de complicados fenômenos envolvidos.

Estes softwares permitem o estabelecimento dos fundamentos teóricos existentes por de trás dos diversos fenômenos a serem simulados, fundamental para o desenvolvimento de um sistema computacional de análise estática e dinâmica não-linear de formas, empregando o Método dos Elementos Finitos, condições de contorno, entre outros.

Neste estudo, utilizam-se os CAD/CAE *Unigraphics NX* e o *ANSYS/LS-DYNA*, softwares comerciais.

1.5 Laser Tracker

O *Laser Tracker* é um sistema de medição de coordenadas portátil de última geração. Munido de um interferômetro a laser, desenvolve dimensionamento em 3D com rápida e alta precisão de medida, através de pontos (capta cerca de 1000 pontos por segundo) ou pelas superfícies dos sólidos requeridos.

O software embutido na ferramenta é compatível com uma variedade de formatos ou extensões de arquivos como: DXF, IGES, Native IMV, Native CATIA, entre outros, permitindo interação com outros CAD/CAE.

A ferramenta permite medidas fáceis e rápidas de muitos componentes, por exemplo, na inspeção dimensional de soldagem feita em montagens de veículos, análise da aerodinâmica de superfícies, análise de perfis de superfícies conformadas ou soldadas, comparando-se o real do planejado, desenvolvendo ações para garantia da qualidade, com ganho de produtividade e rentabilidade. Este ganho é devido ao fato do *Laser Tracker*, além de sua alta precisão, substitui o uso de outras ferramentas ou formas de medição, economizando tempo e dinheiro.

No entanto, de nada adianta ter um recurso tão poderoso se quem vai utilizá-lo não tiver capacidade de explorar ao máximo o potencial dessa ferramenta.

Assim, para submeter o *Laser Tracker* a um processo, o usuário deve ser conhecedor de normas e procedimentos de medição, conceitos e a prática de inspeção dimensional, para então utilizar os artifícios que a ferramenta trás.

Para isto, os inspetores têm que estar em contínua capacitação, explorando novos limites para a utilização da ferramenta, bem como freqüentes atualizações as quais são submetidos regularmente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida neste estudo é de caráter qualitativo feito a partir das observações e coletas de dados na área de conformação mecânica de segmentos de chapas grossas em uma empresa de bens de capital.

De caráter qualitativo, o trabalho tem sido organizado em cinco etapas: estudo do projeto do equipamento a ser fabricado, material, tolerâncias e normas exigidas; simulação não linear; modelamento em 3D da matriz de conformação, bem como detalhamento e instruções necessárias para sua fabricação; inspeção dimensional com o uso do *Laser Tracker*; em seguida, é feita a análise final e são tomadas as devidas ações. A seguir é detalhada a metodologia.

2.1 Estudo do projeto

Após aprovação do projeto pela engenharia de projeto, inicia-se a análise do mesmo. Na Figura 4, tem-se o perfil da peça em questão. Trata-se de um cone de transição entre dois diâmetros diferentes de um vaso de pressão. O material especificado é um aço cladeado, 16 mm de espessura de aço ao carbono ASTM A516 GR 60 e 3 mm de espessura de aço inox ASTM 240 316L, totalizando espessura de 19 mm. A peculiaridade desse perfil, como pode ser visualizado na figura 4, é de possuir um toróide côncavo (*knuckle radius*) e um convexo (*flair radius*), e serem interligados por um cone, através de um ângulo de 29,478°. O toróide côncavo tangencia um costado de 6000 mm de diâmetro, enquanto o toróide convexo, o de 5.000 mm de diâmetro.

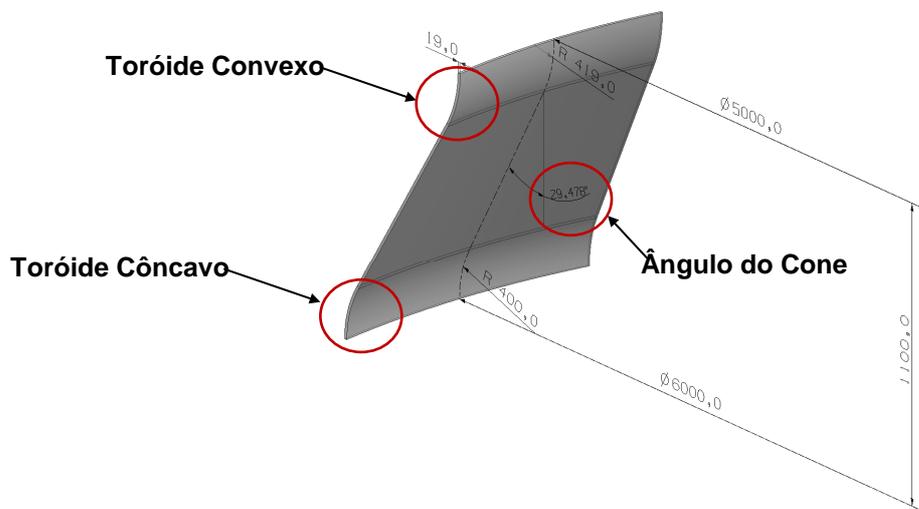


Figura 4: Perfil do segmento de um cone de transição com um toróide côncavo e outro convexo.

Nesta etapa, foi definido que o número de partes do cone de transição seria 18 e a conformação a frio, pelo fato do material ter sido comprado normalizado. Diante disso, surge a necessidade de estimar o *springback* e desenvolver a matriz considerando este fenômeno.

2.2 Simulação Não Linear

Baseado em dados do projeto, projeta-se a casca da ferramenta (matriz superior e inferior) e peça no *ANSYS/LS-DYNA* para então dar início à simulação.

O programa comercial *ANSYS/LS-DYNA* combina a solução do *LS-DYNA*, através do método de elementos finitos utilizando a análise explícita, juntamente com um pré e pós processador do programa *ANSYS*. O método de solução explícito usado no *LS-DYNA* proporciona uma rápida solução de problemas com grandes deformações dinâmicas, problemas com múltiplas não linearidades e ainda problemas que envolvem contatos complexos. Utilizando os dois produtos integrados, pode-se modelar a estrutura no *ANSYS*, obter a solução dinâmica explícita via *LS-DYNA* e rever os resultados no pós-processador do *ANSYS/MECHANICAL*.

A transferência de geometria e informações dos resultados entre o *ANSYS* e *ANSYS/LS-DYNA/MECHANICAL* pode ser efetuada seqüencialmente em

problemas que envolvem análises através dos métodos implícito-explicito ou explícito-implícito que são utilizados para avaliação do retorno elástico (*springback*) na estampagem, testes de queda e outras aplicações.

O ANSYS já sugere os elementos a serem utilizados no modelamento matemático. O programa possui uma biblioteca interna, na qual contém vários tipos de elementos para cada tipo de modelo numérico. No estudo deste trabalho, por exemplo, escolheu-se o *SHELL163* para primeira análise, explícita, e *SHELL181* para a fase implícita. Após definição do tipo de elemento, definem-se as constantes reais, propriedades do modelo (de forma a simular as condições reais), geração da malha de elementos finitos, geração de tabela de elementos do modelo, aplicação da carga e, por fim, definição das entidades de contato. Analisam-se os resultados, se satisfatórios, parte-se para a análise implícita, com o resultado do *springback*.

Finalmente, a malha gerada com o resultado do *springback*, ilustrada na figura 5 a seguir, permite a definição da compensação a ser dada no perfil da matriz inferior e superior, para então projetar-se sua superfície no *Unigraphics NX* e dar seqüência no modelamento.

Malha com
 resultado do

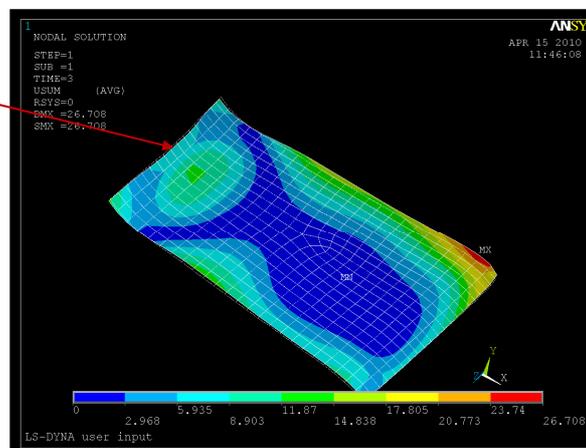


Figura 5: Ilustração da malha gerada pelo ANSYS com o resultado do *springback*.

2.3 Modelamento em 3D da Matriz de Conformação

Em seguida, desenvolve-se em 3D a matriz através do uso do CAD/CAE *Unigraphics NX*. Além do design em três dimensões, é possível também planificar as superfícies complexas e detalhar para execução da mesma (CAD/CAE). É feita uma instrução detalhada da matriz para fabricação. Posteriormente, é executado um teste em uma peça sacrifício, para validar o perfil da matriz.

2.4 Inspeção Dimensional com *Laser Tracker*

Como mencionado no item 1.5, o *Laser Tracker* é uma ferramenta de última geração em dimensional. Através do interferômetro a laser, foi possível copiar o perfil real da peça. O software embutido na ferramenta possibilitou o mapeamento desse perfil através de pontos, conforme pode ser visualizado na Figura 6 (a). Em seguida, os pontos são importados para o *Unigraphics NX* e é gerada uma superfície através desses pontos (Figura 6 b). Em seguida, compara-se a superfície real com a superfície projetada e ideal do software (Figura 6 c).

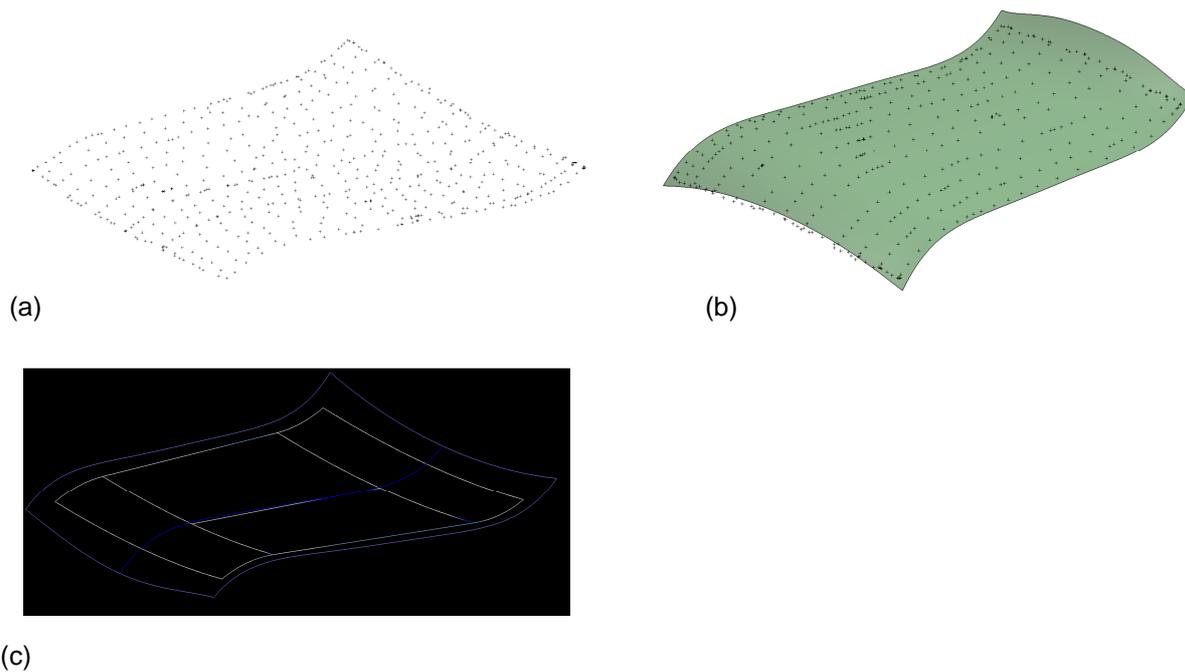


Figura 6: (a): Mapeamento do perfil através de pontos; (b): Superfície gerada através de pontos; (c): Comparação da superfície real com a projetada.

2.5 Análise Final

Após finalizado a comparação entre as superfícies real e projetada, planejou-se a correção do perfil da matriz, diante do resultado do *springback* obtido com o teste. Esta compensação é projetada no próprio software, *Unigraphics NX*, que além de CAD/CAE, também possui o aplicativo *Manufacturing* (CAM) que simula as condições de usinagem, ou seja, as ferramentas no desenho em 3D são as mesmas disponíveis no chão fábrica. Após a simulação é gerado um programa de usinagem de acordo com a linguagem CNC (Comando Numérico Computadorizado) da máquina.

Em seguida, é feito um novo teste, sem necessidade de peça sacrifício, e esta volta a ser inspecionada pelo *laser tracker*. Compara-se o modelo gerado no *ANSYS* e o resultado final da matriz obtida, arquivando estes dados para continuidade, aprimoramento do estudo e validação da análise numérica.

3 RESULTADOS

A interação entre os três softwares, *Unigraphics NX*, *ANSYS* e o do *Laser Tracker*, foi perfeita e possibilitou desempenho satisfatório na identificação dos desvios, bem como para correção para o perfil ideal da matriz, de forma a obter peças conforme projetadas.

O *Laser Tracker*, pela sua precisão e agilidade, foi de fundamental importância por permitir uma comparação efetiva entre a peça real, a simulada e a projetada, além da rapidez na tomada de ações.

O resultado da análise numérica no *Ansys/Mechanical* foi satisfatório por evidenciar o comportamento do material, identificando as regiões de maior deformação e tensão necessária para sua deformação permanente. Percebeu-se que para este tipo de perfil, que possui toróide côncavo e convexo, um interfere na deformação do

outro. Precisamente, o toróide convexo interferiu na deformação do côncavo, fazendo com que este ficasse um pouco mais aberto que o ideal. No entanto, como a norma permite que o toróide fique aberto e proíbe que fique fechado, considerou-se desempenho satisfatório, apesar de ser necessário continuar estudos para aperfeiçoar a análise numérica e ter mais garantia do resultado em relação ao comportamento real.

Em estudos anteriores na empresa, feitos com toróides côncavos e de material comum (ASTM A36), o comportamento da análise numérica é mais previsível e regular do que quando o perfil apresenta dois toróides, côncavo e convexo, na mesma estrutura.

Assim, pôde-se identificar que segmentos complexos como estes que variam entre 2 e 4 horas para serem conformados a frio, com esta nova metodologia variaram em média 0,5 a 1 hora de processo. Estas variações de tempo de processamento são pertinentes aos diferentes colaboradores que executam a tarefa.

O retrabalho foi reduzido entre 60% e 95%, nos piores e melhores casos, respectivamente, permitindo garantia da qualidade e do perfil dos segmentos conformados.

4 DISCUSSÃO

Antes da realização da simulação de estampagem, foi necessário definir as propriedades dos materiais. Como já mencionado na introdução do trabalho, o material utilizado foi considerado isotrópico e homogêneo. As propriedades físicas e mecânicas foram tomadas à temperatura ambiente.

Os valores das propriedades mecânicas consideradas nos modelos foram aproximados para o tipo do aço ao carbono predominante na estrutura do material, ASTM A 516 Gr 60, já que o elemento selecionado na biblioteca do ANSYS não contempla materiais cladeados. Estas propriedades mecânicas consideradas estão listadas abaixo:

- Módulo de Elasticidade: $1,9 \times 10^5$ MPa
- Coeficiente de Poisson: 0,3
- Limite de escoamento: 220 MPa
- Módulo tangente: $1,9 \times 10^4$ MPa

Foi adotado como base o modelo de material que leva em conta a curva de tensão/deformação efetiva.

Comparando os resultados, percebeu-se que alguns pontos do modelo apresentaram diferenças significativas comparando-se o efeito do *springback* nas medidas reais com as simuladas. Esta diferença foi levantada e notou-se um erro acima do esperado, mas se tratando de simulação numérica de estampagem, podem-se esperar erros de até 30%, conforme mencionado por Reis.⁽⁷⁾

Estes erros podem ser provenientes de inúmeras variáveis tais como variações de dimensões da matriz real em relação à projetada via CAD/CAE/CAM durante sua fabricação; não-homogeneidade do material utilizado (material cladeado); diferença de microestrutura e de comportamento do material de uma chapa laminada para outra.

Em função disso, é necessário aperfeiçoamento contínuo em direção a validação da análise numérica, bem como conhecer mais a fundo o comportamento dos materiais.

5 CONCLUSÃO

Diante do mercado em constantes mudanças, que se transforma em um sistema quase sem fronteiras comerciais entre os melhores do mundo, faz-se necessário o uso de ferramentas que melhorem cada dia mais a produtividade das empresas. Assim, é possível ganhar vantagem competitiva neste mercado para satisfazer as necessidades de clientes cada vez mais exigentes, produtos cada vez mais complexos e pela sobrevivência da empresa neste mundo globalizado.

Os CAD/CAE/CAM utilizados trazem ganhos evidentes no tempo de fabricação do processo de conformação de segmentos complexos, na diminuição de 60% a 95% do tempo de retrabalho dessas peças. Os especialistas desenvolvem-se cada vez mais devido à necessidade de aprimoramento contínuo do método de trabalho, bem como das propriedades mecânicas e outras variáveis envolvidas. Além dos especialistas, os colaboradores do chão de fábrica são peças fundamentais, e vão sendo orientados sobre a forma de trabalhar, aumentando a eficiência do processo que se torna mais ágil, tornando-os mais qualificados a função. Foi possível uma perfeita interação dos softwares devido à compatibilidade das extensões existentes e pretende-se explorá-los cada vez mais para o seu melhor aproveitamento e ganhos maiores em termos de produtividade e *know how*.

Além disso, a metodologia apresentada é vantajosa no que diz respeito ao trabalho a frio, neutralizando a dificuldade do trabalho a quente em relação à necessidade de um forno próximo a prensa, o risco a saúde e integridade física do colaborador, roupas e cuidados especiais para com o manuseio e movimentação da peça quente e aqueles materiais especiais que não podem ser aquecidos, como foi exemplificado neste estudo com o material cladeado.

Agradecimentos

A Deus pela força, meus pais e Leandro pelo apoio, Kotinda pela paciência, incentivo e grandes ensinamentos diários, Leonardo pelo apoio técnico que vem dando com muita boa vontade. À Usiminas Mecânica pelo incentivo à pesquisa e ao aprendizado imensurável que tem proporcionado, ao Superintendente Davos por reconhecer a importância da pesquisa na empresa, em especial ao Gerente Raul por acreditar e incentivar este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CETLIN, Paulo Roberto & HELMAN, Horácio. *Fundamento da Conformação Mecânica dos Metais*. – 2ª Ed. - Editora Artliber Ltda. São Paulo, 2005.
- 2 BEER, Ferdinand P. & JOHNSTON, Elwood Russel. *Resistência dos Materiais*. 3ª edição. São Paulo: MAKRON Books, 1995.
- 3 CALLISTER, William D. Jr. *Introduction of Materials Science & Engineering*. 5th edition, John Wiley & Son, 2000.
- 4 WAGONER, R. H.; CARDEN, W. P.; LI K. P. *Simulation of Springback*. *Internacional Journal of Mechanical Sciences*. Page 103-122. 2002.
- 5 LIU, Wing Kam; CAO, Jian; QIAN, Dong; SONG, Nan. *Effective Models for prediction of springback in flanging*. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 123. Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston. October, 2001.
- 6 GEDEON, Mike. *Elastic Springback*. Brush Wellman Customer Technical Service Department. Cleveland, 2000. Vol 2 – nº.5



- 7 REIS, Leonardo Camilo dos. *Estudo dos Parâmetros de Influência na simulação numérica de estampagens de Chapas*. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG. 2002.
- 8 ANSYS/LS-DYNA – Manual Teórico. Abril de 2006.
- 9 ANSYS/LS-DYNA – User’s Guide for Release. Abril de 2006.