CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DEPARTAMANTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MATHEUS BARBOSA DE MEDEIROS ALVIM

ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE QUEBRA-RUGAS ANALÍTICO E GEOMÉTRICO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESTAMPAGEM.

BELO HORIZONTE

MATHEUS BARBOSA DE MEDEIROS ALVIM

ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE QUEBRA-RUGAS ANALÍTICO E GEOMÉTRICO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESTAMPAGEM.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2018

MATHEUS BARBOSA DE MEDEIROS ALVIM

ESTUDO COMPARATIVO DO USO DE QUEBRA-RUGAS ANALÍTICO E GEOMÉTRICO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESTAMPAGEM.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes

Prof. Dr. Allison Duarte da Silva

Prof. Dr. Leonardo Neves

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, aos meus pais por todo amor, paciência e dedicação. Agradeço por acreditarem em mim e por me incentivarem a sempre buscar o conhecimento e a fazer o que é certo.

À minha namorada, Camila, por sempre me apoiar e me incentivar a ser cada dia melhor que antes.

A todos os professores do DEMAT, principalmente ao professor Wellington, que sempre foram minha referência quanto à busca do conhecimento científico.

Ao Gustavo, Vinícius e Pedro que estiveram comigo desde o início do curso e que tenho o prazer de tê-los como amigos. Pela união ao longo dessa trajetória e por toda ajuda nos momentos de turbulência.

Agradeço aos colaboradores da 6Pro: Ricardo, Rodrigo, Alisson, Pedro, Olavo, Victor, Leandro e Mariana por me auxiliarem nesse trabalho, por contribuírem para o meu desenvolvimento pessoal e profissional e por fazerem cada dia ser mais um dia de aprendizado.

RESUMO

Dentre os parâmetros para estampar uma chapa, a utilização do quebra-rugas se faz necessário para obter um controle da movimentação do material estampado. Desta maneira, consegue-se uma deformação plástica uniforme na geometria da peca. O quebra-rugas possui algumas formas padronizadas que criam uma força de restrição em relação ao movimento da chapa, impedimento falhas por enrugamento ou fratura. As diferentes geometrias do quebra-rugas influenciam diretamente na magnitude da força de restrição, fazendo com que apareçam diferentes resultados de estiramento do produto. Com o objetivo de analisar os diferentes estados de tensões do processo de estampagem causados pela utilização do quebra-rugas analítico e geométrico, este trabalho irá utilizar o Método dos Elementos Finitos para simular o processo de conformação de chapas metálicas. Foram feitas comparações das simulações obtidas com uma chapa de aço FEP05 com espessura de 2 mm, e variações dos parâmetros do quebra-rugas, como o raio e geometria. As simulações com o quebra-rugas analítico apresentaram diferença quanto à ruptura e estricção da CLC quando comparado aos mesmos parâmetros do geométrico. As análises de afinamento e deformação plástica se mostraram incoerentes com os estados de tensões por não levarem em conta as tensões compressivas do processo.

Palavras-chave: Quebra-rugas, Estampagem, Conformação, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Among the parameters for stamping a metal sheet, the use of a drawbead is necessary to obtain a control of the movement of the stamped material. In this way, a uniform plastic deformation is achieved in the piece. The drawbead has some standard shapes that create a restraining force in relation to the movement of the metal sheet, preventing wrinkling failure or fracture. The different geometries of the drawbead have direct influence on the magnitude of the restraining force, leading to different results of the final product. Aiming to analyze the different results of the stamping process, caused by the use of the equivalent and geometric drawbead, this work will use the Finite Element Method to simulate the sheet metal forming process. Comparisons of the obtained simulations were made with a 2-millimeter thickness FEP05 steel sheet, and variations of the parameters of the drawbead. The simulations with equivalent drawbead showed differences regarding the CLC rupture and tightness when compared to the same geometric parameters. The thinning and plastic deformation analyzes were inconsistent with the stress states because they did not consider the compressive stresses of the process.

Key words: Drawbead, Stamping, Sheet Metal Forming, Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de estampagem.	16
Figura 2 - Esquema de uma (a) prensa de batida seca, (b) prensa de simples efeito e (c) j	prensa
de duplo efeito	17
Figura 3 - Estado de tensões nas três regiões de um prato estampado	
Figura 4 - Esquema da deformação da chapa com o uso de um quebra-rugas	20
Figura 5 - Geometrias do quebra-rugas nos formatos de (a) degrau (b) circular e (c) quad	drado.
	20
Figura 6 - Esquema de discretização de um sistema contínuo	22
Figura 7 - (a) Malha sem refinamento (b) malha com refinamento	23
Figura 8 - Representação da penetração da malha ao final do curso do processo com e se	em
remalha	24
Figura 9 - Gráfico de Tensão vs. Deformação das curvas convencional e real	25
Figura 10 - Primeira fase da Implementação da simulação de estampagem	26
Figura 11 - Segunda fase da implementação da simulação de estampagem	27
Figura 12 - Terceira fase de implementação da simulação de estampagem	27
Figura 13 - Looping de design, simulação de produto e feasibility	28
Figura 14 - Diferença das formas do quebra-rugas analítico e geométrico	31
Figura 15 - Fluxograma da metodologia do trabalho	
Figura 16 - Detalhamento da geometria da matriz	33
Figura 17- Detalhamento da linha de blanque	33
Figura 18- Curva de escoamento do aço FEP05	34
Figura 19 - Curva limite de conformação do aço FEP05	34
Figura 20-Distribuição das ferramentas de estampagem	35
Figura 21- Curva de referência para o fator de velocidade	36
Figura 22- Árvore de atributos da simulação	
Figura 23- CLC da simulação 1	
Figura 24- CLC da simulação 2	40
Figura 25- CLC da simulação 3	40
Figura 26- CLC da simulação 4	41
Figura 27 - Configuração da malha heterogenia no blaque	42
Figura 28- Comparação do afinamento das simulações 1 e 2	43
Figura 29- Comparação do afinamento das simulações 2 e 3	43

Figura 30- Resultados da deformação plásticas das simulações 1, 2, 3 e 4	44
Figura 31- Resultados das malhas das simulações 1, 2, 3 e 4	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Dados de entrada para criação do material	35
Tabela 2-	Definições dos parâmetros do quebra-rugas.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CAD Desenho assistido por computador
- MEF Método dos elementos finitos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1. Objetivos Gerais	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
3.1 Estampagem	
3.1.1 Processo	15
3.1.2 Ferramentaria	16
3.1.3 Defeitos das peças estampadas	
3.1.4 Quebra-rugas	
3.2 Simulação Computacional	21
3.2.1 Método dos Elementos Finitos	21
3.2.2 Remalha	23
3.2.3 Comportamento do Material	
3.2.4 Simulação Computacional Aplicado a Estampagem	
3.2.5 Modelos de simulação de estampagem	
3.2.6 Dados de Entrada	
3.2.7 Simulação com uso do quebra-rugas	
4 MATERIAIS E MÉTODOS	
4.1 Modelagem da Matriz e da Linha do Blanque	
4.2 Dados de Entrada do Material	
4.3 Dados de Entrada do Ferramental	
4.4 Definição dos parâmetros do quebra-rugas analítico e geométrico	
4.5 Simulação do processo de estampagem	
4.6 Análises	
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	

5.1 Análise da curva limite de conformação (CLC)	
5.2 Análise de Afinamento	42
5.3 Análise de Deformação Plástica	44
5.4 Análise da Malha	45
6 CONCLUSÃO	46
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de conformação mecânica, a estampagem é muito empregada industrialmente por possibilitar produtos com formas complexas. O processo de estampagem caracteriza-se em deformar, permanentemente uma chapa metálica, ou seja, atingindo o regime plástico do material. Para isso, são utilizadas ferramentas com geometrias complementares, chamadas de matriz e de punção. A chapa metálica, antes com forma linear, é posicionada entre a matriz e o punção que, por sua vez, possuem uma organização de forma e movimento de modo a possibilitar o encaixe das mesmas, conformando a chapa até chegar na forma final (ALTAN, 2012).

A eficiência do processo de estampagem está ligada à movimentação da chapa metálica, desde o início do contato com o punção, até a total penetração na matriz. São necessárias forças de restrição para conseguir o controle da chapa, evitando defeitos no produto como enrugamento ou até rupturas. As forças de restrição podem ser criadas com o uso de um prensa-chapas ou com o uso de um quebra-rugas. O prensa-chapas cria forças devido ao atrito da ferramenta com a chapa, mas possui certas restrições quanto ao limite da carga aplicada. Já os quebra-rugas, são geralmente usados quando as forças de restrição exercidas pelo prensa-chapas não são suficientes (SCHAEFFER, 2004).

O quebra-rugas fica na matriz ou no prensa-chapas, como parte das mesmas, podendo possuir diferentes geometrias. Ele é composto por uma saliência e uma reentrância de formato complementar na ferramenta oposta. Com a presença do quebra-rugas no processo de estampagem, após o fechamento das ferramentas, a chapa já terá seu primeiro estiramento. Sendo assim, quando se iniciar o repuxo, aparecerão forças provenientes da resistência mecânica da chapa ao passar pelo quebra-rugas, além das forças de restrição (MURALI, et al, 2012).

A geometria do quebra-rugas influencia o resultado da estampagem, como por exemplo, a variação dos valores das forças de restrição à movimentação da chapa pelo interior da matriz. Neste caso, pode-se variar parâmetros como tipo (quadrado, circular ou degrau), comprimento, profundidade e valor dos raios de um quebra-rugas. Com a variação dos raios, por exemplo, as forças de restrição causadas pelo quebra-rugas também variam, modificando a quantidade de deformação da chapa (quanto menor o raio, maior a restrição e, portanto, maior a deformação) (SAMUEL, 2002).

Na simulação computacional dos processos de estampagem, o quebra-rugas pode ser definido pelos modelos analítico ou geométrico. Quando analítico, o quebra-rugas é representado por uma linha artificial na superfície da ferramenta que exerce forças de restrições. Já o geométrico, é a representação real da cavidade do quebra-rugas na ferramenta. O modelo analítico foi desenvolvido com o objetivo de reduzir o tempo de cálculo do modelo geométrico, já que o último cria um refino considerável na malha de simulação. Com o desenvolvimento tecnológico crescente da área de simulação, novos algoritmos estão são desenvolvidos para prever as forças de restrições causadas no processo real (ESI, 2018).

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Realizar um estudo comparativo das simulações de estampagem com o uso do quebra-rugas analítico e geométrico existentes nos *softwares* de elementos finitos, a fim de demonstrar qual a acurácia do analítico em relação ao geométrico.

2.2. Objetivos Específicos

a) investigar o efeito da mudança da geometria do quebra-rugas analítico e geométrico na distribuição das tensões a partir de análises por curvas limite de conformação (CLC), afinamento e deformação plástica, obtidas por simulação com uso de elementos finitos;

b) verificar a semelhança de respostas apresentadas ao término da simulação para os dois modos de quebra-rugas adotados neste trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estampagem

Processos que permitem a fabricação de perfis variados a partir de chapas metálicas, ganharam espaço no mercado. Isto pode ser explicado pela possibilidade de confeccionar peças com formas extremamente complexas. Além disso, a produção, sendo em grande escala, permite a utilização em indústrias de ramos diversificados, tais como a automobilística e a aeroespacial (ALTAN, 2012).

Basicamente, o blanque (parte metálica que serve de matéria prima para as peças obtidas na estampagem) é submetido à esforços de tração e compressão em todos os elementos de volume, nas três direções principais perpendiculares entre si. Logo, o perfil formado, é consequência de todos os esforços aplicados (DIETER, 1981). Segundo Sachs (1951), os produtos oriundos dos processos de estampagem podem ser classificados em cinco categorias: peças curvadas; peças flangeadas; seções curvas; peças com embutimentos profundos e peças com embutimentos rasos.

3.1.1 Processo

O processo de estampagem de chapas metálicas compreende três operações básicas até chegar no produto final. Essas operações são definidas como corte, dobra e estampagem profunda. A operação de corte ocorre no preparo do blanque e após a estampagem para retirada da rebarba. O objetivo do corte pode ser tanto para realizar um furo, quanto para separar o componente da chapa. A dobra ou dobramento, é uma operação relativamente simples, mas com problemas de certa complexidade, como o retorno elástico. O dobramento pode ser livre, em matriz ou calandrado e baseia-se em transformar segmentos retos em curvos. A estampagem profunda, também conhecida por embutimento, caracteriza-se por deformar permanentemente toda a área da chapa metálica destinado ao produto final (SCHAEFFER, 2004).

De maneira geral, no processo de estampagem, uma chapa metálica é conformada por ferramentas anexadas à uma prensa, até atingir o regime plástico, dando a forma do produto. São geradas quantidades mínimas de sucata, com o processo ocorrendo, na maioria das vezes, com apenas um passo da prensa (DIETER, 1981).

Existem duas vertentes de produção bastante disseminados industrialmente, que são o modo de transferização ou *transfer*, e o método progressivo. A produção por transferização consiste em fazer operações distintas em diferentes prensas, ou seja, cada vez que o produto passar por

uma operação, um operário ou um robô deverá transferir a peça para uma nova ferramenta. Esse método torna a produção mais cadenciada, necessitando de uma maior planta de fábrica e gastos com automação e máquinas. Por outro lado, o fato da peça mudar de prensa permite que diferentes balanceamentos sejam usados para as diferentes operações, criando mais possibilidades de produção (SENAI, 2016).

O método progressivo é utilizado para manufaturar peças em série nas quais a formação do produto depende de vários estágios. Sua disposição ferramental permite a combinação de diferentes operações na mesma prensa. A alimentação do estampo é feita com tiras em pedaços ou de forma contínua saindo de bobinas. A cada passo da tira o produto vai se formando parcialmente, mantendo-se sustentado pelo galho (tira de aço que liga o produto à chapa) até o último estágio, onde se atinge a forma final (BRITO, 2005)

3.1.2 Ferramentaria

As ferramentas necessárias para que uma chapa seja conformada são chamadas de matriz e punção. A chapa metálica é forçada para dentro da matriz (côncava), por meio do punção (convexo). Essas ferramentas possuem formatos complementares, ou seja, quando somadas possuem a forma do contorno da peça conformada (CETLIN e HELMAN, 2005). Na Figura 1 é possível observar o processo de estampagem esquematicamente.





Fonte: SENAI, 2016.

A cinemática do processo varia de acordo com o tipo de prensa a ser utilizada. As prensas de estampagem podem ser mecânicas ou hidráulicas. As mecânicas possuem, geralmente, um curto espaço de tempo do início ao fim do processo e a energia armazenada por um volante é transferida para um êmbolo gerando uma pancada rápida. Elas são comumente empregadas em operações de corte, dobra e estampagem rasa. Já as prensas hidráulicas, possuem uma ação mais cadenciada, com pancadas lentas e são mais utilizadas em operações de estampagem profunda (DUARTE e VIANA, 2017).

As prensas, tanto mecânicas quanto hidráulicas, podem ser classificadas quanto às suas configurações de montagem e de componentes. Industrialmente, são definidas como batida seca, simples efeito e duplo efeito (DIETER, 1981), como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de uma (a) prensa de batida seca, (b) prensa de simples efeito e (c) prensa de duplo efeito.



Fonte: DUARTE e VIANA, 2017.

A prensa de batida seca possui como ferramentas apenas a matriz e o punção para realizar a estampagem, fazendo com que haja limitações no processo. Logo é viável, apenas para peças com geometrias simples, devido à falta de um controle estável da entrada da chapa na matriz. Já a prensa de simples efeito, assim como a de batida seca, possui somente um movimento relativo da matriz em relação ao punção que fica estático. A principal diferença entre essas duas prensas é a presença do prensa-chapas na de simples efeito, que possibilita o controle do fluxo de movimentação da chapa durante a conformação. Desta maneira, a prensa de simples efeito permite a produção de geometrias mais complexas (ALTAN, 2012).

Diferente das outras prensas, a de duplo efeito possui dois movimentos na parte superior e o punção que movimenta em relação a matriz. A porção onde o prensa-chapas está fixado,

desce primeiramente até tensionar o blanque na matriz. Logo em seguida, o punção desce ao fim de curso para criar a geometria. As prensas de duplo efeito têm perdido cada vez mais espaço na indústria devido sua menor complexidade e a boa eficiência das prensas de simples efeito (DUARTE e VIANA, 2017).

3.1.3 Defeitos das peças estampadas

Durante o processo de estampagem, alguns defeitos podem ocorrer na peça conformada. As trincas caracterizam-se em defeitos críticos que inviabilizam a peça, e as rugas são defeitos considerados estéticos. Esses dois defeitos são os que apresentam maiores relevâncias na estampagem, mas existem outros como a estricção, ondulações e perda das tolerâncias dimensionais. Os esforços causados durante a conformação da chapa, tanto de tração quanto de compressão, são os responsáveis por essas falhas no produto. Durante a estampagem profunda de um prato, por exemplo, o blanque é submetido a três tipos distintos de deformação em diferentes regiões (COSTA, 1987), como mostrado na Figura 3.





Fonte: COSTA, 1987.

O fundo da chapa, ou seja, a região que estará em contato direto com a extremidade do punção, sofrerá uma compressão forçando o material a ter um estiramento radial, diminuindo a sua espessura. Já na região da parede, o atrito constante da chapa com a matriz e o punção atenuam ainda mais a tração no sentido longitudinal, fazendo com que o afinamento seja maior que no fundo (MAGNABOSCO e OLIVEIRA, 1994).

Quando essas forças de tração excedem a magnitude suportada pelo material, ou seja, quando atingem o limite de resistência à tração, trincas começam a propagar invalidando o produto. O prensa-chapas, nesse caso, aumenta a restrição da movimentação da chapa, elevando a força de tração, maximizando as rupturas. Para a diminuição das trincas, duas medidas podem ser tomadas. Quando se utiliza o prensa-chapas, a diminuição da força do mesmo, causa o alivio das tensões, fazendo com que o estiramento não seja severo. Outra opção, é realizar duas operações de estampagem, iniciando com diâmetros maiores da cavidade da matriz até a última etapa com o diâmetro desejado (SCHAEFFER, 1999).

Na região da flange, forças de compressão tangencial fazem com que o material enrugue. Isto ocorre pois o blanque redondo é forçado pelo punção a entrar na matriz, de menor diâmetro que o blanque. Pela lei de conservação de volume, o caminho natural a ser seguido é o dobramento lateral da região circunferencial, caracterizando o enrugamento. Para esse tipo de defeito, o prensa-chapas é usado como solução, criando uma força de restrição, o que evita ondulações na flange (DOEGE e BEHRENS, 2007).

Para casos que demandam altas forças de restrição, seriam necessárias altas pressões no prensa-chapas e, consequentemente, prensas muito robustas. Isto pode acarretar em desgaste nas ferramentas ou escoriação (*galling*) na chapa, além de ser um grande incremento no custo final do processo. Para evitar esses problemas, é usual adotar a utilização de um quebra-rugas (MURALI, et al, 2012).

3.1.4 Quebra-rugas

O quebra-rugas é uma nervura que possui uma cavidade na matriz, ou no prensa-chapas, e uma reentrância de formato complementar na ferramenta oposta. Ele é responsável pela modulação do movimento do blanque durante a operação de estampagem, influenciando no estado de tensões da chapa. Em outras palavras, quanto maior a restrição causada pelo quebra-rugas, maior a dificuldade de embutimento da chapa na matriz, alongando-a cada vez mais (HAASE, et al, 2017).

Na Figura 4 é possível observar a região do quebra-rugas exposta em um corte frontal bidimensional demonstrando a deformação sofrida pela chapa ao passar pelo mesmo.



Figura 4 - Esquema da deformação da chapa com o uso de um quebra-rugas.

Existem diversas geometrias possíveis para formar o quebra-rugas, variando normalmente, a quantidade de cantos arredondados que causam a restrição. Dentre as principais formas, as mais usadas industrialmente são a circular, quadrada e degrau, como representado na Figura 5. Os raios e alturas podem ser uniformes ou variáveis, podendo conter uma combinação de perfis quadrado e circular. Isso permite obter restrições diferenciadas para cada região específica da peça, sendo possível alcançar um nível satisfatório de estiramento sem causar rupturas ou afinamentos excessivos. É possível, até mesmo, utilizar dois quebra-rugas em paralelo. O quebra-rugas fica posicionado a uma distância de aproximadamente 25 mm da linha de corte do blanque, e quando usado em paralelo, a distância de um para o outro é de 15 mm (SAMUEL, 2002).





Fonte: SAMUEL, 2002 – Adaptado.

Fonte: WALUYI et al, 2008 - Adaptado.

3.2 Simulação Computacional

Desenvolvida a fim de minimizar os custos com prototipagem, a simulação computacional tornou-se uma ferramenta industrial indispensável nos dias de hoje. Sua utilização faz-se a partir de algoritmos matemáticos, lidos por computadores, que possibilitam uma representação do funcionamento de variados tipos de operações ou processos industriais. Em outras palavras, a simulação computacional é uma ferramenta capaz de criar um modelo de um sistema real, para realizar experimentos com o intuito de entender e avaliar os resultados de um determinado processo (MACKERLE, 2002).

O uso da simulação não descarta a utilização de protótipos, na verdade, o ideal é usá-los de forma sinérgica, já que a prototipagem valida a simulação. Isto é necessário, pois o modelo matemático é feito discretizando a geometria do produto ou processo em diversos pontos para chegar a uma solução aproximada. Essa solução possui erros associados e acumulativos que podem ultrapassar a tolerância do projeto invalidando a simulação (SZABÓ e BABUSKA, 2011).

Os algoritmos matemáticos usados pelos *softwares* de simulação variam de acordo com o processo a ser simulado. Existem diversos métodos e modelos, sendo o Método dos Elementos Finitos (MEF) o mais utilizado (HUTTON, 2004).

3.2.1 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é baseado na discretização de uma geometria em diversos elementos, cujas extremidades são delimitadas por nós, como mostrado na Figura 6. Os elementos podem possuir diferentes geometrias e tamanhos, que são definidos de acordo com a geometria da peça, o tipo de análise que será realizada, os esforços aplicados e as condições de contorno. Todo esse sistema discretizado é chamado de malha de elementos finitos, podendo ser utilizada tanto em duas ou três dimensões (SABONNADIÈRE, 1993).



Figura 6 - Esquema de discretização de um sistema contínuo.

Fonte: ZIENKIEWICZ e TAYLOR, 1988 – Adaptado.

Os nós podem ser "ligados" aos seus adjacentes, podendo formar polígonos simples de 3 ou 4 lados. Assim, os fenômenos físicos que ocorrem ao longo do tempo de processo, como a deformação e a transferência de calor, são calculados para cada nó, considerando a mútua influência entre esses em uma disposição matricial (DUARTE e VIANA, 2017).

A malha de elementos pode representar uma geometria com maior ou menor precisão, de acordo com as nuances do produto. Na Figura 7(a) é mostrada que a malha de nós obtida não representa exatamente a geometria de uma circunferência. Um aumento do número de nós (e assim de elementos) resultaria em uma representação mais adequada da forma ou curvatura da geometria e, portanto, em cálculos mais próximos da realidade. Na Figura 7(b) observa-se um refinamento localizado da malha de elementos finitos com o intuito de melhor representar a geometria proposta. O aumento no número de elementos também proporciona um aumento na quantidade de equações a serem conduzidas computacionalmente, aumentando assim o tempo de simulação. As malhas tridimensionais aumentariam muito o tempo de cálculo em comparação às bidimensionais. Uma representação em três dimensões significa uma maior complexidade das equações (cálculos em três direções) e também um grande acréscimo no número de elementos para a representação do volume (SILVA et al, 2017).



Figura 7 - (a) Malha sem refinamento (b) malha com refinamento

Fonte: IFET, 2011.

3.2.2 Remalha

A prática da remalha é uma alternativa considerada nos modelos com grandes deformações, como o da estampagem profunda. Dependendo da complexidade da forma final da peça, os elementos podem se distorcer de modo extremos ao longo do processo, implicando em grandes erros de cálculo. Para evitar esses fenômenos, os programas de elementos finitos, com foco em deformação plástica, estabelecem critérios de identificação de distorções dos elementos e remalham a nova forma da geometria, interpolando os valores como tensão, deformação e temperatura, entre outros, da malha anterior na nova malha (DUARTE e VIANA, 2017).

Compreende-se que a operação de remalha busca evitar grandes incertezas nos resultados calculados. Um critério de remalha bastante utilizado é a penetração da malha na matriz. Neste caso, a penetração de uma malha é representada pela distância entre a borda do elemento penetrante e a aresta relativa da matriz. Na Figura 8 é possível observar a representação de uma malha em processo de conformação massiva com e sem os critérios de remalha durante o curso (SILVA et al, 2017).



Figura 8 - Representação da penetração da malha ao final do curso do processo com e sem remalha.

Fonte: SILVA et al, 2017.

3.2.3 Comportamento do Material

Com o objetivo de reduzir a complexidade dos cálculos necessários para se prever um resultado, o comportamento de um material é de suma importância para a simulação. Esse comportamento pode ser simplificado como sendo rígido, elástico, plástico ou elasto-plástico. O regime rígido considera que a geometria pertencente ao sistema em análise, não se deforme, desprezando toda e qualquer variação dimensional. Salvo algumas aplicações específicas, é muito comum considerar que o ferramental envolvido no processo de conformação mecânica seja rígido, não computando a influência da sua deformação elástica sobre a forma final da peça conformada. Por outro lado, modelos elásticos são apropriados para situações em que se deseja avaliar o estado de tensões sobre as ferramentas e pequenas variações dimensionais em qualquer geometria, sejam elas resultantes de esforços externos ou variações térmicas (DUARTE e VIANA, 2017).

Os materiais considerados plásticos se mantêm rígidos enquanto os esforços externos sobre eles não resultam em tensões internas que excedam o limite de escoamento, sendo por isso também conhecidos por rígido-plásticos. Caso os esforços externos causem tensões além do limite de escoamento do material, a geometria modifica-se, deformando-se de forma

permanente de acordo com o comportamento determinado pela curva de tensão verdadeira em função da deformação verdadeira em tração durante o regime plástico.

Por fim, o comportamento elasto-plástico calcula as variações dimensionais de uma geometria considerando suas deformações elásticas e plásticas simultâneas, assim como as distorções elásticas da peça, após seu descarregamento (retorno elástico). (SILVA et al, 2015)

A curva verdadeira do material se torna necessária para realizar a simulação computacional de um processo de conformação mecânica. A curva verdadeira pode ser estratificada em dois regimes: elástico e plástico, ou seja, uma combinação entre o comportamento elástico do material, basicamente o seu módulo de Young, e o seu comportamento plástico, a curva de escoamento. Logo, um comportamento elasto-plástico seria representado pela soma destes dois regimes. Na Figura 9 são mostradas as curvas de tensão em função da deformação convencional e verdadeira (ALTAN e TEKKAIA, 2012).



Figura 9 - Gráfico de Tensão vs. Deformação das curvas convencional e real.

3.2.4 Simulação Computacional Aplicado a Estampagem

Existem dois campos de simulação distintos na área de estampagem, sendo eles a simulação de produto e a de processo. A peça estampada, ou seja, o produto, é simulada de maneira a verificar se as características de geometria, material e espessura, suportará de forma segura às solicitações que estará exposto quando montada em um conjunto. A simulação de processo

Fonte: SILVA et al, 2017.

tem como objetivo validar a possibilidade de executar a operação de estampagem, as rotas de operações, dimensionamento da matéria-prima e a definição das variáveis de entrada (GUO, 2013).

O processo de implantação de simulação ocorre de forma similar nas indústrias: a função desta ferramenta evolui a partir de três fases distintas. Na primeira fase de implantação, normalmente a simulação faz o seu trabalho paralelamente ao *try-out*, com a função limitada de testar soluções para ferramenta e produtos problemáticos já existentes em fábrica, como mostrado na Figura 10. Isso ocorre por três motivos principais. Devido a urgência de solução desses problemas, por ter-se pouca confiabilidade nos resultados e pelos usuários ainda estarem em fase de treinamento. Logo, é preferível trabalhar-se com produtos já existentes que permitam a obtenção mais rápida dos resultados e a sua comparação com o virtual. Ainda assim, o ganho é notável, pois acelera o trabalho, reduz o desperdício de matéria-prima e o número de modificações ineficazes nas ferramentas (AGUIAR, 2017).





Fonte: DUARTE e VIANA, 2017.

Na segunda fase de implantação, a simulação se adianta na linha temporal do trabalho em função do aumento da confiabilidade nos resultados e do ganho de *know-how* por parte dos usuários, como mostrado na Figura 11. Passa, então, a atuar com foco na fase de desenvolvimento da rota de processo, que é o momento em que se define exatamente com será cada operação de estampagem bem como qual terá a função de formar, recortar ou flangear cada parte do produto. Com isso, o benefício é muito maior, já que durante o desenvolvimento do processo ainda é possível atuar no projeto das ferramentas antes de iniciar a sua fabricação. Em muitos casos o processo será otimizado, tornando-se mais barato

e eficiente. A simulação do processo completo é chamada de "Formability" (ALTAN e TEKKAIA, 2012).



Figura 11 - Segunda fase da implementação da simulação de estampagem.

Fonte: DUARTE e VIANA, 2017.

Na terceira fase, a simulação se adianta ainda mais na linha temporal do trabalho, passando a atuar desde a concepção do produto, como mostrado na Figura 12. Porém, não elimina a necessidade da sua participação nas outras etapas descritas anteriormente. O objetivo é verificar-se também a factibilidade do produto por meio de simulações rápidas e processos simplificados, por isso esta etapa recebe o nome de "*feasibility*" (DUARTE e VIANA, 2017).



Figura 12 - Terceira fase de implementação da simulação de estampagem.

Fonte: DUARTE e VIANA, 2017.

3.2.5 Modelos de simulação de estampagem

O *feasibility* trata-se da simulação de estampagem de um determinado produto no momento em que este ainda se encontra em sua fase de desenvolvimento (design). O intuito é, como o próprio nome diz, verificar se esse produto poderá ser obtido a partir do processo de estampagem com o material e espessura determinados para tal. Caso a simulação de *feasibility* conclua que este produto não possa ser obtido, torna-se necessário propor modificações no design, material ou espessura que solucionem os problemas encontrados, tornando-o, assim, factível. Essas modificações propostas pela engenharia de processos no design do produto são chamadas "co-design". Na Figura 13 é mostrado o *looping* entre o *design*, a simulação de produto e o *feasibility* (AGUIAR, 2017).



Figura 13 - Looping de design, simulação de produto e feasibility.

Fonte: ALTAN, 2012 – Adaptado.

O ganho que se tem com o *feasibility* é evitar modificações tardias no design do produto, que podem acarretar em problemas de montagem com outros componentes ou problemas estruturais. Os problemas de montagem ocorrem porque o desenvolvimento de um produto leva em conta os pontos de acoplamento nos outros componentes, que devem obedecer às condições de área mínima de solda, planicidade, paralelismo e furação, sendo assim, não podem ter interferências. Existe um número muito grande de componentes metálicos e não metálicos que devem ser acoplados ao conjunto. A montagem do mesmo normalmente é projetada da forma mais otimizada possível com relação ao espaço disponível. Essas modificações tardias ocorrem grandes riscos de causar interferências ou prejudicar as condições de acoplamento. Modificar os componentes adjacentes gera um efeito cascata que

ao final resultará em grandes atrasos no desenvolvimento geral. Deve-se considerar ainda que os componentes costumam ser divididos em plataformas distintas de trabalho, e a comunicação entre essas plataformas não é tão simples e rápida a ponto de assimilarem modificações facilmente (DUARTE e VIANA, 2017).

Durante a concepção de um produto são feitos cálculos estruturais que avaliam a vida útil do produto e o comportamento do mesmo em função das diversas solicitações do conjunto (simulação de produto). O produto só será aprovado se suprir todas as demandas estruturais. Modificações no design desse produto podem influenciar muito no seu comportamento, correndo o risco de invalidar os cálculos estruturais feitos anteriormente. Portanto, ao solicitar uma modificação tardia, é necessário, em alguns casos, refazer esses cálculos, não havendo nenhuma garantia que haverá aprovação do produto modificado (AGUIAR, 2017).

Segundo Duarte e Viana (2017), o *Full process* ou *Formability* consiste na simulação completa de todas as operações da rota de processo definida para um determinado produto. Nesta etapa, o processo deve ser validado por completo, garantindo a aprovação do produto em todas as análises solicitadas pelo cliente. As análises geralmente solicitadas no relatório final de validação estão listadas adiante:

- Alimentação do *blank*;
- Rugas e ondulações;
- Rupturas e risco de ruptura;
- Afinamento;
- Deformação plástica;
- Defeitos estéticos;
- Springback;
- Assentamento.

Além do relatório contendo todas as análises pertinentes ao produto em todas as operações, ao final da simulação de *full process* serão definidas e fornecidas as seguintes informações e arquivos CAD:

- Linha de *blank* posicionada;
- Linha do *blank* após o repuxo;

- Linhas de corte otimizadas;
- Geometrias de quebra-rugas;
- Informações de forças de conformação e sujeição;
- Curso necessário para a conformação.

3.2.6 Dados de Entrada

Para que todas as validações dos modelos de estampagem possam ser feitas, é necessário que determinados parâmetros sejam informados ao software de simulação. Essas variáveis são todos aqueles presentes em uma planta industrial de uma estamparia, para que o produto possa ser formado. Com relação a ferramentaria, são necessárias informações da força do prensachapas, o curso total da matriz até o fechamento com o punção, também chamado de "*stroke*" e, caso haja um quebra-rugas, a geometria do mesmo (ESI, 2018).

Para definir o material, existem informações essenciais e outras que ajudam a refinar o resultado para melhorá-lo. Das essenciais, a curva de escoamento, a anisotropia, o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e a densidade, fazem parte da confecção do material por parte do software. Já quanto às informações de refino, a curva limite de conformação (CLC) informa a tendência de enrugamento, a falta de estiramento e as rupturas durante o processo. A curva CLC, mesmo mostrando resultados essenciais para análise, não se faz necessária a informação, pois os *softwares* usam um conceito de algoritmo baseado na tese de Keeler. Segundo Keeler (1971), é possível plotar pontos referentes à deformação nas três direções radiais, a partir de um modelo levando em consideração o coeficiente de encruamento do material e a espessura da chapa.

3.2.7 Simulação com uso do quebra-rugas

O maior gargalo da simulação computacional é o tempo que o "solver" do *software* de elementos finitos demora para calcular o deslocamento dos nós dos elementos. Logo, quanto maior a quantidade de elementos, maior será o tempo de cálculo. Tendo isso como uma verdade, ferramentas são desenvolvidas pelas empresas detentoras dos *softwares* para otimizar esse tempo. Uma dessas ferramentas é o quebra-rugas analítico (ou equivalente), que possibilita ação do quebra-rugas na chapa metálica sem que o mesmo seja representado na malha de elementos finitos (HAASE et al, 2017).

O quebra-rugas geométrico, por sua vez, representa uma restrição física onde a matriz e o prensa-chapas tem sua geometria alterada. Desta maneira, a malha de elementos finitos, ao passar pelo anteparo, sofre um refino de seus elementos deixando o resultado mais acurado em relação ao analítico. O quebra-rugas geométrico representa a situação real do processo de estampagem. Na Figura 14 é possível observar a diferença das formas entre os quebra-rugas analíticos e geométricos (ESI, 2018).



Fonte: ESI, 2018.

Dentro do software de elementos finitos o quebra-rugas aplica dois tipos de força, sendo elas a força de restrição e a força de abertura. A força de restrição representa a ação restritiva exercida pelo quebra-rugas sobre o blanque. Já a força de abertura representa a ação do blanque no prensa-chapas quando o primeiro passa pelo quebra-rugas (ESI, 2018).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

As ferramentas de estampagem foram modeladas com o auxílio do software FreeCAD®, que possui domínio livre, e as simulações por elementos finitos foram produzidas com ajuda do software PamStamp®, com licença de uso cedida pela ESI Group mediante o intermédio dos agentes representantes da empresa no Brasil, a SIXPRO Virtual&Practical Process. A seguir é representada a sequência das atividades realizadas, esquematizada no fluxograma da figura 15.





Fonte: Produzido pelo autor.

4.1 Modelagem da Matriz e da Linha do Blanque

A matriz de estampagem foi modelada com uma geometria de repuxo que favorece o enrugamento. O raio final do produto tem a metade do tamanho do raio de entrada para forçar uma remalha mais refinada. Na Figura 16 é mostrado o detalhamento da geometria que será simulada.



Figura 16 - Detalhamento da geometria da matriz.

Fonte: Produzido pelo autor

A linha de corte do blanque foi modelada de maneira a alimentar toda a porção do repuxo e ainda possuir material suficiente para sofrer a ação do quebra-rugas, como mostrado na Figura 17.



Figura 17- Detalhamento da linha de blanque

Fonte: Produzido pelo autor

4.2 Dados de Entrada do Material

O aço FEP05 com espessura de 2 mm foi escolhido por ser comercialmente utilizado em processos de estampagem profunda. Os ensaios para dar entrada no material foram fornecidos por uma siderurgia na forma de uma planilha de pontos. A partir dos pontos do ensaio de tração e das deformações da CLC, foram plotados os gráficos de Tensão x Deformação verdadeira e o diagrama CLC, como mostrado nas Figuras 18 e 19, respectivamente.





Fonte: Produzido pelo autor





Fonte: Produzido pelo autor

A curva de Tensão vs. Deformação teve a deformação extrapolada até o valor de 1, para satisfazer os critérios do software. Os demais dados de anisotropia e coeficientes do material, foram extraídos de um catálogo da mesma siderurgia, como mostrados na Tabela 1.

DADOS DO MATERIAL		
Módulo de Young	210 GPa	
Coeficiente de Poisson	0,30	
Massa Específica	7,8 g/cm ³	
Anisotropia r0	1,62	
Anisotropia r45	1,7	
Anisotropia r90	2,32	

Tabela 1- Dados de entrada para criação do materi	al.
DADOS DO MATERIAL	

Fonte: Produzido pelo autor

4.3 Dados de Entrada do Ferramental

Primeiramente foi definido o uso de uma prensa simples efeito para o processo de simulação. A matriz e a linha do blanque feita no FreeCAD foram transferidas para o PamStamp para a confecção do prensa-chapas, do punção e do blanque, como mostrado na Figura 20.

Figura 20-Distribuição das ferramentas de estampagem.



Fonte: Produzido pelo autor

Os valores de curso da cinemática da prensa foram definidos a partir da profundidade do repuxo do bojo, sendo então usado o valor de 40 mm.

Já a força que o prensa-chapas exerce não é padronizada. Logo, foi determinado no software que o prensa-chapas teria uma velocidade relativa em relação à matriz com uma distância fixa entre as mesmas correspondente a espessura da chapa. Foi criada uma curva de referência, como mostrado na Figura 21.





Fonte: Produzido pelo autor

A curva possui um fator multiplicante de 2 para o fechamento da matriz no prensa-chapas, e um fator multiplicante de 5 até a chegada da matriz ao punção.

4.4 Definição dos parâmetros do quebra-rugas analítico e geométrico

Foram definidas quatro simulações sendo duas com o quebra-rugas analítico e duas com o quebra-rugas geométrico, com geometria quadrada. Os raios do macho da geometria das duas simulações iniciais foram de 2 mm, e das duas simulações finais, de 4 mm, como mostrado na Tabela 2.



Fonte: Produzido pelo autor

4.5 Simulação do processo de estampagem

A árvore de atributos do software foi programada para simular o processo de estampagem profunda, levando em consideração as etapas de fechamento da matriz com o prensa-chapas e a descida dos mesmos até o punção. A etapa de fechamento é chamada de Holding e foi inserido todas as ferramentas, além do blanque. Todo o ferramental foi configurado como sendo rígido e possuindo um atrito com o coeficiente de 0,12, em relação ao blanque. A etapa de repuxo é chamada de Stamping e foi inserido as mesmas condições de contorno para o ferramental e o blanque do Holding. Por fim, o solver do software foi acionado iniciando as simulações. Na Figura 22 é possível observar a árvore de atributos do software contendo as instâncias do projeto.

Objects attributes (Simulacao_03_equi_tcc)	×
Display list mode stage Cobject C stage Lobject L stage Lattribute Lattribute Lattribute Lobject	
By stage All stages By object All objects By attribute All attributes Manage stages Add attributes	• A •
Copy Paste □····································	_
Blank Global object OP20-STAMPING OP20-Die OP20-Die OP20-Punch OP20-Blankholder Blank OP20-Blankholder Global object	
1 2 3 4 5 Data check Kinematics check	Close

Figura 22- Árvore de atributos da simulação.

Fonte: Produzido pelo autor

4.6 Análises

As análises de CLC, deformação plástica, afinamento e malha foram feitas a partir dos dados simulados pelo próprio software. Na aba de *"contours"* do PamStamp, todos os gráficos, tabelas e imagens, foram retirados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise da curva limite de conformação (CLC)

Após todos os procedimentos descritos na metodologia serem efetuados, as curvas limites de conformação das quatro simulações feitas foram plotadas pelo software. As Figuras 23, 24, 25 e 26 apresentam a CLC do final do processo da simulação 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Na Figura 23 é possível visualizar que a chapa rompeu no raio superior em apenas um lado do produto. Ocorreu também uma estricção no raio superior em apenas um lado, mas situado em outra região.

É possível observar nas Figuras 23 e 25 a região com estiramento insuficiente entre o quebrarugas e a porção repuxada. Essa falta de estiramento, segundo Chen (1997), ocorreu devido à geometria do blanque, que possui as quinas arredondadas, facilitando a alimentação do mesmo durante o repuxo. Na Figura 24 com o uso do quebra-rugas analítico, não houve fratura na chapa e nem foi acusado nenhum tipo de enrugamento, mas ocorreu estricção. No caso dessa estricção, ela ocorreu no final do raio de entrada da matriz, em uma região oposta ao que foi encontrado na simulação 1.



Figura 23- CLC da simulação 1

Fonte: Produzido pelo autor



Fonte: Produzido pelo autor





Fonte: Produzido pelo autor



Fonte: Produzido pelo autor

Notou-se na figura 25 que o produto final não rompeu e não ocorreu estricção. Além disso, praticamente toda a porção do produto deformou plasticamente. Já na CLC da Figura 26, não houve fratura, mas ocorreu estricção em algumas regiões. As Figuras 24 e 26 que representam o quebra-rugas analítico, não apresentaram tensões compressivas durante todo o curso da estampagem.

Comparando os quatro resultados, verificou-se que as regiões de ruptura e/ou estricção ocorreram de forma assimétrica. De acordo com Silva et al (2016), este resultado não era esperado, já que as ferramentas e o blanque são simétricos e estão referenciados no mesmo centro. Deste modo, a previsão quanto à resposta apresentada pelo material seria que ocorresse uma distribuição mais homogênea das fraturas e das estricções. Uma explicação seria que a malha gerada automaticamente pelo software não ficou uniforme, deixando alguns elementos maiores que outros. Isso pode acarretar em uma fratura em um dos lados, aliviando as tensões do outro lado, não deixando fraturar.

Como exemplo, na Figura 27 é mostrada a distribuição da malha ao longo do blanque aonde percebe-se a heterogeneidade dos elementos ao longo da área útil.



Figura 27 - Configuração da malha heterogenia no blaque

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2 Análise de Afinamento

A análise de afinamento das regiões do produto das simulações 1, 2, 3 e 4 são apresentadas nas Figuras 28 e 29. Nas duas imagens é possível notar na região do quebra-rugas uma diferença considerável de afinamento, sendo os valores apresentados pelo quebra-rugas geométrico maiores que os detectados pelo analítico. Contudo, deve-se destacar que o quebra-rugas analítico não chega a atuar na sua região de atuação, iniciando apenas no raio de entrada da matriz. Já no decorrer do repuxo, nas duas figuras é possível observar uma aproximação entre os resultados do analítico e do geométrico, corroborando com os resultados encontrado por Meinders (1999).

Haase et al (2017) demonstraram uma relação próxima entre os resultados de afinamento e CLC em simulações com quebra-rugas geométricos, para previsão de estricções, rupturas, enrugamento e falta de estiramento. Essa análise foi confirmada com o presente trabalho, mas apresentou ressalvas com relação ao quebra-rugas analítico. Isto porque a CLC do quebra-rugas analítico não apresentou as tensões compressivas que definem o enrugamento, e as regiões de estricção não foram necessariamente as regiões de maior afinamento.



Figura 28- Comparação do afinamento das simulações 1 e 2

Fonte: Produzido pelo autor



Figura 29- Comparação do afinamento das simulações 2 e 3

Fonte: Produzido pelo autor

5.3 Análise de Deformação Plástica

De acordo com os resultados de deformação plástica mostradas na Figura 30, é possível notar uma maior distribuição da deformação nas simulações feitas com o quebra-rugas geométrico. O quebra-rugas analítico, por sua vez, praticamente não exibiu nenhuma deformação plástica na região fora do bojo.

Comparando as simulações que usavam o modelo geométrico, é possível notar uma maior deformação plástica na simulação 1. Isto ocorreu devido ao aumento das forças de restrição causados na mesma, devido o menor raio do quebra-rugas, quando comparado com a simulação 3. Já nos modelos analíticos, mesmo com a variação dos raios do quebra-rugas diminuindo as forças de restrição, os resultados da deformação plástica foram bem próximos assemelhando-se aos resultados visto na CLC das mesmas simulações.



Figura 30- Resultados da deformação plásticas das simulações 1, 2, 3 e 4

Fonte: Produzido pelo autor

5.4 Análise da Malha

A Figura 27 representa a malha de elementos finitos para cada simulação feita após o processo de estampagem. As simulações feitas com o quebra-rugas geométrico apresentaram maior refinamento da malha em relação às simulações feitas com o quebra-rugas analítico.

Segundo Silva et al (2016), esse resultado já era esperado devido ao critério de remalha que define o tamanho do elemento a partir do menor raio da geometria. Como o quebra-rugas geométrico cria uma forma física na geometria, diferentemente do analítico, a malha do mesmo deve ser mais refinada.



Figura 31- Resultados das malhas das simulações 1, 2, 3 e 4

45

Fonte: Produzido pelo autor

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou concluir que simulações feitas com os mesmos dados de entrada, tanto para o material quanto para o ferramental, o quebra-rugas analítico apresentou resultados distintos ao quebra-rugas geométrico. Desta maneira, podendo invalidar processos de estampagem que poderiam ter sido antes, aceitos como sendo válidos.

Quando comparados os resultados do quebra-rugas analítico modificando apenas os valores do raio, ou seja, de 2 mm e de 4 mm, para os mesmos dados de entrada, os resultados ficaram similares para as duas simulações, ao contrário do observado para a simulação executada com as mesmas variáveis para o quebra-rugas geométrico, situação em que foi observada até a ruptura da chapa para o raio de 2 mm.

Uma explicação para o comportamento diferenciado para o quebra-rugas analítico quando comparado com o geométrico é a ausência da ação de tensões compressivas na região do quebra-rugas.

O afinamento na região do quebra-rugas no modelo analítico é praticamente desconsiderado da simulação, juntamente com o aumento da espessura nas bordas do blanque. Já na região do repuxo, os resultados quanto ao afinamento da chapa foram similares para ambos os tipos de quebra-rugas.

A análise da malha de elementos finitos evidenciou que a mesma é refinada na região do quebra-rugas, apenas no modelo geométrico. Está constatação explica possíveis erros na previsão do afinamento e da deformação plástica do modelo analítico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Raissa A. **Simulações integradas do processo.** 2017. Disponível em: < http://www_.sixpro.pro/wp-content/uploads/ >. Acesso em: 09 mai. 2018. 3 p.

ALTAN, T. Sheet metal forming-fundamentals. Ohio: ASM Internacional, 2012.

ALTAN, T.; TEKKAIA. Sheet metal forming-process and aplications. 2012.

BRITO, Osmar de. Estampos de formar - estamparia de metais. São Paulo: Hemus, 1. ed., 2005, 224 p.

BRUSCHI, S.; ALTAN, T.; BANABIC, D.; BARIANI, P. F.; BROSIUS, A.; CAO, J.; GHIOTTI, A.; KHRAISHEH, M.; MERKLEIN, M.; TEKKAYA, A. E. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014. 63(2), p. 727-749.

CETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horácio. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais.** 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 264 p.

CHEN, Fuh-Kuo; LIU, Jia-Hong. Analysis of an equivalent drawbead model for the finite element simulation of a stamping process. Great Britain: Pergamon. 1997, 37. v., no. 4, pp. 409-423.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica:** processos de fabricação e tratamento. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986, v. 2, 334 p.

COSTA, H. B.; MIRA, F. M. **Apostila da disciplina de conformação mecânica de metais** – confomação de chapas. Florianópolis, 1987.

DIETER, George E. **Metalurgia mecânica.** Tradução: Antônio Sérgio de Souza e Silva et al. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 1981. 653 p.

DOEGE, E; BEHRENS, B, A. Handbuch umformtechnik: grundlagen, technologien, Maschinen. Springer, 2007.

DUARTE, A. S.; VIANA, R. A. M. **Tópicos para simulação em estampagem.** 1. ed. Belo Horizonte: Sixpro Virtual and Practical Process, 2017. 149 p.

ESI. User guide PamStamp – version 2018.0.1. Paris, France. 2018.

GUO, Zhanli et al. Introduction of materials modelling into processing simulation. Materials Science Forum, v. 762, 2013, p. 266-276.

HAASE, Olavo C. et al. **Enabling stamping processes through meticulous FE modelling** - segmented drawbeads and remesh criteria. Open Access proceedings. Journal of Physics: Conference series. 9 p., 2017.

HAASE, Olavo C. et al. **Influência da geometria do quebra-rugas na factibilidade do processo de estampagem com base no método dos elementos finitos.** In: SENAFOR Brazil, 37, 2017, Porto Alegre. 15 p. HUTTON, D. V. Fundamentals of finite elements analysis. McGraw-Hill, 1. ed., 2004.

IFET. **Manual de Utilização do software FEMAP.** Semana nacional de Ciência e tecnologia – SNCT. 2011.

KEELER, S. P. **Properties related to forming- sheet metal industries**. Understanding sheet metal formability III. p. 511-517; 1971.

KULKARINI, K. M. Review on forging, stamping and other solid-phase forming processes. Polymer Engineering and Science, v. 19, p. 474-481, 1977.

MACKERLE, J. Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes. Computational Materials Science, 2002, p. 313-332.

MAGNABOSCO, A. S.; OLIVEIRA, J. A., Caracterização da estampabilidade dos aços Cosipa, laminados a frio - Projeto I. Cosipa, 1994.

MEINDERS, T.; GEIJSELAERS H. J. M.; HUÉTINK J. **Equivalent drawbead performance in deep drawing simulation.** University of Twente, Faculty of Mechanical Engineering, The Netherlands, 1999. 6 p.

MURALI, G.; GOPAL, M.; RAJADURAI, A. Effect of circular and rectangular drawbeads in hemispherical cup forming: finite element analysis and experimental validation. Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV), 2012. 37(6).

NINE, H. D. **Drawbead forces in sheet metal forming.** Mechanics of sheet metal forming. Springer US, 1978. p. 179-211.

SABONNADIÈRE, Jean-Claude; COULOMB, Jean-Louis. **Elementos finitos e cae:** aplicações em engenharia elétrica. Tradução de José Roberto Cardoso. 1. ed. São Paulo: Aleph, 1993. 214 p.

SACHS, G. **Principles and methods of sheet-metal fabricating.** New York: Reinhold Publishing Corporation, 1951. Pp.9-14.

SAMUEL, M. Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology 122.1, 2002. p. 94-103.

SCHAEFFER, Lírio. Conformação de chapas metálicas. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 200 p.

SCHAEFFER, Lírio. **Conformação mecânica.** 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999. 170 p.

SENAI. **Ferramentaria de corte, dobra e repuxo:** planejamento e construção de estampos. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2016. 200p.

SILVA, A. D.; AGUILAR, M. T.; CAMPOS, H. B.; PERTENCE, A. E.; CETLIN, P. R. Aspectos de influência na simulação computacional da conformação mecânica baseada no método dos elementos finitos. In: SENAFOR Brazil, 2017.

SILVA, A. D.; AGUILAR, M. T.; PEREIRA, P. H.; CETLIN, P. R. Utilização de dados sobre materiais em simulações computacionais de conformação mecânica. In: SENAFOR Brazil, 2015.

SILVEIRA, Victor. L. et al. **FEM stress state analysis on springback reduction methods:** variable blank holder force and stake bead. Open Access proceedings. Journal of Physics: Conference series. 8 p., 2017.

SZABÓ, B.; BABUSKA, I. Introduction to finite element analysis: formulation, verification and validation. John Wiley & Sons, 2011.

WALUIY, A. S. et al. **Springback behavior prediction of benchmark problem** - model under smooth drawbead. Conference: National Conference on Advanced Manufacturing and Material Engineering, 2008.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The finite element method:** basic formulation and linear problems. 4. ed. London: McGRAW-HILL Book Company Europe, 1988. 1 v., 647 p.