

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE BOTUCATU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PRODUÇÃO INDUSTRIAL**

WELLINGTON ARAÚJO DA COSTA

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL: ESTUDO DE CASO DE CONFORMAÇÃO DE
UM DUTO DE ENTRADA DE AR AERONÁUTICO**

Botucatu – SP

Junho – 2015

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE BOTUCATU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PRODUÇÃO INDUSTRIAL**

WELLINGTON ARAÚJO DA COSTA

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL: ESTUDO DE CASO DE CONFORMAÇÃO DE
UM DUTO DE ENTRADA DE AR AERONÁUTICO**

Orientador: Prof. Ms Vitor de Campos Leite

Projeto de pesquisa apresentado á disciplina
Projeto de Graduação I do curso de Tecnologia
em Produção Industrial da Faculdade de
Tecnologia de Botucatu

Botucatu – SP

Junho – 2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por esta conquista concebida. Agradeço a meus queridos pais Belmiro Ferreira da Costa e Eleni Araujo da Costa, pelo apoio e educação proporcionadas ao longo de minha vida, garantindo assim, que eu pudesse manter meus estudos.

Agradeço a minha irmã Andréia Araujo da Costa, e a minha namorada Fabiana Miranda pela atenção desprendida ao longo do curso, pela motivação e pelas palavras e atos de fortaleza.

Por fim, agradeço ao grande apoio oferecido pelo meu professor e orientador Vitor de Campos Leite e aos demais professores do curso, que tanto contribuíram em minha formação acadêmica.

RESUMO

O uso de peças através da fabricação por estampagem vem sendo utilizado através das indústrias de vários segmentos. Isso ocorre porque é um processo de baixo custo se comparado à usinagem mecânica. Porém a estampagem requer ferramentas dedicadas para fabricação dessas peças. Normalmente essas estampagens utilizam prensas para o uso dessas ferramentas. Conseqüentemente essas ferramentas precisam ser armazenadas para uso futuros, sendo necessário investimento em áreas para estocagem das mesmas. Essas ferramentas geram custos no que diz respeito a utilização na estampagem como também espaços destinados para armazenamento delas. A estampagem incremental é atualmente um processo novo e pouco aplicado nas indústrias no que diz respeito à conformação plástica de materiais em chapa, estando associada a novos campos de aplicação, como o caso da biomecânica e da prototipagem rápida, onde a produção em série de um produto não é a prioridade, mas sim a análise individual da peça a conceber. Este método de conformação distingue-se dos processos convencionais de estampagem. Isso por não requerer o uso de prensa, punção ou matrizes, tendo assim como características principais o baixo custo, simplicidade e flexibilidade de implementação.

Palavras-chave: Conformação. Estampagem Incremental. Simulação digital de estampagem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Blank</i> de peça metálica sem conformação	12
Figura 2 – Tipo de conformação.....	13
Figura 3 – Tipos de processos de conformação.....	14
Figura 4 – Tipos de ISF	16
Figura 5 – Robô utilizado na estampagem incremental	18
Figura 6 – Defeitos na conformação	22
Figura 7 - Simulação de conformação.....	24
Figura 8 - Prensa Chapa	26
Figura 9 - Ferramenta de conformação incremental.....	27
Figura 10 - Prensa do processo atual.....	31
Figura 11 - Matriz de estampagem.....	32
Figura 12 – Guindaste Giratório.....	32
Figura 13 – Ondulação superficial.....	35
Figura 14 – Teste para análise de estiramento.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD – COMPUTER AIDED DESIGN

CAM – COMPUTER AIDED MANUFACTURING

CNC – COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO

ERP – ENTERPRISE RESOURCE PLANNING

ISF – INCREMENTAL SHEET FORMING

NC – NÃO CONFORMIDADE

SPIF – SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING

TIPF – TWO POINTS INCREMENTAL

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Objetivo	8
1.2 Justificativa	8
2 - REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Conformação Plástica	10
2.2 Conceito de Estampagem.....	11
2.3 Estampagem Incremental.....	14
2.3.1 Estampagem incremental em máquina CNC.....	16
2.3.2 Estampagem Incremental em braço robótico.....	17
2.4 Conformação em geral.....	18
2.5 Controle do processo de conformação.....	19
2.6 Lubrificações no processo de conformação.....	20
2.7 Problemas durante a conformação	21
2.8 Simulações no processo de conformação.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Material	25
3.2 Métodos	28
3.3 Estudo de Caso.....	28
3.3.1 A empresa.....	28
3.3.2 Dados anteriores ao estudo do processo de conformação	29
3.3.3 Índice de não qualidade no processo produtivo atual.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Processo de estampagem proposto.....	36
4.2 Melhorias ergonômicas	36
4.3 Modificações no processo de fabricação.....	37
4.3.1 Corte da chapa.....	37
4.3.2 Rebarbação	38
4.4 Estampagem.....	38
5 CONCLUSÃO.....	41
6 REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A indústria metal mecânica possui uma ampla variedade de produtos no qual as pessoas deparam-se diariamente com eles. Grande parte desses produtos pode ser observada no dia a dia, e muitas das vezes não são observadas suas aplicações extremamente úteis. Desde uma simples limpeza de uma louça na cuba de uma pia, até a maravilhosa arte de voar, pode-se encontrar a gama de variedades de produtos estampados. As chapas metálicas têm grande aplicação industrial, sendo usadas na produção de diversos tipos de produtos, desde a indústria aeronáutica e automotiva, onde a sua presença é notória, até a fabricação de recipientes e embalagens destinadas ao consumidor final. Nestas indústrias, os processos mecânicos de conformação de chapa são implementados com o objetivo de fabricar grandes quantidades de componentes num curto espaço de tempo. No entanto existem situações que exigem a necessidade de se produzir pequenas quantidades de peças sem recorrer a equipamentos dispendiosos.

A produção de produtos metálicos é muito ampla e diversificada, dispondo de vários processos produtivos, dentre eles a estampagem que é o mais utilizado.

Basicamente a estampagem é realizada através de uma matriz base e um punção, ocasionado pela força de uma prensa, dando formato desejado à chapa plana.

A Estampagem Incremental ISF (*Incremental Sheet Forming*) objetiva deformar plasticamente chapa por sucessivos incrementos com uma única ferramenta, com movimento nos três eixos cartesianos. Esse processo foi patenteado no Japão na década de 70. Nesse processo uma ferramenta de geometria simples executa a conformação de uma chapa metálica através de sucessivas deformações aplicadas sem o uso de punção ou matriz e de forma relativamente rápida e com razoável precisão, utilizando arquivos CAD (*Computer Aided*

Desing) em 3D. A ferramenta utilizada na estampagem segue uma trajetória gerada por tecnologia CAM (*Computer Aided Manufacturing*), e controlada por programa CNC (Comando Numérico Computadorizado).

Embora grande parte dos processos de conformação mecânica seja desenvolvida para a produção de lotes médios e grandes, em algumas situações existe a necessidade de fabricação de pequenos lotes de peças. Podem-se citar duas situações distintas que servem como exemplo. A primeira é quando um novo produto está sendo desenvolvido e é necessário um protótipo para realização de análises de funcionalidade e *design*. A outra situação é item sob encomenda com baixa demanda, onde a fabricação de um ferramental seria inviável economicamente.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo mostrar um estudo na área de fabricação de peças estampadas de uma indústria de peças aeronáuticas, utilizando a possibilidade de conformação por incrementos, também conhecida como estampagem incremental e analisar suas vantagens e limitações assim como verificar a sua viabilidade econômica em aplicações industriais. Também se pretende mostrar um estudo de caso em que a estampagem incremental pode ser de grande ajuda devido à complexibilidade do produto em estudo. Também serão comentadas as vantagens à área de vendas de peças de reposição ou de projetos únicos, em que o investimento em matrizes e punções tornaria o produto final com um valor mais alto para o cliente.

1.2 Justificativa

A importância do metal na tecnologia moderna deve-se, em grande parte, à facilidade com que podem ser conformados em formas úteis, como tubos barras, chapas finas e grandes variedades de acabamentos em que pode ser aplicado o metal.

As necessidades de atendimento a altas demandas no volume de produção, fez com que as indústrias tivessem de optar por novos processos. A estampagem então se torna um processo viável para atender essa demanda.

Às vantagens que tornam estes processos de conformação tão amplamente aplicados na indústria (como adequação à produção em série de produtos, baixo custo e qualidade) contrapõe-se, entretanto, a falta de um domínio completo dos processos físicos envolvidos e

seu inter-relacionamento, e também com a necessidade de ferramentas dedicadas para obtenção de cada produto conforme sua característica. Os custos de ferramentas dedicadas são muito elevados, resultando no aumento do custo do produto, e também a necessidade de um espaço físico para armazenamento destas ferramentas.

Outros fatores estão relacionados ao processo de estampagem na matriz, como a fricção entre a ferramenta e o material de interface no fluxo metálico, a geração e transferência de calor no fluxo plástico, o relacionamento entre a microestrutura e suas propriedades, assim como as condições do processo, são difíceis de analisar e prever.

O estudo da conformação metálica deve levar em conta os efeitos das variáveis do processo na qualidade do produto. A chave para uma bem sucedida operação de conformação metálica, ou seja, do produto com o contorno desejado e propriedades, está no entendimento e no controle do fluxo metálico. Em outras palavras, durante o processo é necessário controle da conformação da chapa metálica em processo. Esse controle é fundamental para garantia de um produto com características que atendam a necessidade de projeto e satisfação do cliente.

No processo de estampagem incremental o uso de ferramentas dedicadas é reduzido chegando ao ponto de poder ser eliminado dependendo das necessidades e demandas da empresa.

Outra grande vantagem na estampagem incremental é o controle da conformação que é obtido através da programação numérica da máquina, no qual os parâmetros são controlados individualmente, podendo ter um domínio sobre a matéria prima em processo, evitando o surgimento de rupturas ou ondulações também conhecidas como rugas, obtendo uma boa qualidade superficial.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conformação Plástica

A conformação plástica é um processo de conformação no qual o material metálico sofre uma modificação transformando-se de uma chapa plana metálica para uma forma definida.

O processo de conformação é dividido em dois grupos, que são os processos mecânicos, nos quais as modificações de formas são provocadas pela aplicação de tensões externas, e às vezes em altas temperaturas, mais sem a fusão do material. O outro grupo são os processos metalúrgicos, nos quais as modificações de forma podem estar relacionadas também as tensões externas, e às vezes em altas temperaturas, porém com a liquefação do metal como, por exemplo, o processo de fundição.

Segundo Altan (2008), é importante o estudo dos processos de conformação, e que devido a sua natureza, esses processos também podem ser denominados “processos de conformação mecânica”, no qual determina:

Os processos mecânicos são constituídos pelos processos de conformação plástica, para os quais as tensões aplicadas são geralmente inferiores ao limite de resistência à ruptura do material, e pelos processos de conformação por usinagem, para os quais as tensões aplicadas são sempre superiores ao limite mencionado, sendo a forma final, portanto, obtida por retirada de material. (ALTAN, 2008, p. 12).

Ainda segundo Altan (2008) os processos de conformação plástica dos metais permitem a fabricação de peças, no estado sólido, com características controladas.

De uma forma resumida, os objetivos desses processos são a obtenção de produtos finais com especificação de dimensão e forma, propriedades mecânicas, condições superficiais, conciliando a qualidade com elevadas velocidades de produção e baixos custos de fabricação. O conceito de estampagem deve estar extremamente frisado no processo de conformação, pois o uso de técnicas e dispositivos ajudam no desenvolvimento de um processo robusto.

2.2 Conceito de Estampagem

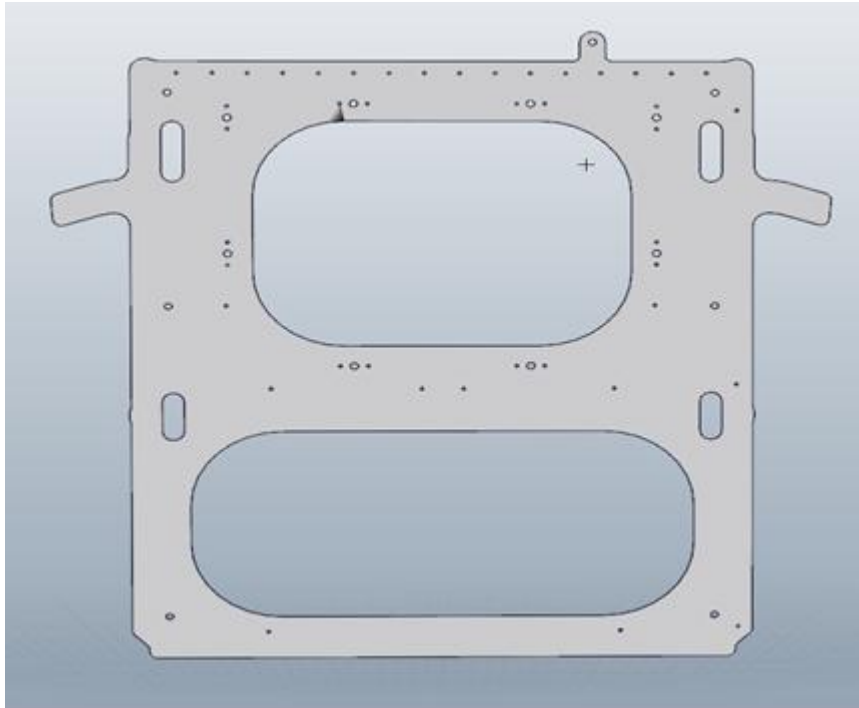
O processo de fabricação de peças por estampagem consiste no processo de corte da chapa, até o processo de prensagem a frio.

Segundo Palmeira (2005), o corte de chapas corresponde a obtenção de peças geométricas a partir de chapas submetidas a força de uma ferramenta de corte, aplicado por meio de uma prensa que exerce pressão sobre uma chapa apoiada em uma matriz.

A estampagem das peças são sempre feitas a partir de um pedaço de chapa cortada. O mesmo pode ter furos redondos, quadrados ou oblongos, dependendo da necessidade de projeto. Esse pedaço de chapa é denominado disco, esboço ou *blank*.

O disco esboço ou *blank* é a peça em sua característica de chapa sem algum tipo de conformação. É o produto desenvolvido, ou seja, o produto planejado, de modo que durante sua planificação é calculado o estiramento sofrido pelo material na estampagem. A Figura 1 ilustra um exemplo de um produto estampado e do seu respectivo *blank*.

Figura 1 – *Blank* de peça metálica sem conformação

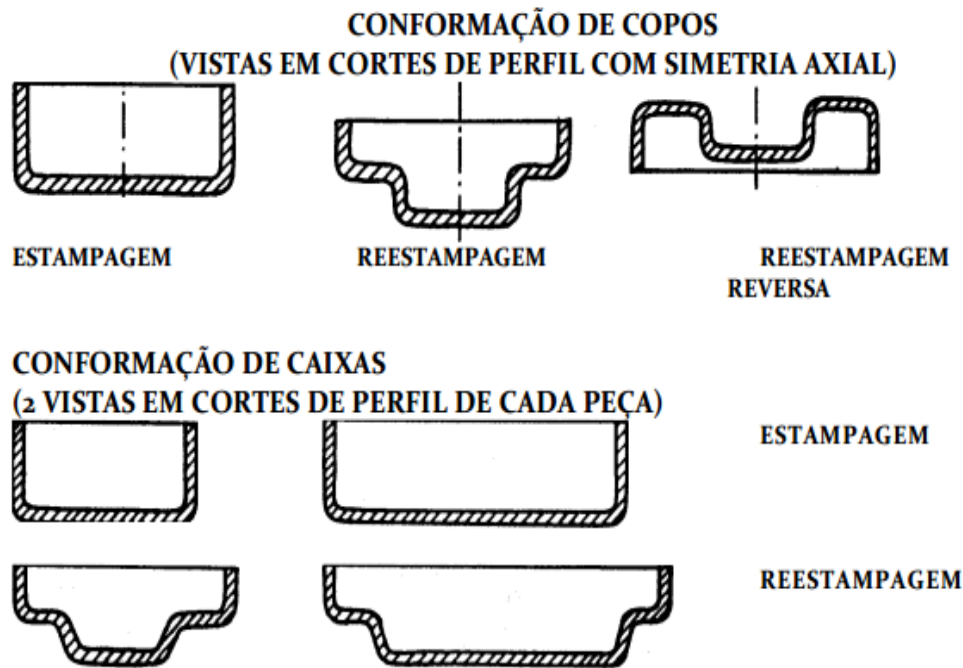


Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

Segundo Souza (1982), a estampagem é vantajosa pela alta produtividade, complexidade e qualidade das peças obtidas que podem apresentar grande resistência.

O grupo de estampagem é constituído pelos seguintes processos: conformação por estampagem, reestampagem e reestampagem reversa de copos; conformação com estampagem e reestampagem de caixas; conformação rasa com estampagem e reestampagem de painéis; conformação profunda com estampagem de painéis. A Figura 2 ilustra os tipos de grupos de estampagem constituídos pelos exemplos acima.

Figura 2 – Tipo de conformação



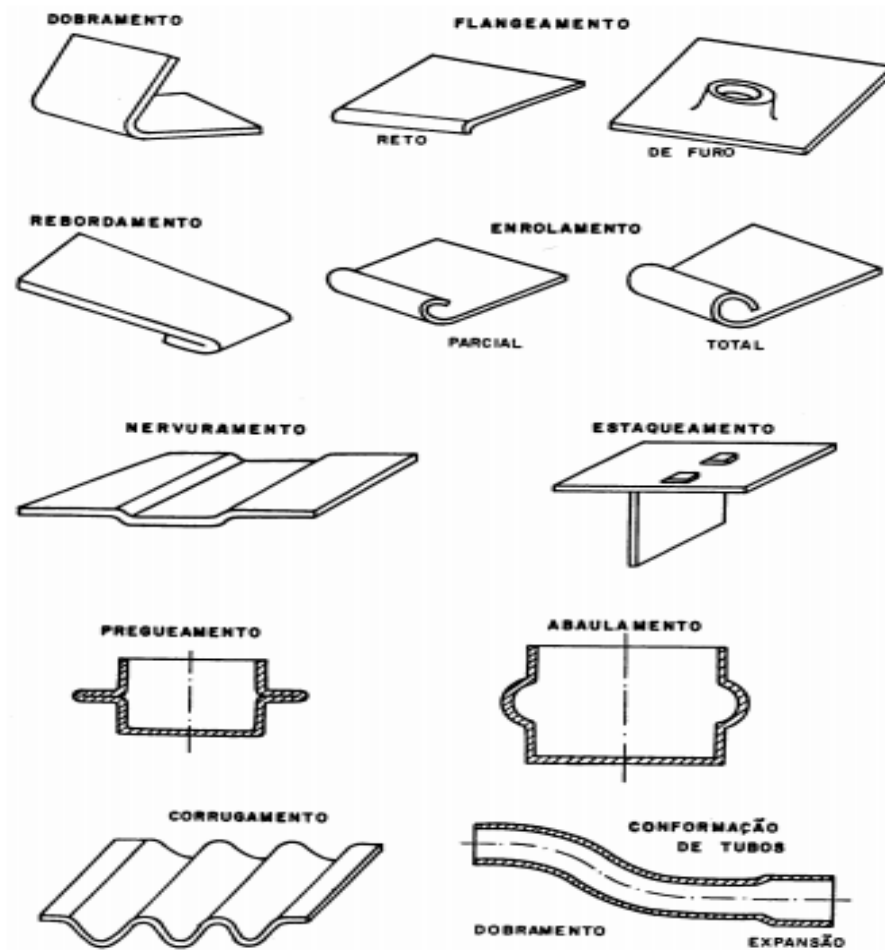
Fonte: ALTAN (2008).

A Figura 3 ilustra os processos do grupo de conformação em geral, ao contrário do grupo anterior, cujos processos utilizam ferramentas acionadas por prensas, esses podem ser realizados em dobradeiras, rolos conformadores ou outros tipos mais específicos de máquinas e ferramentas de conformação. Os tipos principais de processos pertencentes a esse grupo são: dobramento, flangeamento, rebordamento, enrolamento parcial ou total, nervuramento, estaqueamento, pregueamento, abaulamento, corrugamento, gravação, conformação de tubos e outros processos mais específicos.

Nos processos classificados no grupo de conformação em geral, estão sempre presentes, na zona de deformação da peça, esforços de flexão que dobram a região a ser deformada, criando tensões de tração numa superfície e de compressão na superfície oposta. Na estampagem profunda estão, associados aos esforços típicos desse processo, os esforços que caracterizam os processos de conformação em geral. Nesse processo, verifica-se invariavelmente a ação de um dispositivo da ferramenta denominado prensa-chapas ou sujeitador, que ocasiona o surgimento de esforços adicionais. Os esforços que surgem nas operações de conformação são de natureza complexa e variam com o decorrer da operação. Normalmente as operações de conformação de chapas são efetuadas a frio, utilizando-se como matéria-prima laminados de aço, ligas de alumínio, ligas de cobre e outros materiais. Uma

descrição da natureza do processo e das formas obtidas permite melhor compreender a classificação dos diversos processos de conformação de chapas.

Figura 3 – Tipos de processos de conformação



Fonte: ALTAN (2008).

Outro processo de conformação que também vem sendo discutido nas empresas é o processo de estampagem incremental, através do uso de dispositivos prensa chapas, um punção denominado incremento e uma máquina CNC ou braço robótico.

2.3 Estampagem Incremental

O processo de estampagem incremental de chapas metálicas é um processo que por meio da deformação plástica se chega a um produto acabado por sucessivos incrementos com uma única ferramenta, com movimento nos três eixos cartesianos.

Segundo Daleffe (2001, p. 22), “esse processo foi desenvolvido no Japão, a fim de atender algumas necessidades da indústria automotiva”.

Esse tipo de processo utiliza-se de ferramentas específicas de alta precisão que possibilita a elaboração de peças de diversas geometrias. Para realizar a estampagem das chapas metálicas podem ser utilizados robôs, máquinas CNC específicas ou máquinas de usinagem adaptadas, nos quais possibilita o trabalho em três ou mais eixos.

Segundo Castelan (2010), o processo de estampagem incremental se aplica na fabricação de peças em pequenos lotes, onde as formas dos produtos podem variar com o decorrer do tempo, sendo esses produtos de geometria simples ou complexa, e também produtos com baixa demanda ou especiais.

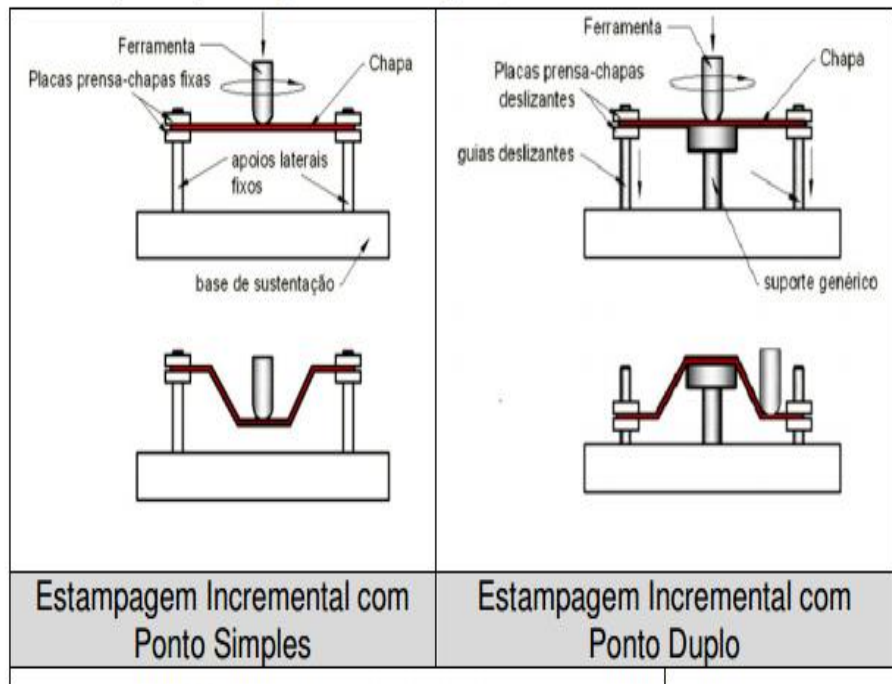
O princípio de funcionamento desse processo é a movimentação incremental de uma determinada ferramenta, cuja ponta é esférica. O nome desta tecnologia deriva-se pelo fato de que a qualquer momento apenas uma pequena parte do produto está sendo realmente conformado, e que a área da deformação localizada está movendo-se sobre o produto inteiro. Essa movimentação ocorre sobre uma chapa metálica presa a um dispositivo denominado prensa chapa, seguindo uma trajetória pré-definida, executando a conformação do material em múltiplos passos. (CASTELAN, 2010, p. 20)

Dessa maneira, a deformação do material ocorre de maneira progressiva e precisa.

Segundo Fritzen (2011), a estampagem incremental pode ser dividida essencialmente em duas famílias. Essa variação depende do número de pontos de contato entre a ferramenta, a chapa e a matriz (quando presente).

A Figura 4 mostra os dois tipos de processos de estampagem incremental que são denominados SPIF (*single point incremental forming*), quando a estampagem ocorre utilizando apenas o ponto de contato da ferramenta, ou TIPF (*two points incremental forming*), que é utilizado pontos duplos na estampagem (FRITZEN 2011).

Figura 4 – Tipos de ISF



Fonte: FRITZEN (2011)

2.3.1 Estampagem incremental em máquina CNC

As máquinas CNC são atrativas por causa dos baixos custos de início de operação, mas trazem algumas desvantagens, pois não são projetadas para grande carregamento no eixo árvore, então existe um risco de que a máquina venha se danificar durante as operações de estampagem incremental. Para evitar esse tipo de problema, deve ser verificado com a manutenção da empresa, ou com o fabricante da máquina, as limitações da mesma para o processo de estampagem, visando sempre o cuidado com o equipamento e principalmente com a segurança do operador envolvido no processo.

Segundo Daleffe (2001), as estampagens incrementais em chapas usando fresadoras CNC têm permitido a exploração de várias velocidades da ferramenta, e qualidade da superfície é melhor quando a velocidade é adequada ao incremento utilizado.

É importante ressaltar que o incremento utilizado na estampagem é de grande importância, sendo que a máquina deve ser projetada para trocas relativamente rápidas de ferramentas, otimizando o desperdícios em *set-ups* e movimentos que não agregam valor ao processo produtivo.

2.3.2 Estampagem Incremental em braço robótico

A aplicação de robôs na estampagem incremental é muito similar com o empregado em máquinas CNC, usando basicamente a mesma estratégia de conformação. O método consiste no uso de um modelo 3D em CAD do produto desejado, no qual é processado em várias camadas no *software* CAM e transferido para a linguagem de programação do robô. O método é muito semelhante aos demais métodos utilizados nos processos de ISF, porém o robô que é utilizado no lugar da máquina CNC é extremamente preciso, mas tem a desvantagem de não obter a mesma força no processo da estampagem.

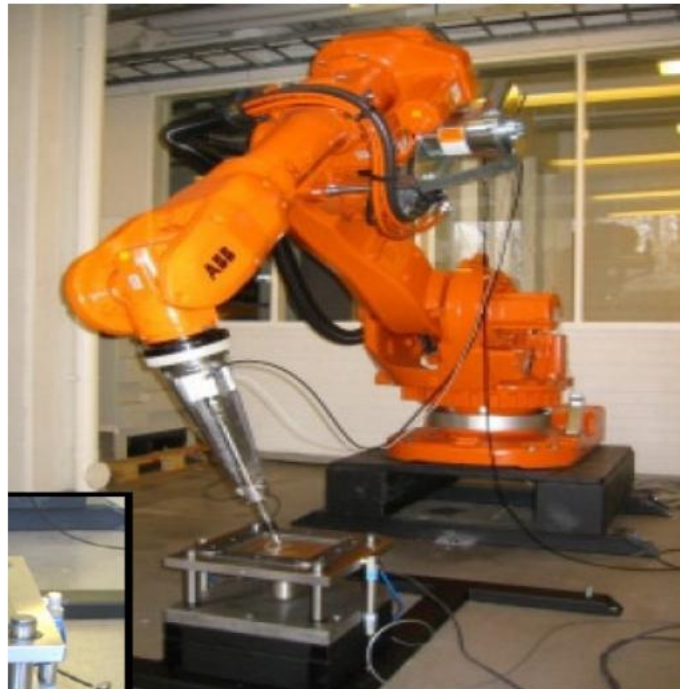
Para a fixação da chapa metálica também é utilizado um dispositivo prensa chapa semelhante ao utilizado nos demais processos de estampagem

Segundo Daleffe (2001), o uso de robôs no processo de estampagem em relação a máquinas CNC é notável.

Os benefícios do robô comparados a estampagem com máquinas fresadoras ou máquinas ISF são notáveis. O robô traz flexibilidade ao processo de fabricação e possibilita a combinação de várias fases de fabricação dentro da cadeia da mesma célula de fabricação. A chapa é apanhada e posicionada, o corte com laser e os tratamentos de superfície podem ser integrados na mesma célula de fabricação operado por um único robô industrial. (DALEFFE, 2010)

Na Figura 5 pode-se identificar o processo de ISF com o uso de robô industrial.

Figura 5 – Robô utilizado na estampagem incremental



Fonte: DALEFFE (2001).

2.4 Conformação em geral

Na conformação em geral, as peças iniciais, ou seja, os metais a serem trabalhados podem ser simples pedaços de tiras, que serão dobrados ou calandrados ou até mesmo pedaços de tubos que também podem ser dobrados. Podem ser ainda, discos que serão estampados (como as pequenas tampas metálicas de garrafas de cerveja e refrigerantes). O dobramento pode ser feito em qualquer ângulo, com raios de concordância diversos.

Quando o dobramento é feito numa pequena parte ou numa pequena dimensão da extremidade do esboço, é denominado flangeamento. O rebordamento (ou agrafamento) é um dobramento completo da borda de um esboço.

Essa borda dobrada pode ser redobrada e unida à outra peça nessa operação para formar uma junta agrafada, como na junção de fundos e laterais de recipientes cilíndricos ou latas pequenas.

O enrolamento da ponta, parcial ou total, muitas vezes é realizado para reforçar a borda da peça ou conferir o acabamento final a ela, isentando-a de bordas cortantes que impedem a sua manipulação.

O nervuramento é feito para dar à peça maior rigidez e também para lhe conferir aparência, de acordo com os conceitos do projeto de sua forma.

O estaqueamento é mais uma operação de dobramento visando a formação de duas ou mais peças e o enrugamento tem a finalidade, em geral, de permitir a montagem da peça em um conjunto.

O abaulamento, realizado em tubos, tem a finalidade de conferir forma para fins funcionais da peça e o corrugamento é aplicado a chapas, principalmente para a fabricação de telhas metálicas onduladas ou serrilhadas.

A conformação de tubos é bastante variada, podendo ser constituída de dobramento simples, expansão de suas extremidades, abaulamento de uma parte central, retração de suas extremidades, redução do diâmetro, a partir de certo comprimento do tubo, e junção ou amassamento de suas paredes na extremidade ou parte central.

Os esforços que surgem nessas operações criam diversos estados de tensão nas diferentes partes das peças. Isso torna complexa e difícil a previsão do esforço resultante e necessário à conformação e dos esforços nos pontos críticos que podem conduzir à ruptura da peça na conformação.

Contudo, pode-se notar que, simplificada, o tipo de esforço predominante é o de flexão, conduzindo ao surgimento de forças de tração e compressão em lados opostos da chapa ao longo da direção e através da dimensão de espessura. Como a flexão se realiza até a deformação plástica da peça, convencionou-se chamar o processo, de um modo geral, de dobramento.

2.5 Controle do processo de conformação

O processo de estampagem de chapas metálicas é controlado por diversos fatores de natureza mecânica e metalúrgica.

Entre os fatores de natureza mecânica pode-se mencionar: a forma e as dimensões da peça, a máquina de conformação (o tipo de prensa empregado), a forma e dimensões das ferramentas (punção e matrizes) e as condições de lubrificação. Esses fatores têm influência direta na definição dos estados de tensão e deformação existentes em cada instante do processo nas diversas regiões da peça em formação. O estado de tensão altera as condições de escoamento e, portanto, de comportamento plástico do material da peça.

Os fatores da natureza metalúrgica, relacionados ao material da peça, são a sua composição química e a sua estrutura, fatores estes que dependem, por sua vez, dos processos

de fabricação e de laminação associados aos tratamentos térmicos de recozimento, que afetam as propriedades mecânicas do material da chapa que são de importância fundamental em seu comportamento na estampagem. De natureza metalúrgica é ainda a influência dos tratamentos térmicos de recozimento intermediários quando o processo é dividido em diversas etapas de estampagem. No que se refere à forma da peça, pode-se afirmar que, quanto mais complexa for, mais difícil se torna a determinação dos esforços necessários à conformação e dos limites máximos admissíveis de deformação plástica, ou seja, da conformabilidade na estampagem (estampabilidade). À complexidade da forma, associa-se a complexidade da natureza de evolução do processo, que se caracteriza por uma condição não estacionária. A cada instante, durante a penetração do punção na matriz, a peça em processamento se apresenta de uma forma diferente e intermediária entre o recorte de chapa inicial e a peça final. O estudo da estampagem de um copo, a partir de um esboço na forma de um disco plano, corresponde a uma condição simplificada, porém típica, do processo de estampagem. Nessa condição, no que se refere ainda à forma e dimensões da peça, é importante estabelecer a redução de dimensões, em termos de relação porcentual, entre a diferença do diâmetro do disco e do diâmetro do copo, em relação ao diâmetro do disco. A redução máxima admissível, isto é, aquela em que não provoca a ruptura da chapa, é um índice da estampabilidade da chapa. Outro índice de natureza geométrica, que pode ser adotado, é a relação entre a altura e o diâmetro do copo conformado. A espessura da chapa exerce, por sua vez, a seguinte influência: à medida que aumenta, cria condições menos favoráveis ao enrugamento e trincas da peça, mas eleva, ao mesmo tempo, o esforço de conformação.

2.6 Lubrificações no processo de conformação

A lubrificação concorre decisivamente para reduzir os esforços de atrito entre a chapa e a matriz e entre o punção e o contra matriz.

Palmeira (2005) comenta que a natureza do lubrificante é determinada em relação à conformação, e essas características são comumente contraditórias, na medida em que os lubrificantes que suportam melhor as elevadas funções do nível do esforço de conformação são os que apresentam maior dificuldade para a sua remoção posterior.

É comum em algumas conformações onde o esforço exercido da chapa contra a matriz é muito grande, notar que após a conformação o lubrificante não está mais presente na ferramenta. Para esses casos recomenda-se a troca por um lubrificante mais eficiente. Para

isso existem vários fabricantes que estudam esses casos de acordo com a necessidade da empresa.

2.7 Problemas durante a conformação

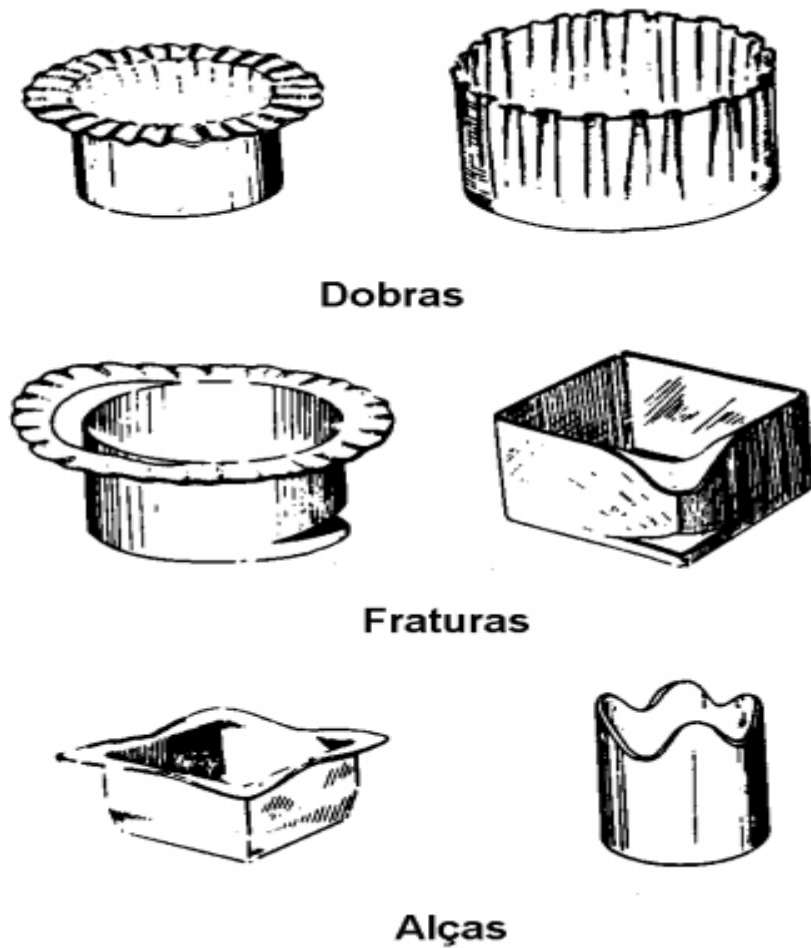
Durante o processo de conformação é comum surgir alguns problemas no produto estampado. Estes problemas ocorrem por vários fatores, como por exemplo, liga do material, condição de dureza da chapa, falta ou excesso de lubrificação, *blank* inadequado, concepção do ferramental ruim, condições adversas de temperatura e ou equipamento, entre outros.

A taxa limite de redução na estampagem, que é a relação limite entre a máxima dimensão da chapa e a máxima dimensão da peça estampada, é uma medida do alcance da estampabilidade (OLIENICK FILHO, 2003).

Segundo Johnson e Mamalis (1976), os limites da conformação metálica de chapas são determinados pela ocorrência de defeitos tais como dobras e rupturas na chapa.

Alguns desses problemas podem ser vistos conforme a Figura 6, onde se podem verificar problemas relacionados a dobras na superfície que também são chamadas de rugas, fraturas que também são conhecidas na indústria como trincas ou rupturas, e as alça na superfície da chapa, que é um empenamento superficial, isto é, ondulações na superfície da peça.

Figura 6 – Defeitos na conformação



Fonte: OLIENICK, (2003)

A análise desses fatores e a solução destes problemas é o grande desafio das indústrias, pois o processo de conformação possui elevados tipos de variáveis. O defeito mais fácil de ser eliminado são as dobras, pois basicamente é a falta de estiramento do material, que muitas vezes pode ser proveniente do excesso de lubrificação ou erro na concepção do *blank* do produto.

Por outro lado as fraturas e alças são extremamente difíceis de serem resolvidas, necessitando na maioria dos casos análises em softwares de simulação.

2.8 Simulações no processo de conformação

Durante a estampagem podem ocorrer operações de dobramento, estiramento e embutimento que interagem influenciando a geometria final do produto. As propriedades do material empregado e seu comportamento às deformações impostas, o atrito nas faces em contato, a geometria e características mecânicas do ferramental, também influenciam. A interação destes fatores torna difícil a determinação analítica do processo. Esta dificuldade leva ao desenvolvimento de novas ferramentas a se basear na experiência do projetista, adquirida em projetos e peças similares e no tipo de material utilizado.

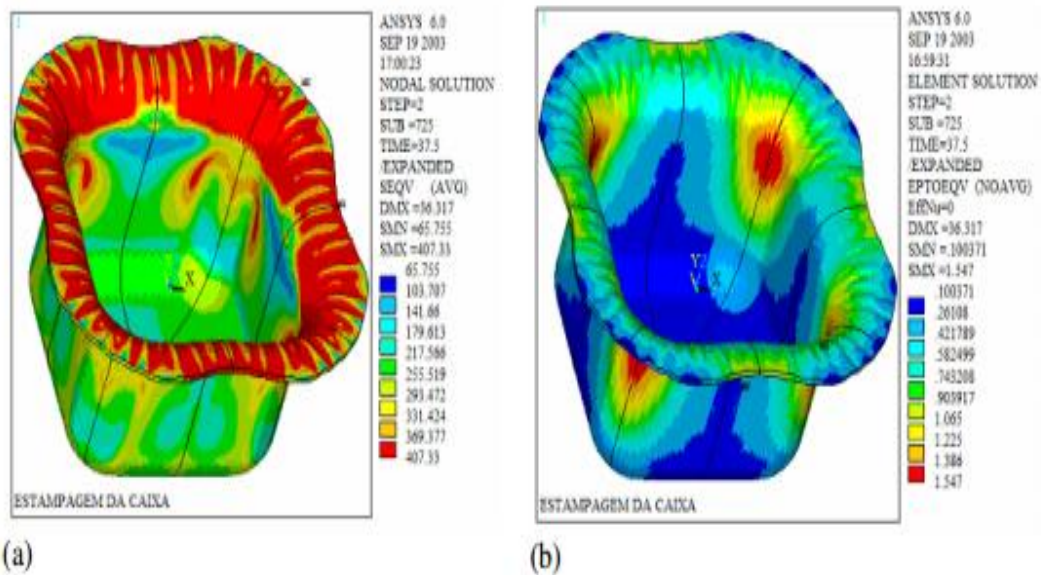
A aplicação de programas desenvolvidos para simular a conformação de chapas metálicas, pode diminuir o número de ciclos no desenvolvimento de ferramentas ou mesmo eliminá-los, garantindo a eficiência do processo, de modo a obter produtos de qualidade ao menor custo e prazo. Estes programas procuram modelar o comportamento plástico dos metais e sua interação com o ferramental durante a estampagem, buscando a predição da força de estampagem, a formação de rugas, a deflexão superficial, a condição limite de rasgamento, a geometria do *blank*, o retorno elástico, avaliação da espessura da chapa, etc. A obtenção destes dados auxilia a tomada de decisões e possibilita a redução do tempo de desenvolvimento do ferramental, através da diminuição das etapas de embutimento e aumento da complexidade das peças. São dados fundamentais na escolha adequada das prensas, no aumento da confiabilidade e na melhoria da qualidade do produto.

Segundo Silva e Costa (2010) o conhecimento da força aplicada a conformação é de suma importância para determinar o processo produtivo do produto.

O conhecimento da força é fundamental para se determinar a capacidade da prensa adequada ao processo, as características de acionamento do prensa-chapa e fixação da ferramenta. A espessura final do material pós-deformação influencia a escolha do número de passos do estampo, o ajuste de sua geometria e parâmetros do processo como velocidade de aplicação do carregamento, lubrificação e pressão do prensa-chapa. (SILVA E COSTA, 2010, p.2)

As simulações ajudam a análise de situações extremamente críticas na conformação, onde o material seria sujeito a não conformidades como fraturas. A Figura 7 identifica um caso onde a fratura ficou localizada no raio de conformação (a). A velocidade na conformação, a lubrificação, e o aumento dos estágios de conformação fez com que o produto obtivesse uma melhoria, eliminando em torno de 90% o risco de trincas (b).

Figura 7 - Simulação de conformação



Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

As regiões em vermelho identificam excesso de estiramento da chapa durante o processo de conformação. O estiramento excessivo causa ruptura do material. Quando não ocorre a ruptura do material o mesmo tem sua espessura afetada. Devido a isso essa condição torna-se um agravante, pois não é possível mensurar em determinadas regiões o quanto foi a variação na espessura. Dependendo do produto e sua aplicação, essa variação pode causar problemas extremamente críticos. Por exemplo, peças de produtos aeronáuticos.

Para essas condições, o processo deve ser analisado através de um controle estatístico, onde algumas peças serão enviadas aos ensaios metalógrafos, no qual é possível identificar a redução da espessura da chapa estampada.

As regiões críticas podem ser suavizadas ou até mesmo eliminadas na própria simulação. Para isso são utilizadas algumas ferramentas no *software* que atuam como lubrificantes na simulação, diminuindo o atrito da chapa metálica com a matriz.

Os pontos em amarelos são pontos que necessitam atenção, pois encontram-se em uma zona de possível tendência a trinca ou estiramento excessivo.

As regiões na cor verde sofreram pouco estiramento, e estão em uma condição ideal de fabricação.

Nos locais onde aparecem as cores azuis, o material não houve movimento relacionado à estampagem, sendo assim áreas que não exigem preocupações voltadas a rupturas ou estiramento excessivo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

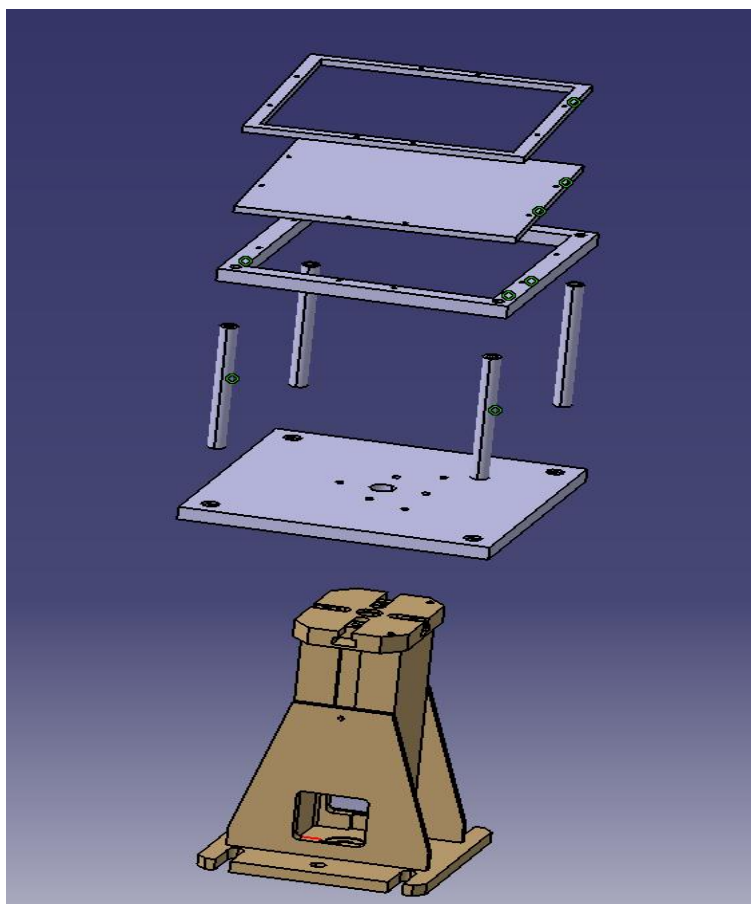
Para o estudo de implantação da conformação incremental, foi utilizado um dispositivo prensa chapa para a fixação da chapa e posterior estampagem da mesma.

Este dispositivo foi elaborado tendo como referência a base da máquina onde será realizado todo o processo de estampagem. Foi necessária essa preocupação, pois a base é fixa e com furos nos quais o prensa chapa será fixado, não sendo permitido qualquer tipo de variação na fixação, pois isso pode interferir na qualidade do produto estampado.

Também foi utilizado uma máquina CNC de cinco eixos da fabricante Breton.

A Figura 8 mostra a imagem do projeto do ferramental, no qual foi elaborado com estudos referentes à matéria prima da chapa a ser estampada, a máquina utilizada para a conformação e também ao produto em sua concepção final.

Figura 8 - Prensa Chapa



Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

Esta estampagem foi realizada em um centro de usinagem de cinco eixos por comando numérico computadorizado. Esse equipamento permite o controle de toda a máquina através de um computador utilizando um código específico, conhecido também como linguagem de máquina. Os movimentos são realizados nos eixos lineares, que convencionalmente são designados com X, Y e Z.

A ferramenta necessária para a conformação foi projetada de ponta cilíndrica e foi fabricada no setor de usinagem da empresa. Elas foram fabricadas em material de aço inoxidável austenítico. Esse material é resistente ao calor e a corrosão, e pode ser utilizado em condições severas de conformação, evitando ruptura prematura ou trincas. Devido a essas

características foi dada preferência a esse material. A Figura 9 mostra o padrão da ferramenta utilizada no processo.

Figura 9 - Ferramenta de conformação incremental



Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

Para o início dos testes a ferramenta de incremento foi elaborada com diâmetros diferentes em sua ponta esférica. A princípio foram utilizados diâmetros de 14mm, 12mm, 10mm. Essas medidas foram baseadas em outros estudos de conformação incremental utilizando chapa de titânio.

A conformação foi realizada em uma chapa de titânio de 0,5mm.

As informações dos materiais a serem estampados e da ferramenta de incremento, como ligas e condições estruturais foram retiradas do site Matweb (Matweb, 2015). Os dados contidos neste arquivo permitiram a realização de uma previsão de benefícios para o setor da empresa.

Também foi utilizado o *software Excel*, para armazenamento de informações relevantes ao processo em estudo.

Algumas informações sobre o processo atual e o seu método de fabricação, foram retirados da base de dados da empresa, que utiliza o sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*).

3.2 Métodos

O primeiro passo foi à análise dos itens no ERP, que é uma plataforma de *software* de gestão empresarial, desenvolvida para integrar os diversos departamentos da empresa, possibilitando o armazenamento de todas as informações, no qual foram identificados os maiores índices de não conformidades da empresa. Foi determinado o estudo do item que tinha um elevado custo final, devido ao seu alto tempo de fabricação, e também ao custo muito alto da matéria prima. A quantidade de acionamentos da produção para a área da engenharia da empresa também era alto, pois a não conformidade não era resolvida apenas por meio dos operadores da produção, sendo necessário análise técnica da engenharia de primárias.

Esses acionamentos são gerados por operadores de máquinas em momentos de dúvidas no processo produtivo, ou por motivos de problemas relacionados a estampagem, como por exemplo rupturas na chapa.

A análise do novo processo de conformação foi difícil devido o método não ser muito utilizado nas indústrias brasileiras. Devido a essa dificuldade foram realizados nesse segundo passo reuniões com professores de várias universidades, a fim de obter um *benchmarking*. Essa etapa foi muito positiva, pois se geraram muitas ideias para o início dos testes no processo produtivo.

3.3 Estudo de Caso

3.3.1 A empresa

O trabalho foi realizado em uma empresa do ramo aeronáutico especializada na estampagem de chapas metálicas. O trabalho foi realizado em conjunto com as áreas de engenharia, qualidade, planejamento e controle de produção, segurança ocupacional e produção.

A empresa em estudo possui diversos processos, dentre os quais, a fabricação de peças estampadas através de processos como prensagem, dobragem, calandragem, utilizando máquinas de variados tipos e modelos, como por exemplo, prensas hidráulicas, calandras, dobradeiras entre outras.

O processo focado nesse estudo de caso é um novo método em desenvolvimento na empresa. Consiste no processo de conformação através de uma ferramenta de ponta esférica acoplada em uma máquina de usinagem de três eixos ou mais, no qual o produto é fixado em um dispositivo que é preso na base da máquina.

O respectivo produto do processo almejado é um duto de ar fabricado em chapa de titânio com espessura de 0,5mm.

A demanda atual deste produto é de 12 peças por mês, sendo que são peças difíceis de serem obtidas por sua complexidade e alto índice de rejeição.

A empresa mantém um almoxarifado, utilizado para estocar os seus produtos.

A empresa não permitiu que seu nome social fosse descrito, sendo assim, será denominada apenas de empresa fabricante de peças estampadas do ramo aeronáutico.

3.3.2 Dados anteriores ao estudo do processo de conformação

A Tabela 1 demonstra o tempo de produção (hora homem e hora máquina) de cada centro de trabalho e a sequência de execução das operações. Esta Tabela será de relevante valor para o cálculo de possível ganho com a implantação do processo de conformação incremental.

Tabela 1 - Tempo das operações antes do processo de ISF

Estágio da Produção	Tempo produtivo (minutos por peça)
Corte de Material	2
Rebarbação	4
Estampagem	17
Desempeno	50
Ajuste de excesso	6
Limpeza	3
Aplicação de proteção temporária	4
Conformidade Final	2
Total	1h : 28min

Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

A empresa trabalha com dois turnos de segunda-feira a sexta-feira, e em cada turno é considerado 8 horas de trabalho. Então pode ser definido que por turno podem ser produzidas 6 peças, considerando o processo por um todo.

Após o corte da matéria prima utilizada na estampagem, ela segue o seu processo até a área de rebarbação. Depois de eliminadas as rebarbas provenientes do corte na guilhotina, o material é enviado a área de máquina para ser prensado.

Na tecnologia aplicada ao processo atual é utilizada uma máquina prensa da fabricante Avure. Essa máquina é antiga, no qual passou por um processo de *retrofit*, que nada mais é que um processo de reciclagem tecnológica, a fim de atender os padrões de segurança exigidos. A Figura 10 mostra o modelo da máquina que é utilizada no processo de estampagem. A máquina é composta por uma área central onde ocorre o sistema de atuação do balão hidráulico no qual realiza o processo de prensagem. Em suas laterais um sistema de gaveta onde são armazenados os ferramentais que geram formas para as chapas estampadas. A máquina atua com pressão mínima de 250 PSi e pressão máxima de 14500 PSi.

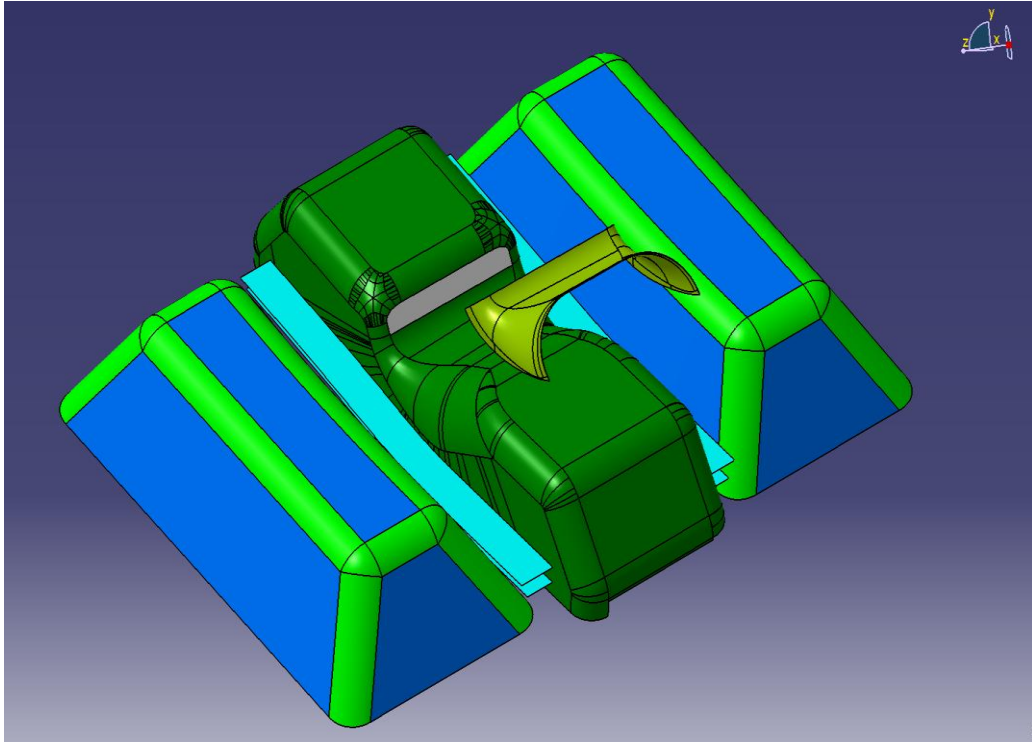
Figura 10 - Prensa do processo atual



Fonte: [HTTP://WWW.DIRECTINDUSTRY.ES](http://www.directindustry.es)

Na gaveta onde ocorre a prensagem do produto é utilizado um ferramental fabricado em alumínio. Esse ferramental é o responsável para gerar forma a chapa estampada. O tempo de preparação do ferramental na gaveta é de 45 minutos. Um tempo alto devido às dificuldades de manuseio, pois o mesmo possui um peso de 380 kg, sendo necessário seu manuseio através de empilhadeira e ponte rolante. A Figura 11 mostra projeto do ferramental em 3D com o produto em sua forma final.

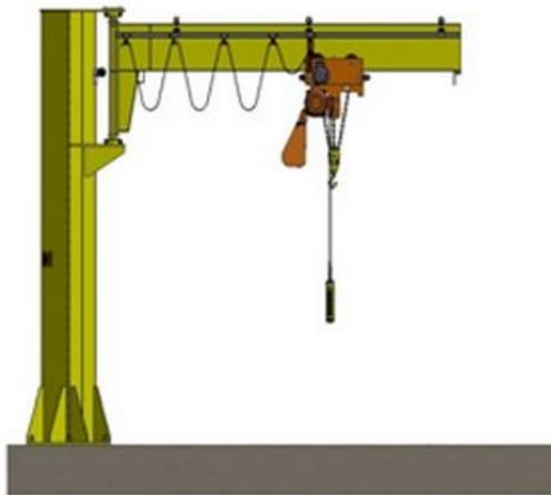
Figura 11 - Matriz de estampagem



Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

O ferramental é colocado na gaveta da máquina através do uso de um equipamento de elevação do tipo guindaste giratório. A Figura 12 ilustra como é o equipamento de elevação.

Figura 12 – Guindaste Giratório



Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

A parte superior do equipamento é a ponte, no qual realiza o movimento de translação. Na ponte existem motores elétricos responsáveis pelo movimento de elevação da carga no sentido vertical e também para deslizamento no sentido horizontal. Para manuseio deste equipamento, é necessário treinamento ao operador. O responsável pelo treinamento é o próprio fabricante do equipamento juntamente com a segurança ocupacional da empresa.

Antes da colocação do ferramental na gaveta, é necessário um procedimento de limpeza do mesmo, verificando possíveis danos no ferramental que possam afetar a qualidade do produto estampado.

Após o uso do ferramental, o mesmo é retirado da gaveta pelo mesmo procedimento de colocação na gaveta, e também ocorre a limpeza e análise se o mesmo possui alguma não conformidade gerada após o trabalho de estampagem. Esse procedimento é importante, pois a chapa de titânio pode gerar defeitos no ferramental, e esses possíveis defeitos devem ser corrigidos antes do ferramental ser armazenado.

O processo de prensagem atual é realizado em 10 estágios de conformação. Esses estágios são diferentes um do outro, ocorrendo variação de pressão e lubrificação.

Os estágios iniciam-se com pressão de trabalho de 250 PSi, chegando em seu último estágio com 5000 PSi. Essa pressão é controlada através de um manômetro digital, que requer calibração semestral, pois a descalibração pode ocorrer excesso ou falta de pressão durante a estampagem, ocorrendo possíveis rejeições do produto.

A lubrificação utilizada pode variar de acordo com a situação do produto estampado. Essa variação é controlada pelo operador da máquina, não sendo possível uma padronização no processo produtivo.

Depois de prensado o material segue para a área de desempenho. A Tabela 1 identifica um tempo elevado no processo de desempenho (50 minutos por peça). Esse tempo é considerado como hora homem, pois se trata de um processo totalmente manual. Porém é certo que esse alto tempo de desempenho ocorre devido ao processo de estampagem, que por sua vez também possui um tempo alto (17 minutos por peça). O tempo de estampagem é considerado como hora máquina.

O processo de desempenho consiste em eliminar algumas imperfeições geradas no processo de estampagem. Essas imperfeições são consideradas normais no processo de estampagem, e devido a isso ela tem tolerâncias para serem aceitas antes de ocorrer o processo de desempenho. Algumas dessas tolerâncias estão relacionadas a ondulações superficiais, rugosidades, ângulos, raios e assentamento do produto sobre o dispositivo para checagem.

Esses dispositivos normalmente são fabricados em alumínio ou algum outro tipo de material que seja leve. Eles possuem o formato do produto final, permitindo que o operador tenha uma referência em como deixar o produto em condições perfeitas para a montagem.

Não existe nesse processo um passo a passo de como deixar a peça em condições perfeitas sobre o dispositivo, também não existe um conjunto de ferramentas que podem ser utilizadas para realizar este trabalho. Esse processo é totalmente artesanal, estando travado no conhecimento empírico de cada operador. Devido a isso a padronização nesse processo de desempenho é praticamente impossível.

A falta de padronização aumenta o risco de não conformidades. Quando ocorre uma possível não conformidade os defeitos que são relatados pelos operadores. Então o produto é encaminhado a área técnica de qualidade para verificação e análise de possibilidade de liberação para continuar o processo produtivo.

3.3.3 Índice de não qualidade no processo produtivo atual

Através do banco de dados da empresa, foi levantado o custo em não conformidades ocorrido no processo de estampagem do produto em estudo.

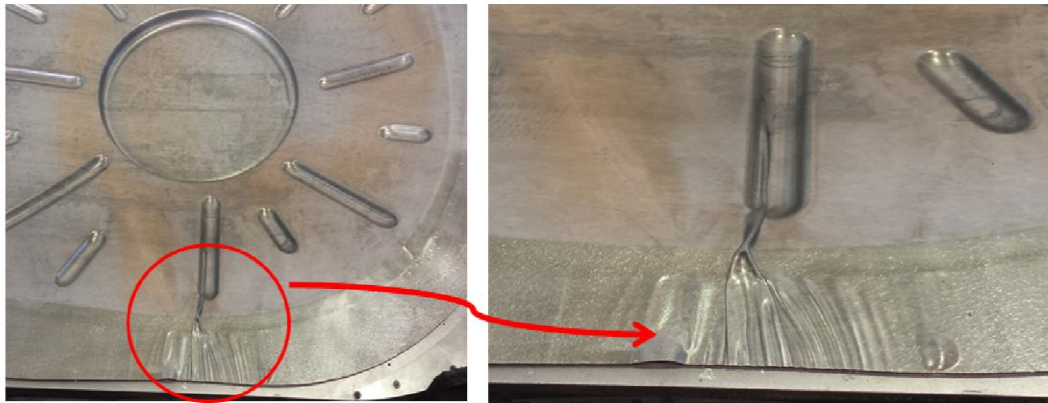
Nas informações foram considerados problemas específicos da estampagem como, rupturas, dobras, ondulações superficiais, e também problemas relativos ao processo de prensagem devido a tipo do processo aplicado, dentre eles marcas provenientes de sujeiras na matriz e deslizamento do *blank* sobre o ferramental ocasionando falta de material em algumas regiões do produto.

O problema com maior índice de repetição foi a questão de ondulações na superfície.

Essas ondulações possuem normas interna de aceitação na empresa, porém no processo atual sempre que ocorrem ondulações as mesmas estão fora do permitido pela engenharia. Essas normas são elaboradas e estudadas pela engenharia de materias. Dependendo de onde a peça é instalada, a ondulação deve ser eliminada, pois pode interferir no produto final ou no aspecto visual.

Na Figura 13 podemos identificar a ondulação gerada no processo de estampagem.

Figura 13 – Ondulação superficial



Vista ampliada da ondulação

Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

Foram considerados também problemas nos processos posteriores ao de estampagem. Alguns desses problemas foram a impossibilidade de desempenho e a impossibilidade de soldagem dos demais componentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Processo de estampagem proposto

O processo de estampagem proposto é o ISF (*Incremental Sheet Forming*).

Este processo é uma novidade nas indústrias, das quais vem estudando este processo para minimizar o uso de ferramentas dedicadas no processo de estampagem.

Basicamente consiste no uso de um dispositivo chamado de prensa chapa acoplado a base de uma máquina de usinagem de três ou mais eixos cartesianos, no qual esta máquina é operada por comandos numéricos computadorizados.

Nesta base é fixada a chapa, a qual vai passar pelo processo de deformação plástica. Esse processo ocorre através da aplicação de uma força sobre a chapa através de uma ferramenta de ponta esférica, a qual é fixada no eixo árvore da máquina.

Conforme a ferramenta se desloca nos eixos cartesianos, a chapa metálica é deformada plasticamente, mantendo a forma desejada conforme o produto CAD assistido pelo *software* da máquina, convertidos em arquivos CAM tridimensionais.

4.2 Melhorias ergonômicas

O processo de estampagem convencional requer uso de dispositivos e ferramentas passíveis de acidentes ou lesões.

Para a colocação da matriz de estampagem na máquina, é utilizado a ponte rolante, não havendo riscos ergonômicos ao operador.

Porém o operador da prensa é sujeito a movimentos e esforços que podem prejudicar sua saúde com o passar do tempo.

As maiorias dos esforços estão voltadas ao manuseio da chapa no ferramental de estampagem. Durante a estampagem de uma peça, o operador coloca e retira a peça do ferramental vinte e quatro vezes. Apesar de a chapa possuir uma espessura de apenas 0,5mm, os movimentos tornam-se desgastantes ao final de um turno de trabalho. Ainda existe no processo de estampagem a lubrificação, que é realizada utilizando pincel, fazendo com que o operador se movimente ainda mais. Para a lubrificação da peça o operador deve estar devidamente equipado, utilizando equipamento de proteção individual.

Após algumas estampagens, o operador deve polir a superfície do ferramental utilizando lixa de grana fina. Este procedimento é necessário devido ao atrito da chapa metálica com a matriz durante a estampagem, gerando uma superfície com rugosidade muito grande. Isso faz com que a chapa tenha maior atrito na matriz ocorrendo excesso de estiramento da chapa e rompimento da mesma. Esse procedimento também requer esforços físicos ao operador, afinal trata-se de um acabamento manual, pois o uso de máquinas específicas no lixamento pode ocasionar defeitos superficiais na matriz.

Em trabalho com a equipe de segurança do trabalho, foi elaborado um laudo sobre o risco de trabalho do processo anterior. Esse risco é reduzido com a implantação do novo método.

4.3 Modificações no processo de fabricação

Conforme foi mostrado na Tabela 1, o produto passava por vários centros de trabalho responsáveis para execução de determinada operação no processo produtivo. Cada operação possui seu tempo de execução de acordo com a sua tarefa. Alguns destes processos sofreram modificações devidas ao novo método de estampagem, conforme será descrito nos tópicos seguintes:

4.3.1 Corte da chapa

No processo de corte de chapas realizado através de guilhotina, houve modificações quanto ao sentido de corte da chapa conforme a laminação da matéria prima. A princípio o *blank* está sendo cortado mantendo a mesma dimensão de corte nos quatro cantos da chapa, ou seja, um perfil quadrado. Mas, esta preocupação já está ocorrendo, pois em estudos futuros

serão trabalhadas dimensões diferentes, e devido a isso é interessante manter atenção nesse ponto durante o corte da chapa.

As dimensões de corte e o método de corte continuaram da mesma forma. Porém estudos futuros quanto ao dimensional do corte da chapa já esta sendo previsto, visando sempre à redução do uso de matéria prima.

4.3.2 Rebarbação

No processo anterior, após o corte da chapa conforme as dimensões do *blank*, o mesmo era direcionado à área de rebarbação para eliminar as arestas da chapa provenientes do corte na guilhotina. Como havia atrito da chapa com a superfície da matriz durante a estampagem, as arestas da chapa poderiam causar riscos na matriz, havendo necessidade de retrabalho da matriz após a estampagem, ou poderia causar excesso de estiramento durante a estampagem. As rebarbas nas arestas iriam segurar o *blank* durante a estampagem, dificultando o seu escoamento. Com isso o risco de rompimento durante a estampagem era grande.

Devido a isso a rebarbação era de tamanha importância. Os operadores da área de rebarbação deveriam manter as arestas das chapas livres de qualquer rebarba.

Com o uso do ISF a operação de rebarbação foi eliminada, havendo um ganho no *lead time* no processo, pois as chapas deixam de passar na área de rebarbação e seguem direto para a área de estampagem. Este ganho foi de quatro minutos por peça, um ganho de aproximadamente US\$ 12,47 por peça. Com uma demanda de 4 peças por mês, o ganho anual foi de US\$ 598,56. Houve também redução em alguns materiais de consumo, como lixas e depreciação de equipamentos utilizados na rebarbação.

No processo de ISF as arestas nas chapas não afetam o processo de estampagem, pois o *blank* é fixo no prensa chapa, e o escoamento é mais lento em relação a estampagem na matriz.

4.4 Estampagem

No início do estudo, a ideia principal era eliminar totalmente a operação de estampagem em prensa utilizando a matriz.

Após os primeiros testes foi encontrada certa dificuldade em realizar a conformação incremental utilizando o sistema SPIF (*single point incremental forming*), ou seja, quando a

estampagem ocorre utilizando apenas o ponto de contato da ferramenta. Devido a isso os primeiros testes estão sendo utilizados com o uso da matriz em baixo do *blank*. Com isso passamos a utilizar o sistema TIPF (*two points incremental forming*), ou seja, que são utilizados pontos duplos na estampagem.

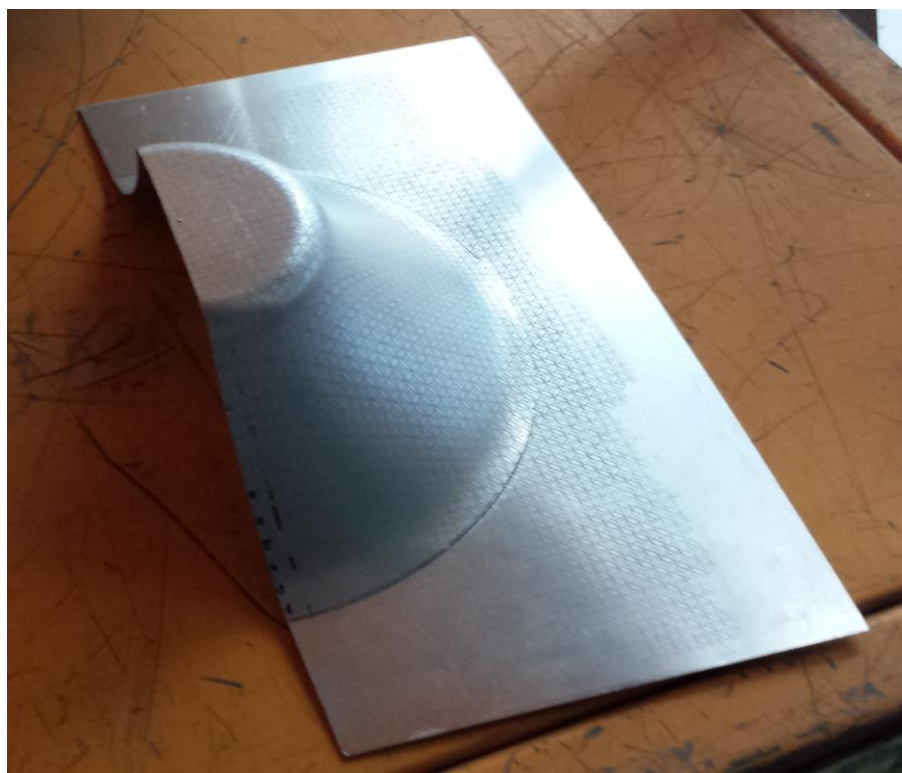
Essa alteração foi realizada devido a falta de conhecimento neste novo processo. Porém os planos futuros no estudo são de eliminar a matriz e trabalhar com apenas o ponto de contato da ferramenta.

Neste momento o novo processo encontra-se em fase final de adequação para uso, e em paralelo, estão sendo analisados ganhos na fabricação em relação ao tempo e a redução de não conformidades na estampagem. A eliminação da matriz será para estudos futuros, para eliminação de ferramentas dedicadas e ganho de espaço no *layout* da empresa.

O primeiro teste de estampagem foi sem o uso da matriz, de modo a conhecer a elasticidade do material. Na Figura 14 pode ser notado que o mesmo possui um escoamento razoavelmente bom, tornando satisfatória a primeira análise.

A Figura 14 também mostra o material utilizado para análise do estiramento e regiões passíveis ao rompimento. O material foi cortado no centro para ser enviado à área de ensaio metalográfico.

Figura 14 – Teste para análise de estiramento



Fonte: INDÚSTRIA DE ESTAMPAGEM DE PEÇAS (2015)

Este ensaio metalográfico consiste em analisar as características estruturais da chapa metálica em relação a suas características mecânicas, sendo realizado externamente à empresa.

Os resultados ainda não foram recebidos, porém, analisando-se o material pode-se notar que o estiramento não foi agressivo, e que é muito provável que a análise seja satisfatória.

Alguns testes ainda estão sendo realizados para melhorar o tempo no processo. Modificações como o diâmetro da ferramenta, a velocidade de passagem da ferramenta sobre a chapa e profundidade em que a ferramenta desce após cada passada, são aspectos difíceis de serem controlados, e possuem diversos fatores.

5 CONCLUSÃO

Como citado anteriormente, este trabalho visava o estudo na conformação de uma peça em titânio, utilizando a estampagem incremental. Devido ao processo ser uma novidade na empresa, e no mercado não ter muitas empresas utilizando esta tecnologia, sua total implantação está sendo demorada e muito difícil. O contato com outras empresas, ou seja, o *benchmarking* fica mais difícil. O contato maior está ocorrendo com professores de algumas universidades que atualmente estudam esse novo processo.

Apesar de não terem ocorrido todos os testes necessários para o novo processo, e também não ter ocorrido a fabricação de uma peça em sua concepção final, pode-se verificar melhorias em vários pontos do processo de estampagem.

Podem ser evidenciados até esse momento alguns ganhos relacionados à ergonomia e segurança operacional, pois os movimentos repetitivos do operador durante a fabricação no processo atual foi reduzido. Houve também ganho na eliminação de uma operação de rebarbação das chapas após o corte em guilhotina.

Também foi possível evidenciar que a adaptação de recursos da área de usinagem como equipamentos, ferramentas e *softwares*, é possível para a fabricação de peças através de estampagem incremental.

Algumas chapas passaram por gravação eletrolítica para análise de estiramento do material, porém os dados ainda não foram processados.

Por fim o trabalho realizado credita ao material estudado boas chances de aplicação do ISF.

REFERÊNCIAS

- ALTAN, T., Sheet Metal Forming, Fundamentals and Applications, Curso ABM, S.Paulo, 2008.
- CASTELAN, J. **Estampagem Incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. 2010. 193 f. Dissertação Mestrado em 2010.
- DALEFFE, A. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro. In: LEACH, D. **A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts**. Bélgica: Conferência Internacional de conformação em metais, 2001. p.211-218. Disponível em: http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/16205/000697890.pdf?sequence=1&locale=pt_BR>. Acesso em 11 mar. 2015.
- EL Salon online de la indústria: Avure Technologies Inc. Disponível em: <http://www.directindustry.es/prod/avure-technologies-inc/product-16238-415092.html>
- FERNANDO FOLE, L. Metodologia de medição do coeficiente de atrito em estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica. **Materiais**, Rio Grande do Sul, v. 1, p. 16, 2008. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14790/000668164.pdf?sequence=1> Acesso em: 31 mai. 2014.
- FRITZEN, D. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de latão 70/30. Porto Alegre: Conferência internacional de conformação de chapas, 2011. p.3. Disponível em: http://assets.cimm.com.br/uploads/cimm/publicacao/arquivo/368/ARTIGOSENAFORDANIE_LFRITZEN_2_97.pdf
- OLIENICK FILHO, E.G. Análise de estampagem de chapas pelo método de elementos finitos. **Estampagem**, Curitiba, v. 1, p. 21, 2003. Disponível em: <<http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/FILHO,%20Eduardo%20Gregorio%20Olienick.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2014.
- JOHNSON, W., MAMALIS, G. Aspectos de mecanismos de plasticidade de algumas chapas no processo de conformação. Grécia. Editora Hellenic, 1978. 226p.

PALMEIRA, A. Processo de estampagem. In: Universidade do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.fat.uerj.br/intranet/disciplinas/Processos%20de%20Fabricacao%20IV/Cap.%208%20-%20Estampagem.pdf>>. Acesso em: 01. Abr. 2015.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metalúrgicos**. Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1982. 325p.