

ESTUDO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE ALUMÍNIO PURO

Jean Lacerda¹

Anderson Daleffe²

Resumo: Este estudo abordará o processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro, com o intuito de analisar e comparar resultados obtidos experimentalmente, usando a máquina dedicada para estampagem incremental e comprovando sua eficiência. O trabalho expõe um método que possa delimitar a capacidade do processo. Para isso, será realizada a estampagem incremental em chapas de 0,5 mm de espessura, em alumínio, com uma porcentagem de 99% de pureza. A partir de especificações e características técnicas do processo de estampagem incremental de chapas, foram feitos experimentos práticos para obter resultados por meio de ensaios de conformação na máquina dedicada a estampagem incremental, utilizando ferramental adequado para o processo. Foi determinado o ângulo limite de parede para a estampagem incremental do alumínio na forma geométrica tronco de pirâmide, foi verificada a variação da espessura na região estampada em relação ao sentido de laminação da chapa. Foram obtidos resultados interessantes relacionados ao processo com grande valia para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Estampagem Incremental, Máquina Dedicada e Alumínio Puro

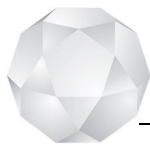
1 INTRODUÇÃO

Constantemente as empresas buscam novas tecnologias, de modo a se destacarem no mercado, pois este está em constante desenvolvimento. Da mesma forma há uma grande busca por confiabilidade por parte de clientes, assim como baixos preços. A concorrência se tornou muito grande ao longo dos últimos anos, exigindo que elas se adaptem de modo rápido. Isso é obtido por meio do avanço tecnológico, que auxilia no processo produtivo, melhora os produtos, reduz os custos com mão-de-obra, aumenta a produção, diminui desperdícios de material e também risco de falhas (DALEFFE, 2008).

As palavras-chaves na indústria hoje são diferenciação, personalização, redução de custos, diminuição do “lead-time” e produção sustentável. É necessário, portanto, providenciar respostas urgentes para estes requerimentos, desenvolvendo novas tecnologias em diferentes áreas da produção, entre elas, a área de conformação plástica de chapas metálicas (LOPES, 2013).

¹ Graduando de Tecnologia em Manutenção Industrial – SATC. E-mail: jeanlacerda@hotmail.com.

² Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Professor da SATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br.



A estampagem incremental (ISF – *Incremental Sheet Forming*), é uma tecnologia utilizada no ramo metal-mecânico. Ela consiste em uma máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado) adaptada ou uma propriamente dedicada para isto, com uma ferramenta com forma esférica na ponta, que realiza movimentos nos eixos X, Y e Z, de forma a conformar gradativamente, através de consecutivas deformações aplicadas localizadamente, uma chapa em liga metálica obtendo-se o formato desejado (CASTELAN et al, 2014).

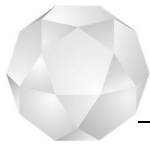
São utilizadas ferramentas simples, que possibilitam baixo custo, diferentemente das tradicionais usadas em outros processos com mesmo objetivo. Sua velocidade, comparada às demais técnicas, também é superior, devido ao fato de não necessariamente precisar da matriz. O desenho da peça é desenvolvido em CAD (Desenho Assistido por Computador) e antes de realizar a estampagem definitiva, é feito testes virtualmente em CAM (Manufatura assistida por computador), possibilitando ajustes que sejam necessários para não haver possíveis erros (FRITZEN, 2012).

A ISF vem para diminuir significativamente os custos de projetos que normalmente fariam a utilização de matrizes para analisar se o design ficou de acordo com o esperado, se as medidas estão corretas, graças a prototipagem que o processo disponibiliza. Em algumas situações pode também ser utilizada para a fabricação de pequenos lotes, como exemplo, a fabricação de peças sob encomenda, em que o número de peças é reduzido e diversificado, não justificando a fabricação dos moldes.

O presente artigo tem como objetivo obter peças fabricadas por estampagem incremental através de testes práticos feitos em chapa de 0,5 mm de espessura em alumínio, na uma máquina dedicada a estampagem incremental. Serão feitos os testes na forma geométrica tronco de pirâmide e serão coletados dados referentes a redução da espessura da chapa, ensaio de tração, composição química do alumínio e ângulo máximo de inclinação de parede na estampagem incremental para o alumínio em questão.

2 ESTAMPAGEM EM METAIS

A estampagem em metais surgiu por volta de 1980, com a necessidade da fabricação de bicicletas em escala industrial. No ramo automobilístico o tão conhecido Henry Ford, da Ford Motor Company chegou a fazer recusas à estampagem de chapas para a fabricação de seus automóveis, mas devido à demanda acabou cedendo. Daí em diante o processo foi se aperfeiçoando e se tornando cada vez mais comum (DAMOL, 2015).



O método de estampagem consiste na conformação de uma chapa metálica ou plástica, seja ela a quente ou a frio. Tem-se o processo de estampagem profunda, que consiste em um punção (que é a ferramenta convexa que fica acoplada no elemento móvel denominado suporte de punção), que será introduzido na matriz côncava, que fica fixada em um suporte (CIMM, 2015).

A Figura 1 mostra como é feito a estampagem profunda.



Figura 1: Estampagem profunda
Fonte: CIMM (2015)

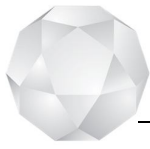
Este é um dos modelos de estampagem mais utilizados no meio metal-mecânico, porém não é o mais viável, pela necessidade obrigatória de uma matriz fabricada exclusivamente para a peça a ser fabricada e com alto custo.

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Estampagem incremental – ISF, foi explorada pela primeira vez no Instituto de Manufacturing em 1990 por Colin Andrew, e depois retomado no Japão durante a década de 1990 (JACSON; ALLWOOD, 2015).

No Japão a estampagem incremental foi estudada com o intuito de ser utilizada na indústria automobilística, que é muito forte no país. Ela é considerada uma tecnologia recente. Essa técnica consiste na estampagem de chapas, sem utilização de calor, sem o uso de matriz e podem-se utilizar máquinas CNCs ou Robôs como suporte para se obter tal resultado. Uma das principais comerciantes dessa tecnologia é a empresa Aimonio Corporation (DALEFFE, 2008).

Esse processo de estampagem é considerado simples. O punção, que é uma ferramenta com ponta esférica, pressiona uma chapa metálica denominada *blank* que é uma tira de material que fica presa no prensa da chapa, aplicando uma força sobre ela, de modo a



realizar uma conformação no material. A ferramenta faz movimentos nos eixos X, Y e Z, para obter a forma ou peça que se deseja. É um processo gradativo, para que não rompa a chapa.

Conforme comentado a ferramenta se movimenta nos eixos de coordenadas do plano 3D, que são os mesmos utilizados na programação da máquina CNC. São eles:

- Eixo X – estabelecido pela direção longitudinal
- Eixo Y – estabelecido pela direção transversal
- Eixo Z – estabelecido como eixo das profundidades (SILVA, 2002).

O eixo de principal importância para a conformação é o Z, este é o que faz com que a ferramenta realize o passo vertical, que consiste em cada passo que é dado no movimento vertical. A altura de crista, que são pequenas deformidades deixadas pelo ângulo da ferramenta, é proporcional ao valor de cada passo vertical (TIBURI, 2007).

A Figura 2, mostra, por meio de ilustração, como são tais deformidades e uma melhor representação do que é o passo vertical.

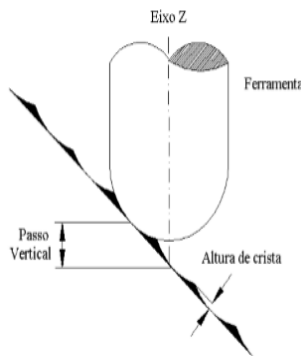
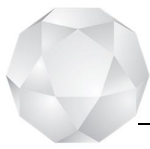


Figura 2: Explicativa altura de crista e passo vertical
Fonte: Tiburi (2007)

Segundo (DALEFFE, 2008), a ferramenta é produzida com um material que suporta uma grande força de atrito (aço-ferramenta endurecido) reduzindo consideravelmente o desgaste. Esta possui a ponta abaloada, para que o ponto de contato seja suave, melhorando o deslizamento sobre a chapa a ser estampada, ocasionando o alongamento e inflexão na mesma. A qualidade da estampagem depende de alguns fatores, um deles é o diâmetro mínimo de ferramenta, que não pode ser menor que 6 mm, pelo fato de que quanto menor for este, maior também será o número de passes necessários para a obtenção da geometria desejada, assim deixando uma maior quantidade de marcas da ferramenta. Quanto maior o diâmetro da ferramenta melhor será a qualidade de estampagem, porém, do mesmo modo, também maior será a força aplicada sobre o material (DALEFFE, 2008).



A Figura 3 mostra algumas características que foram mencionadas anteriormente, para que se tenha uma melhor compreensão do processo.

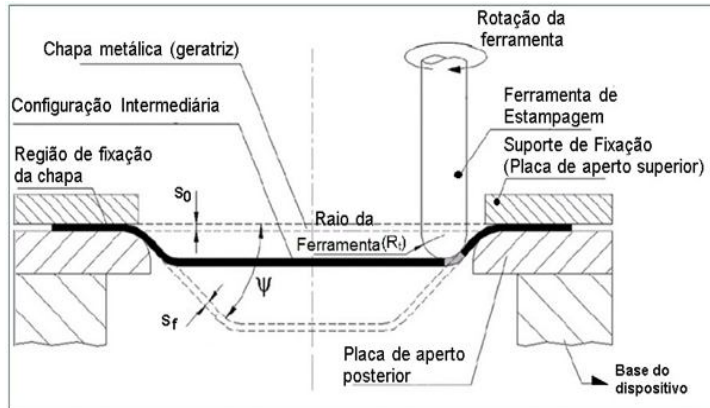


Figura 3: Parâmetros da estampagem incremental
Fonte: Franzen et all (2008)

A lubrificação no processo é essencial para reduzir o atrito e existem vários tipos de lubrificantes para se utilizar na estampagem, o que foi utilizado para este estudo é a graxa a base de lítio, a mesma utilizada em rolamentos e outras aplicações diversas. A lubrificação na estampagem serve para a redução de atrito, desgaste, proteção contra a corrosão, diminuição de ruídos e redução da vibração (MOLYKOTE, 2015).

Há duas maneiras de se obter a estampagem incremental, pode ser gerada com forma negativa ou positiva. Na negativa, a peça fica com o seu formato côncavo na parte em que a ferramenta entra em contato, ou seja, a mesma fica com uma elevação inferior nas bordas pelo fato de que estas ficam presas na mesa de fixação. Na positiva acontece o inverso, formando uma peça convexa (SILVA, 2011).

Na Figura 4 verifica-se o processo de estampagem negativa e positiva.

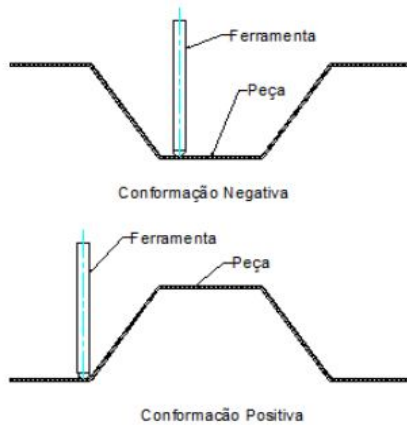
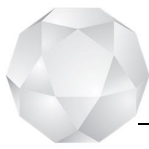


Figura 4: Conformação negativa e positiva
Fonte: Adaptado de Silva (2011)

Atualmente existem poucas máquinas dedicadas a estampagem incremental. Por se tratar de um novo método de conformação. Os centros de usinagem CNC têm um custo elevado e não são projetados para tal aplicação, por isso pode ocorrer problemas de desgaste prematuro e avarias no eixo árvore, pois não foram dimensionados para suportar a força de compressão para a realização da estampagem, assim surgindo a necessidade de uma máquina dedicada para o devido fim.

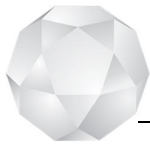
2.2 ALUMÍNIO PURO

O alumínio é considerado pelos estudiosos o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, sendo o metal mais recente utilizado no meio industrial (ABAL, 2015).

Este metal para ser fundido necessita de muita energia, cerca de 14000 KWH para 1 tonelada, tornando o processo com um custo elevado. Dessa forma, verifica-se que na reciclagem do mesmo a diferença de custo supera os 95% tornando esse processo muito mais viável do que retirá-lo do solo e transformá-lo (LIRA, 2015).

Por se tratar de um material novo, o uso dele vem aumentando a cada dia. Possui muitas características interessantes, tais como leveza, elevada condutibilidade elétrica, durabilidade, resistência a corrosão, peso baixo, etc. O alumínio puro (99,99% Al) possui uma resistência mecânica baixa, porém sua ductibilidade é alta, cerca de 60 a 70% de alongamento (CHIAVERINI, 1986).

Mesmo se tratando de um metal consideravelmente novo para o ser humano, já está em grande parte da vida das pessoas. A utilização desse material aumenta a cada dia,



impulsionando cada vez mais os estudiosos a pesquisarem possibilidades de uso para esse metal tão abundante em nosso meio (CHIAVERINI, 1986).

2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM ALUMÍNIO

O alumínio é um material que se conforma facilmente, porém tem uma resistência mecânica muito baixa. Por ele ter a característica de ser um metal consideravelmente dúctil em seu estado puro, torna-se muito fácil a estampagem incremental (TABELA, 2015).

Para a obtenção de um bom resultado, o alumínio em seu estado puro, deve ser conformado gradativamente, de modo que não venha a ocorrer o rompimento da tira que fica presa no prensa chapas.

A Figura 5 é mostra uma chapa de alumínio que foi conformada por estampagem incremental.

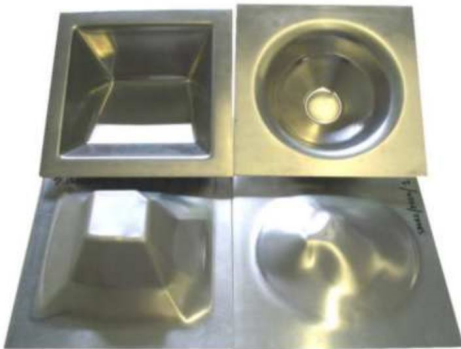
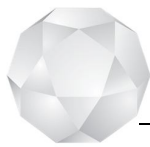


Figura 5: Características da estampagem incremental
Fonte: Jackson (2016)

As formas geométricas que podem ser estampadas através da estampagem incremental em chapas de alumínio são diversas, isto porque o alumínio tem um bom comportamento relacionado com a técnica de estampagem de forma gradativa (CASELAN, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito todo o desenvolvimento do trabalho na prática, os experimentos e todos os materiais e máquinas envolvidos no processo.



3.1 ANÁLISES E ENSAIOS DO ALUMÍNIO

O ensaio de tração é um dos testes mecânicos mais utilizados. Tem como objetivo fornecer dados relativos à capacidade de um sólido de suportar solicitações aplicadas a uma estrutura (INFOSOLDA, 2015).

Esse ensaio foi realizado e dele retirou-se os dados que são representados através da Figura 6.

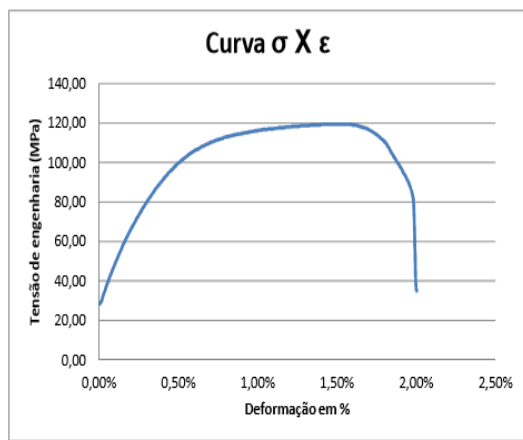


Figura 6: Curva de tensão de engenharia pela deformação
Fonte: Os autores

A tensão de escoamento foi obtida através de valores retirados do ensaio de tração (K_f e ϕ), estes valores foram colocados no Microsoft Excel[®], gerando assim a curva tensão de escoamento do alumínio puro. A curva de escoamento obtida é mostrada na Figura 7.

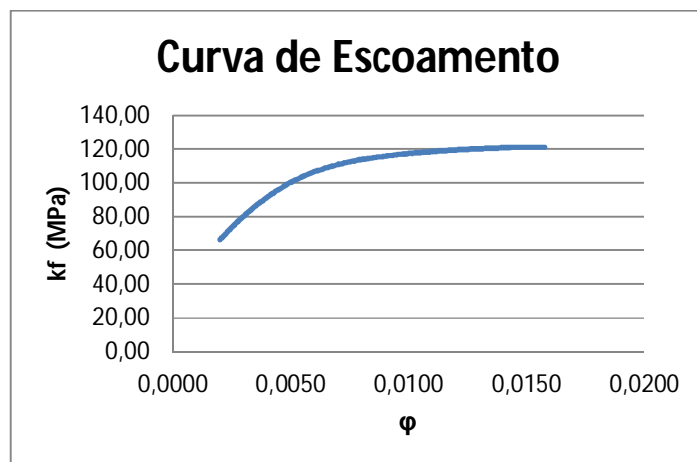
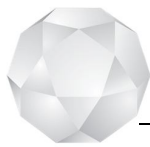


Figura 7: Curva de escoamento do alumínio puro (99,33% Al).
Fonte: Os autores



Foi feita a análise química do alumínio laminado, onde foi constatado os valores apresentados na tabela 1, com os elementos químicos citados em percentual (%):

Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Zn (%)	Ni (%)	Cr (%)	Pb (%)	Sn (%)	Ti (%)	P (%)	Al (%)
0,07	0,41	0,13	0,03	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,01	0,017	0,0013	99,33

Tabela 1: Composição química do alumínio
Fonte: os autores

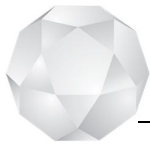
Como visto na análise química, o alumínio que foi utilizado para a realização dos testes incrementais tem um alto teor de pureza, cerca de 99,33%.

3.2 TESTES PRÁTICOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Para iniciar o procedimento experimental foi necessária a preparação do material a ser estampado. A preparação do *blank* inicia-se com a marcação na chapa de alumínio, logo em seguida é feito o corte na guilhotina, para obter o formato que encaixe perfeitamente no sistema de fixação da máquina de estampagem incremental.

Posteriormente, realizou-se a gravação da rede de círculos, que é um processo que irá comprovar o alongamento do material. Para que a gravação seja feita, é necessário que a chapa não contenha nenhum tipo de impureza.

A coleta dos resultados é feita a partir dos círculos que são marcados eletroquimicamente no *blank*. Essa marcação consiste em um processo eletrolítico. Para que essa seja feita é necessário um retificador e um eletrólito (líquido reagente) adequado. O líquido reagente age de maneira a corroer o material da forma pré-estabelecida por uma tela semi-impermeável, contendo uma rede de círculos tangenciais. Na Figura 8, mostra o equipamento utilizado para realizar o procedimento.



1-Máquina, 2- Matriz, 3- Líquido Reagente, 4- Neutralizador, 5- Blanks.

Figura 8: Equipamento utilizado para realização da eletrolise

Fonte: Os autores

Após ser feita essa marcação, os *blanks* já estão prontos para a realização dos testes. O objetivo de marcar a chapa com os círculos é para fazer a medir da deformação do metal, através do estiramento das circunferências se faz a coleta de dados para realização das comparações de resultados. A finalidade da marcação, e obter as deformações da chapa de alumínio após a estampagem.

O modelamento CAD da peça a ser estampada foi feito em SolidWorks[®]. No SolidWorks[®] foi definida as características da peça para posteriormente exporta-la para o software CAM para, para a geração das trajetórias de estampagem incremental, conforme Figura 9. No desenho já são definidos alguns parâmetros importantes, tais como o ângulo de inclinação de parede e a profundidade. Esses parâmetros determinam qual será a inclinação e profundidade que o alumínio irá resistir.

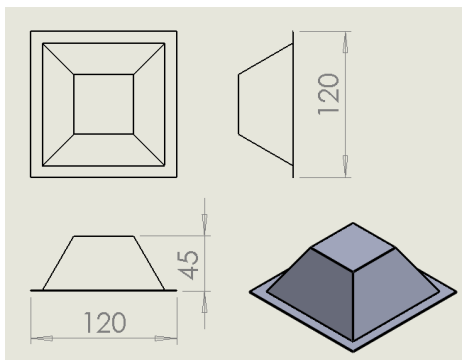
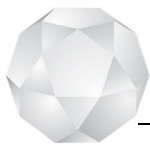


Figura 9 Desenho da peça a ser estampada

Fonte: Os autores

O CAM é um software dedicado à manufatura, especialmente para a programação de máquinas que utilizam a tecnologia CNC. Sem este programa o processo de programação



da máquina se tornaria um ponto crítico, pois este gera todos os comandos que serão enviados à máquina CNC, para que a máquina realize a trajetória da ferramenta de forma correta, esta programação pode ser vista na Figura 10.

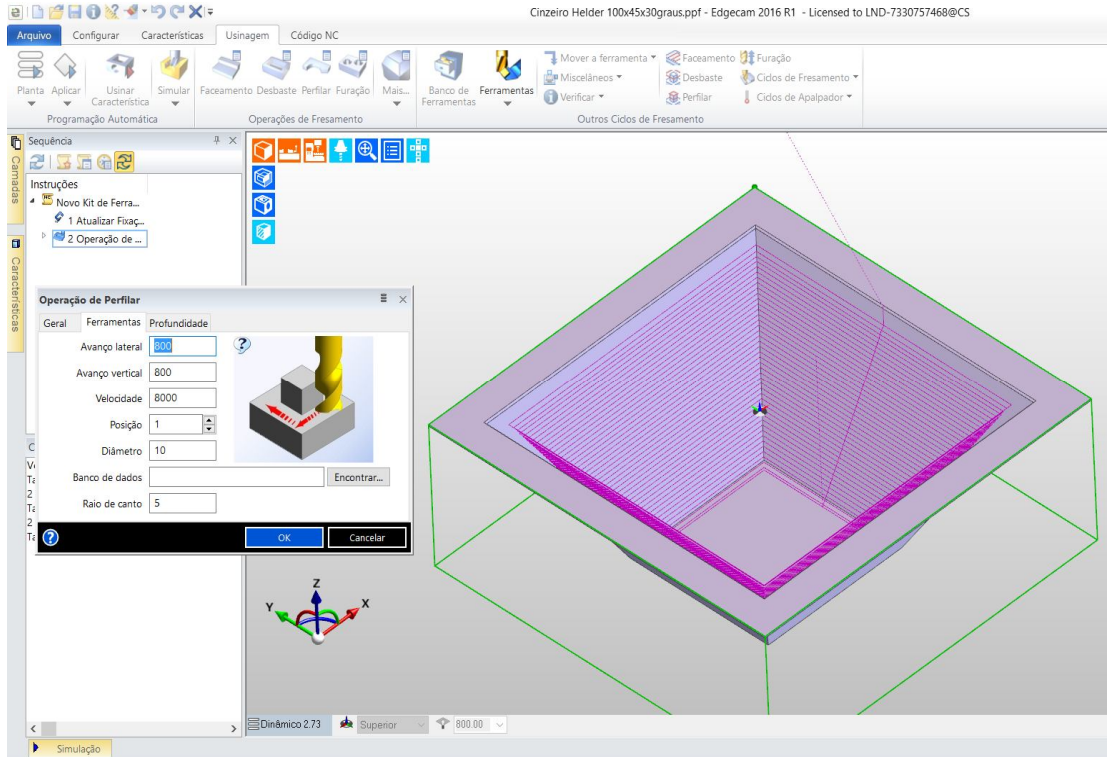


Figura 10 Programação da estampagem incremental
Fonte: Os autores

No programa EdgeCAM[®] são definidos certos parâmetros, sendo eles: número de passes, profundidade do passe e rotação da ferramenta, que nessa condição é RPM (Rotação Por Minuto). A Figura 10, mostra a configuração dos parâmetros do CAM que foram comentados anteriormente, em uma janela aberta ao lado do desenho, caracterizando a configuração da operação.

3.2.1 MÁQUINA DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL UTILIZADA PARA O EXPERIMENTO

A máquina utilizada para a realização dos experimentos foi desenvolvida por acadêmicos da Faculdade SATC, que mostraram todo seu aprendizado e competência dentro do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial no ano de 2015. O resultado desse trabalho é mostrado na Figura 11.

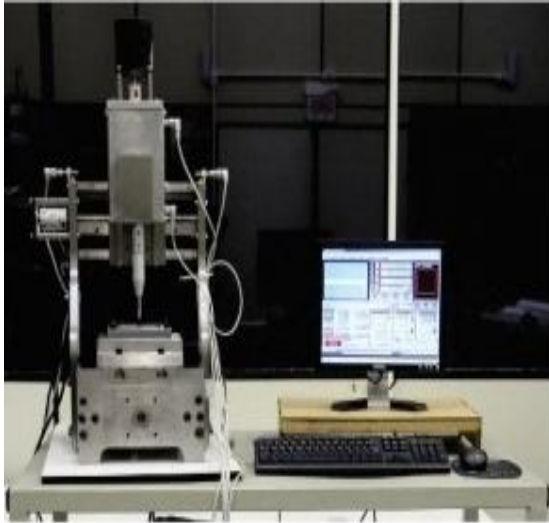
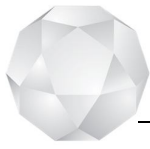


Figura 11 Máquina dedicada a estampagem incremental (MEDEIROS & DALEFFE, 2015).
Fonte: Medeiros e Daleffe (2015)

Os trabalhos que constituíram à máquina não visaram testes experimentais, o foco foi somente para a construção da mesma.

A ferramenta para a estampagem incremental tem o diâmetro de 10 mm, que é considerado bom para que haja poucas cristas na estampagem. Na Figura 12 é mostrada a ferramenta utilizada.

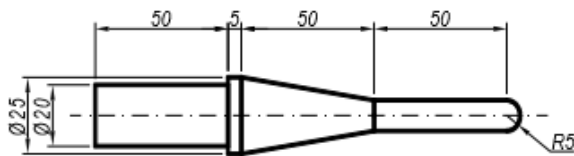
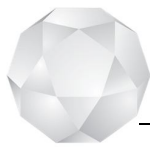


Figura 12: Ferramenta de estampagem.
Fonte: Os autores

3.2.2 REALIZAÇÃO DOS TESTES

Para a realização dos testes foi feita a fixação do *blank* na base no suporte prensa chapas, que possui 4 pontos de aperto com parafusos sextavado interno cabeça cilíndrica e inserir o programa na máquina. A próxima etapa constitui no zeramento da ferramenta para que a máquina faça o trajeto indicado pelo programa, sem sair da área de trabalho da ferramenta que é limitado, pois se caso isso acontecer pode danificar o equipamento, sendo então de imensa importância zerá-la.



O atrito é inevitável, porém foi reduzido aplicando uma camada de lubrificante na área de estampagem, assim possibilitando um melhor deslizamento da ferramenta, diminuindo o desgaste, vibração, oxidação, aquecimento e esforço excessivo no eixo árvore. A graxa aplicada foi a base de Lítio, é a mesma utilizada para engraxar rolamentos, mancais, entre diversas outras aplicações. A Figura 13, mostrada a máquina estampando, com a lubrificação e pontos de fixação no texto mencionados.

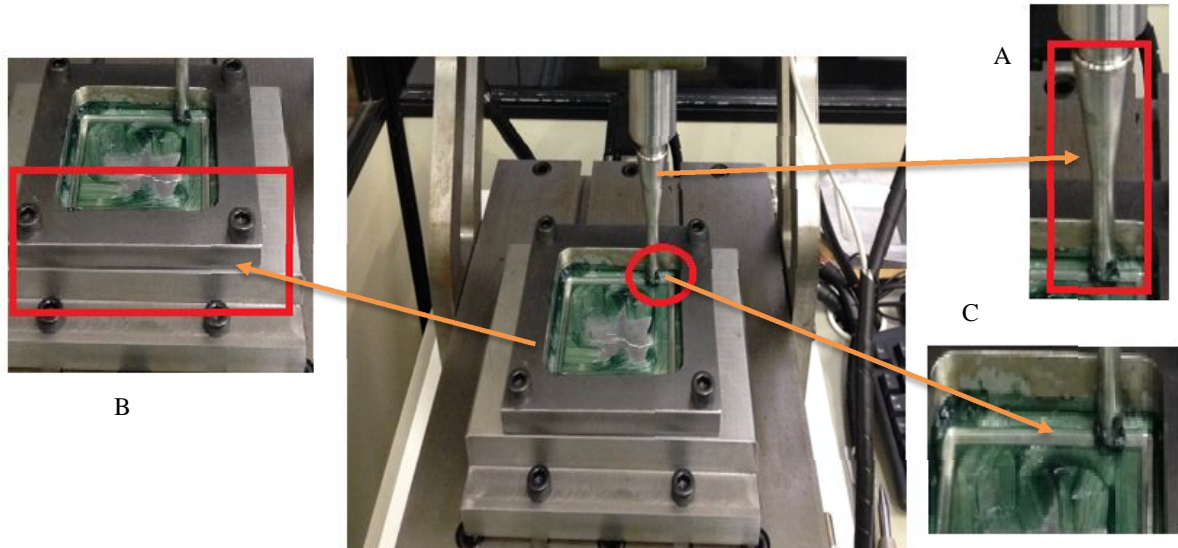


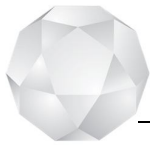
Figura 13: Teste de estampagem incremental, A - ferramenta de estampagem, B – prensa chapas e C – trajetória da ferramenta com lubrificação.

Fonte: Os autores

Na Figura 13, é possível verificar os principais elementos mecânicos, ferramentas e insumos utilizados no processo de estampagem incremental. É possível observar como foi feita a fixação da chapa de alumínio no prensa chapas, fabricado exclusivo para o experimento. A forma de fixação e a ferramenta utilizada e o caminho que a ferramenta faz de acordo com a programação CNC.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste trabalho serão descritos neste capítulo e serão analisados para um perfeito entendimento do conceitos envolvidos, experimentos e estudos realizados.



4.1 ANÁLISE DOS TESTES

Os primeiros testes foram preliminares e decisivos, servirão para o ajuste da máquina e da definição da melhor estratégia CAM. No primeiro *blank* a ser estampado, ainda no ajuste dos parâmetros, ocorreu a ruptura prematura, que foi causada propositalmente para definir o ângulo de parede máximo que o alumínio suportaria.

Foram realizados três testes para o ajuste da máquina, até que se definiu um ângulo de inclinação de parede que estampou até o final sem romper. A Figura 14, mostra um dos testes que foram realizados para o ajuste da máquina.



Figura 14: Ruptura do alumínio
Fonte: Os autores

A partir do quarto teste, com os parâmetros já definidos, foi iniciada a estampagem e foi até o fim sem que houvesse a ruptura do material. Para esse ensaio foi usado o ângulo de parede de 40°. Nesse ângulo ficou claramente visível o alongamento do material através das marcações que foram realizadas na chapa. A partir daí, foram realizados uma série de testes para analisar qual o maior ângulo de parede que o material viesse a suportar. Na Tabela 2, são mostrados os parâmetros utilizados nos testes executados.

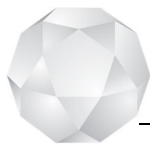


Tabela 2: Ângulos de inclinação de parede

Teste	Diâmetro da ferramenta	Profundidade de estampagem (Programada)	Ângulo de inclinação de parede	Incremento em Z	Situação da peça estampada
Nº 1	10 mm	40 mm	40°	0,3 mm	Normal
Nº 2	10 mm	40 mm	45°	0,3 mm	Normal
Nº 3	10 mm	40 mm	46°	0,3 mm	Normal
Nº 4	10 mm	40 mm	47°	0,3 mm	Normal
Nº 5	10 mm	40 mm	48°	0,3 mm	Normal
Nº 6	10 mm	40 mm	49°	0,3 mm	Normal
Nº 7	10 mm	40 mm	50°	0,3 mm	Pontos de ruptura
Nº 8	10 mm	40 mm	51°	0,3 mm	Ruptura
Nº 9	10 mm	40 mm	55°	0,3 mm	Ruptura

Fonte: Os autores

O teste de número 7 apresentou pequenos pontos de ruptura, um sinal de que o material chegou ao máximo ângulo que pode ser aplicado sobre ele no formato piramidal, portanto o teste número 6 foi o que apresentou os melhores resultados para este material com a máquina dedicada à estampagem incremental.

O teste 8° e 9°, apresentaram rompimento prematuramente. Com ângulo de 51° obteve-se 15 mm em profundidade de estampagem já o com 55° não ultrapassou os 10 mm. A Figura 15, mostra os pontos que romperam com o ângulo de parede de 50°.

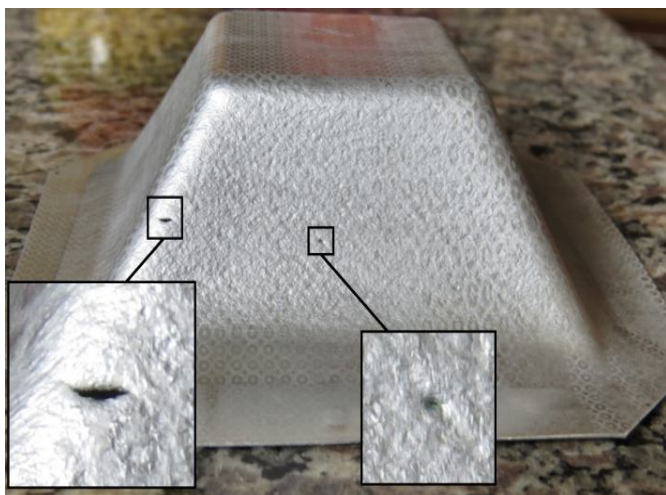
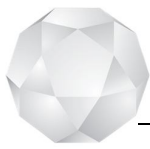


Figura 15: Pontos de ruptura

Fonte: Os autores



A obtenção dos resultados é feita através da medição dos círculos que foram marcados no *blank*. As medidas do alongamento dos círculos foram feitas com um microscópio modelo Digital Microscóp. 800x. Já a espessura foi medida por meio de um micrômetro externo Mitutoyo com capacidade de 0-25 mm com a área de contato com a chapa de 1 mm, de modo a ter uma melhor precisão. O alongamento dos círculos é chamado de estiramento, é através dele que foram extraídos os dados. A Figura 16 mostra uma das capturas feitas com a realização da medição dos círculos que é convertida de pixel para mm.

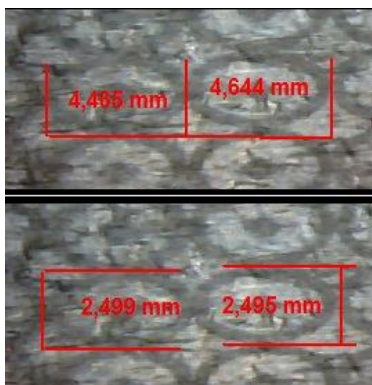


Figura 16: Medição por microscópio
Fonte: Os autores

Foram retiradas as medidas de uma carreira de círculos para analisar o alongamento que o material teve. A medição é caracterizada por (ϕ) que é a deformação plástica que o material sofre na estampagem. Tem-se $\phi 1$ e $\phi 2$ que indicam o alongamento do material. Na Figura 17 retrata por meio ilustrativo como são retiradas as medidas de $\phi 1$ e $\phi 2$.

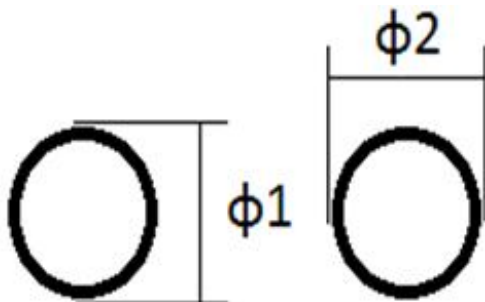
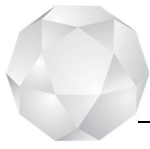


Figura 17: Representação de como são extraídas as medidas $\phi 1$ e $\phi 2$.
Fonte: Os autores



A medição da espessura do material para a obtenção dos resultados teve grande importância para determinar a espessura do material de acordo com a profundidade da estampagem. Tanto a medida feita por microscópio quanto a feita por micrômetro foram extraídas da chapa conformada que suportou maior ângulo de parede sem ocorrência de rompimento plástico, a de 49°. A Figura 18 mostra o material conformado sendo mensurado com o micrômetro.



Figura 18: Medição em diferentes pontos no material
Fonte: Os autores

4.2 ALONGAMENTO E ESPESSURA FINAL DO ALUMÍNIO

As medições dos círculos por imagem possibilitaram medidas precisas. A Figura 19 demonstra como foi o alongamento do material do início da conformação até o final para o ângulo de parede de 49°.

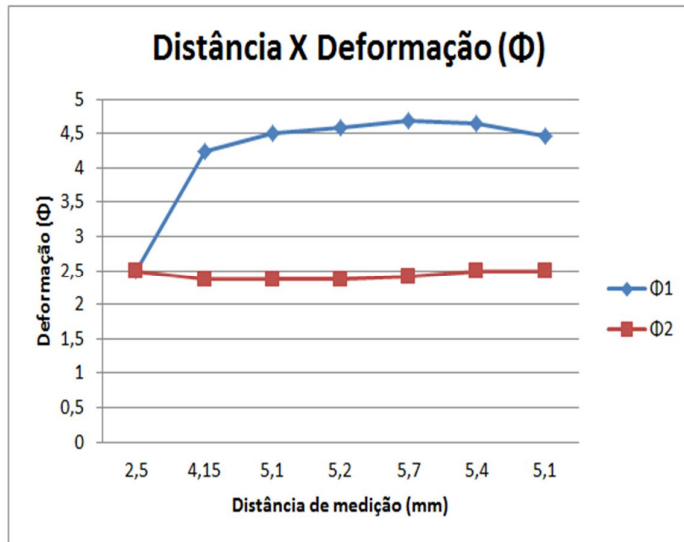
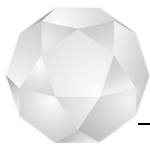


Figura 19: Gráfico de alongamento do material.
Fonte: Os autores

A espessura final do alumínio estampado mostrou o quanto o material alongou sem que houvesse rompimentos. Foram realizadas 26 medidas no sentido transversal da laminação e o mesmo número para o sentido longitudinal da laminação. A Figura 20 mostra as mudanças de espessura do material nesses diferentes pontos e sentido de laminação.

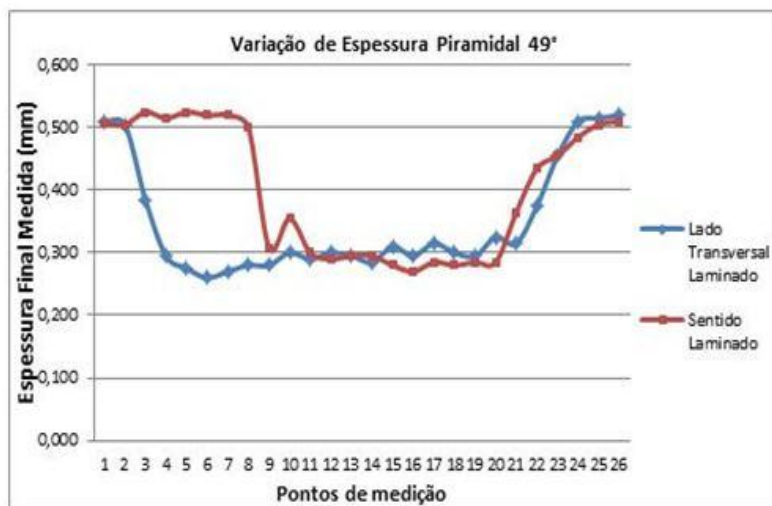
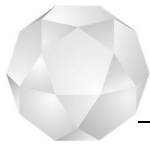


Figura 20: Gráfico representando diferentes pontos de medição
Fonte: Os autores

Analisando o gráfico da Figura 20, é possível perceber uma diferença entre as duas linhas expostas, isso ocorre devido ao sentido de laminação. No sentido de laminação, linha vermelha a espessura do material mudou praticamente no meio da região estampada, isso prova uma maior resistência da chapa a redução da espessura. Já no sentido transversal a



laminação, linha azul, ocorre uma deformação homogênea da espessura em toda a região estampada.

5 CONCLUSÃO

Com o estudo foi possível fabricar peças através da estampagem incremental em uma máquina fabricada especialmente para tal fim. Obtendo bom resultado nas peças fabricadas com as geometrias bem definidas.

A lubrificação foi essencial para a redução do atrito, o uso da graxa a base de lítio proporcionou um bom deslizamento pois criou-se um filme lubrificante entre a chapa e a ferramenta, o que também ajudou muito na profundidade de estampagem para que o alumínio não se rompesse prematuramente, evitando o desgaste da ferramenta e esforço excessivo do eixo árvore.

A gravação dos círculos na chapa antes da estampagem, proporcionou um bom resultado possibilitando a medição das deformações na chapa de alumínio após a estampagem.

Dentre os testes realizados, aquele que mais se destacou foi o com o ângulo de parede de 49°, por ser o que mais se alongou sem que ocorresse nenhum tipo de rompimento, portanto foi o ângulo que suportou os esforços da estampagem incremental no formato pirâmide.

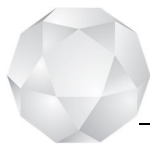
Os gráficos mostraram o alongamento e espessura final da chapa conformada, assim mostrando a resistência do alumínio no processo de estampagem incremental.

Outro fator importante para o processo é as diferenças encontrada nos valores da deformação na espessura em relação ao sentido de laminação do material. Observa-se que dependendo da forma geométrica que se deseja estampar a posição de montagem do *blank* pode influenciar negativamente o processo, ocasionando o rompimento prematuro.

Foi comprovado também a eficiência da máquina dedicada a estampagem incremental. Esta que proporcionou um bom resultado final de cada peça estampada.

REFERÊNCIAS

ABAL. **História do alumínio**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>>. Acesso em: 15 de out. de 2015.



CASELAN, J. **Utilização das Tecnologias CAD/CAM Para Estampagem Incremental do Alumínio Série 1000**. -. Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgia e Materiais . Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

CASTELAN, J.; et. al. **Manufatura de Implante Craniano Customizado Utilizando Impressão 3D e Estampagem Incremental de Chapas**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração., pp. 9-14, 2014.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. São Paulo: McGraw Hill. 1986.

CIMM. **Métodos de Conformação, Máquinas e Ferramentas**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6482-metodos-de-conformacao-maquinas-e-ferramentas#.ViwmfX6rTIV>. Acesso em: 12 de out. de 2015.

DALEFFE, A. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008.

DAMOL. **Entenda o que é Estamparia de Metais**. Disponível em: <<http://damol.com.br/entenda-o-que-e-estamparia-de-metais/>>. Acesso em: 02 de out. de 2015.

FRANZEN, V.; et. al. **On the capability of singlepoint incremental forming for manufacturing polymer sheet parts**. 9th ICTP – International Conference on Technology of Plasticity, 2008.

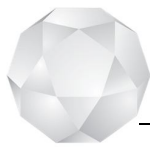
FRITZEN, D. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Latão 70/30**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012.

INFOESCOLA. **Alumínio**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/elementos-quimicos/aluminio/>>. Acesso em: 30 de set. de 2015.

INFOSOLDA. **Ensaio Mecânico: Tração**. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/var/www/html/infosolda.com.br/web/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/209-ensaio-mecanico-tracao.html>>. Acesso em: 8 de out. de 2015.

JACKSON, K. **Production Processes - Single point incremental forming (SPIF)**. Disponível em:<<https://www.mech.kuleuven.be/pp/research/spif>>. Acesso em: 28 de mar. de 2016.

JACSON, K. P., & ALLWOOD, M. **Institute for Manufacturing – University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge, U.K. 2005**. Fonte: Incremental Sheet Forming Research at Cambridge University. Acesso em: 12 de out. de 2015.



LOPES, Tiago. R.S. **Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rótura**. vol. I, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, p. 156, 2013.

MEDEIROS, H., & DALEFFE, A. **Desenvolvimento de Protótipo de Máquina Dedicada à Estampagem Incremental**. FACULDADE SATC, Tecnólogo em Manutenção Industrial,. Criciúma: Faculdade SATC, 2015.

MOLYKOTE. **Graxas**. Disponível em:
<<http://www.lubrificantes.net/grx-001.htm>>. Acesso em: 13 de out. de 2015.

SILVA, P. J. **Estampagem Incremental Utilizada Para Prototipagem de Peças de Aço ABNT 1008 e ABNT 304**. Universidade de Brasília, Mecânica. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2011.

SILVA, S. D. **Programação de Comandos Numéricos Computadorizados: Torneamento**. São Paulo: Érica, 2002.

TABELA. **Tabela Periódica Completa**. Disponível em:
<<http://www.tabelaperiodicacompleta.com/elemento-quimico/aluminio>>. Acesso em: 17 de out. de 2015.

TIBURI, F. **Aspectos do Processo de Estampagem Incremental**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FACULDADE SATC, através do curso de manutenção industrial, por todo o apoio financeiro e a pesquisa realizada neste trabalho, ao laboratório de prototipagem rápida PRONTO 3D, por disponibilizar toda sua infraestrutura para realização dos ensaios e experimentos práticos.