



ESTAMPAGEM INCREMENTAL MÚLTIPLOS ESTÁGIOS EM CHAPAS DE AÇO

1008

Luiz Eduardo Costa Motta¹

Anderson Daleffe²

Rodrigo Concer³

Gilson De March⁴

Jovani Castelan⁵

Daniel Fritzen⁶

Resumo: A estampagem incremental múltiplos estágios em chapas de aço AISI 1008 tem sido pouco procurado por ser mais lento em comparação com a estampagem convencional, porém é um processo mais vantajoso quando temos um lote de pequenas peças pois não é necessário o uso de matriz. O presente trabalho se estrutura na busca por meio da estampagem incremental alcançar o maior ângulo de parede possível, visando os 90 graus, sem a ruptura parcial ou total do material. Fabricar peças que exigem maiores ângulos de parede e que pelo método convencional ainda não é possível. Dessa forma, este estudo tem como principal objetivo analisar a conformabilidade da chapa de aço AISI 1008 de 0,9 mm de espessura, por meio de ensaios de estampagem incremental de múltiplos estágios. Para o estudo teve a preparação e realização da estampagem, nos Laboratórios de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UNISATC, Campus Criciúma/SC. Tendo como resultados obtidos um ângulo máximo de parede de 80° para a estampagem incremental do aço 1008 utilizando a estratégia de múltiplos estágios. Também foi observado, e por fim definido a curva CLC do AISI 1008 de espessura de 0,9 mm, realizou-se medições de espessura após o ensaio. Foi fabricado um protótipo para cada estágio até ocorrer a ruptura parcial, com esses corpos de prova foi possível analisar com clareza o que ocorreu em cada etapa do processo.

Palavras-chaves: Estampagem incremental,

1 INTRODUÇÃO

A estampagem incremental foi desenvolvida recentemente no Japão com o objetivo de atender a indústria automobilística. É uma estampagem feita em

¹ Bacharel em Engenharia Mecânica. 2022. E-mail: luizeduardomotta@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

³ Mestrando em Engenharia Metalúrgica UniSATC. Email: rodrigoconcer@gmail.com

⁴ Mestrando em Engenharia Metalúrgica UniSATC. Email: gilson.march@satc.edu.br

⁵ Professor do Centro Universitário UniSATC. Email: jovani.castelan@satc.edu.br

⁶ Professor do Centro Universitário UniSATC. Email: Daniel.fritzen@satc.edu.br



temperatura ambiente com o auxílio de uma máquina CNC sem o uso de matriz e utilizando um lubrificante especial (DALEFFE, 2008).

Com o avanço das tecnologias a estampagem incremental vem sendo aprimorada para ser utilizada nas mais diversas áreas da indústria tornando necessário o estudo de novas técnicas mais aprimorado para a estampagem das peças. Neste contexto a conformação em chapas metálicas tem um papel importante já que tem o objetivo de produzir peças com uma boa propriedade mecânica e sem perder grandes quantidades de material, abrindo assim um mundo de possibilidades para fabricação de peças em pequeno e média escala, bem utilizada também na fabricação de modelos para analisar a viabilidade da produção em grande escala assim é possível alterar várias vezes a mesma peça sem ter que fabricar uma matriz para cada modelo de peça e conseguir extrair dados reais do protótipo (SCHAEFFER, 1995).

No processo ainda existe algumas limitações que impedem a fabricação de algumas peças, abordando mais profundamente as limitações do processo, e analisando as vantagens da estampagem incremental em múltiplos estágios procurando a maior estampabilidade que o material permite antes da ruptura parcial.

Considerando que a tecnologia avança a cada dia se torna primordial o estudo de novos meios de fabricação de produtos, com essas considerações o trabalho irá abordar um novo método de estampagem incremental em chapas utilizando a estratégia de múltiplos estágios. Assim é possível analisar cada etapa do processo para poder ter clareza sobre como o material se comporta em cada estágio, para isso será utilizado chapas de aço SAE 1008 visando a obtenção de dados importantes para este processo, como o maior ângulo de parede que o material suporta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o estudo sobre o processo de estampagem incremental, assim como todos os parâmetros necessários para a caracterização do material utilizado neste trabalho. São descritos a conformação mecânica, estampagem incremental, ferramentas e os processos de fabricação da estampagem incremental.



Há 6.000 anos, o ser humano já utilizava o processo de conformação de metais para trabalhar com ouro, prata e cobre; e utilizando-se de ferramentas primitivas de pedra, na Mesopotâmia e no Egito há 2.500 a.C., produziam-se facas, espadas, joias e outros artefatos (SCHAEFFER, 2016).

Estudos recentes, que analisaram a viabilidade técnica-comercial, demonstraram que a precisão dimensional do produto final é um importante fator de limitação desta tecnologia de conformação. Dessa forma, pesquisas futuras devem ser realizadas neste sentido (HIRT et al., 2005).

2.1 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A conformação mecânica é um processo de modificação de forma de um corpo metálico para outra forma definida (BRESCIANI, 2011), onde se aplicam forças no material que deforma até chegar a uma geometria idealizada. As tensões aplicadas são geralmente inferiores ao limite de resistência à ruptura do material, ou seja, a forma final não é obtida através da remoção de material, como acontece em vários tipos de processos de fabricação. Existem alguns tipos de conformação mecânica que são: Forjamento, Laminação, Trefilação, Extrusão e Estampagem

Cada processo tem suas variáveis tais como temperatura de trabalho e tipo de esforço aplicado, que afetam diretamente nas propriedades do material utilizado (BARROS, 2019).

2.2 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A estampagem incremental conhecida também como ISF – Incremental Sheet Forming é caracterizado por ser um processo de conformação mecânica, que necessita o uso de uma máquina comandada numericamente, que é o principal equipamento para a realização da estampagem incremental. Com a máquina CNC é possível fabricar as demais ferramentas como, por exemplo, o punção e o próprio prensa chapas e até mesmo as matrizes de pré-forma que são necessárias para o processo. No processo de estampagem incremental principais variáveis controladas são, tamanho da ferramenta movida, material da ferramenta, velocidade de



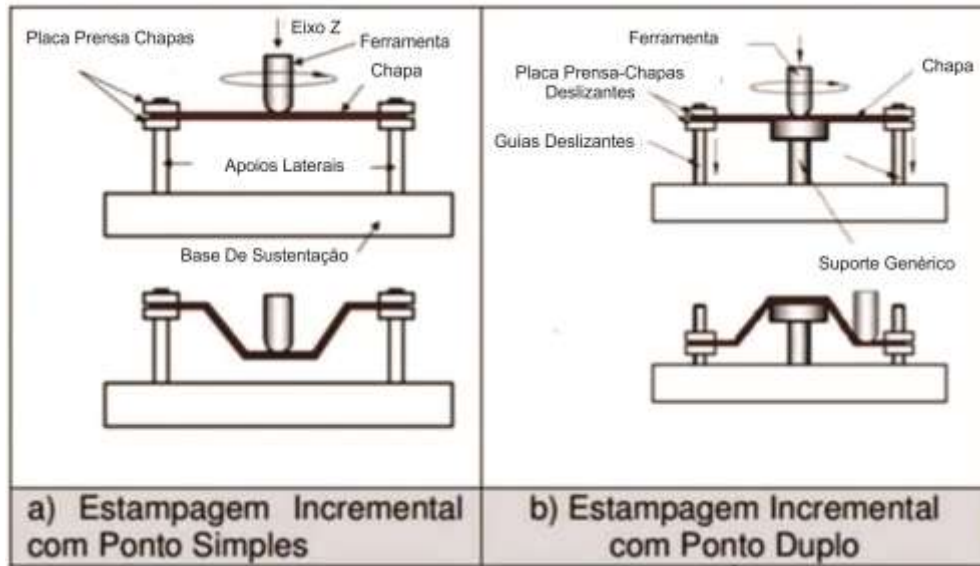
deslocamento da ferramenta, estratégia de conformação, incremento vertical, força de fixação do prensa-chapas e temperatura de estampagem. (FRITSCHER, 2018)

Este processo é viável quando o produto pode ser feito por conformação e a produção requer pequenos lotes de peças, como protótipos de produtos novos em desenvolvimento, e pode ser uma boa opção para a fabricação de produtos sob encomenda, onde a produção por estampagem incremental em larga escala se torna inviável economicamente. (FRITSCHER, 2018)

O termo ‘estampagem’ generaliza várias operações de manufaturas realizadas em chapas de metal, onde sempre ocorrem alterações na sua forma geométrica, produzindo dobras, vincos, cavidade, saliências, cunhas e furos. Todas estas deformações são realizadas no estágio sólido, onde o material é escoado em regime plástico. Tem-se na estampagem um grande aproveitamento da matéria-prima, com desperdício reduzido e geração de sobras de materiais, diferente de outros processos como, por exemplo, a usinagem (RODRIGUES e MARTINS, 2005).

O processo de Estampagem Incremental (Incremental Sheet Forming–ISF) é uma inovação tecnológica na área de conformação de chapas. Consiste na conformação de uma geratriz, com razoável precisão, a partir de arquivos CAD (Computer Aided Design–Projeto Assistido por Computador) convertidos em arquivos CAM (Computer Aided Manufacturing–Manufatura Assistida por Computador) tridimensionais. A trajetória da ferramenta é controlada por um programa e empregando um punção, utilizando a tecnologia CNC (Controle Numérico Computadorizado), vai conformando a peça através de pequenas deformações (SCHAEFFER, 2004) (BAMBACH, HIRT and AMES, 2004).

Figura 1 - Tipos de estampagem incremental.



Fonte: Adaptado de Fritzen (2012)

2.3 FERRAMENTA

O diâmetro da ferramenta é um parâmetro importante na estampagem incremental que pode variar de 6mm a 20mm em alguns casos o diâmetro está diretamente relacionado com o tempo de estampagem e com o acabamento. No geral, quanto maior o diâmetro melhor o acabamento superficial, porém menor a capacidade de copiar pequenos detalhes da peça. A forma das ferramentas pode ser semiesférica, esférica ou chata. Outro fator muito importante nas ferramentas é o baixo coeficiente de rugosidade evitando assim a adesão do material na ferramenta utilizada. (FRITSCHER, 2018).

A ferramenta é responsável por causar o estiramento e o dobramento da chapa, deslizando sobre a superfície da mesma (CAVALER, 2010) e (JESWIET et al., 2005).

O raio da ponta da ferramenta influencia diretamente no acabamento superficial da peça fabricada. A utilização de raios pequenos provoca concentrações de tensão na zona de deformação da chapa, localizadas abaixo da ferramenta. Raios maiores tendem a distribuir a tensão para uma área maior, tornando a superfície da chapa mais lisa e com menos marcas causadas pela ferramenta. Diminuir o raio da ponta da ferramenta aumentará o limite de estampagem da chapa,



entretanto, tornará a mesma mais frágil aos esforços triaxiais que ocorrem na conformação (CASTELAN, 2010).

2.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Quando o assunto é sobre o processo de fabricação se leva em consideração basicamente o modo como a chapa base é presa na máquina CNC, existem quatro maneiras de realizar essa operação uma delas é a SPIF – Single Point Incremental Forming, essa se refere ao processo de fabricação sem a utilização da matriz neste caso a ferramenta punção fica totalmente sem apoio adicional e a peça fica presa apenas pelo prensa chapas, baseado neste processo foi feito os estudos no decorrer deste trabalho. Existe também o TPIF – Two Point Incremental Forming neste caso o processo ocorre da mesma forma com a peça presa chapas e o punção realizando a conformação, porém se tem a adição de uma ferramenta denominada de matriz, que estará posicionada no lado oposto ao punção (LANDELL, 2016).

Existem outros dois modos que são o TPIF com matriz parcial e TPIF com matriz completa nesses casos o processo continua o mesmo. Porém com a diferença de uma matriz de pré-forma no lado oposto à punção podem ser utilizadas matrizes com formatos parciais e matrizes com formato completo da peça desejada (LANDELL, 2016).

A estampagem incremental é um processo de conformação que é realizado progressivamente, mediante a ação de uma ferramenta própria para o processo. O processo admite algumas alterações podendo ser trabalhado com um ou dois pontos de contato; é possível também utilizar uma matriz completa ou parcial (JESWIET, 2005).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O material utilizado para o desenvolvimento deste estudo foi a chapa de aço AISI 1008 de 0,90 mm de espessura, laminada a frio, a qual foi submetida à caracterização, preparação e realização da estampagem incremental de múltiplos estágios, para colheita de dados e análise dos resultados conforme o fluxograma a

pesquisa foi realizada nos Laboratórios de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UNISATC, Campus Criciúma.

Figura 2: Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados



Fonte: Do autor (2021)

Nesta etapa realizou-se a estampagem incremental em múltiplos estágios de sete corpos de provas para que com isso fosse possível realizar o levantamento da curva CLC. Utilizou-se uma chapa de aço 1008 com 0,90 mm de espessura. Nesta chapa foi estampado o formato de um prato. Realizou-se também a descrição de todos os componentes e estratégias utilizadas para chegarmos aos resultados.

O processo de estampagem incremental segundo Leszak (1967) é um método que permite deformar plasticamente chapas de metal em diversas formas geométricas sem o uso de matrizes ou moldes, com a utilização de ferramental de baixo custo.

A primeira estratégia de estampagem incremental em múltiplos estágios consiste em iniciar a estampagem em um determinado ângulo que neste trabalho foi o de 50° no primeiro estágio, e em seguida modificar o ângulo até o limite de fratura do material, no primeiro estágio a máquina levou em torno de 50 minutos e foi baixando o tempo conforme o ângulo utilizado nos sete estágios, no último estágio levou 5 minutos conforme (Tabela 1).

Já na segunda estratégia de estampagem foi determinado um ângulo de início de 60° e realizado a estampagem em apenas dois estágios, onde o primeiro estágio consistiu em abrir a peça diretamente para 60° e no segundo e último estágio foi possível alcançar 80°, onde causou a ruptura neste ângulo. Observando os tempos no primeiro estágio levou cerca de 50 minutos para realizar a

estampagem, já no segundo levou cerca de 5 minutos totalizando assim um tempo total de estampagem de 55 minutos.

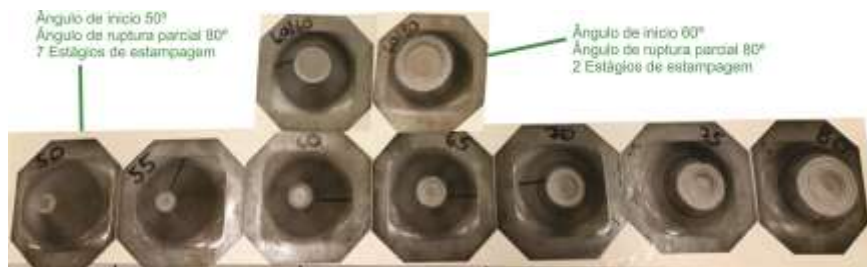
Tabela 1: Estágios da estampagem incremental

Estágio	Ângulo	Tempo	Ruptura
01	50°	50 min	Não
02	55°	35 min	Não
03	60°	30 min	Não
04	65°	20 min	Não
05	70°	15 min	Não
06	75°	10 min	Não
07	80°	05 min	Ruptura Parcial
Tempo Total De Estampagem		2 Horas e 45 minutos	

Fonte: Do Autor (2021)

Foi fabricada uma peça para cada estágio nas duas estratégias conforme a (figura 3) abaixo mostra, para que posteriormente fosse possível realizar as medições e análise em cada estágio da estampagem.

Figura 3: Estágios da Estampagem Incremental.



Fonte: Do Autor (2021)

Para realizar a estampagem incremental das chapas foi utilizado um centro de usinagem modelo D600 ROMI comando FNOK (figura 4). A Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina – SATC disponibilizou a máquina para que fosse possível a produção dos corpos de prova.

Figura 4: CNC ROMI D600



Fonte: Do Autor (2021)

A escolha da máquina se deu através dos parâmetros de usinagem (figura 5) que foram usados e pelo tamanho da peça. Foi realizado a modelagem da peça em 3D no Software SolidWorks para conseguir utilizar o Software Edgecam onde foi realizada a programação da máquina e enfim extrair os códigos para alimentá-la.

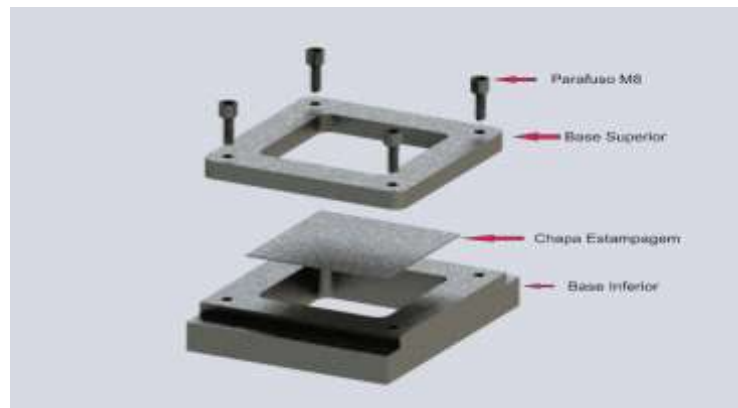
Figura 6 Parâmetros de Usinagem

Parametros de usinagem	
Incremento vertical (Δz)	0,2 mm
Velocidade de avanço (f)	1000 mm/min
Rotação da ferramenta (γ)	50 rpm

Fonte: Do Autor (2021)

Sobre o dispositivo prensa chapas foi realizado o projeto e posteriormente a fabricação do mesmo conforme a figura 6 mostrada abaixo. O dispositivo é composto pela base superior e inferior que é presa na morsa acoplada a máquina, a chapa a ser estampada fica entre as bases e então são utilizados os parafusos M8 para realizar a fixação dos itens.

Figura 6: Dispositivo Prensa Chapas



Fonte: Do Autor (2021)

Como ferramenta de estampagem foi utilizada uma Ferramenta fabricada em Aço ABNT 4340 com ponta semiesférica. O diâmetro da ferramenta é de 10 mm. A ferramenta é presa em um dispositivo chamado mandril, usado para fixar a ferramenta no CNC conforme a figura 7.

Figura 7: Ferramenta Presa no Mandril.



Fonte: Do Autor (2021)

Para lubrificar a peça utilizou-se a graxa a base de lítio especial para rolamentos. Aplicada internamente com o auxílio de um pincel em abundância durante todo o processo de estampagem conforme a figura 8.

Figura 8: Utilização da Graxa



Fonte: Do Autor (2021)

A lubrificação busca reduzir o cisalhamento que ocorre devido ao contato entre ferramenta de trabalho e chapa. Com isso, pode exercer importante papel na vida útil da ferramenta, no acabamento superficial da peça e na diminuição do aquecimento da chapa durante o processo de estampagem. A grande variação de lubrificação, como sendo o seu uso considerado ou não, é preponderante na conformabilidade do material (SKJOEDT, 2008).

Para a análise das deformações foi utilizado a técnica de visioplasticidade que consiste na gravação de círculos nas peças antes da estampagem incremental, depois de realizado a estampagem é possível medir as deformações dos ângulos φ_1 e φ_2 com auxílio de um microscópio e utilizando o software adequado, também foi feito o corte das peças e realizado as medições de φ_3 .

Sendo assim, as deformações principais são calculadas pelas Eq. (2 a 6) descritas abaixo.

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right) \quad (2)$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad (3)$$

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{S_1}{S_0}\right) \quad (4)$$

Considerando a Lei de Constância de Volume, tem-se:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (5)$$

Ou:

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (6)$$

Onde:

φ_1 = Deformação verdadeira na direção do comprimento da elipse (mm);

φ_2 = Deformação verdadeira na direção da largura da elipse (mm);

φ_3 = Deformação verdadeira na espessura (mm);

d_0 = Diâmetro inicial do círculo (mm);

a = Comprimento da elipse (mm);

b = Largura da elipse (mm);

S_1 = Espessura inicial do círculo (mm);

S_0 = Espessura final do círculo (mm).

Figura 9: Visioplastia



Fonte: Do Autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores percentuais dos elementos químicos encontrados na chapa do AISI 1008 por análise espectrométrica estão exemplificados na figura 10, sendo que a porcentagem de manganês (Mn) ficou um pouco abaixo do padrão esperado para o AISI 1008 segundo a norma SAE J403: 2014.

Figura 10: Valores percentuais dos elementos químicos

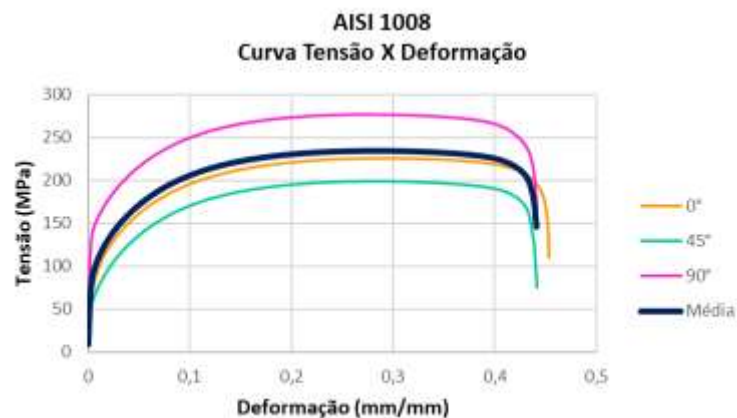


Composição química (%)									
C	Mn	S	P	Si	Cr	Sn	Cu	Nb	Al
0,041	0,271	0,006	0,007	0,001	0,003	0,001	0,008	0,01	0,044

Fonte: Do Autor (2021)

As curvas de tensão por deformação de engenharia foram obtidas dos ensaios de tração dos 9 corpos de prova, sendo 3 destes de cada direção (0°,45° e 90°) no sentido da laminação da chapa antes do processo de estampagem, Fig. 11.

Figura 11: Curvas de Tensão



Fonte: Do Autor (2021)

Para os testes foram utilizados duas estratégias de conformação com o intuito de alcançar os maiores ângulos possíveis, a principal diferença nas estratégias foi o ângulo de partida onde na primeira estratégia iniciou com 50° e na segunda com 60°, na Tabela 2 podendo observar a relação de corpos de prova.

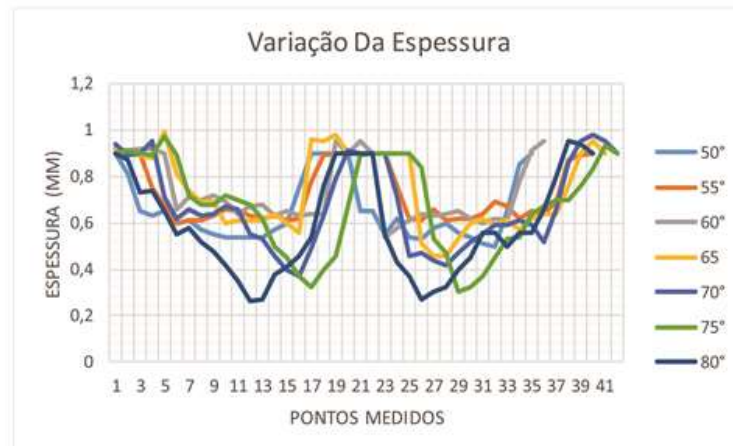
Tabela 2: relação de corpos de prova

	Iniciado com 50°	Iniciado com 60°	
CP 1	50°	60°	CP 1
CP 2	55°	80°	CP 2
CP 3	60°		
CP 4	65°		
CP 5	70°		
CP 6	75°		
CP 7	80°		

Fonte: Do Autor (2021)

Utilizando um micrômetro, com as pontas cônicas acopladas foram feitas as medições de espessura ao longo das peças. Para as duas estratégias foram feitas 35 medições em pontos definidos pelas marcas de gravação antes do processo de estampagem, então foi possível a plotagem dos gráficos de variação da espessura, no gráfico 1 pode-se verificar a variação das espessuras em todas as 7 etapas da estampagem, já no gráfico 2 a variação da espessura na segunda estratégia de estampagem, porém foram retirados apenas dois corpos de provas durante o processo.

Gráfico 1: da variação da espessura ao longo dos corpos de prova



Fonte: Do Autor (2021)

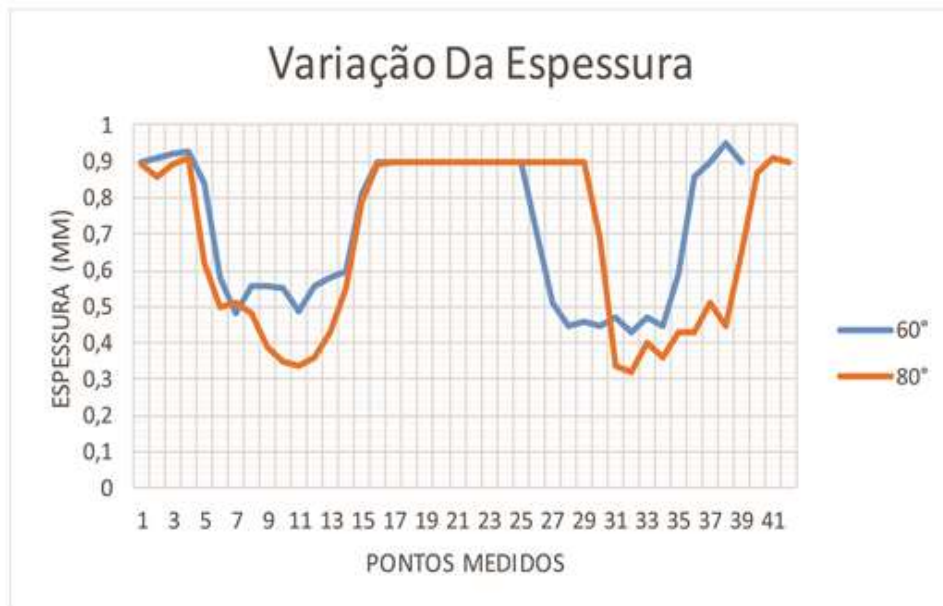
A imagem a seguir mostra os 7 corpos de provas seccionados e é possível observar as variações.

Figura 12: corpos de prova seccionados



Fonte: Do Autor (2021)

Gráfico 2: da variação da espessura ao longo dos corpos de prova



Fonte: Do Autor (2021)

A imagem a seguir mostra os 2 corpos de provas seccionados e é possível observar as variações.

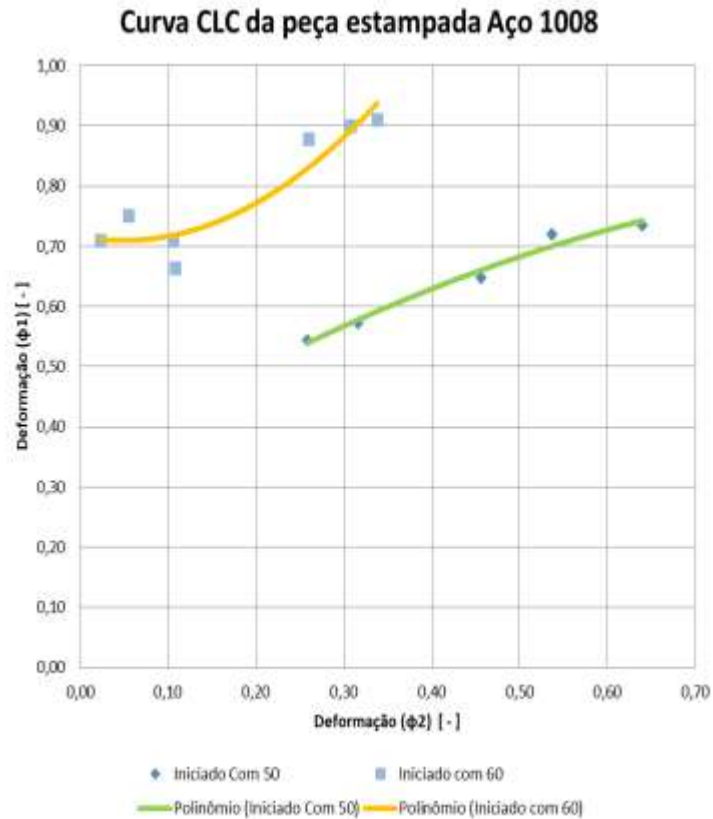
Figura 13: corpos de prova seccionados



Fonte: Do Autor (2021)

Com as medições das deformações de φ_1 e φ_2 foi possível levantar as curvas limite de conformação específicas para cada estratégia, como podemos observar no gráfico 3.

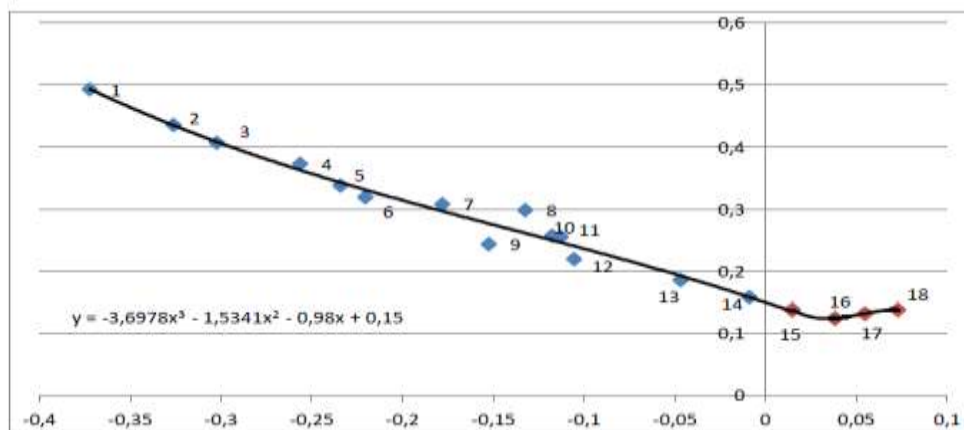
Gráfico 3: Medições das deformações de ϕ_1 e ϕ_2



Fonte: Do Autor (2021)

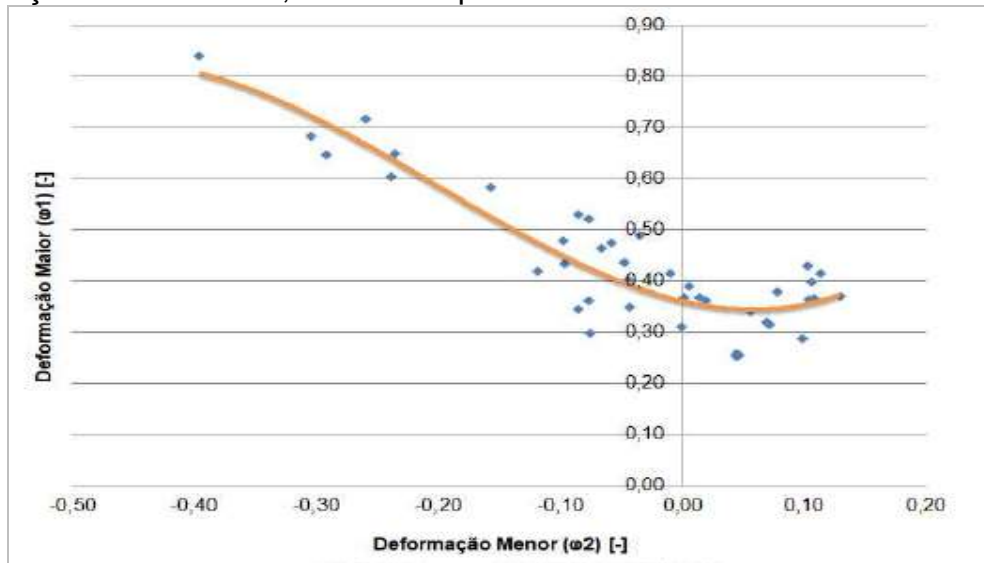
Para obter uma análise melhor da CLC do material antes da estampagem observando os gráficos nas figuras 14 e 15, obtido por meio de Nakazima, em chapas de aço 1008, utilizou-se como referência as curvas propostas por Langbehn (2021) e Mattana (2013).

Figura 14: Curva CLC obtida por meio do ensaio de Nakazima em chapa de aço SAE 1008 de 0,75mm de espessura



Fonte: Mattana (2013).

Figura 15: Curva CLC obtida por meio do ensaio de Nakazima em chapa de aço AISI 1008 de 1,5 mm de espessura



(Langbehn, 2021).

Foi possível observar que as deformações em ângulos φ_1 e φ_2 foram maiores para a chapa depois de feito o processo de estampagem, pois a espessura da chapa utilizada também é maior, e foi levado até o rompimento parcial.

5 CONCLUSÕES

No estudo foi realizada a caracterização do material para o processo de estampagem, as análises foram feitas em uma chapa de aço AISI 1008, com 0,9 mm de espessura, antes dos processos de estampagem. Através do ensaio de tração foi determinado o valor máximo de resistência à tração do material, gerado a curva de tensão por deformação do material.

Foi definido para a chapa de aço baixo carbono de 0,9 mm de espessura, o ângulo limite de parede de 80° para as estratégias de múltiplos estágios, porém não foi observado mudanças significativas no ângulo de parede com as duas estratégias usadas no trabalho, ainda podemos optar pela estratégia de dois estágios em virtude do menor tempo de estampagem comparada com a estratégia de sete estágios que levou 67 % a mais de tempo, e não apresentou um ganho de ângulo significativo.



Da mesma forma foi analisada a variação na espessura da chapa que teve uma redução de 74 %, na região de ruptura parcial do material, proveniente das deformações.

Com os dados levantados de acordo com Felisbino (2021) foi possível observar que o processo de estampagem incremental de múltiplos estágios tem um ganho no ângulo de parede, comparado ao processo de estampagem incremental convencional temos um ângulo de parede máximo de 75° contra os 80° do processo de múltiplos estágio apresenta um ganho no ângulo de parede de 6,25%.

Por estas características levantadas a estratégia se torna viável para aplicações que exigem ângulos de até 80° e que a redução da espessura não afeta a aplicação da peça, como sistema de ventilação para motores elétricos e até carcaças de proteção para equipamentos customizados, e alguns protótipos que exigem esses ângulos.

Por fim foi possível traçar uma curva limite de conformação (CLC) do AISI 1008 após os processos de estampagem incremental de múltiplos estágios, da forma geométrica.

REFERÊNCIAS

BAMBACH, M., HIRT, G., AMES, J. **Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process**. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), 2004.

BARROS, V. H. S. **Fabricação de Peças Complexas em Chapas Finas de Alumínio Comercialmente Puro Usando o Método de Estampagem Incremental**. 2019. 57 f. Monografia – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

BRESCIANI filho, E.; et al. **Conformação Plástica dos Metais**, sexta edição, Campinas, Editora da Unicamp, 2011.

CASTELAN, Jovani. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. Tese de Doutorado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2010.

CAVALER, L. C. C. & SCHAEFFER, L. **Fundamentos da estampagem incremental de chapas aplicados o aço AISI 304L**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2018.



DALLEFE, A. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Alumínio Puro**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre – RS. 2008.

FELISBINO, G. A. **Análise do processo de Estampagem Incremental de ponto único em chapa de aço AISI 1008**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica). Graduando em Engenharia Mecânica. Centro Universitário UniSATC. Criciúma, 2021.

FRITSCHER, M. **Projeto conceitual de uma tela de reconstrução craniana produzida por estampagem incremental**. 2018. 24 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

FRITZEM, D. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Latão 70/30**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre – RS. 2012.

HIRT, G., JUNK, S., BAMBACH, M., CHOUVALOVA, I. e AMES, J. 2005. **Flexible CNC incremental sheet forming: Process evaluation and simulation**. Institute of Materials Technology / Precision Forming (LWP). Saarland University, Germany, 2005.

JESWIET, J., Asymmetric Incremental Sheet Forming. Mechanical Engineering, Queen University, **Kingsto, ON, Canada K713NN6. Advanced Materials Research** Vols. 6-8 2005.

JESWIET, J.; MICARI, F.; HIRT, G.; BRAMLEY, A.; DUFLOU, J. & ALLWOOD, J. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**. Manufacturing Technology, v. 54, n. 2, p.88-114, 2005.

LANDELL, B. **Deformação Plástica Incremental – Análise por Elementos Finitos**. Universidade De São Paulo Escola De Engenharia De São Carlos. São Carlos. 2016.

LANGBEHN, J. T.; SOUZA, A. O.; MORONA, D.; VARNIER, R. & DALEFFE, A. **Determinação da curva limite de conformação do aço AISI 1008**. 40° SENAFOR, Conformação de chapas, p.83-89. Porto Alegre, 2021

LESZAK, E. **Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming**. US 3,342,051, 19 September 1967.

MATTANA, H. A. **Construção e Análise da Curva Limite de Conformação através do Método de Nakazima para o Aço SAE 1008**. Relatório de Estágio. Graduação em Engenharia Mecânica. UCS, 2013.

RODRIGUES, J. e MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica**. Vol. 1 e 2. [S.l.], Escolar Editora, 2005.



SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, L. **Conformação dos Metais**. Ed. Rigel, Porto Alegre, 1995.

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica**. 1 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016.

SKJODT, M., BAY, N., & LENAU, T. A. **Rapid Prototyping by Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**, 2008