



ANÁLISE DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO EM CHAPA DE AÇO AISI 1008

Morvan Antônio Américo¹
Anderson Daleffe²
Henrique Cechinel Casagrande³
Gilson de March⁴
Jovani Castelan⁵
Daniel Fritzen⁶
Gustavo Alexandre Felisbino⁷

Resumo: A estampagem incremental de chapas é um processo pouco explorado pelo setor fabril e ainda necessita de definições de materiais e parâmetros para aplicação do mesmo. Dessa forma, este estudo tem como principal objetivo a análise da conformabilidade da chapa de aço AISI 1008 de 0,90 mm de espessura, por meio de ensaios de estampagem incremental de ponto único (SPIF – *Single Point Incremental Forming*). O processo de estampagem foi realizado em um centro de usinagem CNC, utilizando-se da estratégia helicoidal de movimentação da ferramenta, utilizando lubrificante. Foi realizada a análise química do aço e testes mecânicos de ensaio de tração. Após a estampagem, foram medidas as espessuras para análise da deformação, definido o ângulo limite máximo de parede, realizado ensaio de microdureza e a metalografia dos contornos de grão antes e após o processo SPIF. Com isso, foi obtido um ângulo máximo de parede de 75°. O produto final apresentou uma redução de até 74% na espessura comparada à chapa inicial e um aumento de 86,2% da microdureza na região da falha. Igualmente foi observado, na análise metalográfica, o alongamento dos contornos de grão no sentido da estampagem e por fim definido a curva CLC do AISI 1008 de espessura 0,90mm.

Palavras-Chave: Estampagem Incremental. Aço AISI 1008. SPIF.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia cresce exponencialmente a cada ano e revoluciona as mais diversas áreas do conhecimento, sendo claramente perceptível nos setores industriais onde a demanda é cada vez maior por produtos novos, customizáveis e, conseqüentemente, a prototipagem [1]. Com a evolução tecnológica, a indústria se

¹ Mestrando em Engenharia Metalúrgica. UniSATC. Ano 2025-1. E-mail: americo.mor10@gmail.com

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

³ Mestrando em Engenharia metalúrgica UniSATC. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com

⁴ Professor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: gilson.march@satc.edu.br

⁵ Professor Doutor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br

⁶ Professor Doutor do Cento Universitário UniSATC. E-mail: Daniel.fritzen@satc.edu.br

⁷ Engenheiro mecânico do Cento Universitário UniSATC. E-mail: gustavo.a.felisbino@gmail.com



deparou com grandes melhorias nos processos de fabricação, como nos sistemas de Desenho Assistido por Computador (CAD), Manufatura Assistida por Computador (CAM), Controle Numérico Computadorizado (CNC) e a robótica industrial.

No mesmo segmento, beneficiado pelos avanços tecnológicos citados acima, o processo de fabricação conhecido por Estampagem Incremental de Chapas (ISF – *Incremental Sheet Forming*) destaca-se, principalmente, por suas vantagens e algumas características de viés contrários aos processos convencionais de estampagem de chapas metálicas [1].

Os processos tradicionais de estampagem são voltados à produção em larga escala, em razão da necessidade de diluir o elevado custo e tempo da implementação de novos projetos, que demandam o desenvolvimento e fabricação de ferramentas e matrizes específicas com geometria precisa e complexa [2].

Já, a ISF é um processo de conformação de chapas metálicas que se utiliza de ferramenta em movimento e contato constante com a superfície do material, produzindo um avanço incremental de profundidade. Esse processo é capaz de conformar formas geométricas, sem a necessidade do uso de matrizes.

Embora existam equipamentos específicos para a sua execução, a utilização de maquinário CNC é facilmente adaptável para este fim e, ao se utilizarem as ferramentas CAD/CAM, o processo se torna flexível a alterações de projeto. Logo, a estampagem incremental de chapas torna-se ideal para pequenos e médios lotes de produção, prototipagem e fabricação de peças customizáveis [3] [4].

Contudo, na área de pesquisa da ISF, a literatura é vasta para algumas chapas, como por exemplo, alumínio e titânio, mas ainda há muita carência de informação e parâmetros do processo para a ampla disponibilidade de materiais ferrosos presentes na indústria [2].

Dentre os metais ferrosos comercializados, as chapas de aço de baixo carbono são usualmente aplicadas nos processos de estampagem devido à sua baixa resistência a conformação, baixa dureza e excelente ductilidade e tenacidade [5].

Dessa forma, para contribuir com a literatura acadêmica e incitar futuras pesquisas na ISF, buscou-se, neste estudo, analisar as características do aço AISI 1008 antes e após o processo de SPIF, verificar a variação da espessura e dureza provenientes do processo, traçar uma curva CLC experimental para os perfis estampados e definir o ângulo máximo de parede da chapa estampada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o desenvolvimento industrial, foi possível a produção de chapas mais finas com maior qualidade e, atualmente, os componentes oriundos desse processo são destinados as mais variadas áreas, tais como a medicina, indústria automotiva, agricultura, construção civil, indústria aeroespacial entre outras [7] [23].

Logo, com a vasta aplicabilidade das chapas metálicas na indústria e os avanços tecnológicos, surgiram diversas outras formas de estampagem de chapas, tal como a estampagem incremental de chapas.

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS (ISF)

De acordo com o inventor e detentor da patente do processo de estampagem incremental Leszak [8], esse 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.

O processo de ISF é classificado atualmente em dois tipos, mais comuns, que são a Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF) e a Estampagem Incremental de Ponto Duplo (TPIF– *Two Point Incremental Forming*) [9].

O método utilizado nesse estudo será o SPIF, Fig. 1 a) que se caracteriza por não utilizar matrizes ou ponto de apoio adicional e, por isso, é considerado o mais simples dos processos de ISF, diferente do TPIF, Fig. 1 b) que, além de possuir matriz completa ou parcial no processo, o TPIF possui melhor tolerância dimensional e geométrica, mas perde em deformabilidade em comparação ao SPIF [10].

Figura 1: A) SPIF sem a utilização de suporte inferior, B) TPIF com matriz parcial



Fonte: Cavaler e Schaeffer [2].

2.2 MÁQUINAS PARA ISF

Existem diversas opções de máquinas para se produzir peças por estampagem incremental de chapas como máquinas dedicadas e robôs industriais até centros de usinagem e fresadoras CNC, sendo que, para eleger a máquina ideal para o projeto, segundo Cavaler e Schaeffer [2], deve-se levar em conta a disponibilidade, limitações da máquina, dimensões da peça e a capacidade do comando da máquina.

Conforme dito por Daleffe [11] e reafirmado por Cavaler e Schaeffer [2], por mais que a utilização do centro de usinagem ou fresadora CNC seja atrativo por conta do baixo custo de início de operações, essas máquinas não possuem instrumentos na ponta das ferramentas para medir as forças empregadas nos três eixos de trabalho, apresentam limitações ao acesso reverso da peça por terem bases sólidas.

Contudo, como apontado por Fritzen [12], há diversos estudos e autores que validam e creditam a utilização de centros de usinagem e fresadoras CNC para a estampagem de chapas metálicas, com bom rendimento e praticidade de adaptação. Dessa forma e devido ao caráter de disponibilidade, simplicidade e prototipagem experimental deste trabalho, a utilização de maquinário CNC com auxílio de softwares CAD/CAM, Fig. 2, viabilizam completamente a realização deste estudo.

Figura 2: Máquina CNC e recursos usados para estampagem incremental



Fonte: Adaptado de Daleffe [14].

2.3 SUPORTE DE FIXAÇÃO DA CHAPA

Para que a ISF seja possível, é necessário que a chapa esteja perfeitamente presa em um dispositivo de fixação de chapa para que a mesma possa ser deformada plasticamente. Conforme pode ser visto na Fig. 3, o suporte de fixação de chapa, desenvolvido por Daleffe [11], contém uma chapa de aperto superior e inferior e um suporte que permite a deformação plástica do material ao mesmo tempo em que o mantém fixo à mesa do centro de usinagem CNC [2] [11].

Figura 3: Suporte de fixação de chapas desenvolvido por Daleffe, A



Fonte: Adaptado de Daleffe [11].

2.4 FERRAMENTAS

A ferramenta punção, para deformar plasticamente a chapa, geralmente é de formato esférico, semiesférico ou abalada na ponta, podendo ser rotativa ou não, de metal ou material polimérico. O punção é acoplado na máquina CNC e fica em constante contato com a chapa, por esta razão precisa ter rugosidade baixa, resistência ao desgaste elevado e ser rígido [9] [10] [15].

2.5 PARÂMETROS DO PROCESSO DE ISF

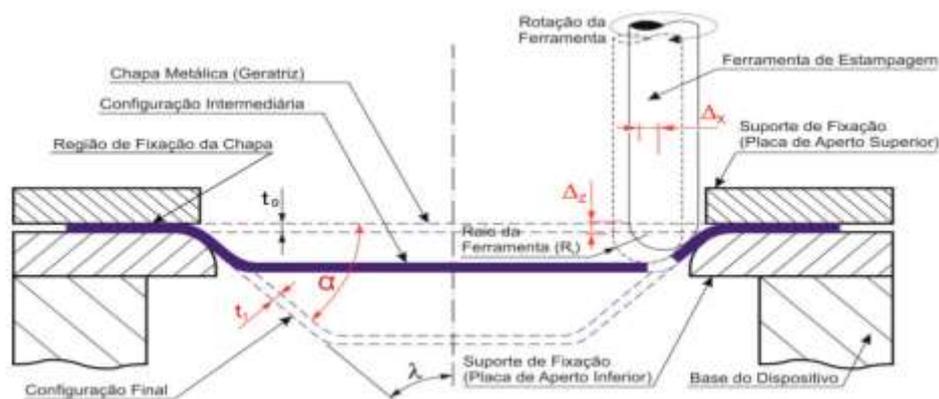
Para os trabalhos que envolvem o processo ISF, alguns parâmetros devem ser levados em consideração, tais como: incremento vertical, raio do punção e lubrificação.

2.5.1 Incremento Vertical

O incremento vertical também influencia nos parâmetros de velocidade e qualidade do acabamento da peça [14].

Como se pode observar na Fig. 4, o incremento vertical (Δz) se correlaciona ao diâmetro do punção e ao incremento horizontal (Δx), sendo que o valor de Δz menor, em relação ao diâmetro da ferramenta, produz resultados com menor rugosidade e melhor acabamento [16].

Figura 4: Detalhamento do movimento do avanço incremental da ferramenta com suas variáveis



Fonte: Adaptado de Fritzen [17].

2.5.2 Raio da ferramenta



O raio do punção é um parâmetro fundamental no tempo do processo e na qualidade final da peça, facilitando o aumento da intensidade do retorno elástico. [14].

2.5.3 Lubrificação

A lubrificação do processo de ISF reduz o atrito da peça e a ferramenta, diminuindo o aquecimento da chapa e a redução do cisalhamento. A lubrificação do processo aumenta a vida útil da ferramenta e melhora a qualidade. [16] [18].

2.6 AISI 1008

Devido ao baixo custo e a grande disponibilidade dos aços de baixa liga, esses são amplamente utilizados pela indústria na fabricação de peças em diversas áreas, desde a automobilística e naval quanto a eletrônica [19] [22].

Os aços são definidos como aço-carbono quando os elementos predominantes da liga são o ferro e o carbono, sendo o último na proporção entre 0,008% e 2,000% [5].

Segundo a norma SAE J403:2014 que define a composição química dos aços, o aço AISI 1008 possui no máximo carbono de até 0,10%.

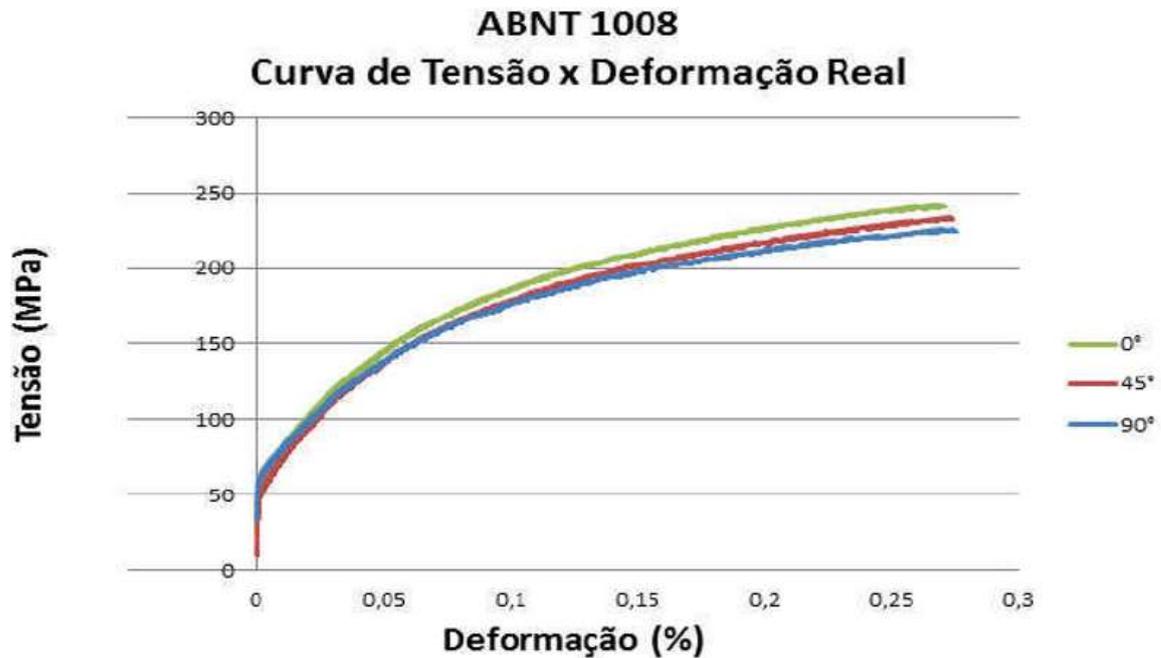
Os aços de baixo teor de carbono, com valores menores que 0,25% C como é o caso do AISI 1008, tem sua microestrutura constituída de ferrita e perlita, o que agrega ao material as características de baixa dureza, baixa resistência a conformação, e ótima ductibilidade e tenacidade [5].

2.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é utilizado para a obtenção de informações e o controle das especificidades de um material [4].

Os valores de forças e deformações obtidos através do ensaio é possível traçar a curva de engenharia (curva de Tensão X Deformação), conforme Fig. 5, da qual é possível definir algumas propriedades como a resistência máxima a tração e o limite de escoamento de um material [4] [25].

Figura 5: Curva de Tensão, aço AISI 1008 de 0,90mm de espessura, norma ABNT 6152.

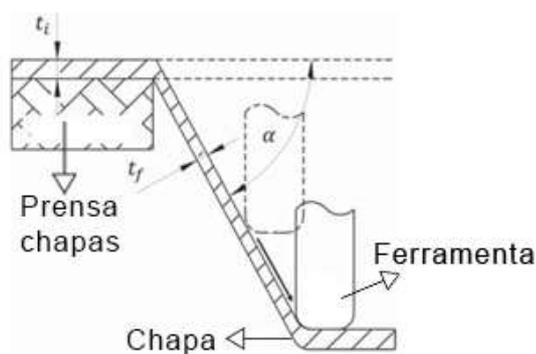


Fonte: Silva, 2011 [4].

2.8 COMFORMABILIDADE DA CHAPA

Para que a estampagem ocorra, o material deve receber uma carga tal que ultrapasse as tensões limites de escoamento, assim deformando-se plasticamente nas três direções principais [6]. Já a conformabilidade pode ser definida através do ângulo máximo de estampagem (α), assim como a curva limite à estricção e à falha [16]. Esse ângulo de estampagem é a relação entre a redução da espessura da chapa e o seu ângulo de conformação, segundo demonstra a Fig. 6 e a Eq. (1), lei dos senos.

Figura 6: Parâmetro de redução de espessura em relação ao ângulo de estampagem



Fonte: Adaptado de Gupta [20].

$$t_f = t_i * \sin(90 - \alpha) \quad (1)$$

Onde:

t_i = espessura inicial da chapa (mm);

t_f = espessura medida em determinado ponto após a conformação (mm);

α = ângulo de inclinação da parede da chapa.

Outras propriedades mecânicas que influenciam na conformabilidade do aço e podem ser definidas segundo Faquim [16], a partir de um ensaio de tração, são o grau de encruamento que aumenta a dureza do material, anisotropia média e planar; também se pode determinar as propriedades mecânicas do material, como alongamento, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tensão de ruptura.

2.9 ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO E VARIAÇÃO DE ESPESSURA DA CHAPA

O uso da técnica da visioplasticidade, que consiste em gravar círculos na superfície da chapa antes do processo de estampagem, permite determinar as três principais deformações ocorridas na mesma, conforme exemplificado na Fig. 7.

Figura 7: Técnica de visioplaticidade para determinação das deformações na chapa



Fonte: Daleffe [11].

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);

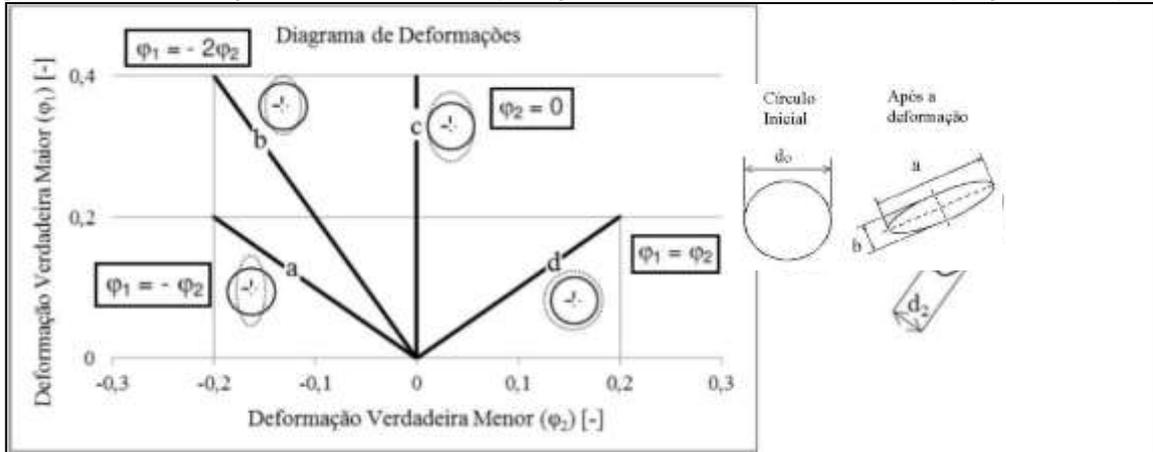
b = Largura da elipse (mm);

S_1 = Espessura inicial do círculo (mm);

S_0 = Espessura final do círculo (mm).

Logo, a partir das medições na rede deformada obtém-se a relação entre as deformações e estas podem ser classificadas em função das solicitações ocorridas na estampagem, conforme mostra a Fig. 8, onde: (a) Estiramento Profundo; (b) Estiramento de Tração (Uniaxial); (c) Deformação Plana e (d) Estiramento Biaxial.

Figura 8: Deformação em diferentes posições em uma linha de uma peça estampada

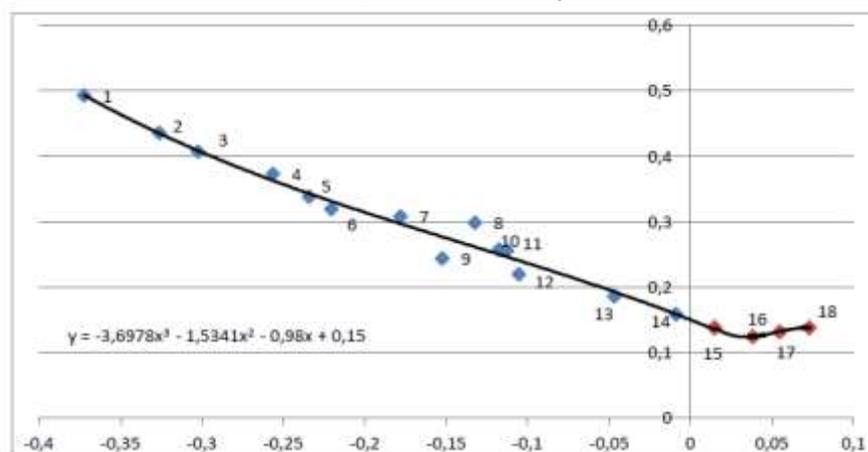


Fonte: Adaptado de LANGBEHN [21].

Com a análise das deformações verdadeiras ocorridas por ensaios de conformação é possível traçar a curva CLC do material sendo possível determinar o quanto uma chapa pode ser conformada sem que ocorra o seu rompimento [19].

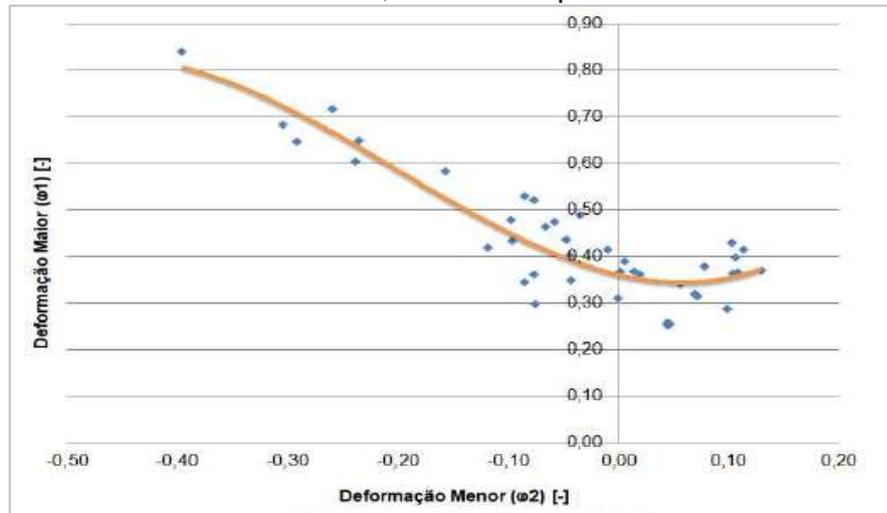
Em comparação a curva CLC específica dos perfis, de parede radial, com curvas CLC obtidas por meio de ensaio de Nakazima, em chapa de aço AISI 1008, utilizou-se como referência as curvas propostas por Langbehn [19] e Mattana [21], Fig. 9 e 10.

Figura 9: Curva CLC obtida por meio do ensaio de Nakazima em chapa de aço SAE 1008 de 0,75 mm de espessura



Fonte: Mattana [21].

Figura 10: Curva CLC obtida por meio do ensaio de Nakazima em chapa de aço AISI 1008 de 1,5 mm de espessura



Fonte: Langbehn [19].

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

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 SPIF, nos Laboratórios de Engenharia Mecânica do Centro Universitário UNISATC, Campus Criciúma, de acordo com as etapas demonstradas no fluxograma da Fig.11.

Figura 11: Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados



Fonte: Do autor (2021).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

Para definir as características do material, foram retiradas amostras em corte a laser e para ter sua composição química foi através do processo de espectrometria, o qual identificou os valores percentuais de cada elemento químico.

Já, a resistência mecânica do aço foi determinada através de ensaio de tração feito em máquina de ensaio da marca EMIC com carga máxima de 100kN. Para os testes, foram utilizados 3 corpos de prova para cada sentido de laminação, cortados a laser nas direções de 0°, 45° e 90°, segundo as especificações e dimensionamento da norma ABNT NBR 6152, para a chapa de 0,90mm, antes do processo de ISF.

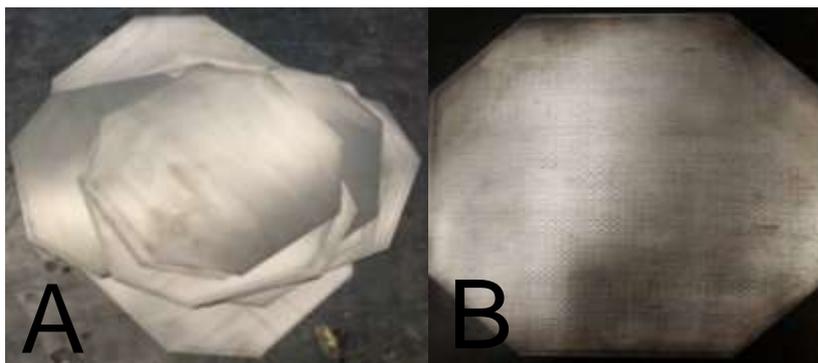
Com os dados coletados pela máquina de ensaio, foi possível gerar a curva Tensão por Deformação para os valores médios entre todos os corpos de prova.

3.2 PREPARAÇÃO DO MATERIAL

Para aplicação da SPIF na chapa de aço AISI 1008, a mesma foi cortada em *blanks* de 150x150 mm, com as dimensões do suporte prensa chapas e foram lixadas para gravação eletroquímica e remoção de rebarbas, como mostra a Fig.13 a).

Estes *blanks* foram gravados por processo de gravação eletroquímica no aparelho de marca Gravamet, modelo ônix, utilizando-se de matriz de gravação (*stencil*) com malha circular de dimensão padronizada de 2,5 mm de diâmetro, conforme exemplifica a Fig. 13 b).

Figura 13: a) Blank antes da gravação e b) depois da gravação



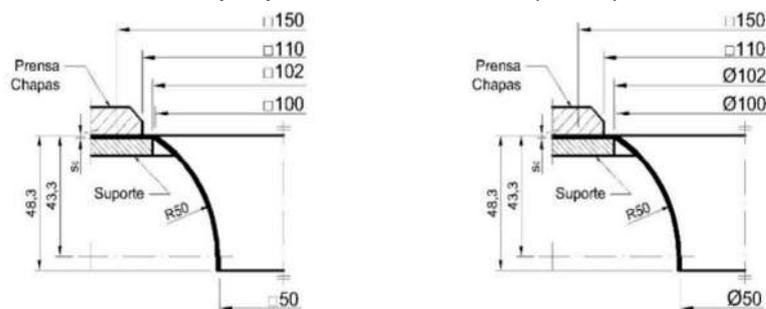
Fonte: Do autor (2021).

3.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DAS CHAPAS METÁLICAS

Foram definidos dois modelos geométricos para obter o ângulo máximo de conformação (α), ambos perfis de parede radial, sendo estes o Tronco de Pirâmide e Tronco de Cone, já utilizados na literatura, segundo apresentado por Fritzen [17].

Sendo assim, para a criação dos formatos 3D a serem estampados pelo centro de usinagem CNC, utilizou-se o software de CAD 3D SolidWorks®, seguindo as especificações da Fig. 14.

Figura 14: a) Tronco de Pirâmide e b) Tronco de Cone, com parede radial proposta em Fritzen (2016)



Fonte: Adaptado de Fritzen [17].

Posteriormente, o código de programação, utilizado no CNC, foi gerado através do software de CAM EdgeCam®. Neste foi estipulada a estratégia de ferramenta do tipo helicoidal a qual decompõe o incremento vertical (Δz) ao longo de todo o contorno da peça, conforme exemplifica a Fig. 15.

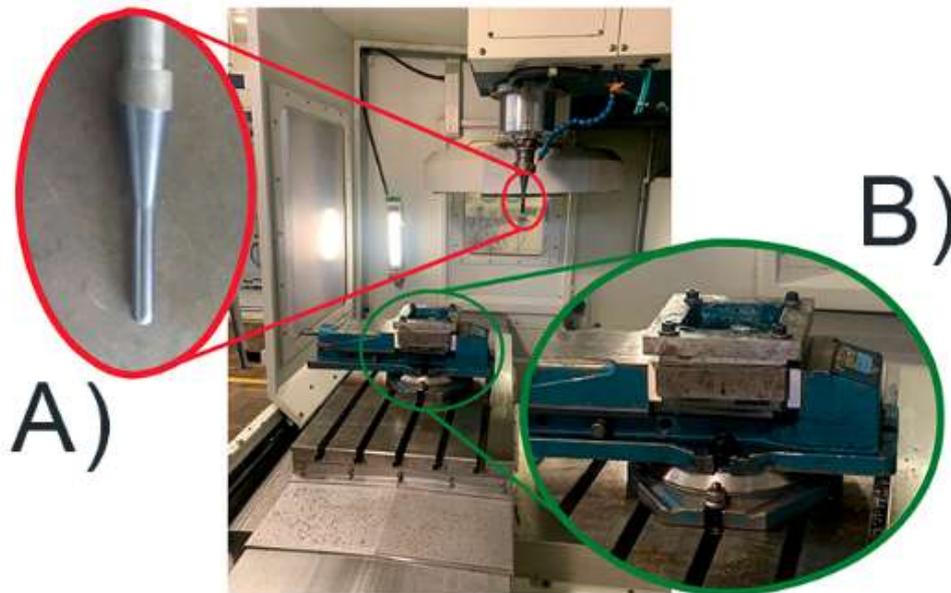
Figura 15: Estratégia helicoidal para conformação incremental da chapa.



Fonte: Do autor (2021).

O processo de estampagem incremental foi realizado no Centro de Usinagem CNC Romi D600 e utilizou-se de suporte prensa chapa adaptado à mesa do próprio CNC, conforme Fig. 16. A prensa chapa foi lubrificada com graxa a base de lítio entre a chapa e a ferramenta durante a realização da SPIF. No equipamento, foi utilizado ferramenta, e punção rígida de ponta esférica com 10 mm de diâmetro.

Figura 16: a) Ferramenta Punção, b) Fixação do suporte da chapa para SPIF



Fonte: Do autor (2021).

Os parâmetros do processo da SPIF utilizados no Centro de Usinagem CNC estão descritos na Tab. 2:

Tabela 2 – Parâmetros da SPIF

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

Fonte: Do autor (2021).

As peças estampadas foram mensuração da espessura ao longo do perfil estampado com a utilização de um micrômetro de pontas cônicas.

Após verificar a variação de espessura, foi retirada uma amostra do perfil de cada peça e outra da chapa sem ter sofrido a conformação. Foi realizado o embutimento das amostras em resina, lixadas com lixa d'água e feito o polimento e por fim o ataque com uma solução de álcool e ácido nítrico na concentração de 2%.

Com a utilização de máquina de ensaio de microdureza do tipo vickers, foi analisada a dureza ao longo dos perfis dos corpos de prova CP_O (perfil não estampado), CP_P (perfil tronco de pirâmide) e CP_C (perfil tronco de cone).



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores percentuais dos elementos químicos encontrados na chapa do AISI 1008 por análise espectrométrica está exemplificado na Tab. 3 abaixo, sendo que a porcentagem de manganês (Mn) ficou um pouco abaixo do padrão esperado para o AISI 1008 segundo a norma SAE J403:2014.

Para caracterização química das amostras utilizou-se o espectrômetro da fabricante BRUKER modelo Q2 ION. No ensaio em questão, foi utilizado potência de 400 Watts por um período de 30 segundos. Salienta-se o ensaio em triplicata para validação do método e utilizando a técnica de espectrometria de emissão óptica.

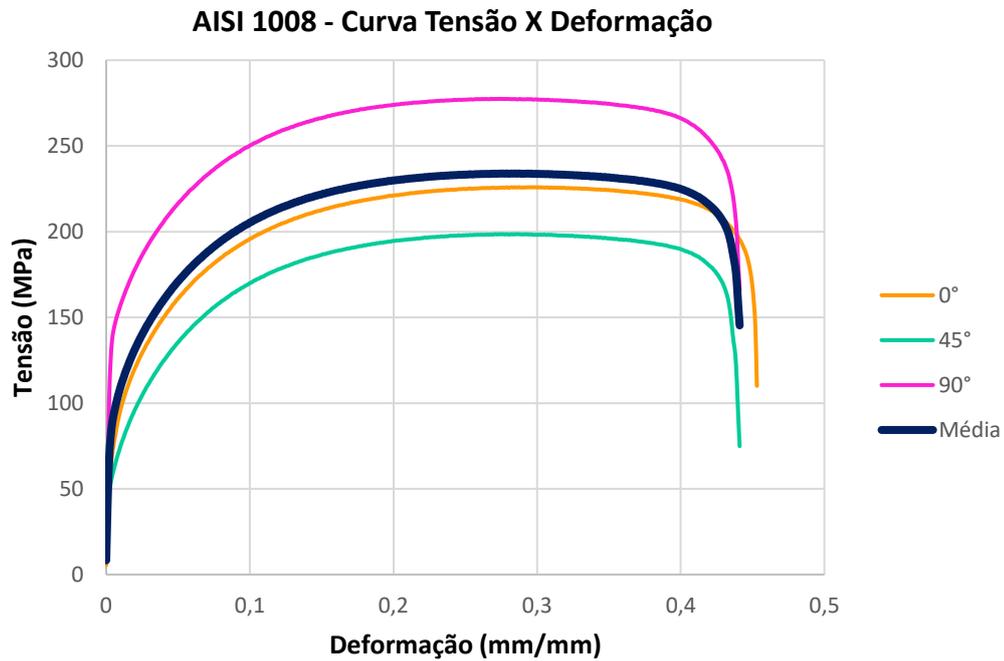
Tabela 3 – Composição química da chapa de aço AISI 1008

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	0,010	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 SPIF, Fig. 17.

Figura 17: Curva tensão x deformação do aço AISI 1008

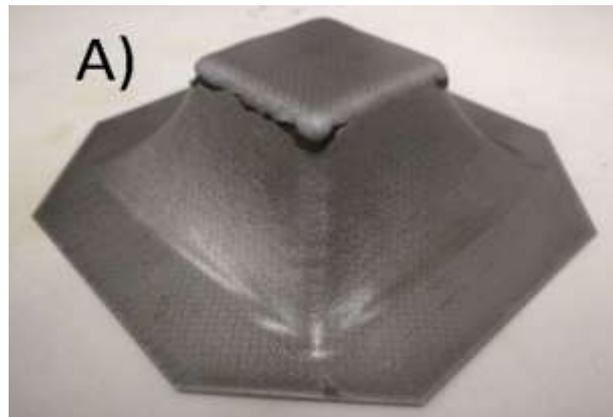


Fonte: Do autor (2021).

A curva de cada direção foi dada pela média dos resultados obtidos nos ensaios dos 3 corpos de prova. Da mesma forma gerou-se uma curva de tensão por deformação média do material a partir da média dos resultados de todos os 9 ensaios nas direções 0°, 45° e 90° da chapa e essa se provou similar a curva proposta por Silva (2011), Fig. 5, que utilizou o mesmo material, espessura de chapa e normas aplicadas neste ensaio [4].

Foram produzidas 6 peças por SPIF, sendo metade delas com a forma geométrica de tronco de pirâmide (CP_P). As peças foram conformadas até o momento de sua ruptura, Fig. 18.

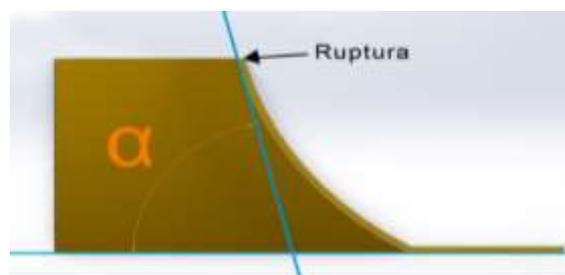
Figura 18: Ruptura da chapa estampada A) CP_P



Fonte: Do autor (2021).

Foi realizado um corte longitudinal no centro das peças estampadas onde analisou-se a profundidade em que ocorreram as falhas para avaliar o ângulo limite de parede, assim, traçou-se uma reta tangente à superfície no ponto em que houve a ruptura da peça e outra reta tangente à superfície na base da chapa onde não ocorreu a conformação, como exemplificado na Fig. 19.

Figura 19: Definição do ângulo limite de estampagem (α)

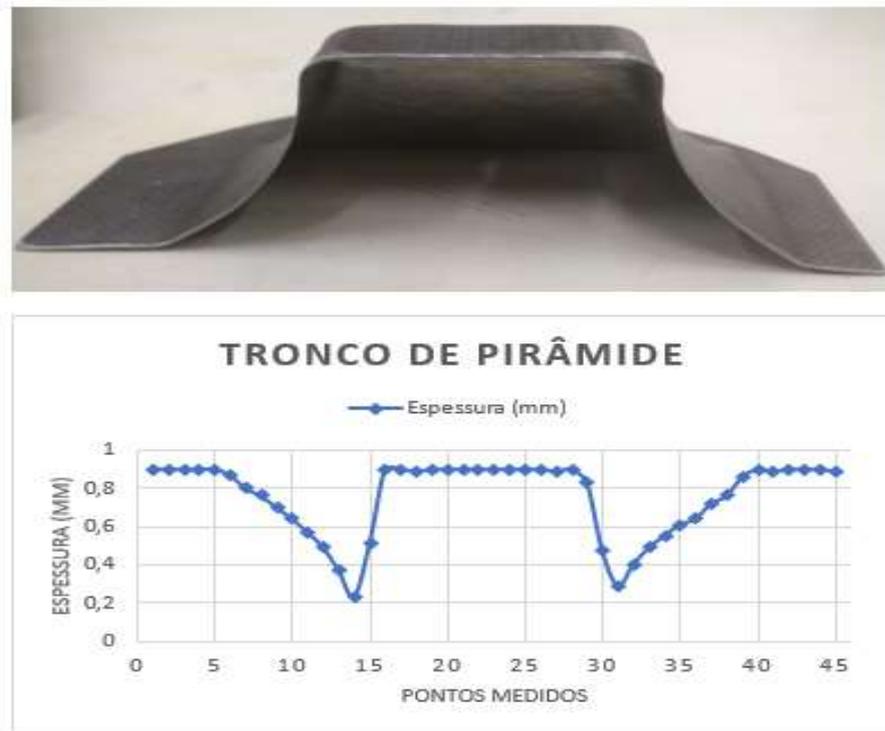


Fonte: Do autor (2021).

O ângulo limite de parede (α), expresso entre as duas retas, foi definido pelos menores ângulos de parede encontrados na ruptura do CP_P de 75,58°.

Com o auxílio de um micrômetro, foi mensurada a espessura da chapa ao longo da peça, em 45 pontos equidistantes definidos pela matriz gravada antes do processo de conformação, sendo possível a plotagem gráfica e variação da espessura por pontos medidos ao longo da peça, como pode ser visto nas Fig. 20.

Figura 20: Gráfico da variação da espessura ao longo das peças



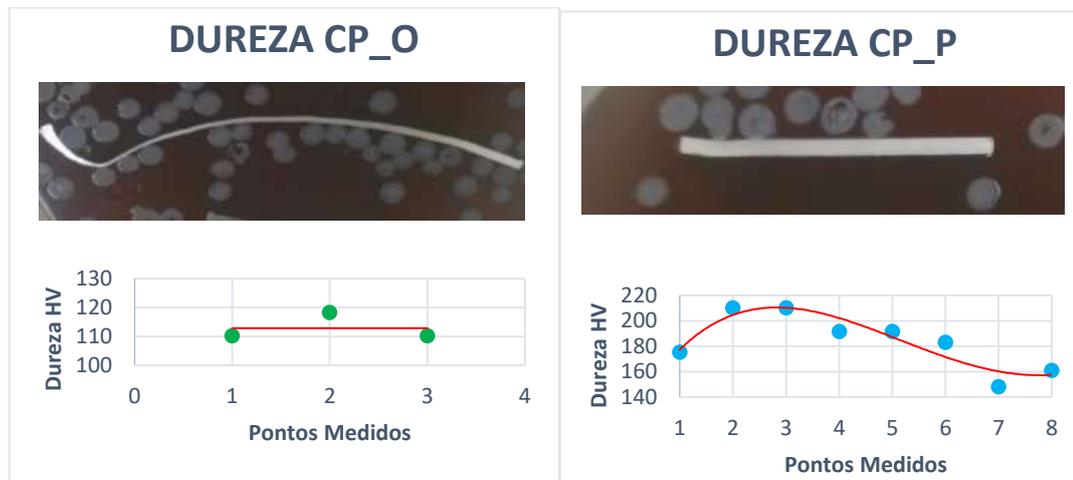
Fonte: Do autor (2021).

Na região de falha das peças, obteve-se o valor da espessura próximo de 0,23 mm, cerca de 0,07 mm acima do valor calculado pela Eq. (1) para o mesmo valor de ângulo máximo de parede (α).

A redução máxima da espessura foi de até 74%, no ponto mais próximo da ruptura, e quanto maior o ângulo de parede menor a espessura da chapa.

A dureza dos perfis dos corpos de prova CP_O e CP_P, obtidos por ensaio de microdureza do tipo Vickers pode ser observado nos gráficos da Fig. 21.

Figura 21: Análise da dureza nos perfis da chapa não estampada, tronco de pirâmide



Fonte: Do autor (2021).

Para uma carga de 0,2 Kgf aplicada nos ensaios, o corpo de prova de referência CP_O apresentou dureza média de 112,82 HV, enquanto que a média geral do corpo de prova CP_P resultaram em dureza de 182,47 HV.

Nos pontos críticos os perfis CP_P, próximos da região de falha, onde as peças apresentaram a menor espessura da chapa, também foi obtida a maior dureza, sendo essa de 210,14 HV, apresentando um acréscimo de 86,2% em relação à chapa não estampada.

Com o auxílio de um microscópio com lente de ampliação de 200x, observou-se a metalografia do material antes e depois de sofrer o processo de SPIF, como demonstram as Fig. 22 e 23, sendo assim comparado o tamanho e forma dos contornos de grãos da chapa CP_O com os pontos próximos da ruptura de CP_P das peças estampadas.

Figura 22: Metalografia da chapa antes da ISF (CP_O), ampliada 200x



Fonte: Do autor (2021).

Figura 23: Metalografia da chapa após a ISF (CP_P), ampliada 200x



Fonte: Do autor (2021).

Um dos fatores observados, através da análise metalográfica, é o alongamento dos contornos de grão, que gera aumento da dureza, no sentido de estampagem da chapa pelo processo de SPIF: resultado da deformação do material e do encruamento sofrido pelo mesmo ao longo do perfil da peça conformada.

As deformações dos contornos de grão também podem ser reafirmadas pela análise das deformações realizada através da grade circular gravada, na qual foram medidos o comprimento (a) e a largura (b) dos círculos após a ISF em 22 pontos, que compreendem o perfil da forma geométrica das peças tronco de cone e tronco de pirâmide, dispostos em linha no centro das mesmas como mostra a Fig. 24.

Figura 24: Disposição dos pontos nas duas peças estampadas

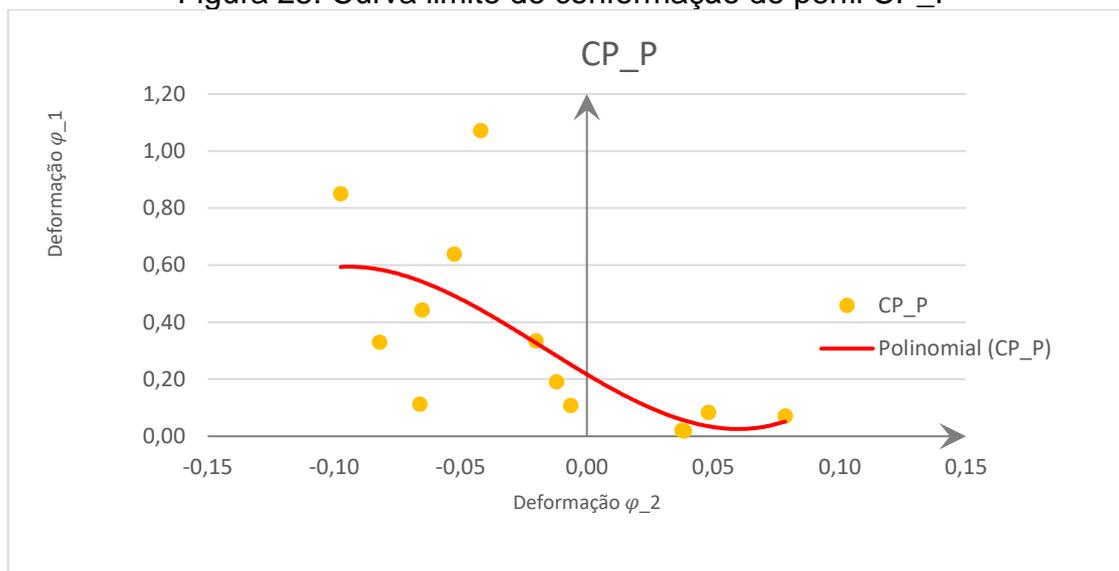


Fonte: Do autor (2021).

As deformações nas duas direções principais φ_1 e φ_2 foram calculadas de acordo com as Eq. 2 e 3 utilizando-se dos valores medidos nos 22 pontos das duas peças estampadas.

Com esses valores foi possível gerar as curvas limite de conformação específicas para cada perfil de parede proposto, Fig. 25, e verificar o padrão de deformação para cada peça proposta.

Figura 25: Curva limite de conformação do perfil CP_P



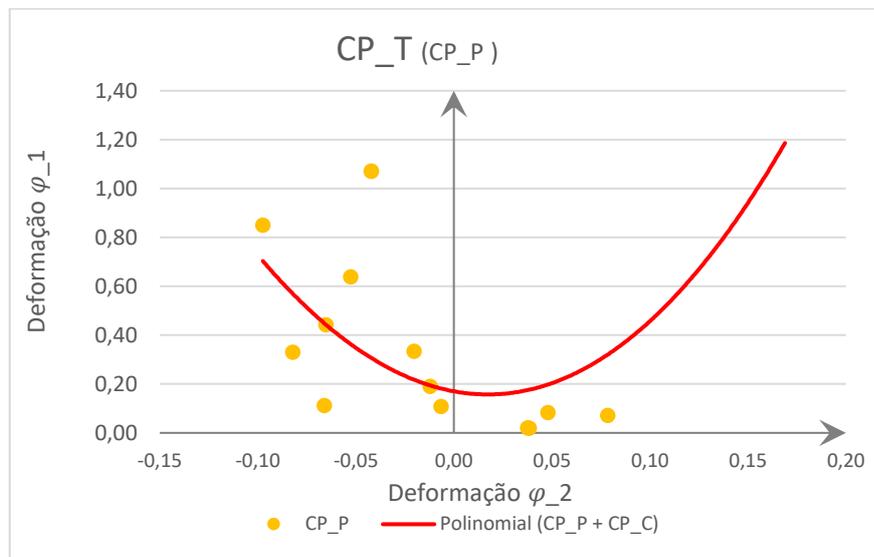
Fonte: Do autor (2021).

Como se pode observar na Fig. 25, os pontos dispersos das deformações principais φ_1 e φ_2 , do perfil CP_P, estão dispostos em sua maioria no quadrante negativo do eixo de deformação φ_2 .

E ao comparar as linhas de tendência dos gráficos CP_P (Fig. 25) com a Fig. 8, onde exemplifica os tipos de deformações de acordo com seu grau de deformação nos eixos principais φ_1 e φ_2 , podemos declarar que o perfil CP_P, na linha de pontos analisada, possui um caráter de deformação que tende entre a deformação uniaxial e o embutimento profundo.

Outra análise feita com os pontos e deformações calculadas de todas as peças estampadas foi a plotagem gráfica desses pontos e a obtenção de uma curva limite de conformação específica para a ISF das duas formas geométricas com parede radial (tronco de pirâmide) pelo processo de SPIF em chapas de aço AISI 1008 com 0,90 mm de espessura, como mostra a Fig. 26 a seguir.

Figura 26: Curva limite de conformação geral, CP_T, dos perfis CP_P



Fonte: Do autor (2021).

O valor da intersecção no eixo Y ($\varphi_2 = 0$) da curva CLC do aço 1008 para a espessura de 0,75 mm, Fig. 9, é 0,15 e para a espessura de 1,50 mm, Fig. 10, é 0,36. Com isso, foi estipulado o valor da intersecção no eixo Y para a chapa de 0,90 mm de espessura, por meio de interpolação linear, e o resultado calculado foi 0,19.

Para a CLC obtida do CP_P e CP_T os valores da intersecção no eixo Y foi de aproximadamente 0,21 e 0,17 respectivamente, a diferença percentual do valor calculado pela interpolação para o valor obtido da curva CLC para o tronco de pirâmide foi de 13,1% e para a curva de ambas as peças, CP_T, 11,4%, este último foi mais próximo do valor calculado.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo foi possível caracterizar alguns aspectos da chapa de aço AISI 1008, com 0,90 mm de espessura, antes e após o processo de estampagem incremental de chapas pelo método SPIF.

Por meio de ensaio de tração foi definido o valor máximo de resistência à tração do AISI 1008 e gerada a curva tensão por deformação do material, sendo estes consistentes com os valores encontrados na literatura.

Foi definido para a chapa de aço baixo carbono de 0,90 mm de espessura, utilizada como objeto de estudo no presente trabalho, o ângulo limite de parede de 75° para a ISF de ponto único (sem utilização de matriz inferior).



Da mesma forma foi observada uma variação na chapa com redução de 74% da espessura, na região de falha das peças estampadas, provenientes da deformação plástica do material.

Assim como foi comprovado o encrumamento do aço ao longo dos perfis conformados pelo efeito de alongamento dos contornos de grão, feito por análise metalográfica dos tamanhos e formatos dos contornos de grãos vistos em microscópio com lentes de ampliação de 200x.

O encruamento da chapa também foi reafirmado por ensaios de microdureza do tipo vickers que concluiu um aumento de 86,2% na dureza do aço AISI 1008 na região de ruptura que, conseqüentemente, é a região de maior deformação e com maior redução de espessura.

Por estas características citadas acima o processo se torna viável para algumas aplicações que não necessitem de ângulos maiores que 75° e que a redução de espessura não afete a aplicabilidade da peça como por exemplo: estampagem de moldes para criação de cerâmicas tridimensionais a serem utilizados na arquitetura, assim como protótipos de tampas defletoras do sistema de ventilação de motores elétricos e até carcaças de proteção para equipamentos customizados.

Outro aspecto observado foi a análise dos tipos de deformações presentes nos dois perfis das peças estampadas, tronco de cone e tronco de pirâmide: a parede do tronco de pirâmide apresentou uma deformação tendendo entre o embutimento profundo e a tração uniaxial; em contraponto o tronco de cone mostrou uma tendência de deformação do tipo biaxial.

Por fim, foi possível traçar uma curva limite de conformação (CLC) não convencional do AISI 1008 após o processo de SPIF das formas geométricas CP_P e CP_C, com parede radial, que, por sua vez, vem sendo usualmente aplicadas no estudo de ISF.

REFERÊNCIAS

- [1] CRISTINO, V.A.; MAGRINHO, J.P.; CENTENO, G.; SILVA, M.B. & MARTINS, P.A.F. **Theory of single point incremental forming of tubes**. Journal of Materials Processing Tech, v. 287, 2021.



- [2] CAVALER, L. C. C. & SCHAEFFER, L. **Fundamentos da estampagem incremental de chapas aplicados o aço AISI 304L**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2018. 181 p. ISBN 9788547311636.
- [3] GRIMM, T.J. & MEAR, L. **Investigation of a radial toolpath in single point incremental forming**. Procedia Manufacturing, v. 48, p. 215–222, 2020.
- [4] SILVA, P. J. **Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço ABNT 1008 e ABNT 304**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM – 164A/11. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.
- [5] HAAG, J. & FERRANTI, G. O. **Estampabilidade de aços de baixo carbono**, p. 308-319. In: *54º Seminário de Laminação e Conformação*, São Paulo, 2017.
- [6] SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica**. 1 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016. 218 p. ISBN 9788576974352.
- [7] SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 200 p. ISBN 8598236802.
- [8] LESZAK, E. **APPARATUS AND PROCESS FOR INCREMENTAL DIELESS FORMING**. US 3,342,051, 19 September 1967.
- [9] 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.
- [10] LANDELL, B. M. **Deformação Plástica Incremental – Análise por Elementos Finitos**. 2016. 78 f. Monografia – Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- [11] DALEFFE, A. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Alumínio Puro**. 100 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Processos de Fabricação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2008.
- [12] FRITZEN, D. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Latão 70/30**. 124 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Processos de Fabricação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- [14] 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
- [15] 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.
- [16] FAQUIM, L. D. **Análise da Estampagem Incremental em Placas de Aço Inoxidável AISI 316L**. Trabalho de Conclusão de Curso II – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2020.
- [17] FRITZEN, D. **Estudo dos Parâmetros de Conformabilidade para o Processo de Estampagem Incremental**. 134 p. Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2016.
- [18] CHENG, Z.; LI, Y.; XU, C.; LIU, Y.; GHAFOR, S. & LI, F. **Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 4, p. 7225-7251, 2020. Doi: 10.1016/j.jmrt.2020.04.096.
- [19] LANGBEHN, J. T.; SOUZA, A. O.; MORONA, D.; VARNIER, R. & DALEFFE, A. **Determinação da curva limite de conformação do aço AISI 1008**. 40º SENAFOR, Conformação de chapas, p.83-89. Porto Alegre, 2021.
- [20] GUPTA, P., SZEKERES, A. & JESWIET, J. **Manufacture of an aerospace component with hybrid incremental forming methodology**. International Journal of Material Forming v.14, p. 293–308, 2021. Doi: 10.1007/s12289-020-01601-9
- [21] 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.
- [22] Motta, L. E. C., Daleffe, A., Concer, R., De March, G., Castelan, J., & Fritzen, D. **Estampagem incremental múltiplos estágios em chapas de aço 1008**. *Revista Vincci-Periódico Científico do UniSATC*, 8(2), 406-423., 2023.
- [23] MARQUES, Clauberto Roberto Melo. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de titânio comercialmente puro ASTM F-67 grau 2**. Processos de Fabricação., 2022.
- [24] DE MARCH, G., PINHEIRO, W. C., FRITZEN, D., DALEFFE, A., & CASTELAN, J. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de alumínio para uso em aquecedor solar**. *Revista Vincci-Periódico Científico do UniSATC*, 8(2), 446-468., 2023.
- [25] PAYAM TAYEBI, RAMIN HASHEMI, **Numerical and experimental study of three-layered Al 1050/Mg AZ31B/ Al 1050 sheets formability considering strain and stress conditions through single point incremental forming**. Materials Today Communications, Volume 41, 2024, 110884, ISSN 2352-4928.