

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

Gustavo Alexandre Felisbino¹

Anderson Daleffe²

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, marca e modelo Romi D600, utilizando-se da estratégia helicoidal de movimentação da ferramenta, com velocidade de avanço de 1000 mm/min, rotação da ferramenta de 50 rpm, incremento de profundidade de 0,2 mm e graxa a base de lítio como lubrificante. Foi realizada a análise química do aço e testes mecânicos de ensaio de tração para determinar as propriedades mecânicas do material. Após a estampagem, foram medidas as espessuras ao longo da peça para análise da deformação da chapa, definido o ângulo limite máximo de parede, realizado ensaio de microdureza ao longo dos perfis estampados para comparação com a dureza inicial da chapa e analisada a metalografia dos contornos de grão antes e após o processo SPIF. Com isso, foi obtido um ângulo máximo de parede de 75° para a estampagem incremental do aço 1008. 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. Também 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. 1008. Ângulo. 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]. Nesse ritmo acelerado da evolução tecnológica, a indústria se deparou com grandes melhorias nos processos de fabricação, como nos sistemas de Desenho Assistido por Computador (CAD),

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2021-2. E-mail: gustavo.a.felisbino@gmail.com

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

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, que é o caso da Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF– *Single Point Incremental Forming*).

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]. Por isso, existe a necessidade de se realizarem testes, definir parâmetros e analisar resultados para os mais diversos materiais dentro do processo de estampagem incremental de chapas.

Sendo assim, dentre os metais ferrosos disponíveis comercialmente, 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].

Por possuir essas características inerentes ao processo de estampagem e ter ampla disponibilidade comercial na indústria, a chapa de aço AISI 1008 é usualmente utilizada na fabricação de copos, painéis, carcaças de automóveis, produção de vigas, canaletas, tubulações e edificações [5], com isso o material apresentou-se como excelente opção para objeto de estudo no processo de ISF.

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

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 [6].

Já, no século passado, 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].

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)

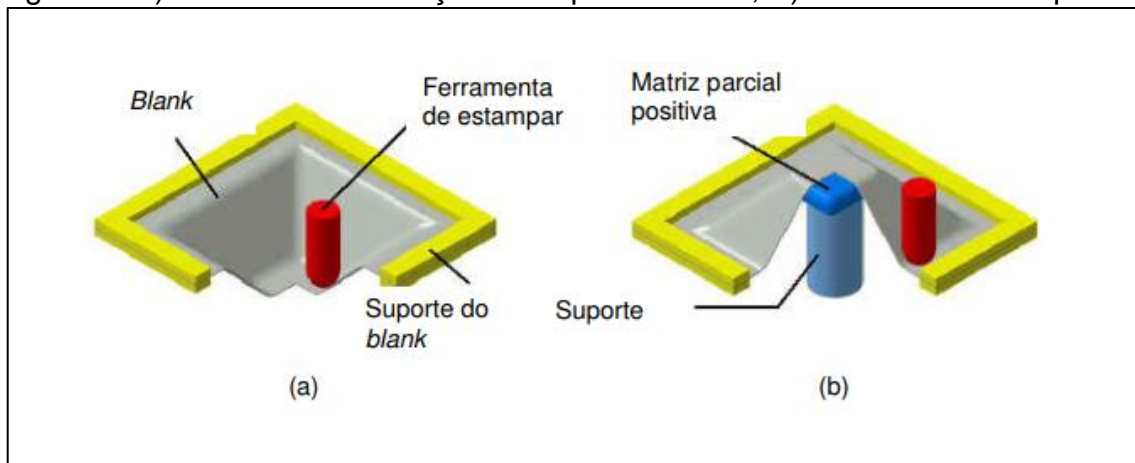
De acordo com o inventor e detentor da patente do processo de estampagem incremental Leszak [8], esse é um método que permite deformar plasticamente chapas de metal em diversas formas geométricas sem o uso de matrizes ou moldes, com a utilização de ferramental de baixo custo. E o mesmo pode

ser adaptado facilmente em grande parte das máquinas comuns de usinagem presentes na indústria.

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*), sendo que ambos os processos possuem uma ferramenta se movimentando sobre a chapa no plano horizontal e no plano vertical, onde ocorrem as deformações [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

Atualmente, existem diversas opções de máquinas para se produzir peças por estampagem incremental de chapas que vão desde 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. Mas, vale também considerar o objetivo do projeto que pode

ser desde a prototipagem experimental, produção em pequena ou larga escala e as tolerâncias dimensionais exigidas pela peça a ser produzida.

Conforme dito por Daleffe [11] e reafirmado por Cavaler e Schaeffer [2], por mais que a utilização de um centro de usinagem ou fresadora CNC seja muito 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. As máquinas fresadoras também não são projetadas para grandes esforços no eixo arvore, como demonstra De Lucca [12] na análise dos esforços no processo SPIF, o que pode resultar em quebra ou danificação do maquinário.

Contudo, como apontado por Fritzen [13], 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



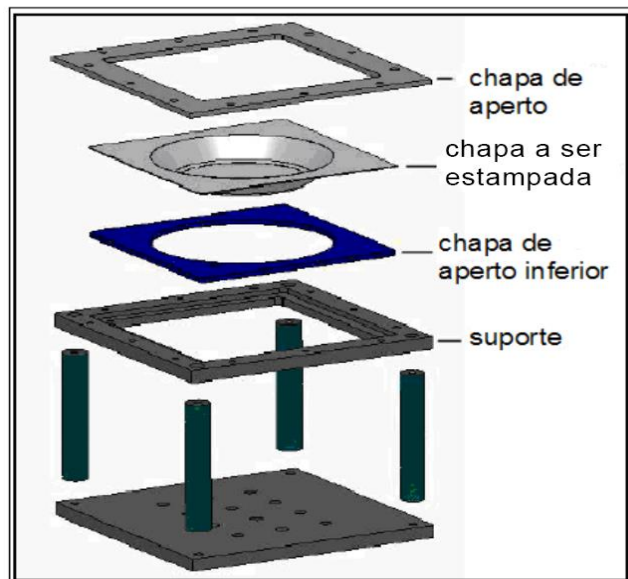
Fonte: Adaptado de Daleffe [14].

A utilização dos centros de usinagem e a aplicabilidade do processo também foram comprovados na fabricação de moldes para criação de pisos 3D, desenvolvimento de telas de reconstrução cranianas e até carcaças de aero geradores, [4] [15] [16].

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] [17].

Por se tratar de um processo relativamente novo, a ferramenta usualmente é fabricada pelo usuário no próprio centro de usinagem, haja vista a dificuldade de se encontrar no mercado e também a sua especificidade de uso [9].

2.5 PARÂMETROS DO PROCESSO DE ISF

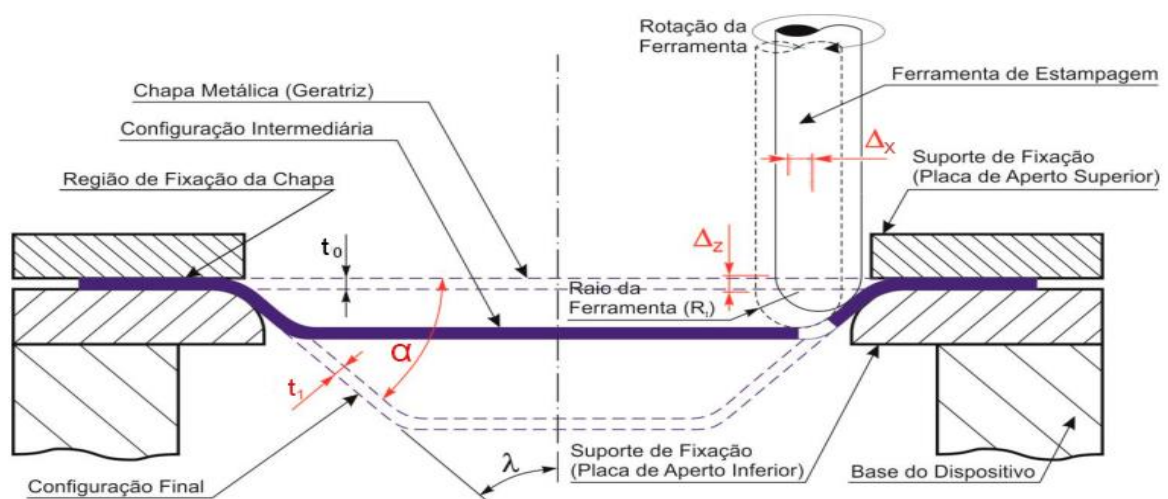
Os mais variados processos de manufatura independentemente de sua complexidade possuem parâmetros que influenciam direta ou indiretamente no processo. No caso da ISF, isso não seria diferente. Dessa forma, neste trabalho são abordados alguns parâmetros que têm relativa importância no resultado final da peça a ser produzida.

2.5.1 Incremento Vertical

O incremento vertical também influencia nos parâmetros de velocidade e qualidade do acabamento da peça [16].

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 [18].

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



Fonte: Adaptado de Fritzen [19].

2.5.2 Raio da ferramenta

O raio do punção é um parâmetro fundamental no tempo do processo e na qualidade final da peça. Como por exemplo, quanto menor o raio da ferramenta maior

será o número de passos verticais e mais demorado será o processo, assim como quanto menor for o raio maior será o detalhamento da estampagem [16].

2.5.3 Lubrificação

A lubrificação do processo de ISF reduz o atrito entre a peça e a ferramenta e, com isso, há a diminuição do aquecimento da chapa e a redução do cisalhamento que ocorre pelo contato entre ambos. Além disso, a lubrificação do processo aumenta a vida útil da ferramenta e melhora a qualidade da superfície da chapa estampada [18] [20].

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 [21].

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 é representado por um aço-carbono com valor máximo de carbono de até 0,10%, de acordo com a Tab. 1.

Tabela 1 – Propriedades químicas do aço AISI 1008 em porcentagem

Composição Química %			
C	Mn	S	P
≥ 0,10	0,30 – 0,50	≥ 0,040	≥ 0,050

Fonte: SAE J403:2014.

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, sendo assim, possuem grande

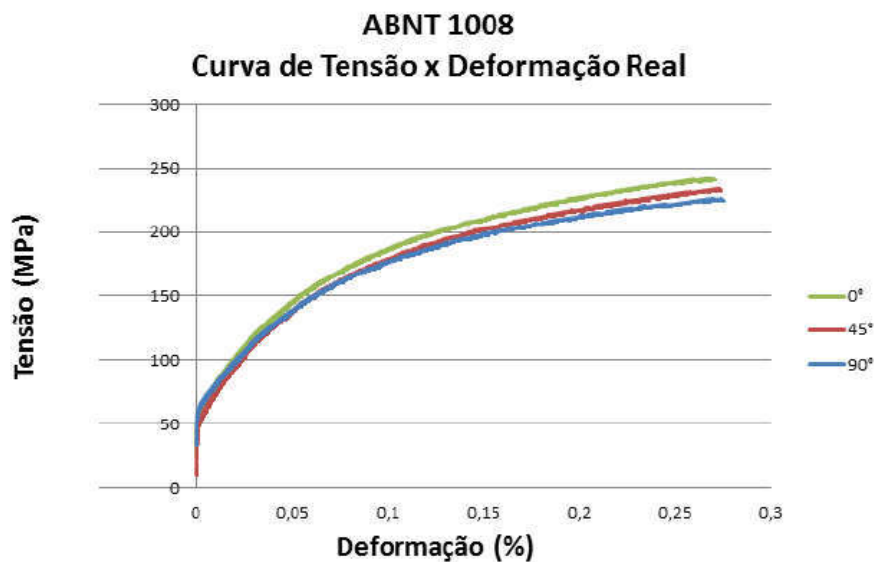
aplicabilidade nos processos de estampagem, como fabricação de copos, painéis, carcaças de automóveis, produção de vigas, canaletas, tubulações e edificações [5].

2.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é utilizado para a obtenção de informações e o controle das especificidades de um material. Esse ensaio consiste da tração uniaxial de um corpo de prova de seção pré-definida até o seu rompimento, sendo que o equipamento responsável pelo ensaio possui sensores que mensuram a carga aplicada e o alongamento do corpo de prova [4].

Assim, com os valores de força e deformação 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].

Figura 5: Curva de engenharia do aço 1008 de 0,90mm de espessura de acordo com a norma ABNT 6152.



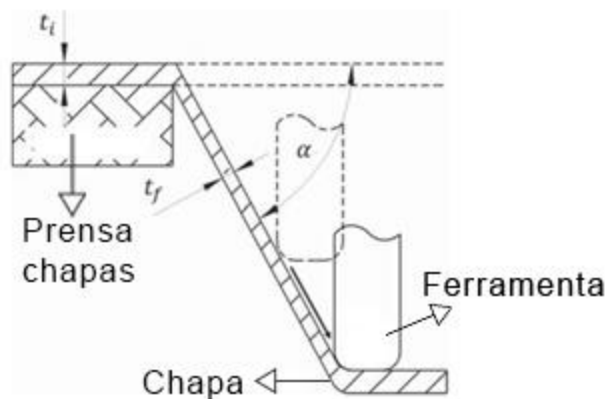
Fonte: Silva, 2011 [4].

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 de uma chapa pode ser definida através do ângulo máximo de estampagem (α), assim como através da curva limite à estrição e à falha [18]. 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: Esquema do parâmetro de redução de espessura em relação ao ângulo de estampagem



Fonte: Adaptado de Gupta [22].

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

Onde:

t_i = espessura inicial da chapa (mm);

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

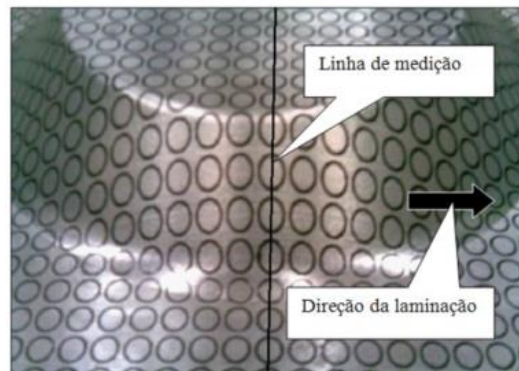
α = ângulo de inclinação da parede da chapa.

Outras propriedades mecânicas que influenciam na conformabilidade do aço e podem ser definidas segundo Faquim [18], 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 ou módulo de Young, 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 visioplasticidade 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);

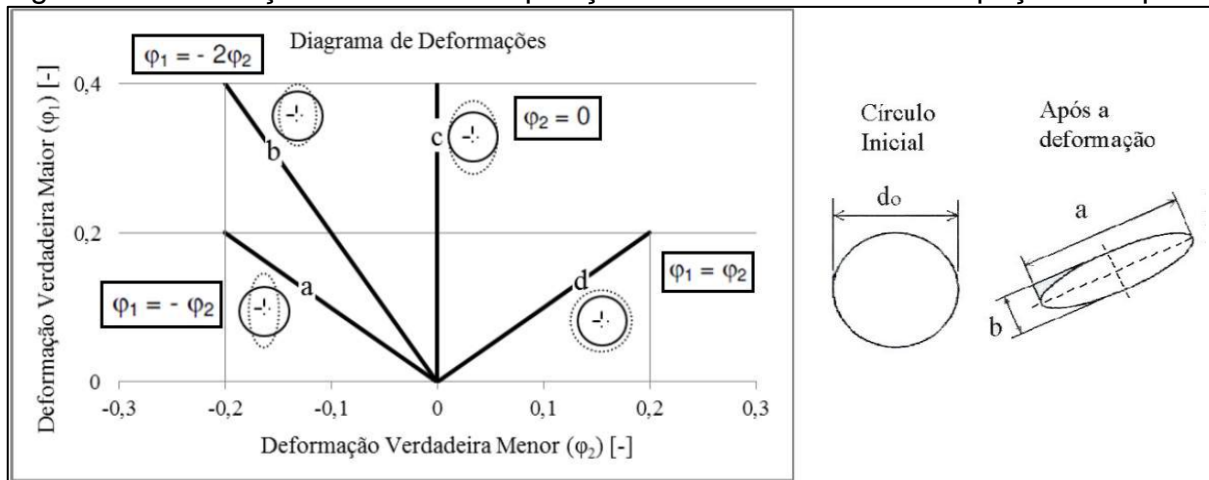
b = Largura da elipse (mm);

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

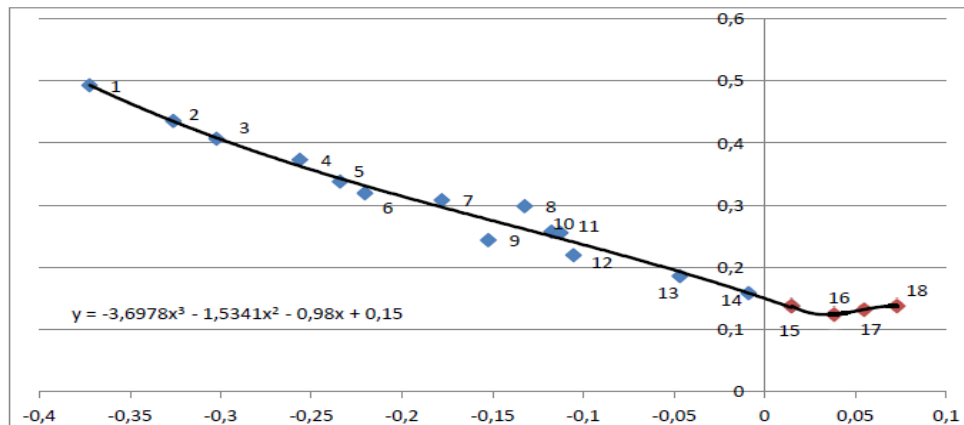


Fonte: Adaptado de LANGBEHN [21].

Com a análise das deformações verdadeiras ocorridas por ensaios de conformação é possível traçar a curva CLC do material e através desta é possível determinar o quanto uma chapa pode ser conformada sem que ocorra o seu rompimento [21].

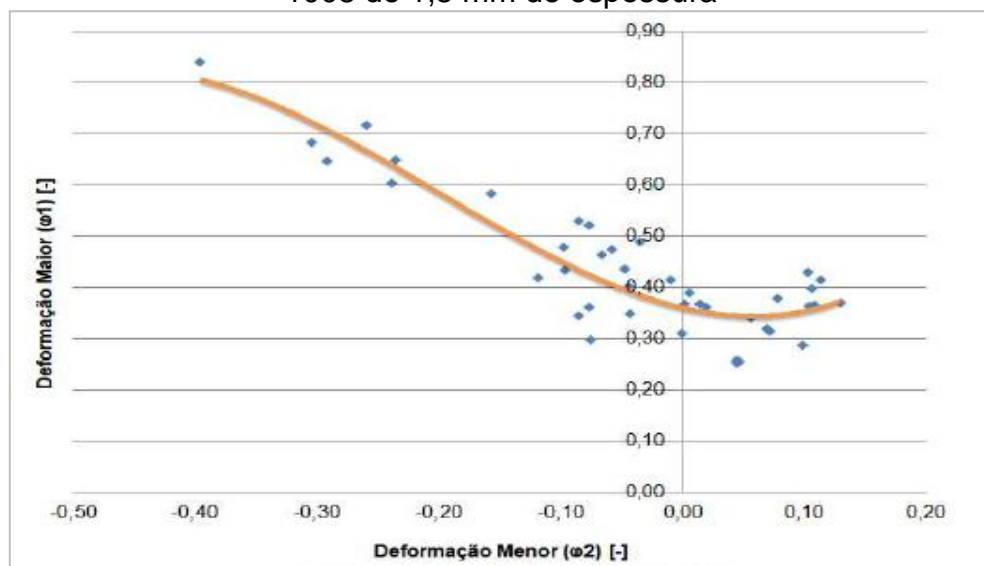
Para comparação da curva CLC específica dos perfis estampados, de parede radial, com curvas CLC obtidas por meio de ensaio de Nakazima, em chapa de aço 1008, utilizou-se como referência as curvas propostas por Langbehn [21] e Mattana [23], Fig. 9 e 10.

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 [23].

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

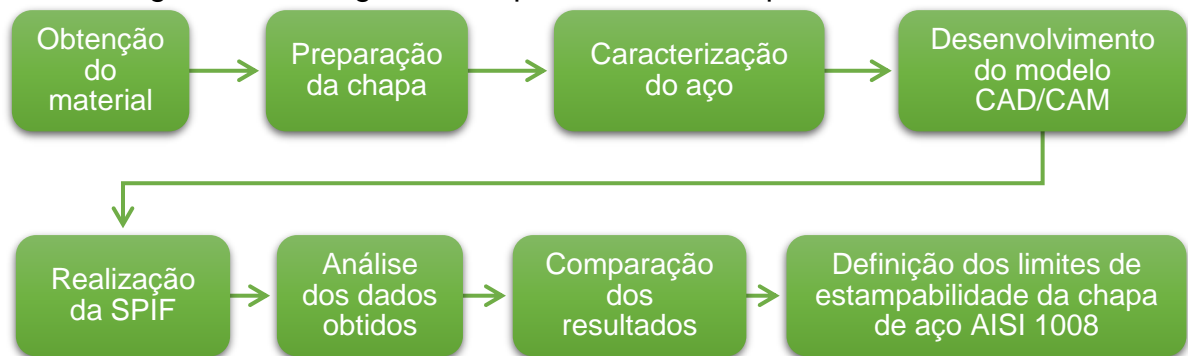


Fonte: Langbehn [21].

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



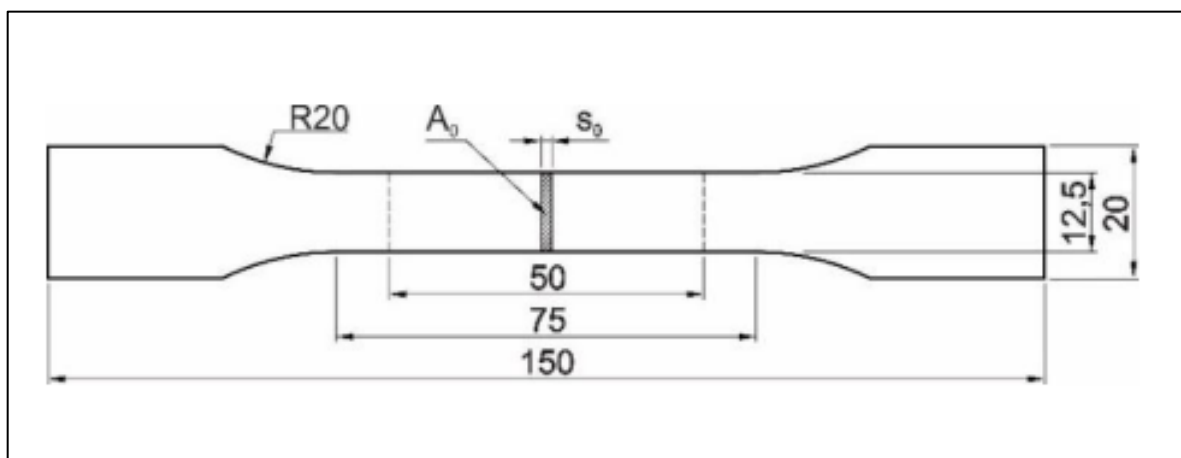
Fonte: Do autor (2021).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO

Para definir as características do material, foram retiradas amostras da chapa de 0,90 mm em corte a laser para ter sua composição química determinada através do processo de espectrometria, o qual identificou os valores percentuais de cada elemento químico encontrado na chapa.

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, Fig. 12, para a chapa de 0,90mm, antes do processo de ISF.

Figura 12: Dimensões dos corpos de prova do ensaio de tração



Fonte: ABNT NBR 6152 [24]

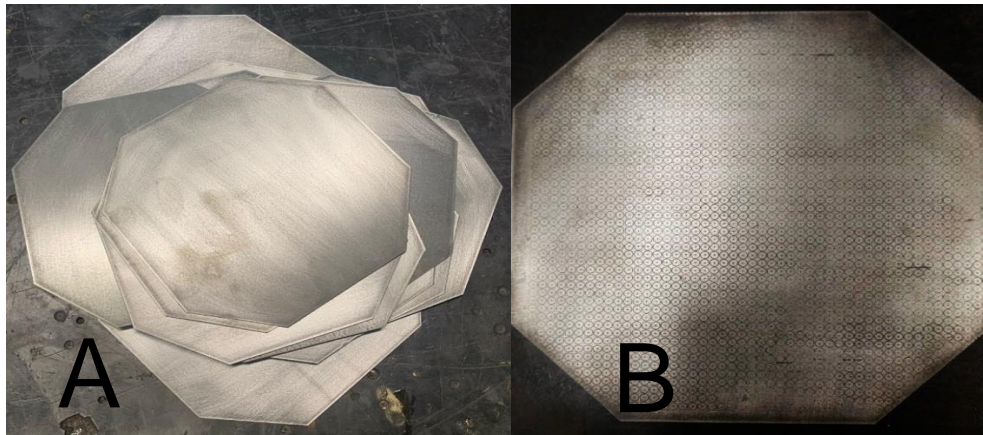
Com os dados coletados pela máquina de ensaio, foi possível gerar a curva Tensão por Deformação para os valores médios entre todos os corpos de prova.

3.2 PREPARAÇÃO DO MATERIAL

Para aplicação da SPIF na chapa de aço 1008 de 0,90mm, a mesma foi cortada na guilhotina em *blanks* de 150x150 mm, conforme 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



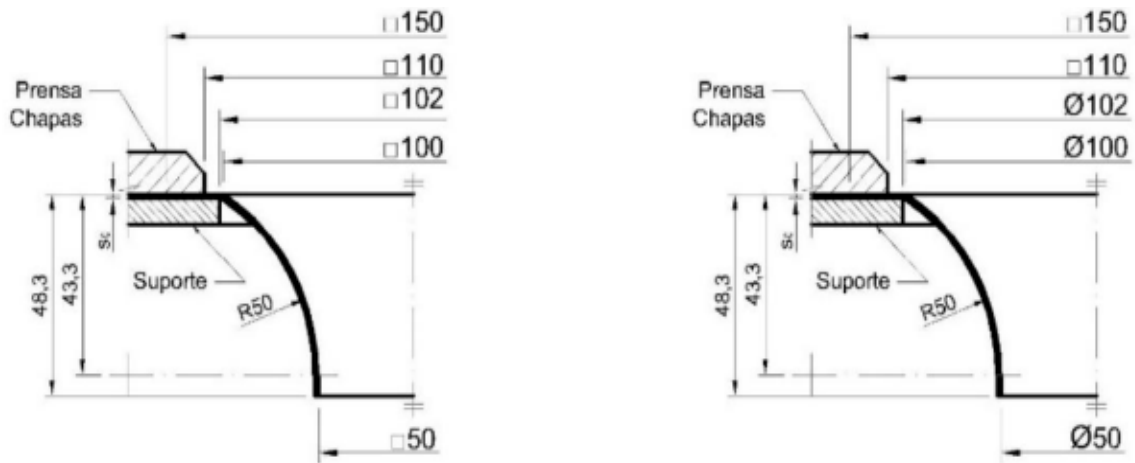
Fonte: Do autor (2021).

3.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DAS CHAPAS METÁLICAS

Foram definidos dois modelos geométricos para obtenção do ângulo máximo de conformação (α), ambos com perfil de parede radial, sendo estes o Tronco de Pirâmide e Tronco de Cone, já utilizados na literatura, segundo apresentado por Fritzen [19].

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 propostos em Fritzen (2016)



Fonte: Adaptado de Fritzen [19].

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 helicóide a qual decompõe o incremento vertical (ΔZ) ao longo de todo o contorno da peça, conforme exemplifica a Fig. 15.

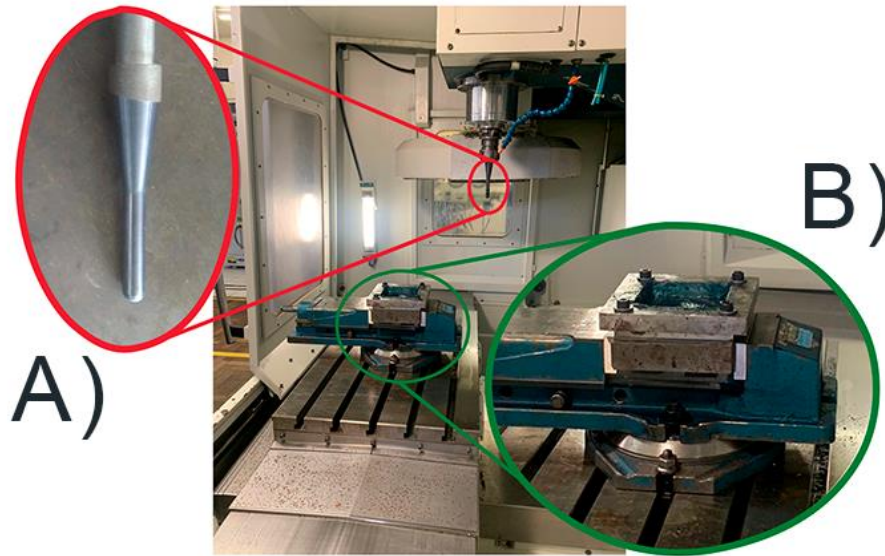
Figura 15: Estratégia helicoidal para conformação incremental da chapa.



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, para fixação devida da mesma. A prensa chapa foi lubrificada com graxa comum a base de lítio para redução do atrito entre a chapa e a ferramenta durante a realização da SPIF. No equipamento, foi utilizado, como ferramenta, o punção rígido 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 cortadas com uma serra manual ao meio para possibilitar a mensuração da espessura ao longo do perfil estampado com a utilização de um micrômetro de pontas cônicas.

Após a verificação da variação de espessura, foi retirada uma amostra do perfil de cada peça estampada e outra da chapa sem ter sofrido a conformação. Foi realizado o embutimento das amostras em resina, lixadas com lixa d'água de granulometria 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200, respectivamente, 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 da marca Shimadzu, modelo HMV – 2T, 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.

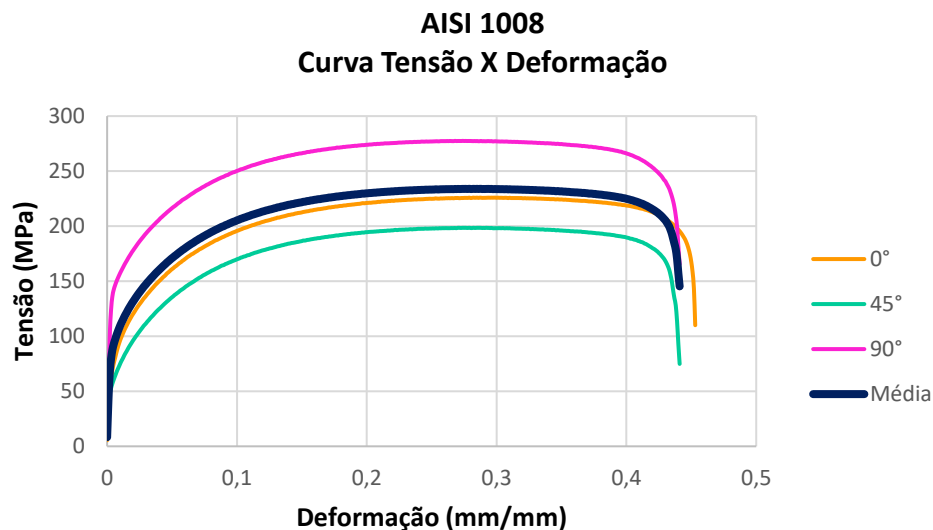
Tabela 3 – Composição química da chapa de aço AISI 1008

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



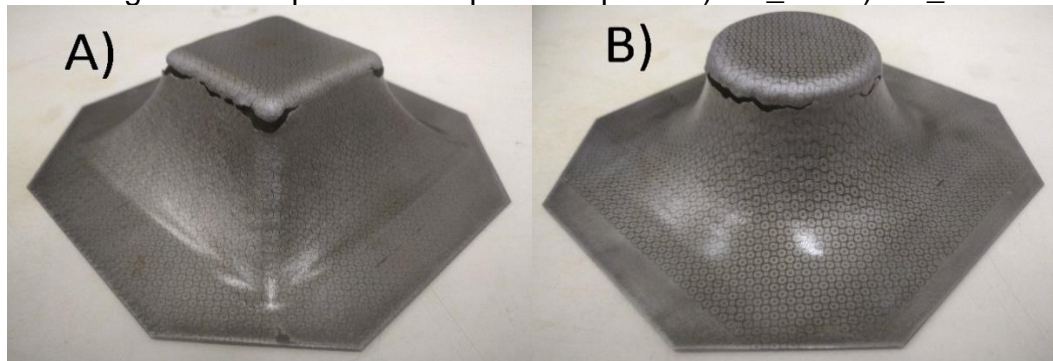
Fonte: Do autor (2021).

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 cone (CP_C) e a outra metade em tronco de pirâmide (CP_P). As peças foram conformadas até o momento de sua ruptura, Fig. 18.

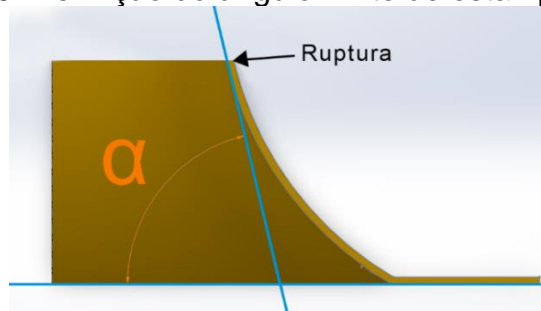
Figura 18: Ruptura da chapa estampada A) CP_P e B) CP_C



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)



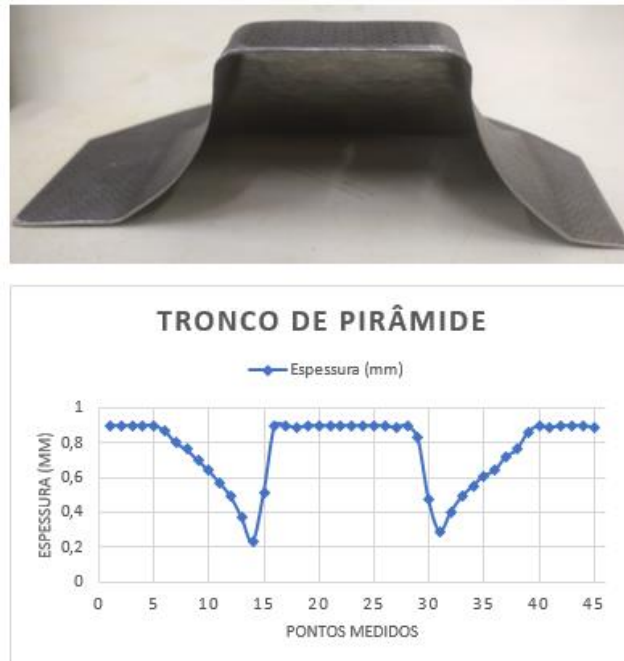
Fonte: Do autor (2021).

O ângulo limite de parede (α), expresso entre as duas retas, foi definido pelos menores ângulos de parede encontrados na ruptura do CP_P e do CP_C, respectivamente, $75,58^\circ$ e $75,83^\circ$.

Com o auxílio de um micrômetro de pontas cônicas, foi mensurada a espessura da chapa ao longo de toda a peça, para ambas as formas geradas, em 45

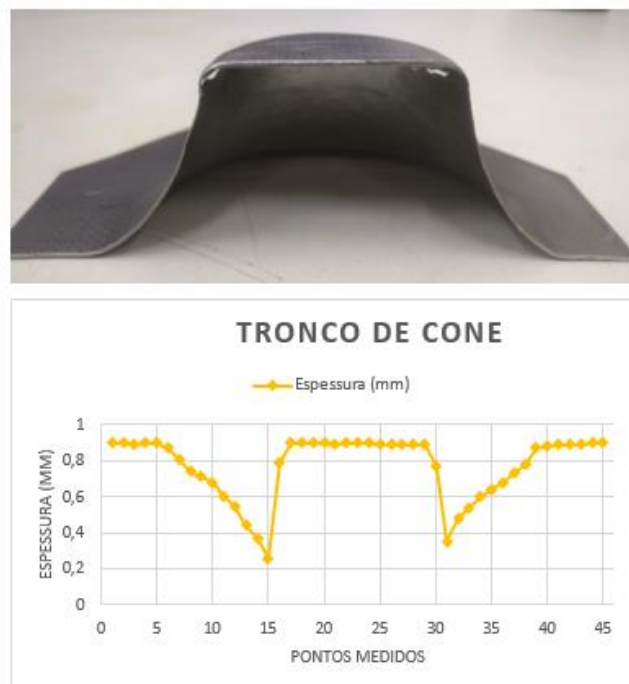
pontos equidistantes definidos pela matriz gravada antes do processo de conformação do material, sendo, então, possível a plotagem gráfica da variação da espessura por pontos medidos ao longo da peça, como pode ser visto nas Fig. 20 e 21.

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



Fonte: Do autor (2021).

Figura 21: Gráfico da variação da espessura ao longo das peças



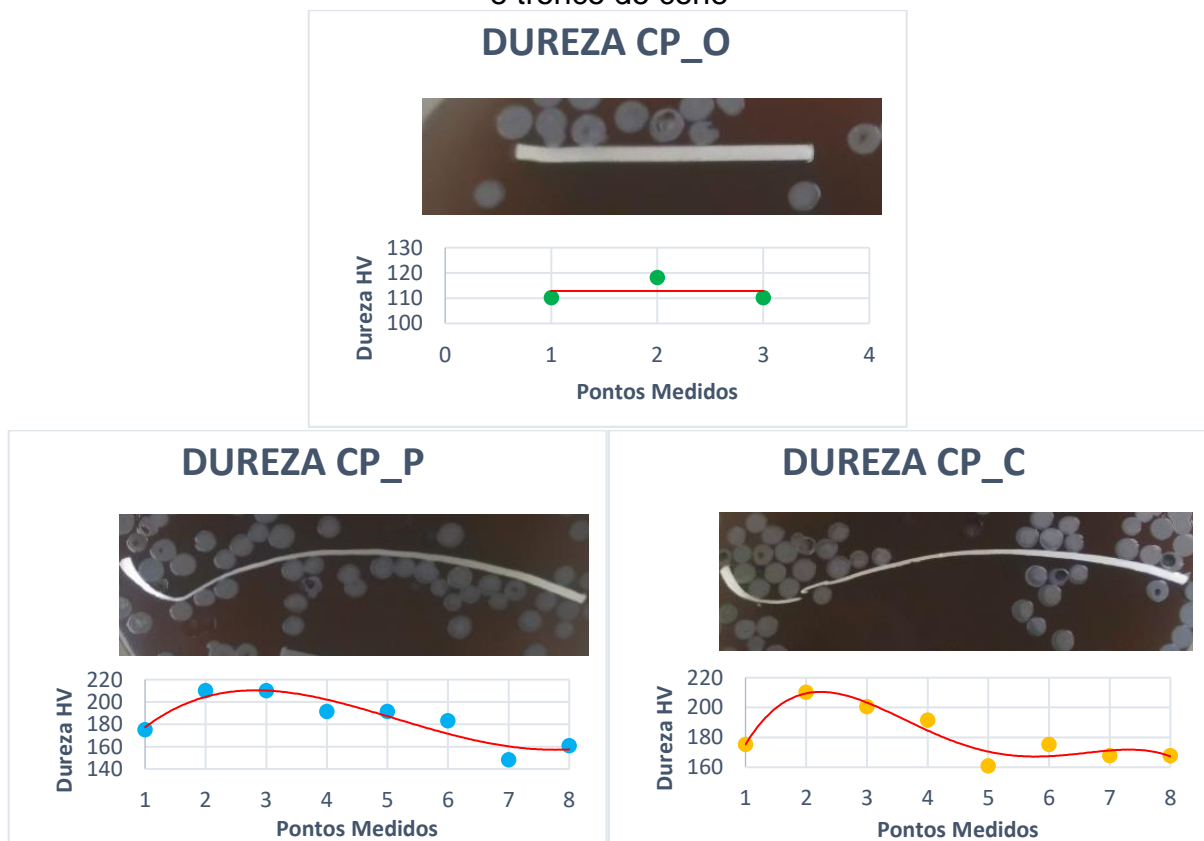
Fonte: Do autor (2021)

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).

Observou-se também que 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 ao longo dos perfis dos corpos de prova CP_O, CP_P e CP_C, obtidos por ensaio de microdureza do tipo Vickers pode ser observado nos gráficos da Fig. 22.

Figura 22: Análise da dureza nos perfis da chapa não estampada, tronco de pirâmide e tronco de cone



Fonte: Do autor (2021).

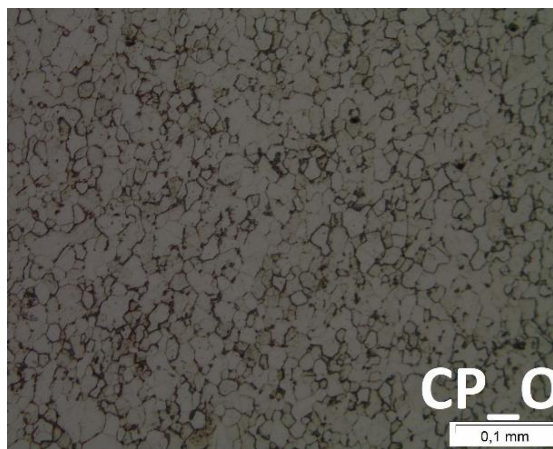
Para uma carga de 0,2 Kgf aplicada nos ensaios, o corpo de prova de referência CP_O apresentou dureza média de 112,82 HV, enquanto que a média geral dos corpos de prova CP_P e CP_C resultaram em dureza de 182,47 HV.

Nos pontos críticos de ambos os perfis CP_P e CP_C, 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.

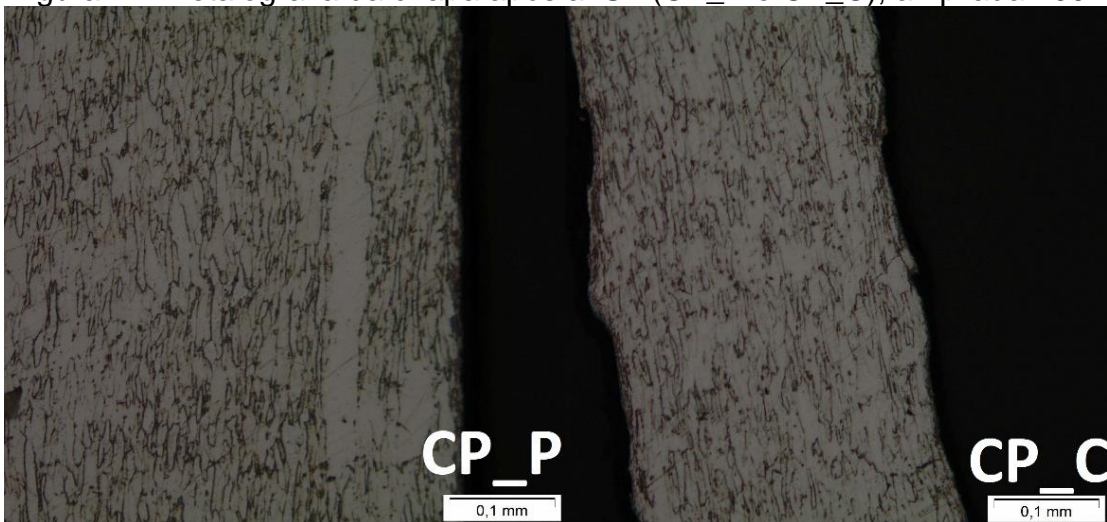
Com o auxílio de um microscópio com lente de ampliação de 200x, observou-se a metalografia do material antes e depois de sofrer o processo de SPIF, como demonstram as Fig. 23 e 24, sendo assim comparado o tamanho e forma dos contornos de grãos da chapa CP_O com os pontos próximos da ruptura de CP_P e CP_C das duas peças estampadas.

Figura 23: Metalografia da chapa antes da ISF (CP_O), ampliada 200x



Fonte: Do autor (2021).

Figura 24: Metalografia da chapa após a ISF (CP_P e CP_C), ampliada 200x



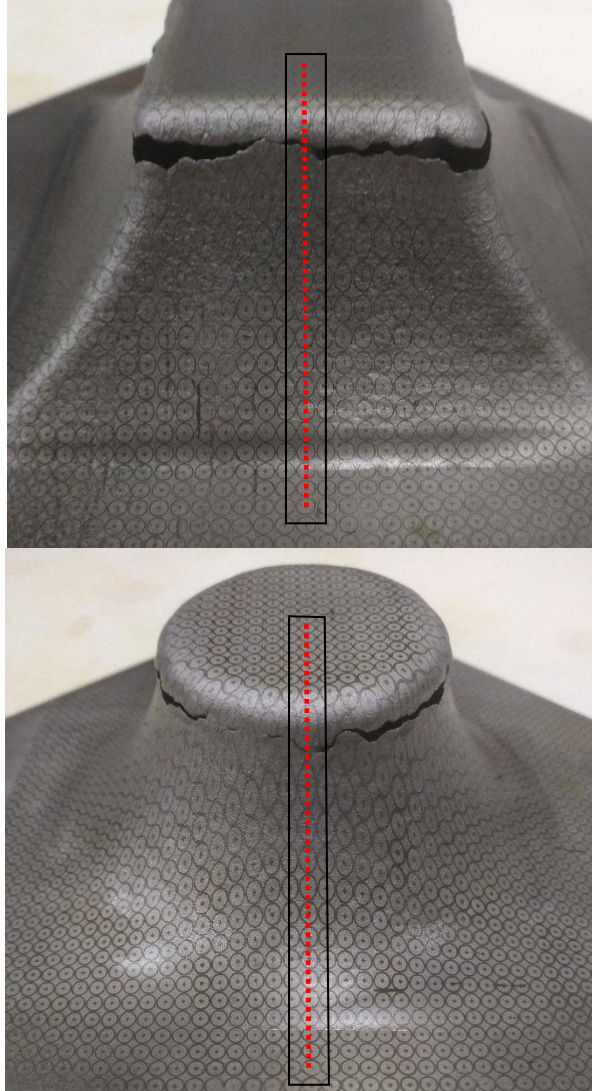
Fonte: Do autor (2021).

Um dos fatores observados, através da análise metalográfica, é o alongamento dos contornos de grão, que gera aumento da dureza do material, 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 chapa, 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. 25.

Figura 25: Disposição dos pontos nas duas peças estampadas

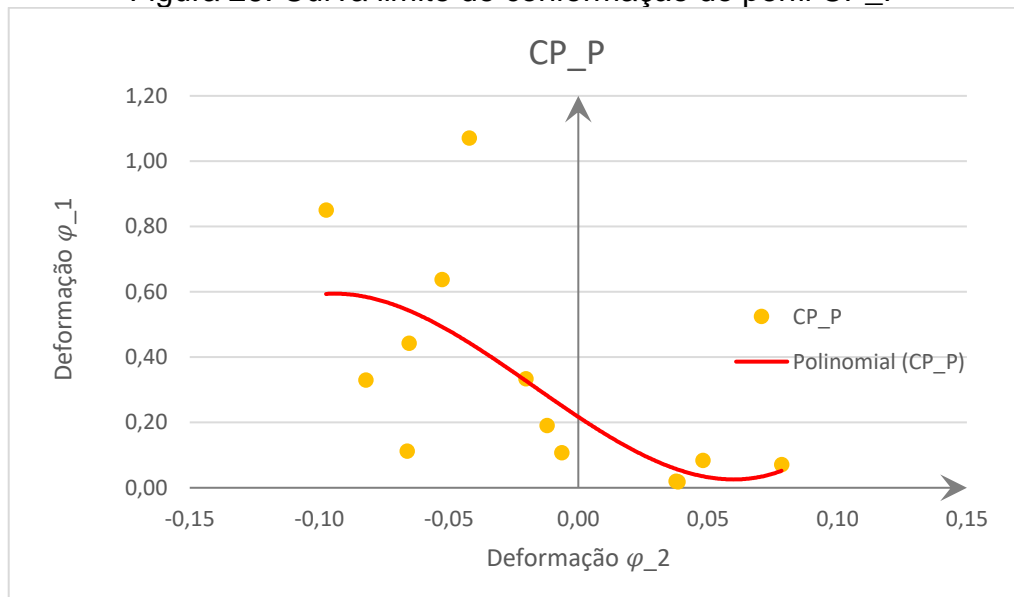


Fonte: Do autor (2021).

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.

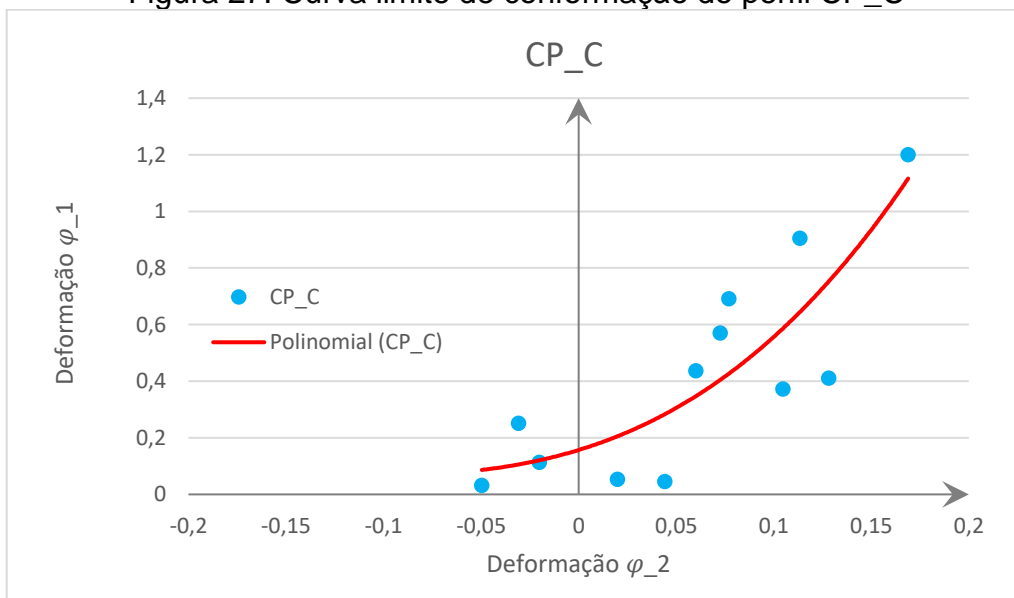
Com esses valores foi possível gerar as curvas limite de conformação específicas para cada perfil de parede proposto, Fig. 26 e 27, e verificar o padrão de deformação para cada peça proposta.

Figura 26: Curva limite de conformação do perfil CP_P



Fonte: Do autor (2021).

Figura 27: Curva limite de conformação do perfil CP_C



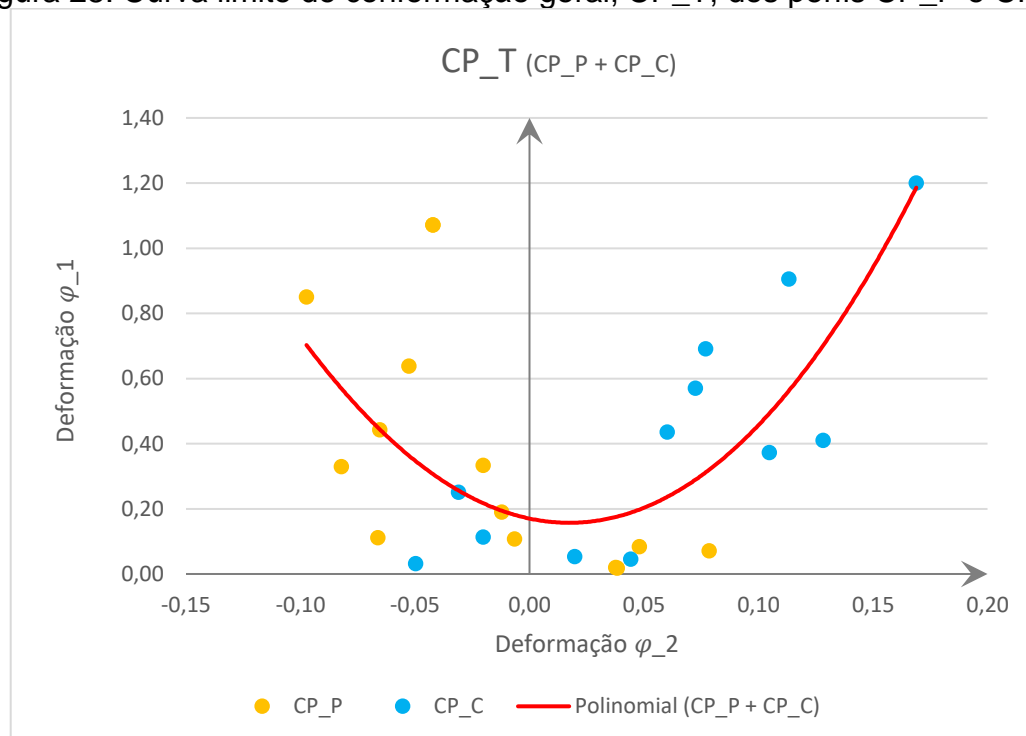
Fonte: Do autor (2021).

Como se pode observar na Fig. 26, 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 . Diferentemente do perfil CP_C, Fig. 27, na qual os pontos se concentram no quadrante positivo do eixo de deformação φ_2 .

E ao comparar as linhas de tendência dos gráficos CP_P (Fig. 26) e CP_C (Fig. 27) 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. Já, para o perfil CP_C, a linha de tendência das deformações possui um caráter de deformação biaxial.

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 cone e tronco de pirâmide) pelo processo de SPIF em chapas de aço AISI 1008 com 0,90 mm de espessura, como mostra a Fig. 28 a seguir.

Figura 28: Curva limite de conformação geral, CP_T, dos perfis CP_P e CP_C



Fonte: Do autor (2021).

De acordo com os autores, 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, CP_C e CP_T os valores da intersecção no eixo Y foi de aproximadamente 0,21, 0,16 e 0,17 respectivamente, dessa forma a diferença percentual do valor calculado pela interpolação para o valor obtido da curva CLC para o tronco de pirâmide foi de 13,1%, para o tronco de cone foi 18,3% e para a curva de ambas as peças, CP_T, 11,4%, sendo esse último o 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] DE LUCCA, G. S. **Análise de Forças Durante Processo de Estampagem Incremental com Auxílio de Extensometria**. 99 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Processos de Fabricação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2015.
- [13] 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] DALEFFE, A.; SCHAEFFER, L.; FRITZEN, D. & CASTELAN, J. **Analysis of the Incremental Forming of Titanium F67 Grade 2 Sheet**. *Key Engineering Materials*. v. 554-557, p. 195-203, 2013.
- [15] FELISBINO, G. A.; DE MARCH, G.; FRITZEN, D.; CASTELAN, J. & DALEFFE, A. **Criação de Pisos 3D por Processo de Estampagem Incremental: Estudo de Caso**. 40° SENAFOR, Conformação de chapas, p.27-35. Porto Alegre, 2021.
- [16] 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
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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
- [23] 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.
- [24] ABNT, NBR-6152. **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. ABNT, Rio de Janeiro, 2002.