

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO –
CAMPUS SÃO PAULO

GUSTAVO HENRIQUE DE PAULA SANTOS

DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE ESTAMPABILIDADE DE CHAPA DE AÇO IF PELO
PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

SÃO PAULO – SP

2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO –
CAMPUS SÃO PAULO

GUSTAVO HENRIQUE DE PAULA SANTOS

DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE ESTAMPABILIDADE DE CHAPA DE AÇO IF
PELO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Orientador: Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart

Coorientador: Prof. Dr. Mário Luiz Nunes da
Silva

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do
IFSP como requisito para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e
Processos de Fabricação.

São Paulo – SP

2018

Catalogação na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237d	<p>Santos, Gustavo Henrique de Paula Determinação dos limites de estampabilidade de chapa de aço if pelo processo de estampagem incremental / Gustavo Henrique de Paula Santos. São Paulo: [s.n.], 2018. 95 f. il.</p> <p style="text-align: center;">Orientador: Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart Co-orientador: Prof. Dr. Mario Luiz Nunes da Silva</p> <p style="text-align: center;">() - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2018.</p> <p style="text-align: center;">1. Conformação Mecânica. 2. Estampagem Incremental de Chapas. 3. Aço If. 4. Limites de Estampabilidade. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título.</p>
-------	---

CDD

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

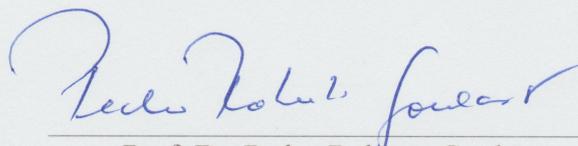
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE ESTAMPABILIDADE DE CHAPA DE AÇO IF
PELO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL”

Autor: Gustavo Henrique de Paula Santos

Orientador: Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart

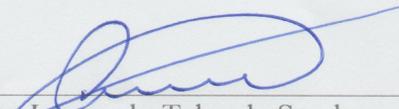
A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa dissertação:



Prof. Dr. Pedro Roberto Goulart
IFSP – ITP



Prof. Dr. Gianildo Alves dos Santos
IFSP – SPO



Dr. Leonardo Taborda Sandor
Villares Metals S.A.

São Paulo, 13 de agosto de 2018

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe
faltasse uma gota.”*

Madre Teresa de Calcutá

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram a torná-lo possível.

Agradecimentos

A Deus primeiramente por ter permitido chegar até aqui com saúde, família e amigos. Aos meus orientadores Prof.º Dr. Pedro Roberto Goulart e Prof. Dr. Mário Luiz Nunes da Silva pela paciência, atenção e orientação. Ao meu amigo e companheiro de mestrado Lucas Clarindo Pereira por todo apoio durante a realização deste trabalho. Agradeço ao Prof.º Dr. Sérgio Tonini Button por todos materiais, equipamentos e sugestões. A Nivelartec© pelo dispositivo de fixação do prensa-chapa e de modo geral a todos que contribuíram direta ou indiretamente. Ao IFSP campus Itapetininga por disponibilizar máquinas e laboratórios.

Resumo

Novos processos de estampagem de metais vêm sendo desenvolvidos para atender às demandas do mercado que requer cada vez mais peças customizadas e curtos tempos de fabricação. Neste tocante surge como alternativa para atender a estas solicitações o processo de estampagem incremental de chapas (do inglês *incremental sheet forming - ISF*) que se baseia na aplicação de uma deformação plástica local e progressiva produzida por uma ferramenta que, guiada por uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC), pressiona uma chapa ao longo de trajetórias específicas a fim de estampar uma peça com determinada geometria. Diferentes materiais têm sido utilizados nos estudos do processo *ISF* variando desde metais a polímeros, porém poucos estudos têm sido realizados em aços, sobretudo em aços dedicados à estampagem, como o aço livre de intersticiais (*interstitial free - IF*). Este estudo apresenta os resultados de experimentos realizados com chapas de aço IF de 0,6 mm de espessura pelo processo *ISF* que determinou o ângulo limite de estampagem para o formato geométrico de um cone, sendo que acima deste limite o material fica sujeito a fraturas com diferentes graus de severidade e em diferentes profundidades.

Palavras chave: conformação mecânica, estampagem incremental de chapas, aço IF, limites de estampabilidade.

Abstract

New metal forming processes have been developed to meet the demands of the market that requires increasingly custom parts and short manufacturing times. In this regard, an alternative to meet these requests is the incremental sheet forming process (ISF), which is based on the application of a local and progressive plastic deformation produced by a tool that is guided by a computerized numerical control machine (CNC) and presses a sheet along specific paths in order to forming a part with certain geometry. Different materials have been used in the ISF process studies ranging from metals to polymers, but few studies have been done on steels, especially on steels dedicated to forming, such as interstitial free steel (IF steel). This study presents the results of the experiments performed with IF steel sheets with a thickness of 0.6mm by mean of ISF process that defined, for the geometric shape of a cone, the forming angle limit. Above this limit the material is subject to fractures with different degrees of severity and at different depths.

Keywords: *metal forming, incremental sheet forming, IF steel, forming limits.*

Lista de Figuras

Figura 1: Processos de estampagem sendo 1a. simétrico e 1b. assimétrico.....	18
Figura 2: Elementos básicos do processo <i>ISF</i>	19
Figura 3: Processo <i>ISF</i> durante a estampagem de um cone.	20
Figura 4: Etapas do processo <i>ISF</i> convencional.	21
Figura 5: Componentes da estampagem incremental de dois pontos (<i>TPIF</i>).	22
Figura 6: <i>SPIF</i> com matrizes dos tipos negativa e positiva.	23
Figura 7: Estampagem incremental de um ponto com fluido hidráulico.	23
Figura 8: Estampagem incremental de um ponto com matriz parcial.....	24
Figura 9: Estampagem incremental de um ponto com matriz total.....	24
Figura 10: Aplicações do Processo <i>ISF</i>	26
Figura 11: Geometrias utilizadas nos estudos do processo de <i>ISF</i>	27
Figura 12: Trajetórias do punção no processo <i>ISF</i>	28
Figura 13: Trajetória do punção em detalhes para estampagem de um cone.	29
Figura 14: Tipo de trajetórias do punção.	30
Figura 15: Influência do ΔZ na rugosidade.....	31
Figura 16: Parâmetros do material para a lei do seno/cosseno.	33
Figura 17: Regiões das variações de espessura de um cone.....	34
Figura 18: Tipos de formatos de ponta dos punções rígidos.....	35
Figura 19: Punção com esfera de rolamento e interferência na peça.	35
Figura 20: Fratura ocorrida em um cone truncado.	37
Figura 21: Falha típica no processo <i>ISF</i>	38
Figura 22: DLC típico com as zonas de segurança e de falha do material.	39
Figura 23: Deformação de círculo para elipse durante o processo <i>ISF</i>	40
Figura 24: Principais deformações nos processos convencionais de estampagem.....	41
Figura 25: Zonas características por tipo de deformação.	42

Figura 26: Peças automotivas produzidas a partir do Aço IF.	43
Figura 27: Propriedades dos aços para painéis e componentes estruturais.	45
Figura 28: Microestrutura do Aço IF – Ampliação de 500x.....	47
Figura 29: Dimensões em mm do corpo de prova para o ensaio de tração.	48
Figura 30: Dimensões e formato final do punção.	50
Figura 31: Conjunto prensa-chapa.	51
Figura 32: Centro de usinagem CNC de 3 eixos.	52
Figura 33: Sistema de marcação de metais Tecnigrav.	52
Figura 34: Fluxograma do processo de estampagem incremental de um ponto.....	53
Figura 35: Cone em a) geometria e dimensões e b) limites da geometria da peça e o comportamento do punção na profundidade máxima da peça.....	54
Figura 36: Corpo de prova cortado e pontos de medição.	58
Figura 37: Medição das elipses no ImageJ®.	59
Figura 38: Classificação das elipses conforme ASTM E2218 – 15.	60
Figura 39: Conjunto de teste de Nakazima.	61
Figura 40: Dimensões e formatos dos corpos de prova do ensaio de Nakazima.....	62
Figura 41: Corpos de prova ensaiados.	63
Figura 42: Diagrama Limite de Conformação do ensaio de Nakazima.	65
Figura 43: Croquis planejados em CAD para os experimentos realizados.	68
Figura 44: Experimento 1 e 6.	69
Figura 45: Experimentos 2 e 3: a) vista frontal, b) vista posterior.....	70
Figura 46: Experimentos 4 e 5: a) vista frontal. b) vista posterior.....	71
Figura 47: Experimento 7 e 8.	72
Figura 48: Relação profundidade x ângulo de parede.....	73
Figura 49: Espessuras medidas no experimento 1.	75
Figura 50: Espessuras medidas no experimento 6.	76
Figura 51: Espessuras medidas no experimento 7.	77

Figura 52: Espessuras medidas no experimento 8.	79
Figura 53: Média das espessuras medidas por experimento.	79
Figura 54: Diagrama Limite de Conformação: <i>ISF</i> x Nakazima.....	82
Figura 55: Comparativo dos alongamentos obtidos nos ensaios e processo <i>ISF</i>	83

Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição química do aço IF (percentual em peso)	46
Tabela 2: Valores médios obtidos no ensaio de tração.....	48
Tabela 3: Anisotropia do aço IF pelo ensaio de tração.	49
Tabela 4: Valores dos parâmetros estabelecidos para todos os experimentos.	56
Tabela 5: Quantidade e classificação das elipses do ensaio de Nakazima.	64
Tabela 6: Nakazima - Valores médios percentuais dos alongamentos.	64
Tabela 7: Resultados dos experimentos.	67
Tabela 8: Relação raio da base superior do cone <i>versus</i> profundidade máxima de estampagem por ângulo de parede planejado.	74
Tabela 9: Espessuras medidas no experimento 1.....	74
Tabela 10: Espessuras medidas no experimento 6.....	76
Tabela 11: Espessuras medidas no experimento 7.....	77
Tabela 12: Espessuras medidas no experimento 8.....	78
Tabela 13: Percentual da diminuição da espessura na região de redução.	80
Tabela 14: <i>ISF</i> - Média percentual dos alongamentos para cada tipo de elipse.	82

Lista de Abreviaturas e Siglas

AA-DQ	<i>Drawign Quality Steel</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARBL	aços de alta resistência baixa liga
BH	<i>bake hardening</i>
C	comprimento do corpo de prova
CAD	<i>computer-aided design</i>
CAD/CAM	<i>computer-aided design / computer-aided manufacturing</i>
C _f	comprimento final
CFC	estrutura cúbica de face centrada
CLC	curva limite de conformação
C _i	comprimento inicial
CNC	controle numérico computadorizado
d	diâmetro
DLC	diagrama limite de conformação
DP	<i>dual phase</i>
e ₁	maior deformação
e ₂	menor deformação
E _f	espessura final da chapa
E _i	espessura inicial da chapa
F	força de estampagem metálica
h	profundidade de estampagem
IF	<i>interstitial free</i>
IF-AR	<i>interstitial free abrasion resistant</i>
ISF	<i>incremental sheet forming</i>
kN	quilo Newton
L _f	largura final
L _i	largura inicial
mm/min	milímetros por minuto
Nb	nióbio
PM	ponto medido
ppm	partes por milhão
r	raio

R	coeficiente de anisotropia normal
R_m	coeficiente de anisotropia médio
rpm	rotação por minuto
<i>SPIF</i>	<i>single point incremental forming</i>
Ti	titânio
<i>TPIF</i>	<i>two points incremental forming</i>
<i>TRIP</i>	<i>transformation induced plasticity</i>
v	velocidade de avanço
VM	valor medido
ΔR	coeficiente de anisotropia planar
ΔZ	incremento do passe vertical
\varnothing	ângulo da parede para o cosseno
α	ângulo da parede para o seno
σ_b	limite de resistência à tração
σ_e	tensão de escoamento
ω	rotação

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivos.....	16
1.2	Justificativas	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Estampagem Incremental de Chapas Metálicas.....	17
2.1.1	Estampagem Incremental Convencional	20
2.1.2	Estampagem Incremental Híbrida	22
2.1.3	Vantagens, Limitações e Aplicações do Processo <i>ISF</i>	25
2.2	Principais Parâmetros no Processo <i>ISF</i>	27
2.2.1	Parâmetros do Processo	28
2.2.2	Parâmetros do Material.....	32
2.3	Equipamentos e Ferramentas para o Processo <i>ISF</i>	34
2.4	Limites de Estampabilidade no Processo <i>ISF</i>	36
2.5	O Aço Livre de Intersticiais (<i>Interstitial Free</i>)	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Materiais	46
3.1.1	Determinação do Tamanho de Grão	46
3.1.2	Ensaio de Tração.....	47
3.1.3	Determinação da Anisotropia.....	48
3.1.4	Determinação da Dureza	50
3.2	Equipamentos e Ferramental.....	50
3.2.1	Punção.....	50
3.2.2	Prensa-chapa	51
3.2.3	Centro de Usinagem.....	51
3.2.4	Equipamento para Marcação Eletroquímica.....	52
3.3	Métodos.....	53
3.3.1	Programa para Modelagem da Geometria.....	55
3.3.2	Programa <i>CAD/CAM</i>	56
3.3.3	Preparação dos Corpos de Prova.....	56
3.3.4	Preparação do Centro de Usinagem e Lubrificação da Chapa.....	57
3.3.5	Medição de Espessuras e das Elipses	57
3.3.6	Ensaio de Nakazima.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1	Relação entre a Profundidade do Cone e o Ângulo de Parede	66
4.2	Espessura da Parede dos Cones	74
4.3	Deformações Obtidas pelo Processo <i>ISF</i>	81
5	CONCLUSÕES.....	85

1 INTRODUÇÃO

A estampagem de metais é um dos processos que compõem a área da conformação mecânica. Filice, Fratini e Micari (2002), Park e Kim (2003) e Hirt et al. (2004) relatam que os processos tradicionais de estampagem de metais, como a estampagem profunda, envolvem custos relevantes ligados aos equipamentos e ferramentais utilizados e aos tempos de *set-up*, pois as matrizes e os punções são fabricados de modo a ficarem próximos da forma da peça a ser produzida e são utilizados para impor a deformação desejada à peça bruta deixando o processo pouco flexível. A aplicação desta tecnologia tradicional pode ser economicamente justificada apenas para a produção de grandes lotes pois os custos ligados à fabricação e montagem são divididos entre um volume grande de peças.

Neste tocante as indústrias enfrentam novos desafios como produção de pequenos lotes de peças, flexibilização dos processos e redução do tempo de fabricação e comercialização dos produtos sendo que as características dos processos tradicionais de estampagem de metais são incompatíveis com estas novas demandas e provocaram o desenvolvimento de novos processos como os de estampagem incremental de chapas (*Incremental Sheet Forming - ISF*) que não exigem equipamentos convencionais e ferramentais dispendiosos e operações com configurações demoradas (FILICE; FRATINI; MICARI, 2002; LU et al., 2014; JESWIET et al., 2015).

Diferentes tipos de estudos têm sido conduzidos com ênfase na compreensão, avaliação e melhoria da estampabilidade no processo *ISF* (LI et al., 2017). As informações sobre a estampabilidade dos materiais são muito importantes para que os fabricantes de chapas e os usuários possam resolver problemas relacionados a este processo (NARAYANASAMY; NARAYANAN, 2007).

Diferentes materiais têm sido utilizados nos estudos do processo *ISF* variando desde metais a polímeros. Na literatura as pesquisas em metais têm sido conduzidas predominantemente com o uso de chapas de ligas de alumínio e titânio como pode ser visto nos trabalhos de Fratini et al. (2004), Jeswiet et al. (2005) e Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017). Poucos estudos têm sido realizados em aços,

sobretudo em aços dedicados à estampagem, como o aço livre de intersticiais (*interstitial free* – IF). O aço IF apresenta altos níveis de estampabilidade em função da pequena quantidade de átomos intersticiais de carbono e nitrogênio proporcionando baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio (GORNI; SILVEIRA; ALMEIDA FILHO, 2002).

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho foi determinar os limites de estampabilidade de chapa de aço IF no processo de estampagem incremental utilizando um centro de usinagem CNC de 3 eixos. Os objetivos específicos foram:

- Determinar o ângulo máximo e a profundidade de segurança em que a parede da peça pode ser estampada sem que ocorram fraturas.
- Verificar a variação de espessura do material ao longo da parede da peça do cone.
- Analisar as deformações obtidas no material pelo processo *ISF* e pelo ensaio de Nakazima.

1.2 Justificativas

A principal razão para a realização deste estudo sustenta-se no fato de que há poucas pesquisas publicadas sobre o comportamento do aço IF no processo *ISF*. Além disso foram identificadas lacunas do processo *ISF* conforme descrito no trabalho de Lu et al. (2014) e Li et al. (2017) que citam que embora o processo *ISF* vem sendo pesquisado há mais de 20 anos, tanto na análise teórica como nas observações experimentais, as aplicações na indústria são limitadas por uma série de razões incluindo estampabilidade insatisfatória, imprecisão geométrica, longo tempo de fabricação e acabamento superficial ruim devido ao pouco entendimento de como os diferentes parâmetros do processo afetam o comportamento da estampagem e a qualidade final do produto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estampagem Incremental de Chapas Metálicas

O processo *ISF*, do inglês *Incremental Sheet Forming* pode ser utilizado para descrever uma variedade de processos de fabricação sendo todos caracterizados pelo fato de que a qualquer momento somente uma pequena parte do produto está realmente sendo conformada e que a área de deformação local está se movendo ao longo do produto (EMMENS; SEBASTIANI; BOOGAARD, 2010). Jeswiet et al. (2005) classificam esse processo de fabricação convencionais em dois tipos: estampagem incremental simétrica e assimétrica de chapas metálicas.

Na estampagem incremental simétrica de chapas metálicas um dos métodos mais antigos é o estiramento que engloba um grupo de processos de conformação para a produção de formas ocas simétricas, classificando-se em estiramento convencional, cisalhamento e conformação cilíndrica. As técnicas de estiramento envolvem a rotação de uma peça de trabalho presa em um mandril enquanto as ferramentas de estiramento se aproximam da peça de trabalho e a deformam até forma desejada. (WONG; DEAN; LIN, 2003).

Na estampagem incremental assimétrica um dos métodos utilizados é a embutimento profundo que tem a capacidade de fabricar peças tridimensionais a partir de chapas. Neste tipo de processo são utilizados punções e matrizes juntamente com prensas mecânicas e hidráulicas. Os punções tem a geometria interna do produto a ser fabricado e as matrizes têm a forma de anel com o canto interno arredondado. Durante o processo o material escoia sobre este canto. Entre o punção e a matriz deve haver uma folga que é determinada pela espessura da chapa (SHAEFFER, 2004). Na Figura 1a pode-se ver o processo convencional de estampagem simétrica (estiramento) relacionando a ferramenta de deformação, o pivô, o mandril, a máquina e a chapa metálica a ser estampada. Na Figura 1b pode-se ver o processo convencional de estampagem assimétrica (embutimento profundo) relacionando o punção, a chapa estampada, a matriz e a prensa-hidráulica.

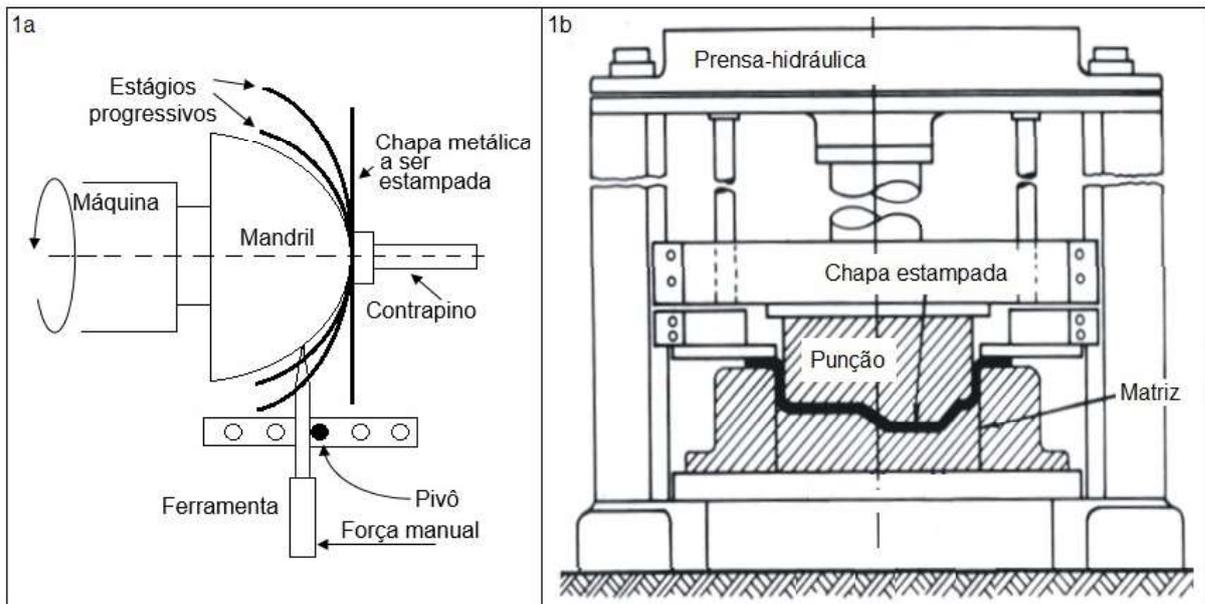


Figura 1: Processos de estampagem sendo 1a. simétrico e 1b. assimétrico. Adaptado de Avitzur; Yang, 1983 apud Wong; Dean; Lin, (2003); Borges (2018).

Com o desenvolvimento das técnicas de estampagem, novas tecnologias têm sido desenvolvidas devido aos avanços na usinagem controlada por computador e no desenvolvimento de pós-processadores que controlam os caminhos das ferramentas das máquinas em pacotes de programas de desenho e manufatura assistida por computador (*computer-aided design and manufacturing - CAD/CAM*) resultando na capacidade de estampar formas simétricas e assimétricas a baixo custo e sem matrizes caras (JESWIET et al., 2005). Neste contexto a tecnologia *ISF* simétrica ou assimétrica é definida como um conjunto de processos de conformação de chapas metálicas, com o uso ou não de uma matriz, na qual a deformação é altamente localizada, sem extração de material, com o uso de um dispositivo que prende completamente a chapa; assim a forma final é determinada pelo movimento nos eixos X, Y e Z de alguma ferramenta (EMMENS; SEBASTIANI; BOOGAARD, 2010). Este processo teve seu início nos conceitos das máquinas primeiramente idealizadas, desenvolvidas e patenteadas por Roux em 1960 e por Lezak em 1967 que eram inviáveis na época devido ao pouco desenvolvimento dos sistemas de controle numérico e dos programas computacionais associados (LU et al., 2014; JACKSON; ALLWOOD, 2009; JESWIET et al., 2008).

Desta maneira, a ideia básica dos processos *ISF* é obter a forma desejada da peça por meio do movimento de um pequeno punção ao longo de um percurso especificado pelo operador. Um torno ou fresadora controlados numericamente por computador podem ser utilizados para deformar a peça bruta plasticamente, impondo à ferramenta (punção) uma trajetória pré-estabelecida nos programas *CAD/CAM*. Não é necessário o ferramental básico do processo convencional de estampagem e a forma final da peça depende apenas da trajetória atribuída à ferramenta, pois é determinada pela "soma" das deformações locais induzidas pelo punção ao longo do seu percurso (FILICE; FRATINI; MICARI, 2002).

Os elementos básicos do processo *ISF* são: (1) punção, (2) prensa-chapa, (3) chapa metálica e (4) máquina CNC atrelada ao planejamento da trajetória da ferramenta por programas *CAD/CAM*. Os elementos citados estão ilustrados na Figura 2, a qual relaciona como parâmetros básicos do processo no centro de usinagem CNC a força de estampagem (F), a velocidade de avanço (v) e a rotação (ω) do punção (JESWIET et al., 2005).

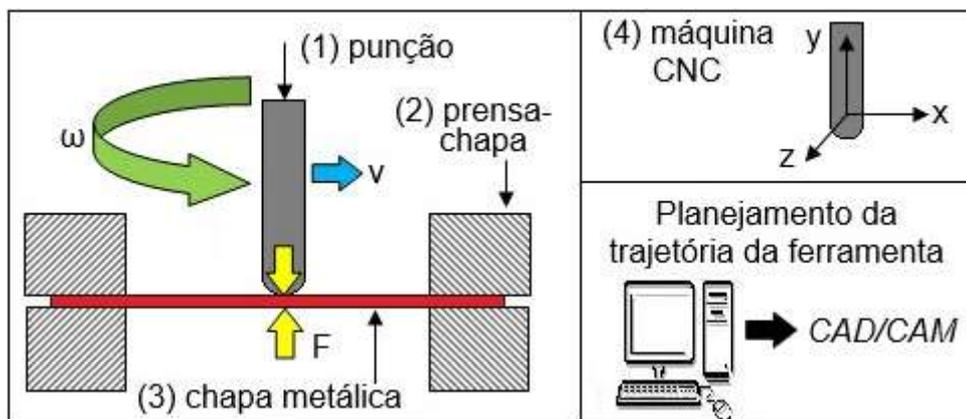


Figura 2: Elementos básicos do processo *ISF*.

Adaptado de Jeswiet et al. (2005).

Na Figura 3 pode-se ver a chapa sendo submetida ao processo *ISF* relacionando os elementos básicos do processo.

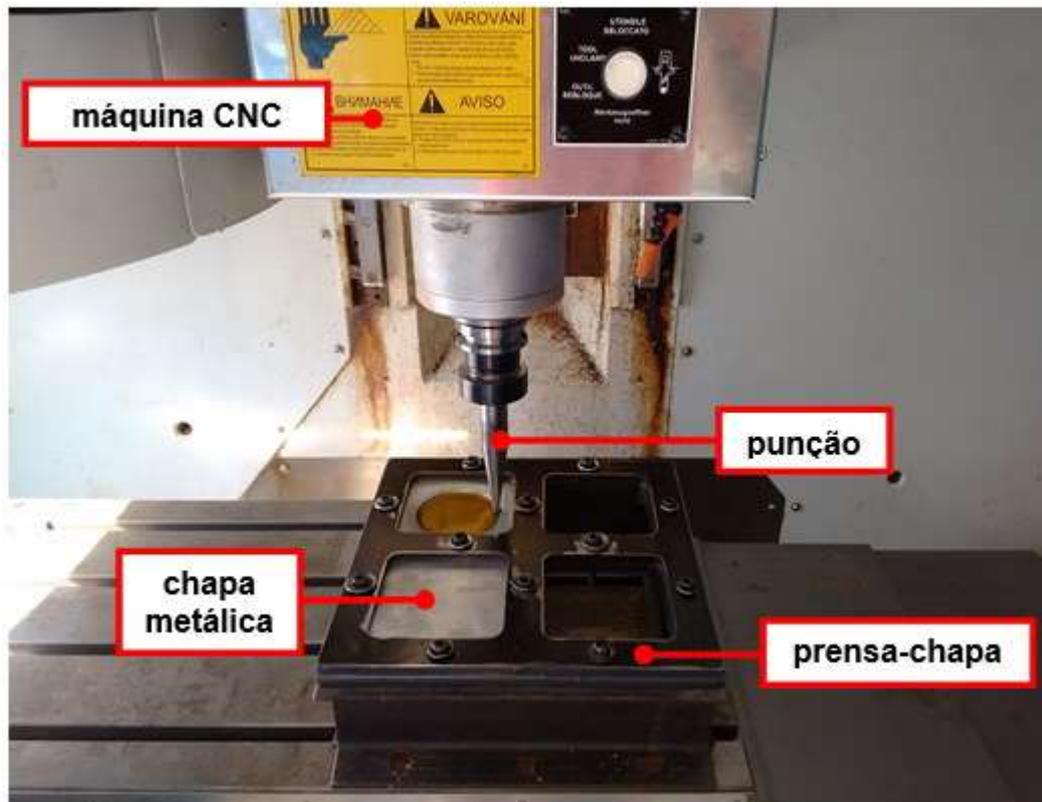


Figura 3: Processo *ISF* durante a estampagem de um cone.

Fonte: Autoria Própria.

O processo *ISF* pode ser interpretado de diferentes maneiras pois suas variações utilizando jatos de água, rolos e marteletes como ferramenta de deformação têm sido exploradas, contudo a ferramenta mais utilizada na aplicação é o punção hemisférico sólido (JESWIET et al. 2005; JACKSON; ALLWOOD, 2009). Kumar e Kumar (2015) classificaram os processos *ISF*, utilizando punção e máquinas CNC, em duas categorias principais: convencional e híbrida.

2.1.1 Estampagem Incremental Convencional

No processo convencional *ISF*, geralmente uma chapa de metal é estampada por deformação plástica progressiva e localizada usando um punção simples cujo caminho é controlado por uma máquina CNC. O punção move-se sobre a superfície da chapa metálica até a forma final da peça. Não há nenhuma outra ferramenta ou pressão externa aplicada para deformar a chapa na forma desejada (KUMAR;

KUMAR, 2015). Na Figura 4 pode-se ver as etapas do processo *ISF*, sendo a etapa 1 preparação da máquina CNC com indicação dos principais elementos do sistema. Etapa 2 início do processo com a entrada do punção na chapa causando uma pequena deformação; a etapa 3 exemplifica um passe da trajetória programada do punção após a entrada na chapa e a etapa 4, a forma da peça acabada após o punção ter executado todos os passes programados da trajetória pré-estabelecida (KIM; YANG, 1999).

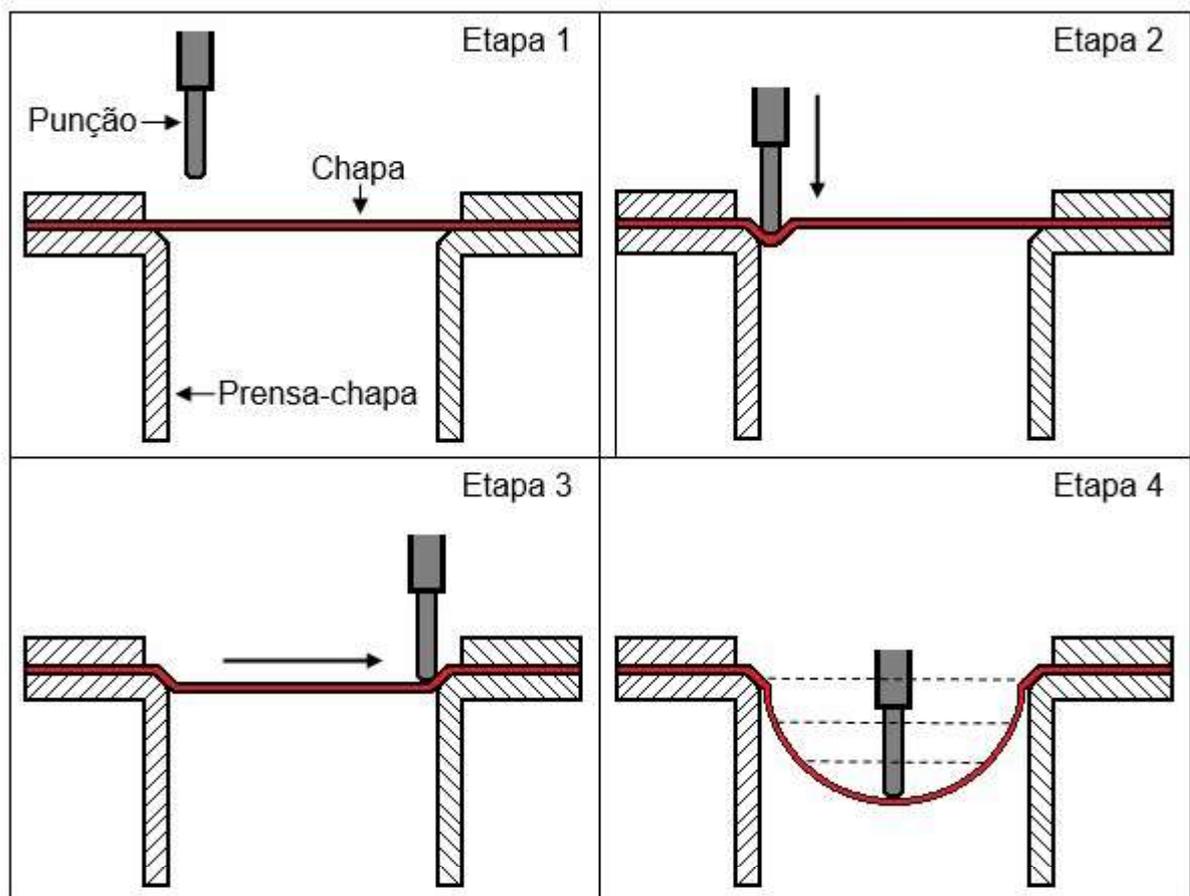


Figura 4: Etapas do processo *ISF* convencional.

(KIM; YANG, 1999)

Ainda segundo Kumar e Kumar (2015), o processo *ISF* convencional se divide em estampagem incremental de um ou dois pontos. A estampagem incremental de um ponto (*Single Point Incremental Forming –SPIF*) caracteriza-se por apenas uma ferramenta (punção) se mover sobre a superfície da chapa metálica sem o uso de matriz ou molde o que pode ocasionar desvios geométricos com relação a peça

planejada devido ao retorno elástico, entretanto aumenta a flexibilidade pois, neste caso, a ação do punção é a única responsável por dar a forma final desejada à peça (KUMAR; KUMAR, 2015; BAMBACH; ARAGHI; HIRT, 2009). As Figuras 3 e 4 ilustram mais esse processo.

A estampagem incremental de dois pontos (*Two Points Incremental Forming - TPIF*) caracteriza-se por duas ferramentas, uma chamada de punção e outra ferramenta de suporte, que se movem sobre a superfície da chapa metálica sem o uso de matriz ou molde (KUMAR; KUMAR, 2015). As duas ferramentas são responsáveis por dar a forma final desejada à peça como pode-se ver na Figura 5.

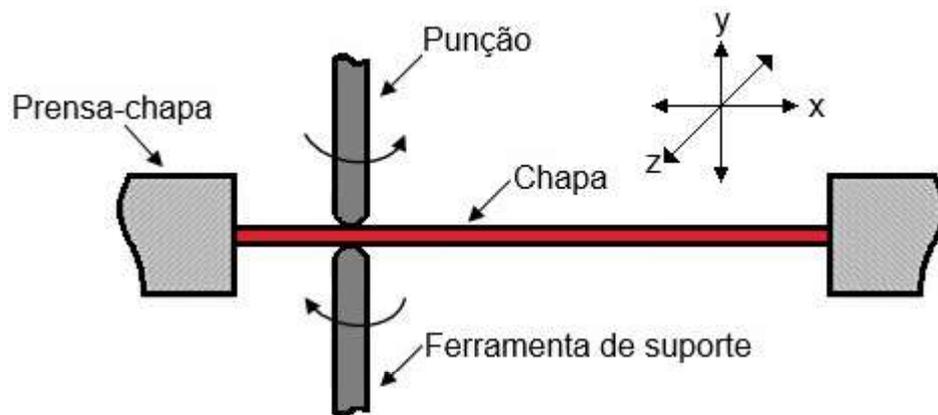


Figura 5: Componentes da estampagem incremental de dois pontos (*TPIF*).
(KUMAR; KUMAR, 2015)

2.1.2 Estampagem Incremental Híbrida

Os processos híbridos são as formas modificadas da estampagem incremental convencional. Nestes processos, o punção desloca-se sobre uma superfície da chapa metálica, enquanto que o outro lado da superfície da chapa é suportado por fluido hidráulico pressurizado, matriz parcial ou total para obter a forma e o tamanho desejado da peça (KUMAR; KUMAR, 2015). As matrizes deste processo não precisam ser necessariamente de metal podendo ser feitas de materiais baratos como madeira ou resina. As matrizes utilizadas nesses casos podem ser classificadas como positiva ou negativa, conforme ilustrado na Figura 6, e que no caso de matriz positiva o prensa-chapas necessita se mover na direção

vertical para manter a chapa na altura correta do punção (ATTANASIO et al., 2008; BAMBACH; ARAGHI; HIRT, 2009).

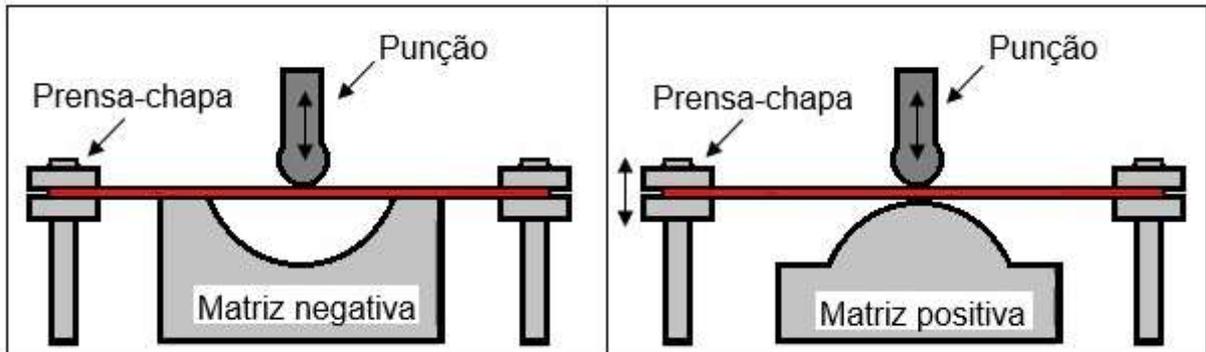


Figura 6: *SPIF* com matrizes dos tipos negativa e positiva.
Adaptado de Alwood et al., (2005) apud Castelan (2010).

Park e Kim (2003) em seu estudo sobre técnicas de conformação concluem que os processos *SPIF* utilizando matrizes positivas são melhores que os processos convencionais, pois aumentam a capacidade de conformação sendo possível estampar formas geométricas complexas, entretanto a matriz negativa dificulta estampar peças com cantos e arestas vivas.

No processo *SPIF* com fluido hidráulico um único punção se move sobre um lado da superfície da chapa metálica sendo o outro lado suportado por fluido hidráulico pressurizado (KUMAR; KUMAR, 2015) conforme Figura 7.

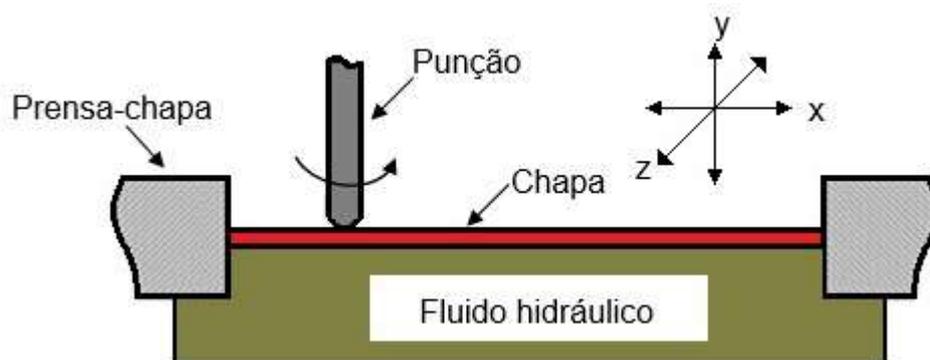


Figura 7: Estampagem incremental de um ponto com fluido hidráulico.
(KUMAR; KUMAR, 2015)

Na Figura 8 pode-se ver esquematicamente o processo *SPIF* com matriz parcial; um punção se desloca sobre um lado da superfície da chapa metálica enquanto o outro lado é suportado por uma matriz parcial do tipo positiva que não possui os contornos finais da peça a ser estampada (KUMAR; KUMAR, 2015). Jeswiet et al. (2005) relatam que a matriz parcial cria uma contra-força ascendente na chapa permitindo que a deformação plástica ocorra sob ação direta do punção.

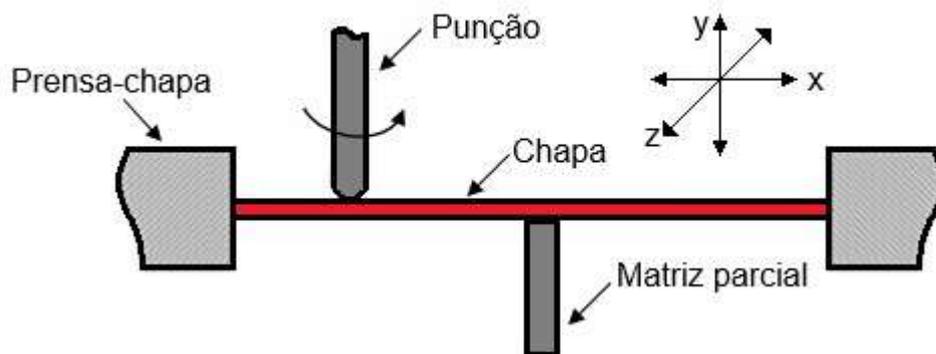


Figura 8: Estampagem incremental de um ponto com matriz parcial.
(KUMAR; KUMAR, 2015)

Na Figura 9 pode-se ver o processo *SPIF* com matriz total; um único punção se desloca sobre um lado da superfície da chapa metálica e o outro lado é suportado pela matriz que pode ser do tipo positiva, negativa ou uma combinação entre elas.

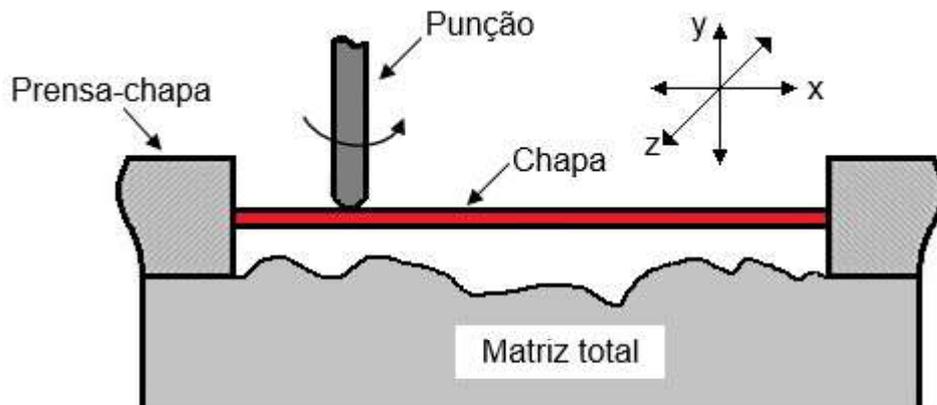


Figura 9: Estampagem incremental de um ponto com matriz total.
(KUMAR; KUMAR, 2015)

2.1.3 Vantagens, Limitações e Aplicações do Processo *ISF*

A principal vantagem do processo *ISF* utilizando-se a técnica *SPIF* em relação às outras técnicas é que esta usa um único punção e não equipamentos convencionais, por isso pode ser facilmente implementada em uma máquina CNC utilizando-se programas comerciais disponíveis que por sua vez reduzem o custo de do processo (JESWIET et al., 2015).

Em outro trabalho Jadhav (2003) apud Jeswiet et al. (2005) citam outras vantagens como: protótipos em metal são facilmente fabricados; bom acabamento superficial pode ser alcançado; operação silenciosa e relativamente livre de ruídos; sem necessidade de matrizes positivas ou negativas; grande grau de flexibilidade devido à facilidade de execução de mudanças no projeto; produção de peças para protótipos rápidos ou pequenos lotes podem ser feitos diretamente em arquivos *CAD/CAM*; limitação das dimensões da peça somente pelo tamanho da máquina utilizada para o processo e a natureza incremental do processo contribui para aumentar a estampabilidade em materiais com características de baixa conformação.

Fratini et al. (2004) afirmam que um esforço relevante de pesquisa foi realizado nos últimos anos para avaliar as vantagens do processo e que as pesquisas estão sendo dirigidas para diferentes direções como redução dos inconvenientes típicos da estampagem incremental, estampagem de formas complexas e aprendizado da mecânica deste processo. Neste tocante, Jadhav (2003) apud Jeswiet et al. (2005) listam as seguintes limitações: ocorrência de retorno elástico; limitação do processo à produção de pequenos lotes; tempo de estampagem maior quando comparado ao processo de estampagem profunda e a estampagem de ângulos retos não pode ser realizada em um único passe devendo ser previsto para este fim outras estratégias de estampagem.

Muitos pesquisadores como Filice, Fratini e Micari (2002), Hirt et al. (2004), Bambach, Araghi e Hirt (2009), Jeswiet et al. (2015), Li et al. (2017) afirmam que o campo de aplicação do processo *ISF* se situa na fabricação de protótipos rápidos e de pequenos lotes de peças. Lu et al. (2014) citam que devido à flexibilidade do processo, a aplicação do mesmo é particularmente atraente para fabricação de peças de chapas metálicas de alto valor agregado em partes pequenas e personalizadas, especialmente em peças para implantes cirúrgicos e na indústria aeroespacial. Confirmando o exposto acima, Castelan (2010) utilizou a técnica para fabricar um implante craniano e Gunashekar e Kishore (2017) para fabricar um componente aeroespacial de foguete. Alguns exemplos das áreas de aplicação do processo *ISF* e seus respectivos produtos são relacionados por Jeswiet et al. (2005) e Kumar e Kumar (2015): indústria naval fabricando placas de casco de navios; arquitetura/decoração fabricando peças de decoração; indústria automobilística fabricando painéis internos e externos da porta, capô do motor e peças estruturais; indústria de customização fabricando coroas dentárias, suporte ortopédico, capacetes, implantes cranianos, peças assimétricas sob encomenda, e a indústria aeroespacial fabricando carcaças e carenagens. Na Figura 10 pode-se ver algumas das aplicações relacionadas sendo: a) capô de carro, b) face do Buda, c) suporte ortopédico, d) peça assimétrica e e) componente aeroespacial.

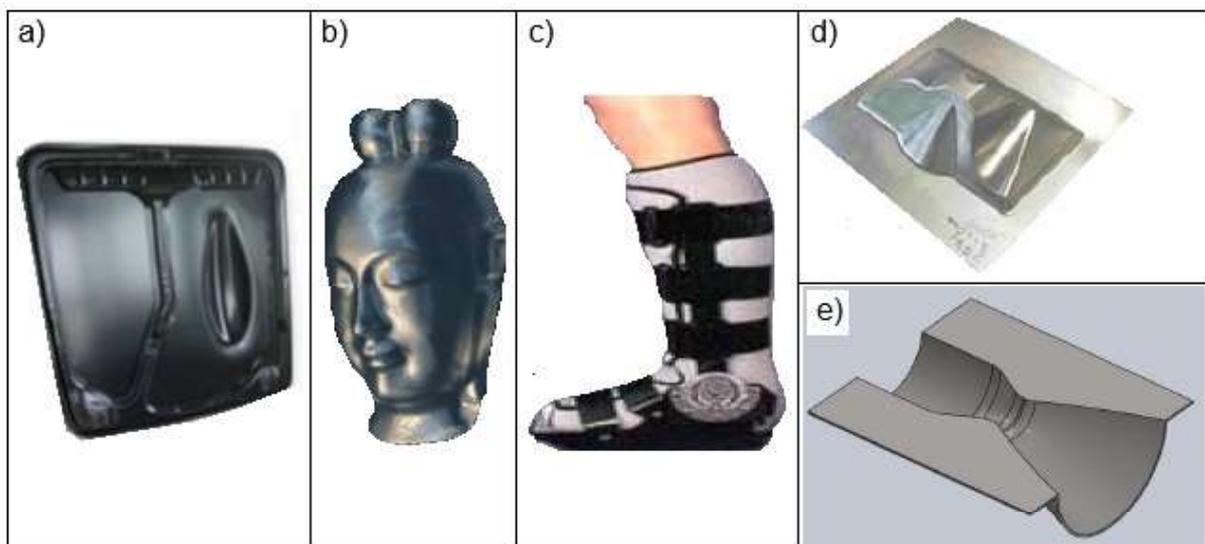


Figura 10: Aplicações do Processo *ISF*.

Adaptado de Jeswiet et al. (2005), Kumar e Kumar (2015); Li et al. (2017); Gunashekar; Kishore (2017).

Entretanto, para alcançar esses resultados são necessários estudos para conhecer a limitação dos materiais sob diferentes formas geométricas. As geometrias mais consagradas no estudo do processo *ISF* são de cruz, pirâmide e cone conforme pode ser visto nos trabalhos de Filice, Fratini e Micari (2002); Hirt et al. (2004); Fratini et al. (2004); Bambach, Araghi e Hirt (2009); Ham e Jeswiet (2008); Lu et al. (2014) e Madeira et al. (2015). Jeswiet et al. (2005) mostram em seu trabalho as geometrias empregadas nos estudos do processo *ISF* conforme ilustra a Figura 11.

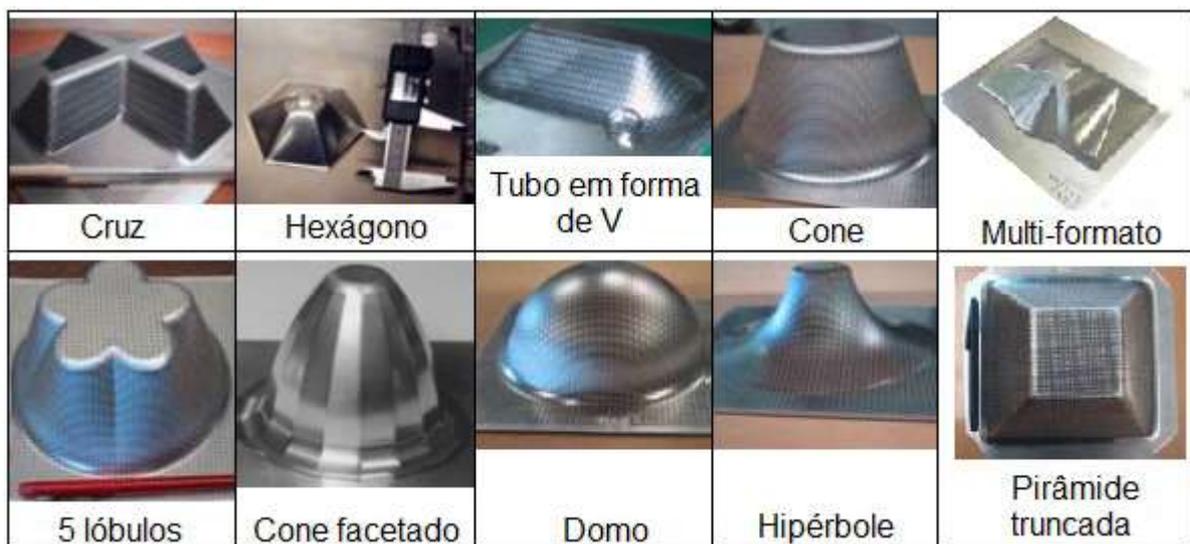


Figura 11: Geometrias utilizadas nos estudos do processo de *ISF*.
(JESWIET et al., 2005)

2.2 Principais Parâmetros no Processo *ISF*

No processo *ISF*, além da geometria da peça, os parâmetros do processo são outro importante foco de estudo. Ham e Jeswiet (2008) citam que os cinco principais parâmetros que devem ser levados em consideração e que afetam a estampabilidade no processo *ISF* são tipo e espessura do material, diâmetro da ponta do punção, incremento do passo vertical e o formato geométrico da peça a ser estampada. Segundo Jeswiet et al., (2005) os parâmetros relacionados ao processo e ao material são o coração do processo *ISF*.

2.2.1 Parâmetros do Processo

A trajetória do punção é um importante parâmetro do processo diretamente relacionada à forma geométrica da peça que se deseja estampar. Filice, Fratini e Micari (2002) ilustraram em seu trabalho a trajetória do punção para duas formas geométricas diferentes conforme pode ser visto na Figura 12, sendo “a)” a trajetória do punção para a geometria de uma cruz e a peça executada e “b)” a trajetória do punção para a geometria de um cone e a peça executada.

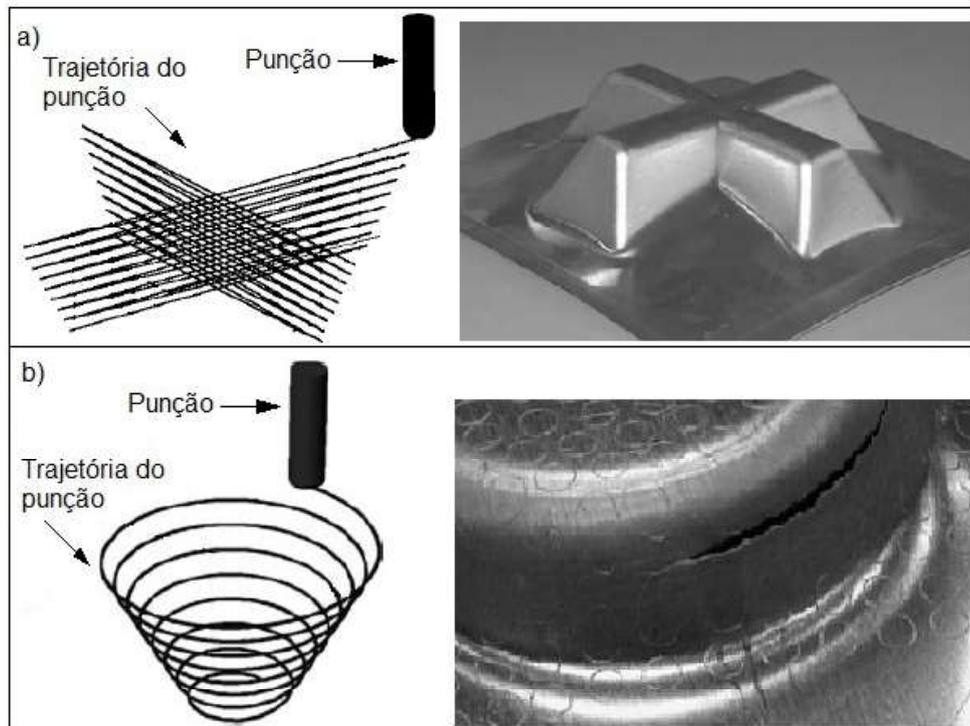


Figura 12: Trajetórias do punção no processo *ISF*.
(FILICE; FRATINI; MICARI, 2002).

A trajetória do punção para o processo *ISF* de um cone é ilustrada com detalhes no trabalho de Jeswiet et al., (2005) que mostraram por meio de uma sequência numérica progressiva os passes que o punção executa nos eixos X, Y e Z conforme a Figura 13. O movimento da ferramenta no eixo Z se refere ao incremento do passe vertical (ΔZ), um dos parâmetros de controle do processo. Deste modo o processo se inicia com a entrada da ferramenta na chapa em 1, seguido do primeiro passe na direção do eixo Y (de 2 para 3), depois avança na direção do eixo X em 4 e por último o ΔZ em 5 e assim por diante até o término da estampagem ou a

ocorrência de fratura na parede da chapa. Um exemplo de fratura pode ser visto no cone estampado da Figura 12 (b).

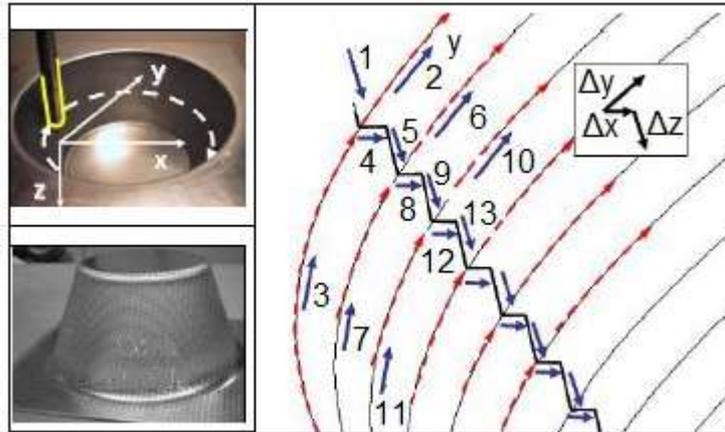


Figura 13: Trajetória do punção em detalhes para estampagem de um cone.
(JESWIET, 2004 apud JESWIET et al., 2005)

Arfa, Bahloul e Belhadjsalah (2012) citam que durante o processo *ISF* o punção pode seguir trajetórias descontínuas ou contínuas. Segundo os autores, a trajetória descontínua é composta de uma série de contornos incrementais com o valor do ΔZ constante, ou seja, o punção realiza um contorno completo somente nas direções X e Y e quando chega ao ponto de partida incrementa em Z. A trajetória contínua é baseada no caminho do punção em contorno espiral, os autores ainda dizem que esta última melhora a qualidade do acabamento superficial da peça estampada. Além disso, Callegari et al. (2006) citam que a trajetória do punção pode ser configurada em trajetória contínua direta com movimento descendente progressivo que configura o início da trajetória do punção no processo de estampagem de fora para dentro, ou seja, da borda externa para o centro da peça ou em trajetória contínua inversa com movimento descende progressivo que configura o início da trajetória do punção no processo de estampagem de dentro para fora, ou seja, do centro para a borda externa da peça. A configuração do tipo de trajetória em descontínua, contínua direta ou inversa é feita diretamente no programa *CAD/CAM*. Na Figura 14 pode ser visto os contornos das trajetórias que podem ser configuradas para o punção em: a) trajetória descontínua, b.1) contínua direta e b.2) contínua inversa.

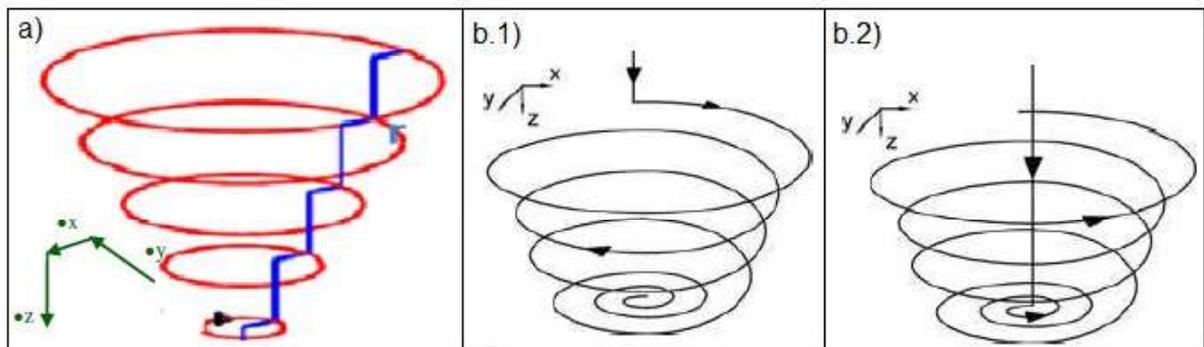


Figura 14: Tipo de trajetórias do punção.

Adaptado de Callegari et al. (2006) e Arfa, Bahloul e Belhadjsalah (2012).

Na trajetória contínua direta o punção fica em contato com a chapa durante todo o processo de estampagem o que proporciona maior ângulo de parede e melhor distribuição das deformações e espessura em comparação com a trajetória descontínua (FRITZEN et al., 2011; OLEKSIK, 2014; GOLABI; KHAZAALI, 2014). A trajetória contínua inversa é feita após a finalização da estampagem da peça para diminuir a imprecisão geométrica, deste modo todo o contorno da geometria é feito novamente partindo-se do final da peça estampada para o início da peça.

Malwad e Nandedkar (2014) relatam em seu estudo o efeito do ΔZ na deformação de uma liga de alumínio comercial descrevendo o comportamento do acabamento superficial a cada passe de modo que a rugosidade aumenta com o aumento do valor de ΔZ . A Figura 15 ilustra como a variação do ΔZ influencia a rugosidade, sendo que a rugosidade é maior quando o punção percorre uma distância maior no sentido dos eixos X e Z como em ΔX_1 e ΔZ_1 – indicando grandes incrementos – e diminui quando o punção percorre uma distância menor como em ΔX_2 e ΔZ_2 – indicando pequenos incrementos.

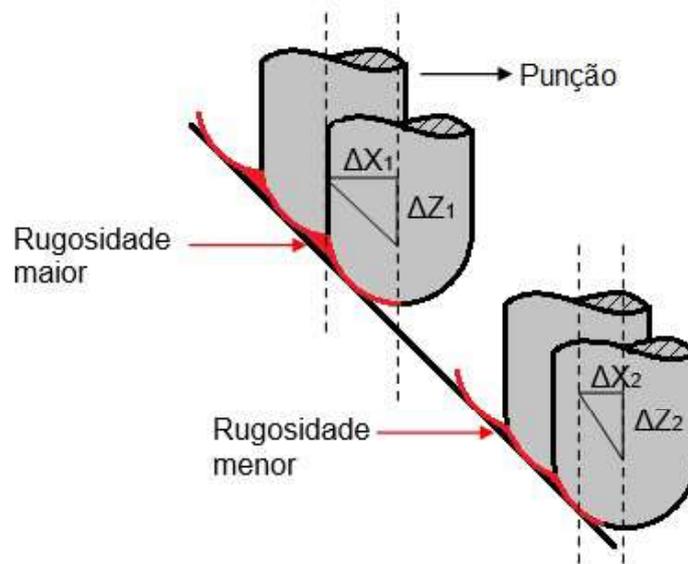


Figura 15: Influência do ΔZ na rugosidade.

Adaptado de S. Junk, G. Hirt, I. (2003) apud Jeswiet et al. (2005).

Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017) concluíram no estudo comparativo sobre o estado da arte em *SPIF* que é consenso na literatura que a estampabilidade melhora com pequenos valores de ΔZ que demandam maiores tempos de fabricação e que caso seja necessário reduzir o tempo de processo o valor deste incremento deve ser ajustado em função da rugosidade. Os valores de ΔZ utilizados recentemente nos experimentos da literatura variam de 0,1 mm a 2,0 mm como nos trabalhos de Oleksik (2014), Malwad e Nandedkar (2014), Jeswiet et al. (2015), Garg et al. (2016) e Pachori e Agrawal (2017).

A velocidade de avanço e rotação são variáveis impostas ao punção como parâmetros passíveis de configuração no programa *CAD/CAM*. Jeswiet et al. (2005) citam que as velocidades de avanço no processo *ISF* são muito superiores às velocidades de usinagem típicas pois a ferramenta é hemisférica e não há preocupação com a quantidade de corte de material como na usinagem convencional. Ambrogio, Filice e Gagliardi (2011) concluíram em seu estudo sobre a adequação industrial do processo *ISF* que altas velocidade de avanço não afetam de modo significativo a estampabilidade e a rugosidade superficial da peça.

Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017) concluem em seu trabalho que punções sem velocidade de rotação são prejudiciais tanto para a estampabilidade quanto para a qualidade da superfície e que o aumento da velocidade de rotação pode resultar em aumento na estampabilidade. Os autores, encontraram valores de velocidade de avanço entre 373 a 500.000 mm/min e rotação entre 0 e 2.500 rpm.

Outro fator importante no processo *ISF* é a lubrificação. Jeswiet et al. (2005) citam que a lubrificação ajuda a diminuir o atrito entre o punção e a chapa melhorando o acabamento superficial da região estampada. Bramley (2001) apud Jeswiet et al. (2005) realizou um conjunto de testes no processo *ISF* alternando o tipo de lubrificação entre graxa, óleo e sem lubrificação para determinar o quanto a lubrificação altera a rugosidade da superfície e obteve como resultado que o tipo de lubrificante não é um fator relevante, mas que a lubrificação é necessária para se obter superfície lisa.

2.2.2 Parâmetros do Material

Os parâmetros básicos no processo *ISF* relacionados ao material são o tipo e a espessura do mesmo e a geometria da peça a ser estampada cujo desdobramento se dá em função do ângulo máximo da parede e da profundidade de estampagem. Mcanulty, Jeswiet e Doolan, (2017) citam que o tipo de material pode ser visto como a base em que todos os outros parâmetros são selecionados. Jeswiet et al. (2015) afirmam que o ângulo máximo de estampagem determina a espessura final da parede da chapa e à medida que o ângulo aumenta, a redução da espessura da parede da chapa atinge um valor mínimo no qual a fratura ocorre como consequência determinando o respectivo limite de estampabilidade do material.

O ângulo máximo e a espessura final da parede da peça são estimados utilizando a lei do seno ou do cosseno (HIRT et al., 2004; JESWIET et al., 2005; JESWIET et al., 2015; MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017; LI et al., 2017) conforme Equações 1 e 2 aplicadas à Figura 16 onde pode-se ver em “a)” os parâmetros do material para um cone (em corte) sendo “h” a profundidade de estampagem, “ θ ” o ângulo da parede do cone com a base da chapa e “ E_i ” a

espessura inicial da chapa e em “b)” o perfil do corte do cone de “a)” com os respectivos ângulos utilizados para aplicação da lei do seno ou do cosseno sendo “ E_f ” a espessura final da chapa após a estampagem, “ α ” o ângulo da parede para o seno.

$$E_f = E_i \cdot \text{sen } \alpha \quad (1)$$

$$E_f = E_i \cdot \text{cos } \varnothing \quad (2)$$

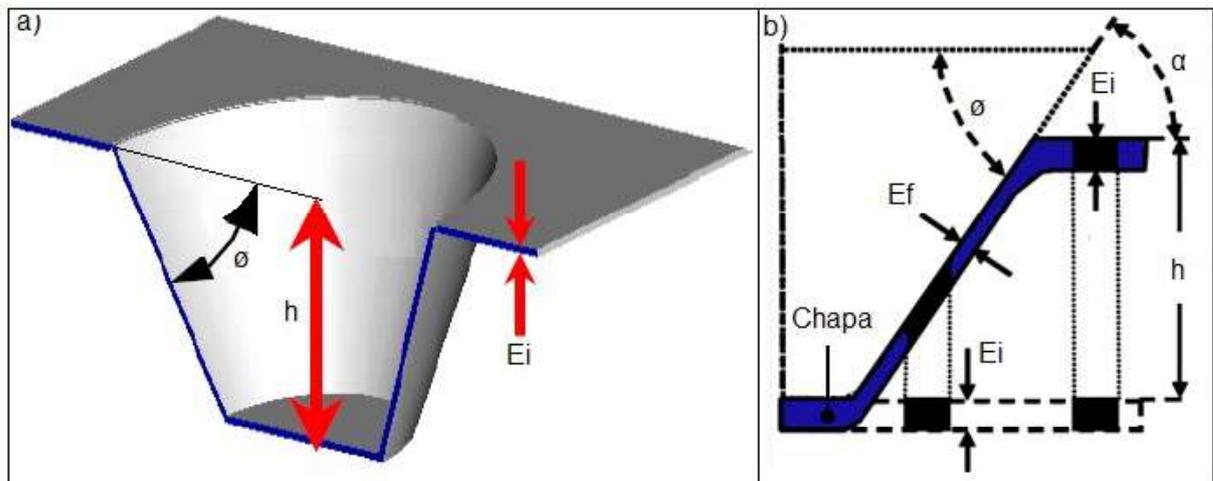


Figura 16: Parâmetros do material para a lei do seno/cosseno.
Adaptado de Jeswiet et al. (2005).

Jackson; Allwood, (2009) e Salem et al., (2016) citam que o perfil das paredes das peças estampadas pelo processo *ISF* podem apresentar variações de espessura em três regiões distintas identificadas como região de dobramento que ocorre próximo à fixação do prensa-chapa, região de redução de espessura que pode ocasionar fratura em ângulos acentuados e região de estabilidade de espessura que apresenta valores mais próximos aos obtidos pela lei do cosseno. Na Figura 17 pode-se ver em a) a imagem do perfil da parede de um cone estampado pelo processo *ISF* indicando as regiões de dobramento, de redução de espessura e de estabilidade de espessura e em b) o valor a espessura em cada região. Em ambas as figuras pode-se notar os pontos de entrada e saída da ferramenta,

respectivamente da base superior para a base inferior do cone. Na entrada da ferramenta na chapa o punção inicia o processo de estampagem da peça impondo uma deformação plástica ao material sob determinado ângulo de parede o que ocasiona inicialmente duas regiões distintas: (i) região de dobramento que ocorre primeiro próxima à região de fixação da chapa no prensa-chapa e possui como principal característica a diminuição gradativa da espessura a partir da espessura inicial durante os primeiros passes do punção; (ii) região de redução de espessura (mais suscetível à fratura) que atinge a menor espessura de parede e (iii) região de estabilidade de espessura que caracteriza-se por manter a espessura uniforme ao longo da parede da peça até o término da estampagem e a saída da ferramenta.

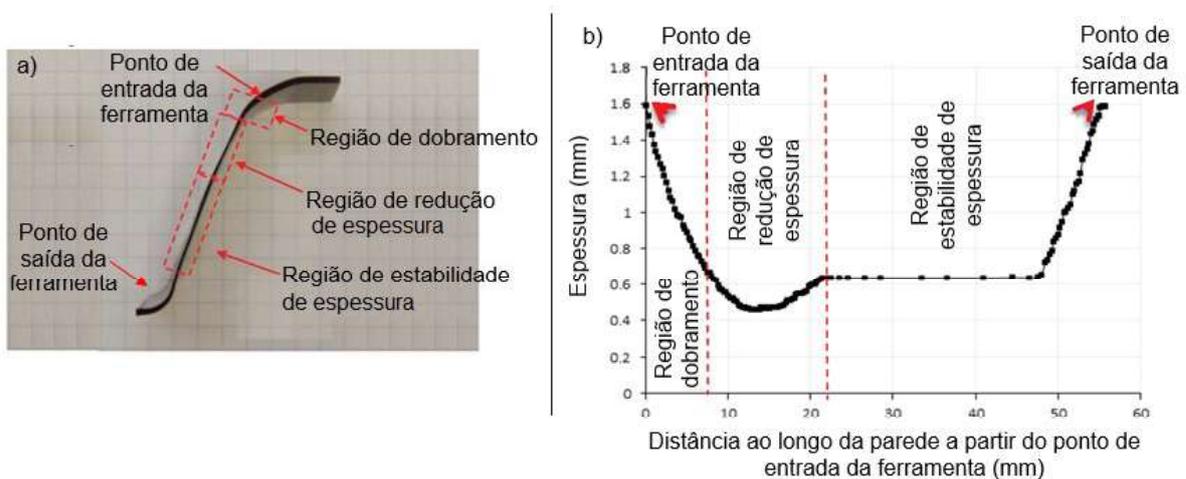


Figura 17: Regiões das variações de espessura de um cone.

Adaptado de Salem et al., (2016).

2.3 Equipamentos e Ferramentas para o Processo *ISF*

Os punções utilizados no processo *ISF* possuem variação de diâmetro de 5 mm a 25 mm (JESWIET et al., 2015) que são fabricados pelos próprios usuários uma vez que não estão disponíveis no mercado e são os elementos mais importantes do processo *ISF* segundo Jeswiet et al. (2005). Considerando-se uma aplicação típica, uma vez fabricados são instalados na pinça do porta-ferramentas do magazine da máquina CNC. Li et al. (2017) citam que estes punções são simples, possuem diferentes formatos de ponta e que um formato genérico pode estampar uma infinidade de peças, desde que seja adotado um percurso de

estampagem adequado. Na Figura 18 pode-se ver punções com diferentes tipos de formatos de ponta, raios e ângulos.

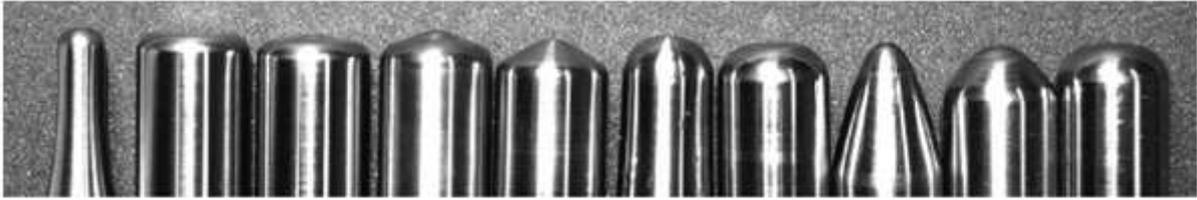


Figura 18: Tipos de formatos de ponta dos punções rígidos.
(ADAMS, 2013)

Lu et al. (2014) descrevem que o punção rígido de ponta esférica geralmente feito de aço, apesar de ser largamente utilizado, deixa riscos na superfície da chapa mesmo utilizando-se lubrificante sólido no processo, e que para suprimir este problema foram desenvolvidos punções equipados com esfera de rolamento na ponta a fim de melhorar o acabamento superficial das chapas. Os autores ainda citam que, embora o punção com esfera de rolamento tenha sido proposto há anos, existe uma limitação quanto ao ângulo máximo de estampagem que se consegue alcançar no processo *SPIF* devido a interferências entre o punção e a peça, especialmente no uso de máquinas CNC de 3 eixos. Na Figura 19 pode-se ver em a) o punção com esfera de rolamento e em b) a interferência do punção com a parede da peça em determinado ângulo.

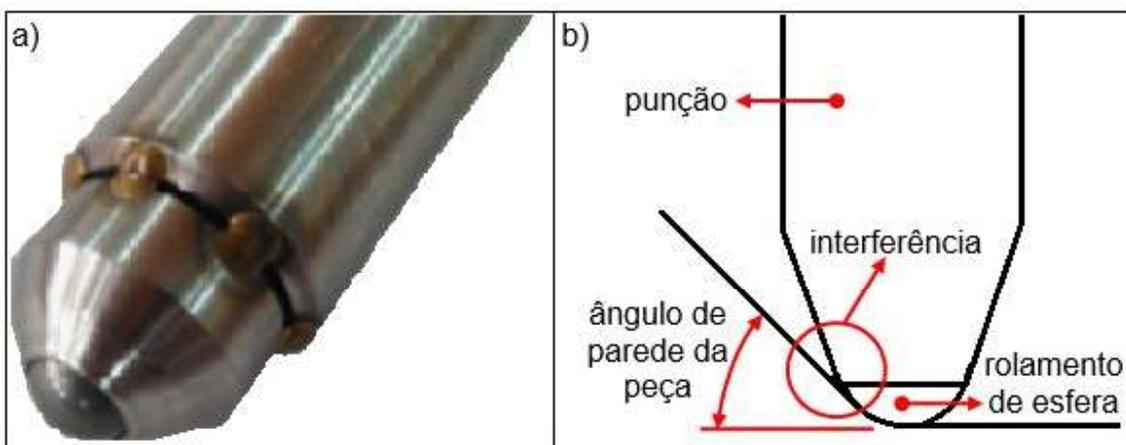


Figura 19: Punção com esfera de rolamento e interferência na peça.
Adaptado de Lu et al. (2014).

As vantagens de um tipo de punção em relação a outro têm sido pesquisadas ao longo do tempo, visto que o tamanho e a forma final do punção influenciam no processo de estampagem, pois a área de contato entre o punção e a chapa pode gerar atrito (MCANULTY; JESWIET; DOOLAN, 2017).

No processo *ISF* os equipamentos em que os punções são instalados, segundo Jeswiet et al. (2005), podem ser de diferentes tipos como células robóticas, máquinas especialmente desenvolvidas para processos *ISF* ou fresadoras CNC convencionais sendo estas últimas as mais utilizadas e que geralmente atendem a mais de um tipo de operação em um ambiente fabril (JESWIET et al., 2005). Confirmando o exposto anteriormente, Filice, Fratini e Micari (2002), Park e Kim (2003), Fratini et al. (2004), Attanasio et al. (2008), Lu et al. (2014) e Pachori e Agrawal (2017) utilizaram em seus respectivos estudos máquina fresadora CNC de 3 eixos enquanto Benedetti et al. (2017) utilizou braço robótico e Zhang et al. (2016) uma máquina especialmente desenvolvida na Northwestern University para o processo *ISF*.

Jeswiet et al. (2005) citam também em seu trabalho que as células robóticas para os processos *ISF*, embora estejam em estágio embrionário, são promissoras. Um estudo comparando vantagens entre células robotizadas e máquinas CNC para os processos de estampagem incremental foi realizado por Callegari et al. (2006) que relataram que apesar de alguns robôs não possuírem rigidez nem forças necessárias para estampar gradualmente a chapa, eles permitem troca automática de ferramentas, possibilitando redução drástica no tempo do processo, pois no mesmo equipamento é possível estampar, cortar, dobrar ou flangear as bordas, carregar ou descarregar a peça.

2.4 Limites de Estampabilidade no Processo *ISF*

No processo *ISF*, antes que quaisquer componentes comerciais possam ser fabricados, é necessário determinar o limite de estampabilidade para o material de interesse, que é geralmente expresso em termos do ângulo máximo em que a parede da peça pode ser estampada sem que ocorra fratura. Este ângulo é um

critério de projeto útil, pois pode ser medido e aplicado ao projetar peças, limitando quais formas e ângulos podem ser estampados (JESWIET et al., 2015).

Ham e Jeswiet (2007) citam que o limite de estampabilidade é importante para entender o processo *ISF*, pois permite a previsão de fraturas e pode delimitar o projeto da peça. Na Figura 20 pode-se ver a fratura ocorrida durante o processo *ISF* em uma peça com o formato geométrico de cone truncado, indicando que o limite de estampagem foi atingido ultrapassado.

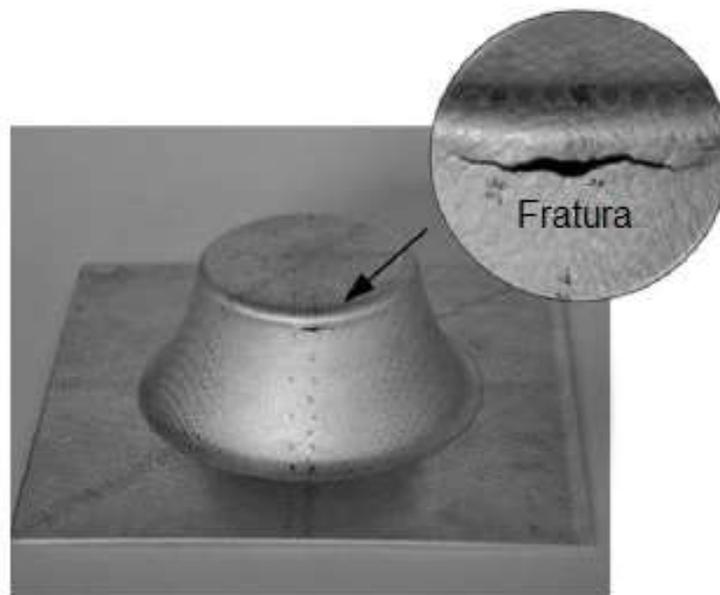


Figura 20: Fratura ocorrida em um cone truncado.
(MADEIRA et al., 2015)

Silva et al. (2008) relatam que no processo *ISF* a fratura do material na zona de transição entre a parede inclinada da peça e o raio estampado na chapa ocorre pelo movimento rotacional e descendente do punção que provoca o estiramento na chapa e resultam na abertura de trincas semelhantes ao processo de estampagem convencional ou de estampagem profunda. Os autores ainda citam que a propagação das trincas desenvolve um formato de ziguezague em torno da direção circunferencial da peça devido ao atrito gerado pelo punção no sentido de rotação. Na Figura 21 pode-se ver este mecanismo de propagação a qual o ponto “a”, está sob uma tensão menor que o ponto de início da fratura em “o”, assim a rotação do

punção faz com que a direção da propagação da fratura seja alterada para o ponto "b", que é semelhante ao do ponto de "o" em relação ao nível de tensões, reiniciando a propagação da fratura em ziguezague de forma cíclica. Martins et. al. (2008) cita que a fratura ocorre em direções inclinadas na superfície da chapa.

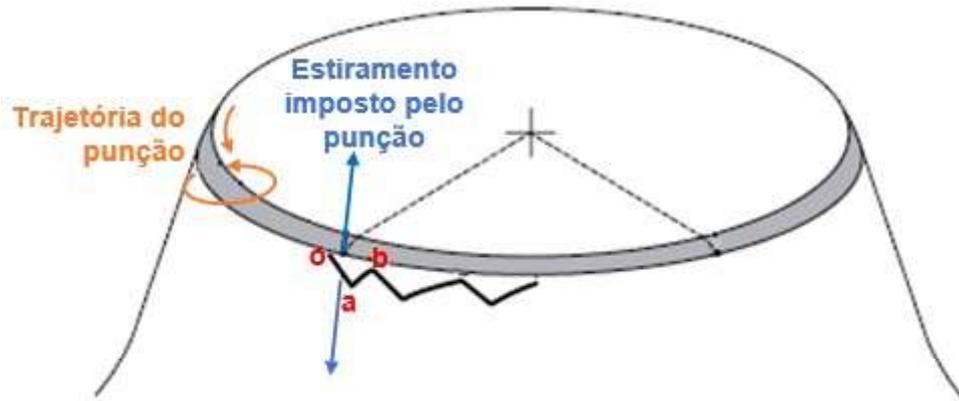


Figura 21: Falha típica no processo *ISF*.
Adaptado de Silva et al. (2008).

Além da fratura e do ângulo máximo de parede outros tipos de análises também são utilizados para determinar os limites de estampabilidade dos materiais como o Diagrama Limite de Conformação (DLC), do inglês *forming limit diagram (FLD)*. Neste diagrama as deformações sofridas pelo material durante o processo de estampagem são medidas, calculadas, plotadas e conectadas uma a uma para formar a Curva Limite de Conformação (CLC) do inglês *Forming Limit Curve (FLC)* que possibilita analisar a distribuição das deformações para definir uma zona de falha (acima da curva) e de segurança (abaixo da curva) (TIBURI, 2007, FRITZEN, 2016). A Figura 22 ilustra um DLC típico, relacionando os eixos de maior e de menor deformação e apresentando a CLC em que divide o diagrama em zonas de segurança e de falha.

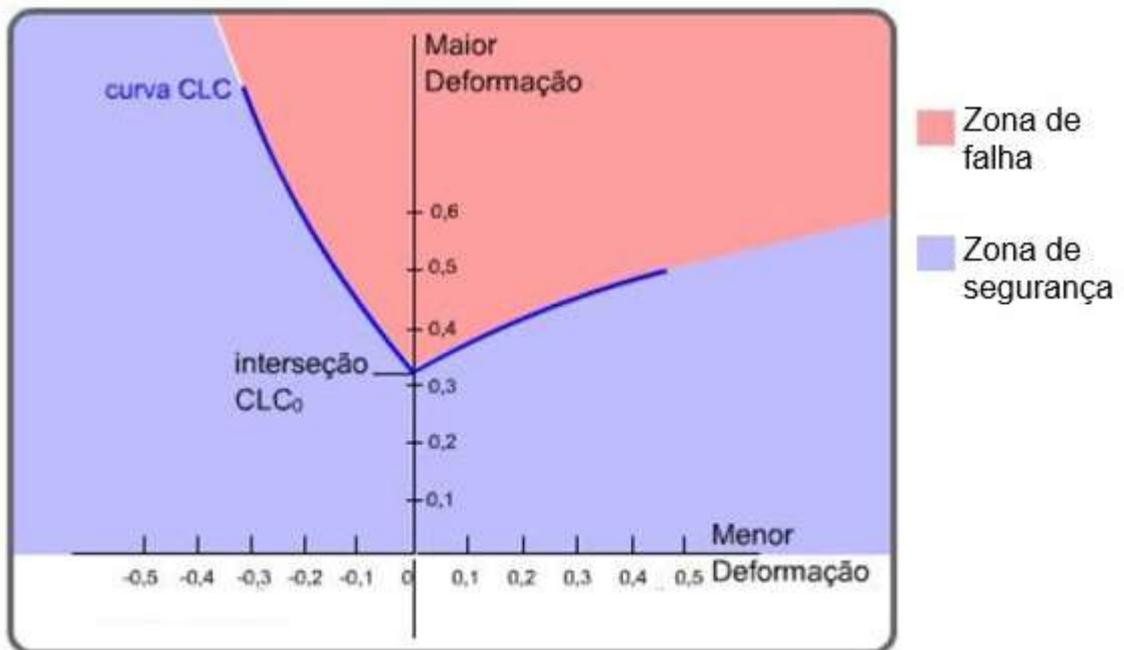


Figura 22: DLC típico com as zonas de segurança e de falha do material.
Adaptado de Grucon (2006) apud Tiburi (2007).

As deformações que ocorrem na chapa podem ser medidas através do procedimento de Análise por Grade de Círculos (*Circle Grid Analysis*), que consiste na gravação de uma grade círculos na superfície do material antes da estampagem; posteriormente a chapa é submetida ao processo de estampagem fazendo com que os círculos se alonguem e se transformem em elipses e em seguida estas elipses são medidas no sentido do eixo da deformação maior e menor (MADEIRA et. al. 2015, FRITZEN, 2016), assim sendo, é possível identificar as distribuições de esforços, e onde as elipses forem maiores, maiores serão as solicitações e riscos de trincas. A Figura 23 ilustra o mecanismo de deformação mostrando um cone estampado pelo processo *ISF* o qual relaciona o diâmetro original da grade de círculos e a elipse formada após o processo de estampagem. Ainda é possível notar na mesma figura uma fratura na parede do cone indicada por seta e que houve formação de elipses na parede enquanto na base inferior (fundo do cone) os círculos permaneceram no tamanho do diâmetro original.

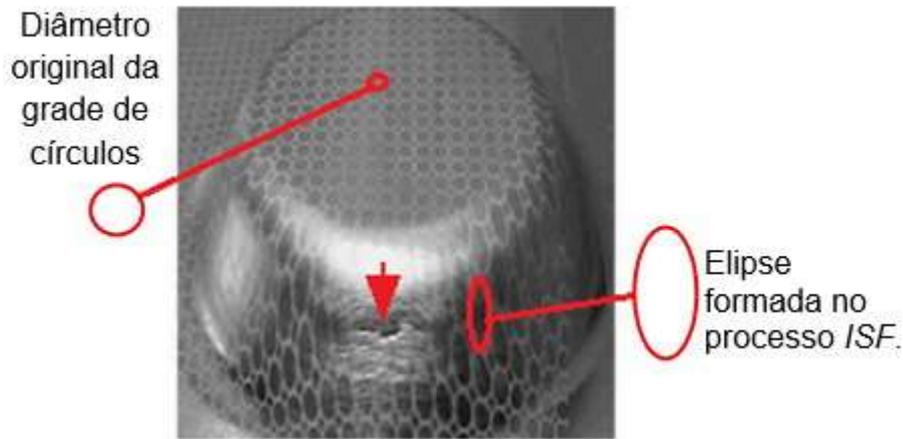


Figura 23: Deformação de círculo para elipse durante o processo *ISF*.
Adaptado de Fratini et al. (2004).

Os ensaios comumente utilizados para caracterizar o material no DLC são o de Nakazima conforme pode ser visto no trabalho de Caldin (2006) e Araújo (2017) e o de Erichsen conforme pode ser visto no trabalho de Tiburi (2007) e Xavier (2014). A norma que estabelece os procedimentos para determinação da CLC é a ASTM E2218-15 que orienta que as elipses devem ser medidas, calculadas e classificadas em função dos valores de maior deformação (e_1) e de menor deformação (e_2) sofridas durante o processo de estampagem utilizando as Equações 3 e 4 a seguir, onde a letra “C” refere-se à medida de comprimento, “L” largura, o subíndice “i” para inicial e “f” para final; na Figura 24 pode-se ver as medidas supracitadas e a classificação do formato final da elipse de acordo com os processos convencionais de estampagem, as linhas tracejadas se referem ao formato original (círculo) e as linhas cheias ao formato final (elipse).

$$\text{Maior deformação} = ((C_f - C_i) / C_i) \cdot 100 = e_1 (\%) \quad (3)$$

$$\text{Menor deformação} = ((L_f - L_i) / L_i) \cdot 100 = e_2 (\%) \quad (4)$$

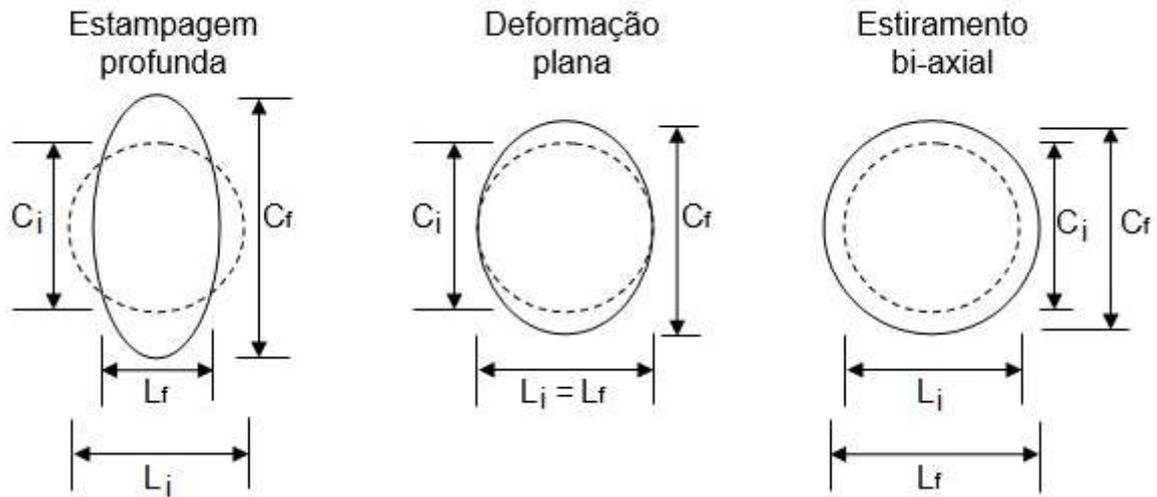


Figura 24: Principais deformações nos processos convencionais de estampagem.

Adaptado de ASTM E2218 – 15 e Xavier (2014).

A localização das zonas características dos processos convencionais de estampagem no DLC é apresentada por setas na Figura 25 que mostra a deformação típica dos principais de processo de estampagem como a estampagem profunda, deformação plana e estiramento bi-axial incluindo a zona característica do ensaio de tração e do processo *ISF*. Nesta figura os círculos em linha pontilhada representam o material antes do processo de estampagem e as elipses em linha cheia o material após o processo de estampagem. Tiburi (2007) cita que nesta figura é possível verificar que a deformação “ e_1 ” está relacionada com o eixo das ordenadas e “ e_2 ” com o eixo das abscissas e que para cada processo de estampagem existe uma relação entre as duas deformações (“ e_1 ” e “ e_2 ”). Para os processos de estampagem profunda é verificado que a deformação “ e_1 ” é positiva (na direção do comprimento) e a deformação “ e_2 ” é negativa na direção da espessura (na direção da largura). A deformação plana caracteriza-se “ e_1 ” ser positivo (na direção do comprimento) e “ e_2 ” ser igual a zero. No estiramento bi-axial as deformações “ e_1 ” e “ e_2 ” são positivas.

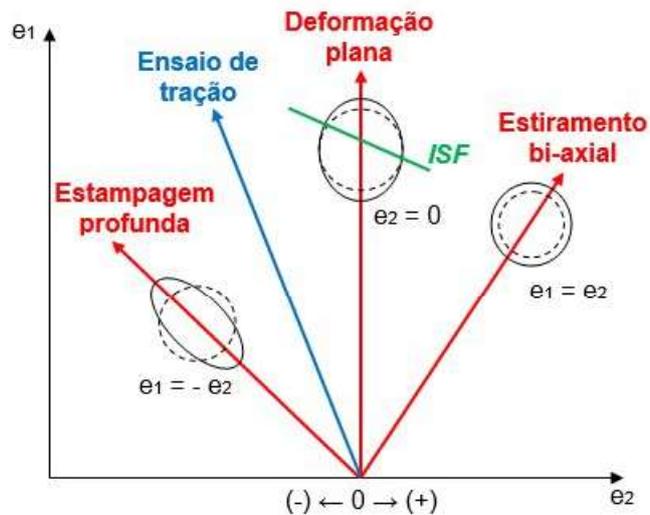


Figura 25: Zonas características por tipo de deformação.
Adaptado de Tiburi (2007), Fritzen (2016) e Xavier (2014).

Segundo Tiburi (2007) o emprego da curva limite de conformação (CLC) permite realizar uma análise das distribuições das deformações em processos de estampagem a fim de otimizar o processo e prever possíveis locais de ocorrência de falhas no componente estampado.

2.5 O Aço Livre de Intersticiais (*Interstitial Free*)

Classicamente, define-se o aço como um liga ferro-carbono com até 2% de carbono sendo este limite associado à máxima solubilidade do carbono no ferro com estrutura cúbica de face centrada (CFC), entretanto a adição de outros elementos de liga altera este limite e permitiu o avanço nos processos de refino para se produzirem aços com teores muito baixos de carbono culminando no desenvolvimento de materiais como o aço IF que possui teores máximos de carbono da ordem de dezenas de partes por milhão (ppm) (COLPAERT, 2008).

O aço IF laminado a frio tem sua origem no Japão em 1960, sendo comercializado a partir de 1977 impulsionado pela indústria automobilística por ter maior estampabilidade em relação aos aços acalmados comuns (FONSECA;

ALVES; LACERDA, 2009). As particularidades deste aço são alto alongamento, baixo limite de escoamento, alto valor do coeficiente de anisotropia normal, baixo valor do coeficiente de anisotropia planar e baixa susceptibilidade ao envelhecimento o que direcionam estes aços a serem especialmente aproveitados nos processos de estampagem (OLIVEIRA, 2010) conforme pode ser visto na Figura 26 que ilustra as peças automotivas que podem ser produzidas com este aço.

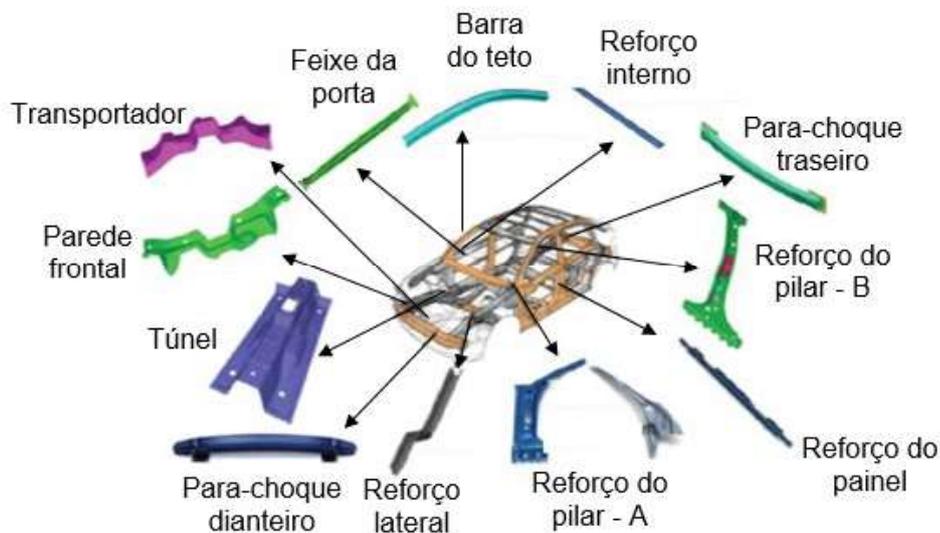


Figura 26: Peças automotivas produzidas a partir do Aço IF.
(PINTO et al., 1992 apud OLIVEIRA, 2010)

A introdução de átomos de soluto em solução sólida numa rede de átomos solventes, invariavelmente, produz uma liga mais forte que o metal puro. Existem dois tipos de solução sólida. Se os átomos de soluto e solvente são aproximadamente similares em tamanho, os átomos de soluto vão ocupar parte da rede cristalina do átomo solvente, sendo chamada então de solução sólida substitucional. Se os átomos de soluto são muito menores que os átomos de solvente, eles ocupam as posições intersticiais na rede cristalina do solvente. Carbono, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e boro são os elementos que comumente formam as soluções sólidas intersticiais (DIETER, 1981).

O aço IF é constituído basicamente de ferro e elementos de liga como silício, manganês, enxofre e titânio. Os átomos desses elementos se difundem na matriz de forma substitucional, na qual um átomo de silício substitui um de ferro na rede

cristalina, ou de forma intersticial, com o átomo de carbono se alojando entre átomos de ferro, ou seja, nos interstícios da rede cristalina. A redução do nível dos solutos intersticiais é feita adicionando-se titânio (Ti) e/ou nióbio (Nb), pois os átomos de carbono que ainda se encontram nos interstícios da rede cristalina do ferro são removidos ou capturados pela adição do titânio, que atua como elemento formador de carbonetos, daí o nome livre de intersticiais (*interstitial free*). Existem três tipos de aço IF: com adição de titânio (IF-Ti), com adição de nióbio (IF-Nb) e com adições de nióbio e titânio (IF-Nb+Ti) (REGONE, 2001).

Silva e Mei (2010) citam que os aços IF possuem teores de carbono e nitrogênio na faixa de 20 a 30 ppm (0,002 – 0,003%) e como os teores de carbono são extremamente baixos, estes aços podem apresentar resistência muito baixa em diversas aplicações. A alternativa neste caso, segundo os autores, são aços IF ligados, principalmente endurecidos ao fósforo, com adição de boro para prevenir fragilização. No Brasil a composição química dos aços para estampagem é normatizada pela ABNT NBR 5915:2013 parte 2.

A adição de elementos de liga quase sempre provoca um aumento na resistência ao deslizamento de discordâncias. Átomos intersticiais possuem uma alta mobilidade pela rede cristalina devido ao seu tamanho reduzido. Se um aço, por exemplo, for deformado a frio e posteriormente aquecido a temperaturas relativamente baixas, por um certo período de tempo, os átomos intersticiais tendem a procurar regiões onde exista mais espaço para que se acomodem. Inevitavelmente, estes átomos atingem as lacunas existentes abaixo das linhas de discordâncias. Desta forma, as discordâncias só conseguem se mover quando uma tensão aplicada a elas puder arrastar consigo os átomos intersticiais ou se elas se desvincularem destes intersticiais. Em ambos os casos, o início do escoamento é retardado para valores mais altos. Uma vez que as discordâncias ancoradas são liberadas e/ou novas discordâncias são criadas, a tensão pode cair abruptamente. Somente quando a maior parte das discordâncias são desvinculadas, o material passa a se comportar “normalmente” (MILAN et al., 2004).

As discordâncias são defeitos lineares e sua movimentação é responsável pela maior parte dos mecanismos de deformação plástica. Sem a presença destes

defeitos os metais seriam frágeis e quebradiços e não poderiam ser conformados nas diversas formas por processos envolvendo deformação. Quando um metal é deformado plasticamente a frio um grande número de discordâncias é gerado, de modo que à medida que a tensão aplicada aumenta mais e mais discordâncias são geradas o que dificulta sua movimentação e conseqüentemente a continuação da deformação plástica ocorrendo um aumento na dureza do material ou da resistência mecânica (MILAN et al., 2004).

Na Figura 27 pode-se ver as propriedades típicas dos modernos aços planos para fabricação de painéis e componentes estruturais sendo possível comparar as características do aço *IF* com outros aços no que diz respeito ao alongamento percentual e ao limite de escoamento. Na figura as siglas “*IF-AR*” refere-se a *Interstitial Free Abrasion Resistant*, “*BH*” refere-se a *Bake Hardening*, “*C-Mn*” refere-se a aços ligados ao manganês, “*ARBL*” refere-se a Aços de Alta Resistência Baixa Liga, “*TRIP*” refere-se a *Transformation Induced Plasticity*, Aço “*DP*” refere-se a *Dual Phase* e “*AA-DQ*” refere-se a *Drawing Quality Steel*. Observando-se a figura conclui-se que os Aços IF apresentam maior alongamento percentual e menor limite de escoamento dos aços apresentados.

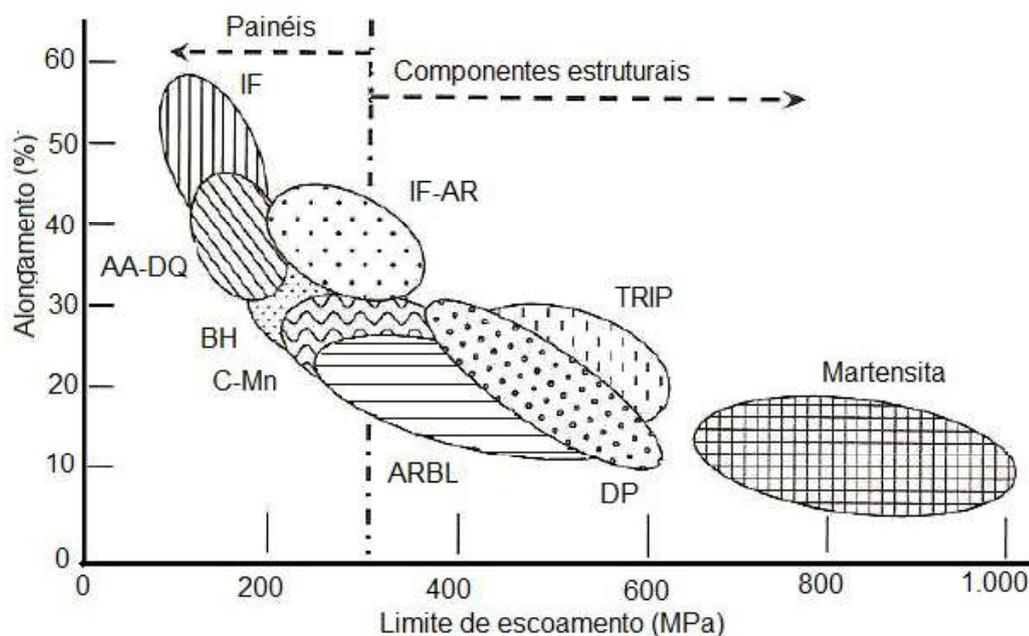


Figura 27: Propriedades dos aços para painéis e componentes estruturais. (SILVA; MEI, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

O material utilizado nos ensaios foi chapa de Aço IF com espessura de 0,6 mm e composição química conforme Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço IF (percentual em peso)

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr
0,0028	0,1130	0,0150	0,0067	0,006	0,028	0,009	0,012
Ni	N	Mo	Ti	Nb	V	Sn	B
0,008	0,0026	0,002	0,037	0,0004	0,002	0,001	0,0001

Brasmetal (2012) apud Gomes (2012).

Na norma ABNT NBR 5915 que estabelece os requisitos das chapas finas de aço-carbono para estampagem o percentual de carbono varia de máximo 0,13% para chapas classificadas como “para estampagem moderada” até no máximo 0,02% para chapas classificadas como “para estampagem extra profunda com aço IF”.

3.1.1 Determinação do Tamanho de Grão

Na análise de micrografia foi determinado o tamanho médio de grão do aço IF. O processo para realização desta análise consistiu em embutir uma amostra do aço IF em baquelite. Após o embutimento as amostras foram preparadas em três etapas, na primeira foi realizado o lixamento com lixas de 400, 600, 800 e 1.200 mesh e limpeza por ultrassom. Na segunda etapa foi realizado o polimento com pasta diamantada de 3 µm e limpeza por ultrassom. Na terceira etapa foi feito o ataque químico com aplicação do reagente Nital 2% sobre as amostras por 25 segundos. Após a preparação foram feitas imagens em regiões distintas das amostras utilizando o microscópio Axio modelo LabA1 com ampliação de 100 vezes.

O programa utilizado para análise do tamanho de grão foi o AxioVs40x64 V 4.9.1.0 (AxioVision) fabricado pela Zeiss. Utilizou-se o módulo de Análise de Grão disponível no programa analisador de imagens. A opção selecionada para análise do tamanho de grão foi o método do intercepto, de acordo com a norma DIN EN 643:2003, ASTM E1382 / ASTM E112. As fronteiras dos grãos foram delimitadas manualmente a fim de se evitar erros na leitura. O tamanho do grão obtido foi o ASTM 5, a partir de 7 imagens analisadas, que conforme norma corresponde ao tamanho médio linear de grão de $\pm 56,6 \mu\text{m}$. Uma amostra da microestrutura do aço IF utilizado neste trabalho com ampliação de 500 vezes pode ser vista na Figura 28.

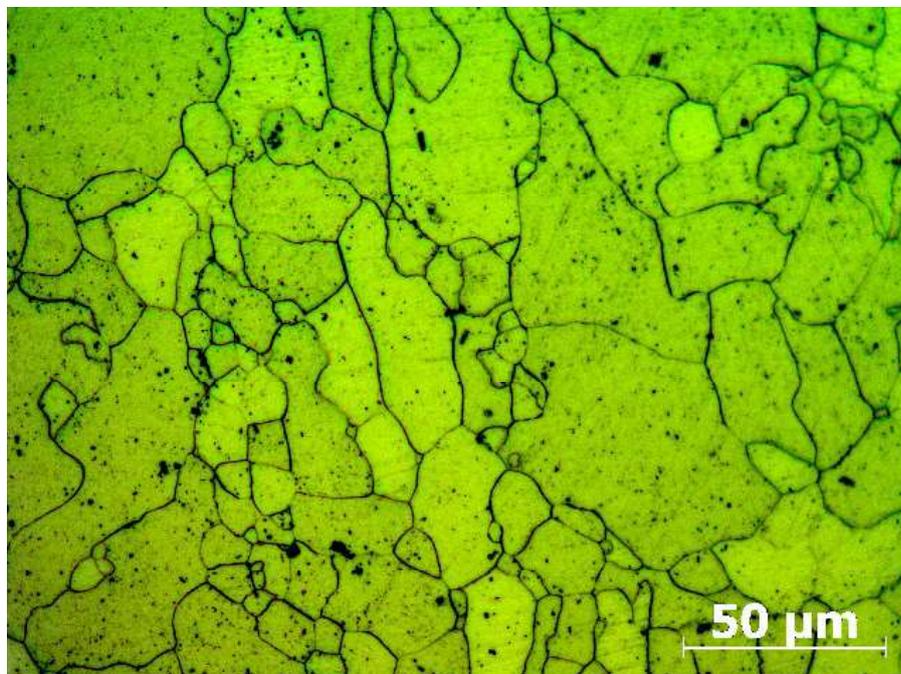


Figura 28: Microestrutura do Aço IF – Ampliação de 500x.

Fonte: Autoria Própria.

3.1.2 Ensaio de Tração

Utilizou-se máquina para o ensaio de tração marca EMIC® modelo DL3000N com capacidade de 300 kN interligada à célula de carga de 300 kN. O controle, gerenciamento e coleta de dados foi realizado pelo programa TESC® versão 3.04 que foi configurado para velocidade de ensaio de 3 mm/min e critério de parada do ensaio automatizado quando a força atingir 40% da força máxima aplicada (colapso).

Foram ensaiados 9 corpos de prova com dimensões e geometria de acordo com a norma ASTM E8 mostrado na Figura 29, sendo 3 corpos de prova cortados a 0°, 3 corpos de prova à 45° e 3 corpos de prova à 90° em relação ao sentido de laminação.

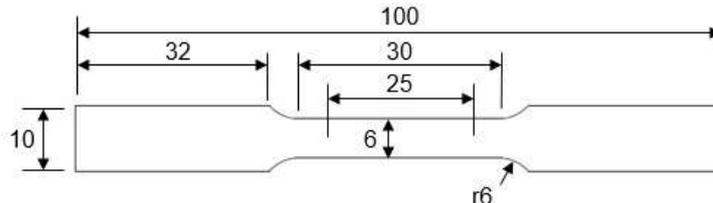


Figura 29: Dimensões em mm do corpo de prova para o ensaio de tração.

Adaptado de ASTM E8.

Os valores médios do ensaio de tração obtidos para cada direção de corpo de prova estão relacionados na Tabela 2 sendo “ σ_e ” tensão de escoamento e “ σ_b ” limite de resistência à tração.

Tabela 2: Valores médios obtidos no ensaio de tração.

Direção	σ_e (MPa)	Alongamento (%)	σ_b (MPa)
0°	83	41	252
45°	108	36	280
90°	104	37	263
Média Geral	98	38	265

Fonte: Autoria Própria.

3.1.3 Determinação da Anisotropia

A fim de avaliar a influência da anisotropia no processo de embutimento de chapas, define-se o coeficiente de anisotropia normal “R” que relaciona as deformações provocadas na largura e na espessura de um corpo de prova submetido à tração. Ao extrair-se corpos de prova orientados a 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação, obtém-se R_{0° , R_{45° e R_{90° , conforme Equação 5. Com esses valores pode-se determinar o coeficiente de anisotropia médio “ R_m ” conforme Equação 6 e o coeficiente de anisotropia planar “ ΔR ” conforme Equação 7

(BARRET; MASSALSKI, 1966; BRESCIANI, 2011; DIETER, 1981; REED-HILL, 1982; HONEYCOMBE, 1984 apud BUTTON, [s.d.]).

$$R = \ln (L_i / L_f) / \ln (E_i / E_f) \quad (5)$$

Sendo “L_i” largura inicial, “L_f” largura final, “E_i” espessura inicial e “E_f” espessura final.

$$R_m = (R_0 + 2 \cdot R_{45} + R_{90}) / 4 \quad (6)$$

$$\Delta R = (R_0 + R_{90} - 2 \cdot R_{45}) / 2 \quad (7)$$

Os coeficientes calculados são apresentados na Tabela 3 e estão conforme norma ASTM E517-18. Segundo Bresciani Filho et al. (2011) para se chegar a uma melhor condição de estampabilidade, deve-se procurar obter na fabricação da chapa por laminação valores elevados de anisotropia normal média (R_m) e valores baixos para a anisotropia planar (ΔR). Com os dados obtidos conclui-se que o aço IF, objeto deste estudo, possui características adequadas ao processo de estampagem.

Tabela 3: Anisotropia do aço IF pelo ensaio de tração.

Direção	R	R _m	ΔR
0°	3,66	5,80	-2,67
45°	7,14		
90°	5,27		

Fonte: Autoria Própria.

3.1.4 Determinação da Dureza

A determinação da dureza do aço IF foi realizada conforme norma ASTM E10 por meio do ensaio utilizando durômetro marca EMCO-TEST Duravision. Foram realizadas 4 medições em regiões distintas, sendo obtido o valor médio de 111 HB.

3.2 Equipamentos e Ferramental

3.2.1 Punção

O punção utilizado neste trabalho foi fabricado a partir de uma barra redonda de aço SAE-4340 com diâmetro de 25,4 mm x 150 mm de comprimento, temperado e revenido até a dureza 45 HRC. O punção projetado tem ponta em formato hemisférico com diâmetro de 5,9 mm. A geometria do corpo do punção foi baseada no trabalho de Tiburi (2007) e levou em consideração a rigidez necessária para suportar os esforços durante o processo de estampagem e a profundidade máxima que a ponta do punção deve atingir ao estampar a peça. Nesta condição, o punção preso à pinça e ao porta-ferramentas do centro de usinagem CNC, deve estar livre de interferências com o conjunto prensa-chapa e com a parede da peça de modo a garantir que somente a ponta do punção esteja em contato com a superfície a ser estampada. Na Figura 30 pode-se ver as dimensões e o formato final do punção.

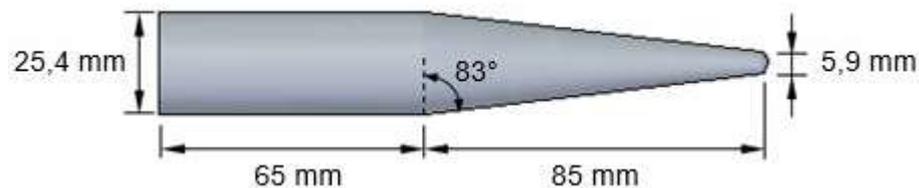


Figura 30: Dimensões e formato final do punção.

Fonte: Autoria Própria.

3.2.2 Prensa-chapa

O prensa-chapa utilizado possui dimensões de 300 x 300 x 100 mm (comprimento x largura x altura). Sua estrutura física é composta de dois perfis “U” paralelos ao longo das laterais, interligados entre si por cantoneiras metálicas formando um conjunto rígido para suporte da chapa. No prensa-chapa os dispositivos de fixação superior e inferior são divididos em 4 áreas de estampagem quadradas, iguais e vazadas com dimensões internas de 105 x 105 mm, simetricamente espaçadas entre si, das quais somente duas áreas serão ocupadas pela chapa de aço IF durante os experimentos conforme Figura 31.

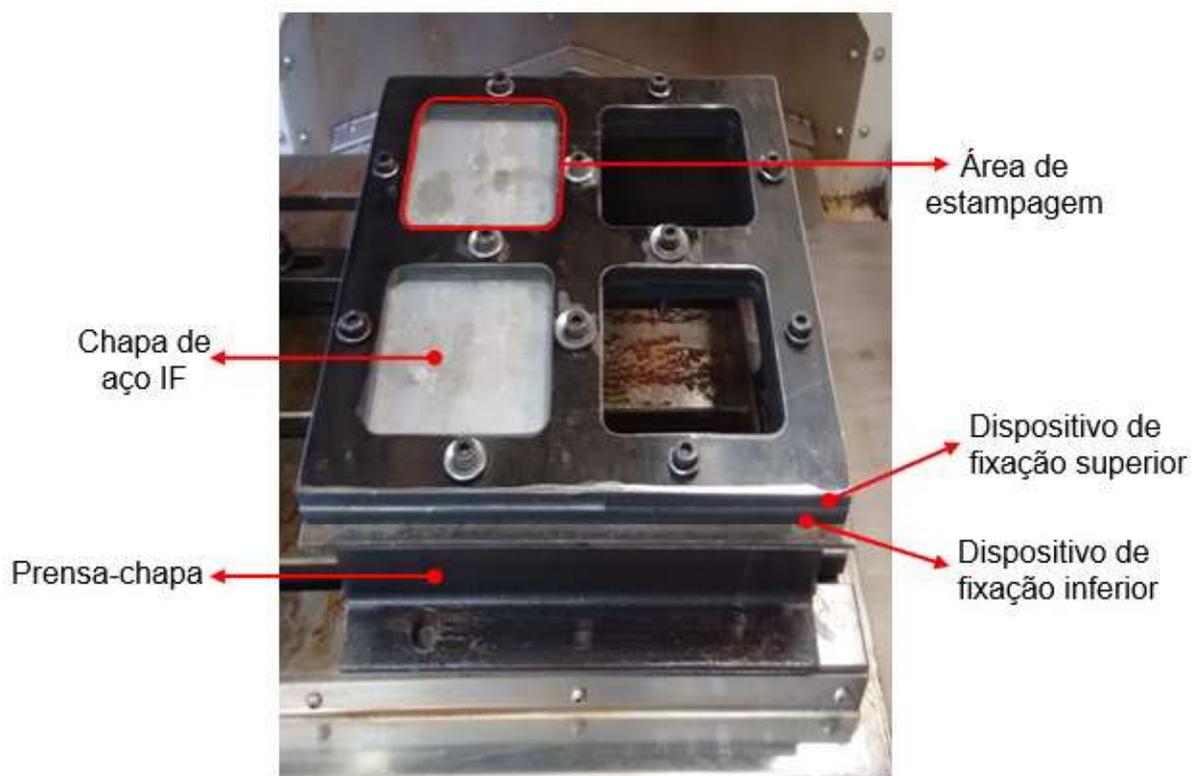


Figura 31: Conjunto prensa-chapa.

Fonte: Autoria Própria.

3.2.3 Centro de Usinagem

O centro de usinagem CNC de 3 eixos modelo MV-760-ECO da Veker, Figura 32, foi utilizado para realização dos experimentos.



Figura 32: Centro de usinagem CNC de 3 eixos.

Fonte: Autoria Própria.

3.2.4 Equipamento para Marcação Eletroquímica

O sistema de marcação de metais da Tecnigrav modelo RB 200 Super foi utilizado neste trabalho para realizar a marcação de círculos com 2,5 mm de diâmetro na superfície da chapa de aço IF por meio de reação eletroquímica. O sistema é composto pelo módulo eletrônico RB200, carimbo eletroquímico em formato de rolo, placa de contato, papel de gravação, líquidos de gravação e neutralização e cabos de interligação, conforme pode ser visto na Figura 33 sendo a) equipamentos e b) líquidos de gravação.



Figura 33: Sistema de marcação de metais Tecnigrav.

Fonte: Autoria Própria.

3.3 Métodos

O planejamento experimental deste trabalho é apresentado nas etapas mostradas no fluxograma da Figura 34 baseado nos métodos propostos por Hirt et al. (2004), Jeswiet et al. (2005) e Kumar e Kumar (2015).

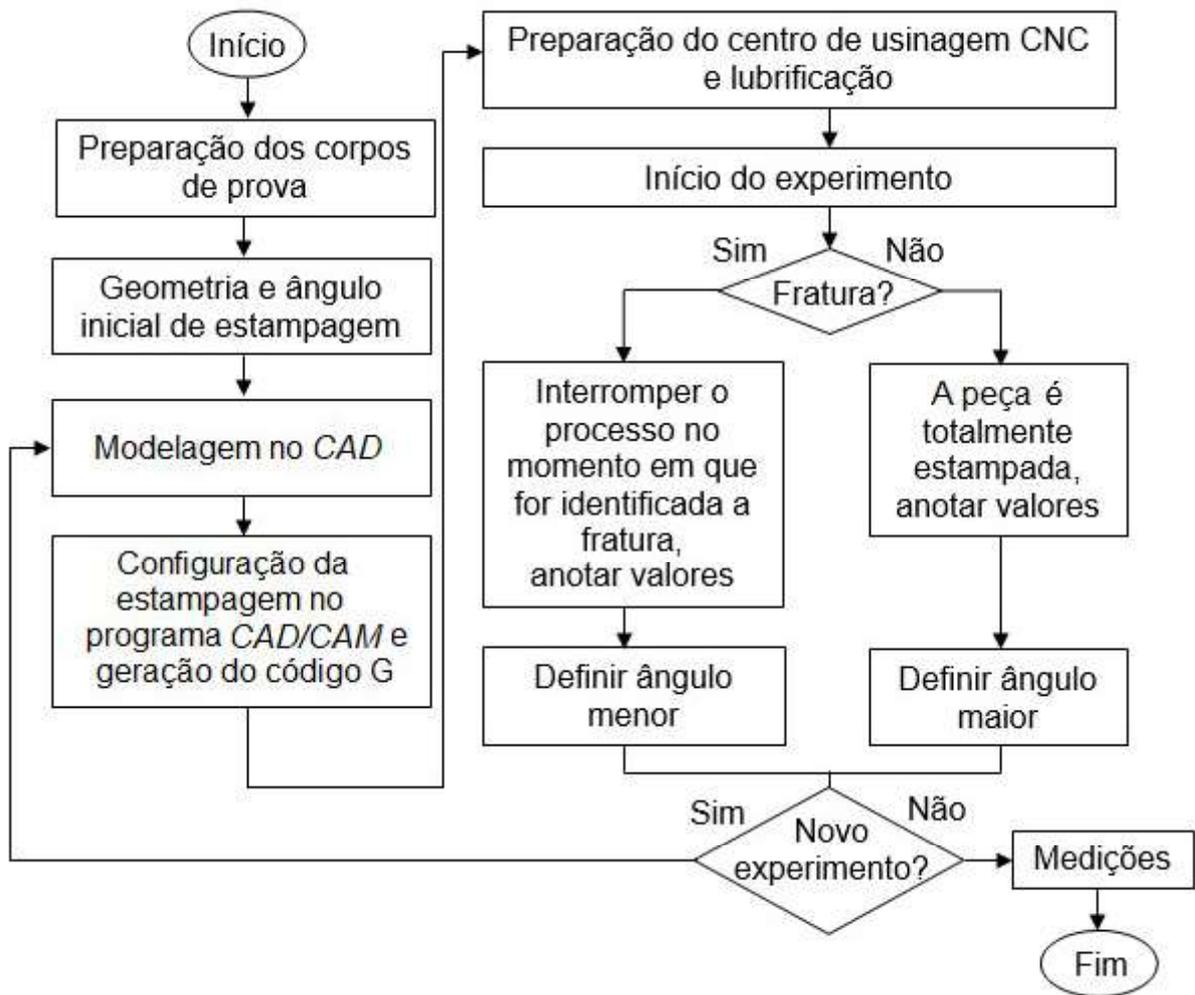


Figura 34: Fluxograma do processo de estampagem incremental de um ponto.

Fonte: Autoria Própria.

A forma geométrica escolhida para o experimento é o cone pois está consolidado em experimentos do processo *ISF* conforme pode ser verificado nos trabalhos de Martins et al. (2009), Malwad e Nandedkar (2014) e Jeswiet et al. (2015). O cone de cada experimento tem diâmetro da base superior fixo em 90 mm pois foi limitado pelas dimensões da área de estampagem 105 x 105 mm possuindo

folga nas laterais para que o punção não tenha interferência com o prensa-chapa. O diâmetro mínimo da base inferior foi calculado com o dobro do diâmetro da ponta do punção respectivamente 11,8 mm para garantir que o punção possa realizar o contorno da estampagem na profundidade máxima da peça. A profundidade máxima projetado para o cone é de 107,15 mm devido a limitação de altura entre o prensa-chapa e a mesa da máquina CNC. Na Figura 35 pode-se ver em a) o cone modelado em CAD com as principais dimensões e em b) os limites da geometria da peça com relação à profundidade máxima.

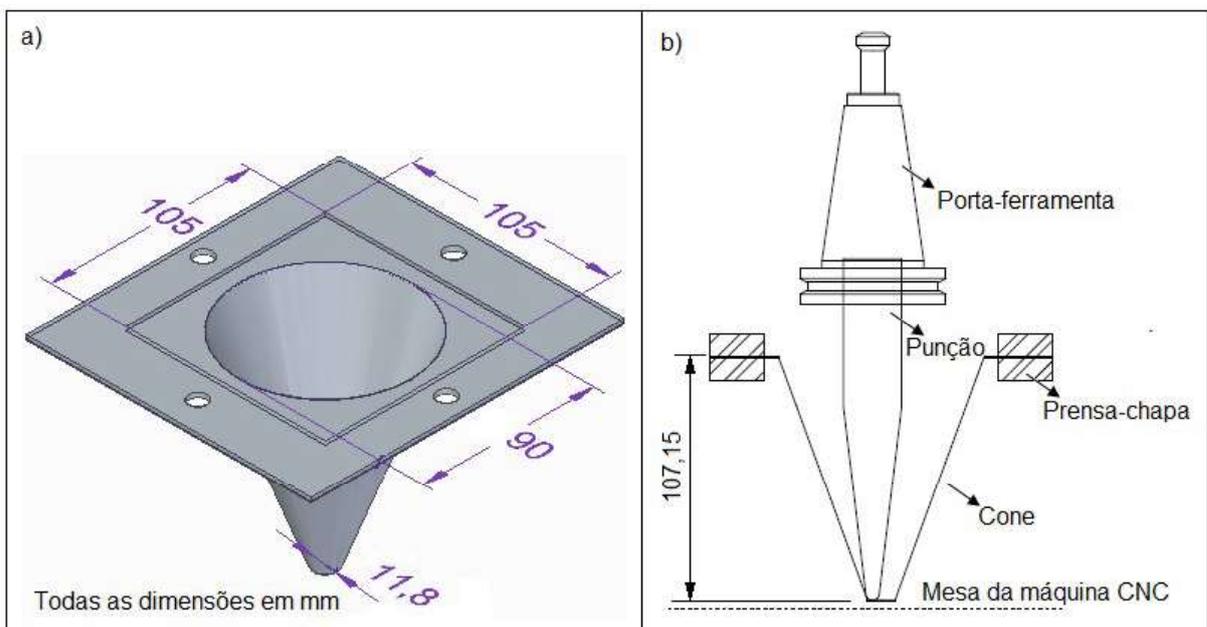


Figura 35: Cone em a) geometria e dimensões e b) limites da geometria da peça e o comportamento do punção na profundidade máxima da peça.

Fonte: Autoria Própria.

Segundo Jeswiet et al. (2005) e Ham e Jeswiet (2007) a estampabilidade no processo *ISF* é quantificada em função do ângulo máximo de parede em relação ao plano horizontal em que o material pode ser trabalhado antes de falhar; deste modo vários testes são realizados, cada um com um ângulo de parede maior do que o anterior, até que a peça sofra uma fratura. A cada novo experimento é alterado o ângulo “ θ ” da parede do cone, que por sua vez determina a profundidade máxima de estampagem limitada pela distância entre o prensa-chapa e a mesa do centro de usinagem CNC.

O ângulo (θ) inicial de estampagem adotado para o primeiro experimento é de 70° definido a partir do trabalho de Golabi e Khazaali (2014) que realizou testes em aço inox 304 com espessuras de 0,3 a 1,0 mm e ângulos de 63° , 68° , 73° , 78° e 84° . A partir desta definição é feito o incremento ou diminuição do ângulo de parede em função do surgimento ou não de fraturas na peça. Os primeiros experimentos são planejados com o incremento ou diminuição de 10° a partir do ângulo de partida até a obtenção de dois experimentos consecutivos um com fratura e outro sem; assim no experimento 1 o cone tem ângulo de 70° e caso sofra fratura no experimento 2 o cone terá ângulo de 60° ou caso não sofra fratura o cone terá ângulo de 80° . A partir da obtenção de dois experimentos consecutivos, um com fratura e o outro sem, os próximos ângulos são planejados como a metade da diferença dos ângulos entre os dois cones somado ao ângulo do cone que não fraturou.

Deste modo, no experimento 1 o ângulo adotado é de 70° , caso não frature no experimento 2 o ângulo será de 80° e caso frature o experimento 2, o experimento 3 será a metade da diferença entre 70° e 80° somado ao ângulo do cone que não fraturou (70°); desta forma o experimento 3 será com ângulo de parede 75° e assim sucessivamente.

3.3.1 Programa para Modelagem da Geometria

O programa Solid Edge® da Siemens© foi utilizado neste trabalho para modelagem CAD do cone. Um cone com ângulo inicial de parede 70° , base superior de 90 mm de diâmetro, base inferior de 11,8 mm de diâmetro e profundidade de 107,15 mm, conforme pode-se ver na Figura 35, foi modelado para servir de matriz para os experimentos. Os cones dos demais experimentos foram modelados alterando-se apenas o valor do ângulo de parede, obtendo-se desta forma uma nova profundidade e nova dimensão de base inferior com no mínimo 11,8 mm de diâmetro.

3.3.2 Programa CAD/CAM

O programa Esprit® da DP Technology© foi utilizado neste trabalho para configuração dos parâmetros de estampagem do cone por intermédio do recurso CAD/CAM. Um arquivo do Esprit® contendo todos os parâmetros estabelecidos para os experimentos foi configurado para servir de matriz. A partir deste arquivo, para cada novo experimento, foi feita uma nova cópia importando o modelo 3D do cone feito no Solid Edge® e mantendo-se os parâmetros pré-estabelecidos do arquivo matriz. Após a configuração do processo de estampagem foi gerado um arquivo com linguagem de programação em código G que é responsável pelo comando do centro de usinagem CNC.

Os parâmetros do processo *ISF* deste trabalho configurados no Esprit® foram baseados principalmente no trabalho de Mcanulty, Jeswiet e Doolan (2017) que realizaram um estudo do estado da arte nos processos *ISF* e relacionaram os principais valores utilizados pelos pesquisadores da área. Os valores da velocidade de avanço (v), rotação (ω), incremento do passe vertical (ΔZ) e tipo de trajetória do punção foram fixados, ou seja, não variaram de experimento para experimento e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Valores dos parâmetros estabelecidos para todos os experimentos.

Parâmetro	Valores
Velocidade de avanço da ferramenta (v)	1.500 mm/min.
Rotação do fuso (ω)	50 rpm
Incremento do passe vertical (ΔZ)	0,5 mm
Tipo de trajetória da ferramenta	Contínua direta

Fonte: Autoria Própria.

3.3.3 Preparação dos Corpos de Prova

Para realização dos experimentos do processo *ISF* foram cortados corpos de prova com dimensões de 300 x 160 mm (comprimento x largura) possibilitando a estampagem de dois cones em cada corpo de prova.

Em seguida, os corpos de prova foram submetidos ao processo de gravação eletroquímica de grade de círculos, processo esse que tem sido amplamente utilizado nos estudos de comportamento da deformação dos materiais submetidos ao processo *ISF* como pode ser visto no trabalho de Filice, Fratini e Micari (2002), Martins et al. (2009) e Madeira et al. (2015).

O processo de marcação eletroquímica consiste em: i) preparar a superfície dos corpos de prova efetuando a limpeza para remover eventuais incrustações de pó e oleosidades; ii) colocar os corpos de prova sobre a placa de contato dentro de um recipiente limpo; iii) ligar o carimbo eletroquímico e a placa de contato ao módulo eletrônico; iv) selecionar o tipo de gravação (clara ou escura); v) colocar o papel de gravação sobre a chapa; vi) embeber o carimbo eletroquímico no líquido de gravação; vii) ligar o módulo eletrônico e manualmente rolar o carimbo sobre o papel de gravação de um lado para o outro durante 3 segundos e viii) finalizar o processo com a aplicação do líquido neutralizador sobre a área marcada dos corpos de prova.

3.3.4 Preparação do Centro de Usinagem e Lubrificação da Chapa

A preparação do centro de usinagem consistiu na configuração e instalação do punção no magazine e fixação do prensa-chapa na mesa da máquina. O corpo de prova e os dispositivos de fixação superior e inferior são presos ao prensa-chapa por doze parafusos M8 para garantir total fixação.

O programa Esprit® gerou um arquivo em código “G” para cada experimento que foi carregado no controlador da máquina. Por último foi aplicado lubrificante sobre o corpo de prova para diminuir o atrito com a ponta da ferramenta. O óleo utilizado para a lubrificação foi o ISO 68 Capella da Texaco®.

3.3.5 Medição de Espessuras e das Elipses

Para o corte dos corpos de prova no sentido longitudinal da chapa passando pelo centro geométrico de cada cone foi utilizada a máquina de eletroerosão marca Charmilles modelo Robofil 310 a fim de que seja possível realizar a medição da

espessura na parede do corpo de prova. Na borda da parede do cone cortado de cada experimento foram marcados pontos de medição espaçados em 5 mm desde a base superior até a inferior; um micrômetro analógico de ponta arredondada marca Mitutoyo com precisão 0,01 mm foi utilizado para realizar as medições baseado no procedimento utilizado por Fritzen (2016). Na Figura 36 pode-se ver um corpo de prova com dois experimentos cortados pela máquina de eletroerosão e a marcação dos pontos na parede do cone para medição da espessura. A medição de todos os corpos de prova foi feita da base superior para a inferior.

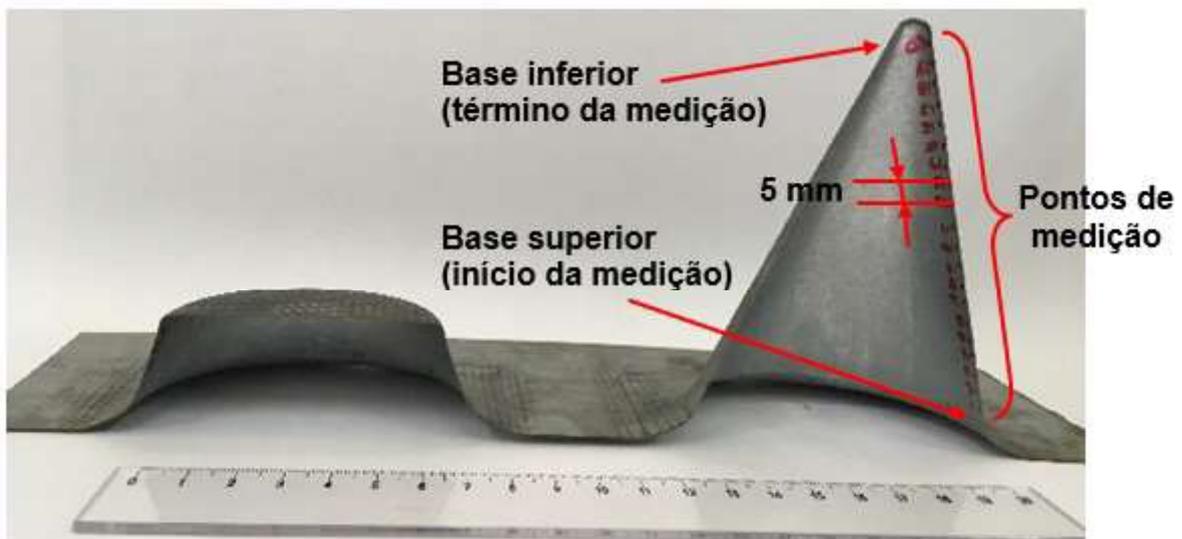


Figura 36: Corpo de prova cortado e pontos de medição.

Fonte: Autoria Própria.

O processo de medição das elipses para a confecção do Diagrama Limite de Conformação do Aço IF foi realizado conforme orientações da norma ASTM E2218 – 15 que estabelece os critérios do Método de Teste Padrão para Determinar as Curvas Limite de Conformação.

Na primeira etapa deste processo foi definida a região de medição das elipses dos cones de cada corpo de prova. A região definida se localiza no entorno das elipses que apresentaram fratura decorrente do processo *ISF*. Na segunda etapa as elipses que estão dentro da região de medição foram numeradas no próprio corpo de prova. Na terceira etapa foram feitas as imagens de cada elipse numerada, utilizando-se um microscópio digital USB; também faz parte de cada imagem uma

régua transparente com escala padrão em milímetros sobreposta à elipse medida. Na quarta etapa as imagens de cada elipse foram carregadas no programa ImageJ® da Wayne Rasband National Institute of Health versão 1.51n, que possibilitou realizar as medidas de comprimento final (C_f) e largura final (L_f) conforme esquema da Figura 24. O ajuste da escala do programa foi feito utilizando-se a escala da régua. As medidas foram realizadas levando-se em consideração o contorno interno da elipse conforme pode-se ver na Figura 37 a medição da elipse número 2 no ImageJ®.



Figura 37: Medição das elipses no ImageJ®.

Fonte: Autoria Própria.

Na quinta etapa cada elipse foi classificada segundo os critérios “bom”, “marginal” ou “falha” a fim de se determinar a Curva Limite de Conformação (CLC) conforme a norma ASTM E-2218 – 15 que classifica como elipse “Bom” aquela localizada totalmente fora da região de fratura; elipse “Marginal” aquela localizada às margens da fratura e elipse “Falha” aquela localizada na fratura. Na Figura 38 é possível se ver um exemplo da classificação das elipses, sendo a elipse 17 classificada como “Falha” pois a fratura está dentro do entorno da elipse, elipse 21 classificada como “Marginal” pois está ao lado da elipse 17 (às margens da elipse fraturada) e a elipse 24 classificada como “Bom” pois está totalmente fora da região de fratura.

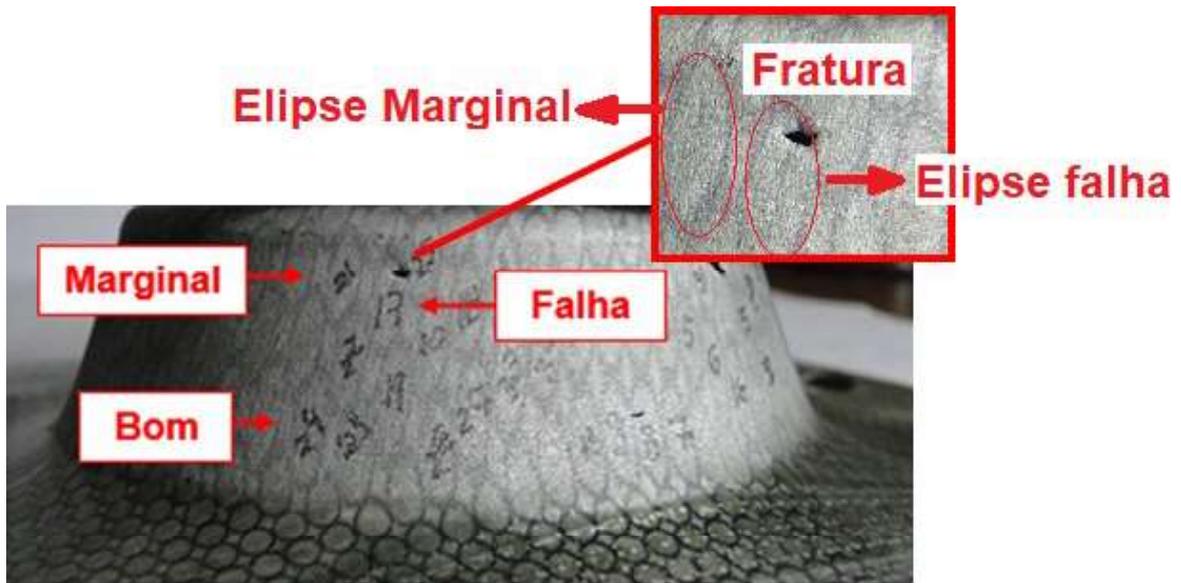


Figura 38: Classificação das elipses conforme ASTM E2218 – 15.

Fonte: Autoria Própria.

Na sexta e última etapa foram calculados os percentuais dos valores da maior e menor deformação (e_1 , e_2) de cada elipse conforme equações 3 e 4 para posteriormente gerar-se o gráfico do Diagrama Limite de Conformação. Uma linha de tendência intitulada de Curva Limite de Conformação (CLC) foi colocada no DLC a partir das elipses classificadas como “Marginal” dividindo-o em duas regiões: de estampagem segura (abaixo da CLC) e não segura (acima da CLC).

3.3.6 Ensaio de Nakazima

Tradicionalmente o ensaio de Nakazima é realizado para fornecer informações dos limites de estampabilidade de um dado material. Neste trabalho além de caracterizar o aço IF os dados deste ensaio serviram como parâmetros de comparação com os resultados obtidos no processo *ISF*. Desta forma julgou-se adequado a inclusão tanto da metodologia do ensaio de Nakazima quanto dos valores obtidos dentro deste item.

O ensaio de Nakazima consiste basicamente em estampar um corpo de prova preso a uma matriz com abertura circular utilizando um punção hemisférico de modo

a submeter o material a um estado de deformações similares às encontradas nos processos de embutimento e estiramento (CALDIN, 2006). O dispositivo para o teste Nakazima é composto por punção, calços de fixação e matriz que são montados em uma máquina universal de ensaios. Na Figura 39 pode-se ver na base inferior de uma máquina universal de ensaios um corpo de prova montado no dispositivo para o ensaio de Nakazima. As dimensões do dispositivo e do punção são informadas no Anexo 01.

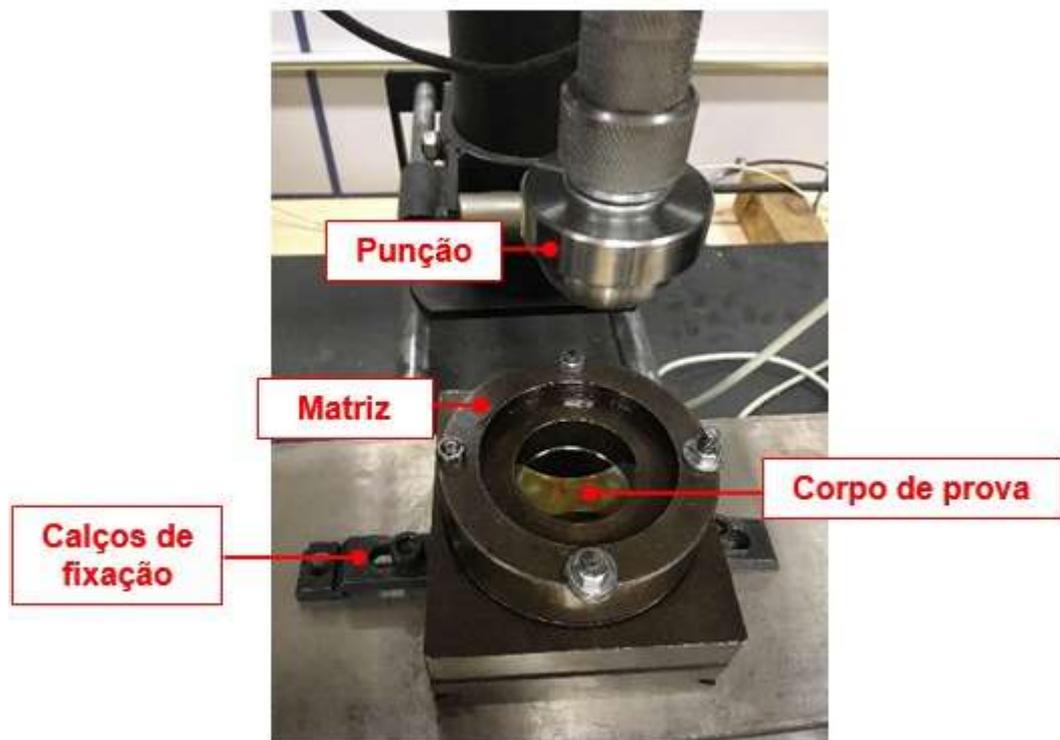


Figura 39: Conjunto de teste de Nakazima.

Fonte: Autoria Própria.

A máquina utilizada no ensaio de Nakazima foi a EMIC® modelo DL30000N com capacidade de 300 kN interligada à célula de carga de 300 kN. O controle, gerenciamento e coleta de dados foi realizado pelo programa TESC® versão 3.04 que foi configurado para velocidade de ensaio de 10 mm/min e critério de parada do ensaio automatizado quando a força atingir 40% da força máxima aplicada (colapso). O óleo utilizado para a lubrificação entre o punção e o corpo de prova foi o ISO 68 Capella da Texaco®.

Foram ensaiados 5 corpos de prova de aço IF, cada qual, com dimensões e formatos geométricos baseados no trabalho de Araújo (2017). Os corpos de prova foram cortados em uma máquina de eletroerosão a fio marca Charmilles modelo Robofil 310 e submetidos ao processo de marcação da grade de círculos. Na Figura 40 pode-se ver os formatos geométricos e as dimensões dos corpos de prova marcados com a grade de círculos; “r” refere-se a raio e “d” a diâmetro.

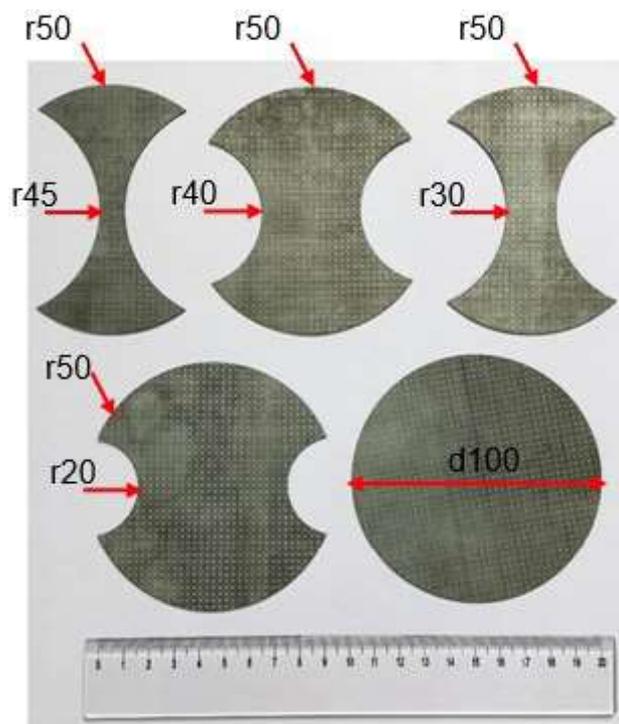


Figura 40: Dimensões e formatos dos corpos de prova do ensaio de Nakazima.

Fonte: Autoria Própria.

Na primeira etapa para a realização do ensaio o punção foi instalado na célula de carga da máquina. Posteriormente a matriz foi posicionado na base da máquina e alinhada com o punção de modo a se evitar contato entre os dois. Depois de alinhada, a matriz é fixada à base da máquina com o uso dos calços de fixação. Em seguida, o corpo de prova é montado no dispositivo e foi feita a aproximação do punção e da matriz sem que haja contato com o corpo de prova. A partir deste ponto foi feita a lubrificação sobre o corpo de prova e o ensaio pode ser iniciado.

Dos cinco corpos de prova ensaiados apenas o de raio 20 mm não fraturou e devido a dificuldades operacionais na fabricação e teste não foi realizado outro ensaio o que não comprometeu a análise final do experimento. Na Figura 41 pode-se ver os corpos de prova ensaiados com a indicação dos respectivos raios (r) e diâmetro (d) nas setas.

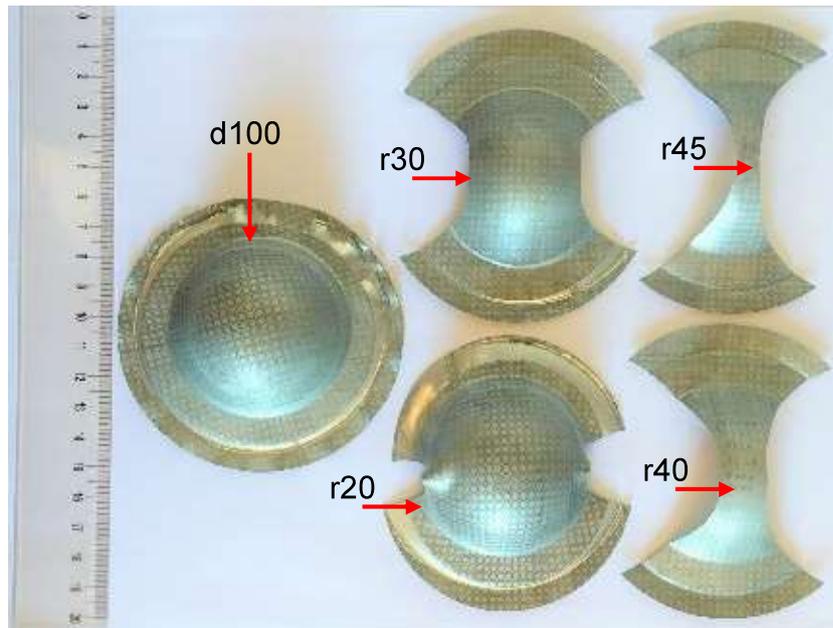


Figura 41: Corpos de prova ensaiados.

Fonte: Autoria Própria.

Foram analisadas, em todos corpos de prova, as elipses da região de medição classificadas em bom, marginal ou falha. O contorno das elipses do corpo de prova de $r45$ mm (corpo de prova com a menor largura) não ficaram nítidas devido ao alongamento do material durante o ensaio, o que impossibilitou a medição de um número maior de elipses. Como o corpo de prova $r20$ mm escorregou durante o ensaio, não houve fratura e, portanto, nem elipses Marginal e Falha. Na Tabela 5 pode-se ver a quantidade e classificação das elipses analisadas por corpo de prova.

Tabela 5: Quantidade e classificação das elipses do ensaio de Nakazima.

Corpo de prova	Quantidade de elipses medidas		
	Bom	Marginal	Falha
r20	4	-	-
r30	4	4	4
r40	4	4	4
r45	-	3	-
d100	4	4	4
TOTAL	16	15	12

Fonte: Autoria Própria.

Os valores médios de “e₁” e “e₂” dos corpos de prova para cada classificação de elipse são apresentados na Tabela 6. Os valores medidos são apresentados no Anexo 02.

Tabela 6: Nakazima - Valores médios percentuais dos alongamentos.

Classificação da elipse	e ₁ (%)	e ₂ (%)
Bom	-3	-20
Marginal	9	-27,5
Falha	20	-24,5

Fonte: Autoria Própria.

O DLC foi elaborado a partir dos valores de “e₁” e “e₂” de cada elipse e sua respectiva classificação conforme pode ser visto na Figura 42. A CLC foi elaborada por meio do recurso de previsão linear do Origin® baseada nos dados de “e₁” e “e₂” das elipses “Marginal” de todos os corpos de prova definindo a zona de segurança para estampagem que está localizada abaixo da CLC na região de concentração de pontos do tipo “Bom”; e a zona de falha para estampagem que está localizada acima da CLC na região de concentração de pontos do tipo “Falha”.

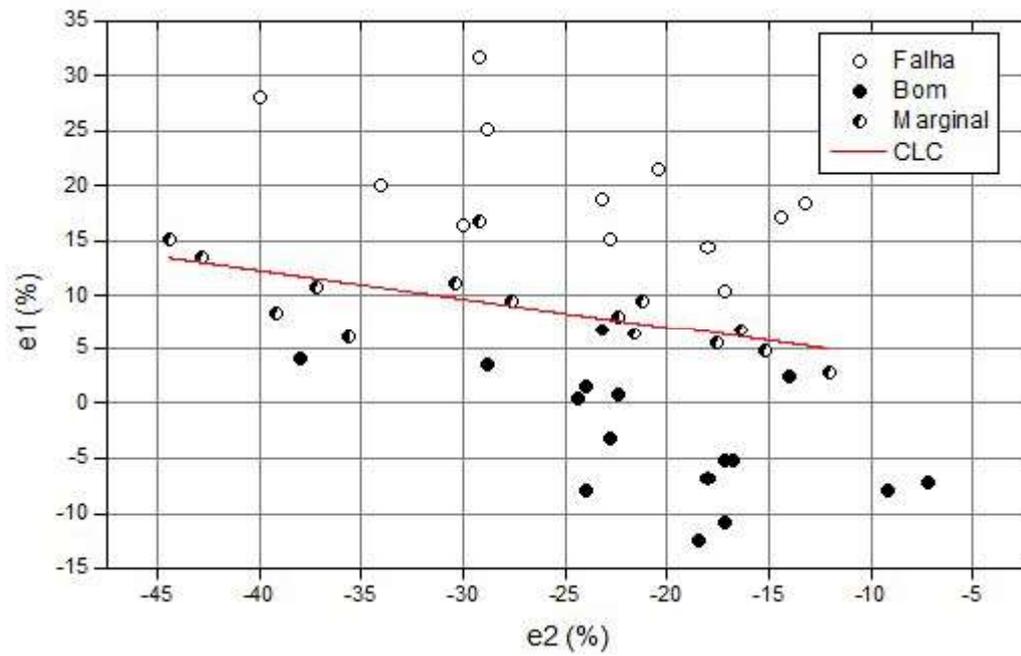


Figura 42: Diagrama Limite de Conformação do ensaio de Nakazima.

Fonte: Autoria Própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Relação entre a Profundidade do Cone e o Ângulo de Parede

Inicialmente deve-se salientar que não foi encontrada na literatura metodologia para identificação de ocorrência de fraturas na chapa no momento em que ela ocorre durante a execução do processo *ISF* no centro de usinagem. O método definido para este trabalho baseou-se em cuidadosa observação visual durante toda a execução do processo de estampagem. Foi possível identificar de três modos a ocorrência de fraturas no momento em que elas ocorrem: i) acompanhando-se o movimento do punção sobre a chapa quando o observador identifica visualmente o momento em que ocorre a fratura (inspeção visual); ii) identificando-se o momento em que a chapa fratura pela ocorrência de um ruído característico (ruído de cisalhamento) e iii) observando-se se há lubrificante vazando do corpo de prova para a mesa do centro de usinagem (vazamento do lubrificante).

No momento em que é identificada a fratura na chapa o observador deve colocar o avanço da máquina imediatamente em zero e anotar a profundidade que o punção atingiu até aquele momento no eixo Z e outras informações julgadas necessárias. Estes valores são mostrados na tela do centro de usinagem.

Foram necessários 8 experimentos para se obter o ângulo limite de estampabilidade, objetivo deste trabalho, realizados conforme a metodologia e parâmetros pré-estabelecidos. As variáveis dos experimentos e os dados coletados estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados dos experimentos.

Experim.	Ângulo planejado no CAD (θ)	Profundidade máxima planejada no cone	Houve fratura?	Tipo de fratura	Profundidade medida no processo ISF
1	70°	107,15 mm	Não	-	107,15 mm
2	80°	107,15 mm	Sim	Cisalhamento horizontal	11,07 mm
3	75°	107,15 mm	Sim	Cisalhamento horizontal	12,07 mm
4	72,5°	107,15 mm	Sim	Cisalhamento horizontal	13,61 mm
5	71,25°	107,15 mm	Sim	Cisalhamento horizontal	15,30 mm
6	67,5°	94,15 mm	Não	-	94,15 mm
7	70,625°	107,15 mm	Sim	Orifícios	28,55 mm
8	70,3125°	107,15 mm	Não	-	107,15 mm

Fonte: Autoria Própria.

Do experimento 1 ao 5 foi seguida a metodologia experimental proposta no item 3.3. O experimento 6 foi realizado para se confirmar a não fratura do experimento 1. Os experimentos 7 e 8 novamente seguiram a metodologia proposta. Na Figura 43 pode-se ver os croquis dos planejamentos CAD das geometrias de todos os experimentos realizados com indicação dos valores do ângulo de parede planejado, profundidade máxima planejada e da base inferior do cone. Os experimentos que estão sem indicação de valores nos croquis têm profundidade máxima de 107,15 mm (limitada pela mesa da máquina CNC) e diâmetro mínimo da base inferior de 11,8 mm (limitado pelo diâmetro do punção).

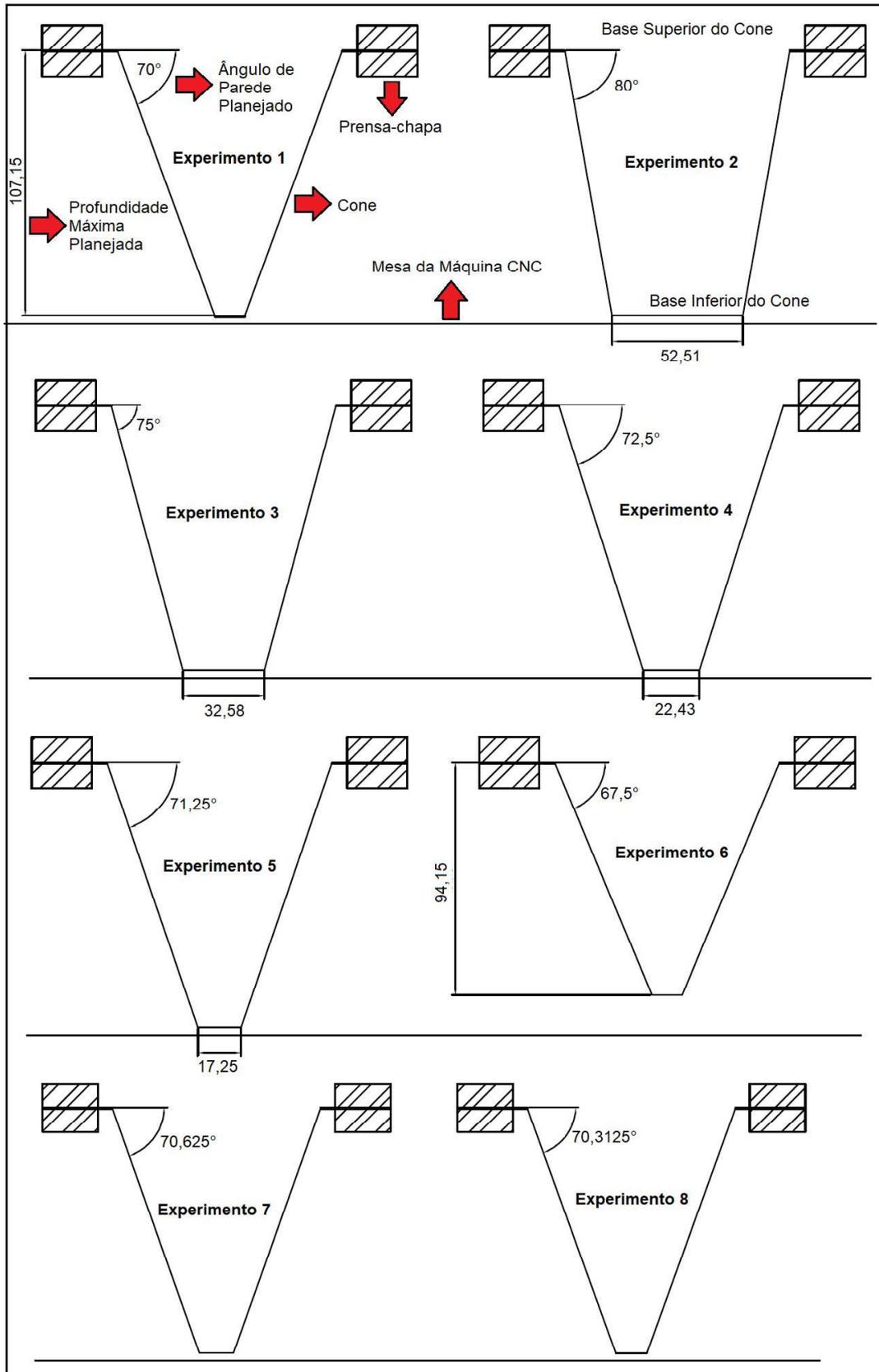


Figura 43: Croquis planejados em CAD para os experimentos realizados.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 44 pode-se ver os cones do experimento 1 e 6, respectivamente com ângulos de parede planejados de 70° e $67,5^\circ$. Não houve fratura e as peças foram estampadas até a profundidade máxima planejada de 107,15 mm para o cone do experimento 1 e 94,15 mm para o cone do experimento 6. A diferença de profundidade entre o cone de 70° e o $67,5^\circ$ foi devido ao fato de que quanto mais próximo o ângulo de 90° maior a profundidade possível de ser atingida.

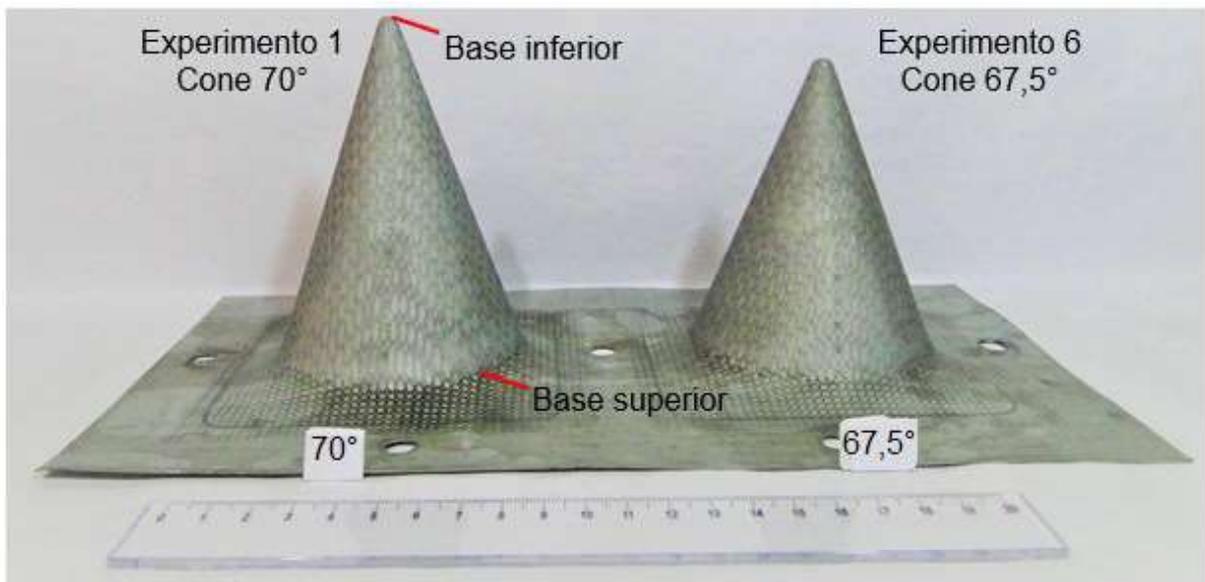


Figura 44: Experimento 1 e 6.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 45 pode-se ver os experimentos 2 e 3, respectivamente cones com ângulos de parede planejados de 80° e 75° sendo a) vista frontal e b) vista posterior. Houve fratura na profundidade de 11,07 mm para o cone de 80° e 12,07 mm para o cone de 75° conforme indicam as setas. Em ambos os experimentos as fraturas caracterizaram-se por cisalhamentos horizontais na parede do cone, exatamente no local onde o punção passou durante a execução de sua última trajetória antes que fosse identificada a fratura e interrompido o processo. Constatou-se que o experimento 2 possui fraturas maiores e mais severas que no 3 devido ao ângulo de parede mais acentuado.

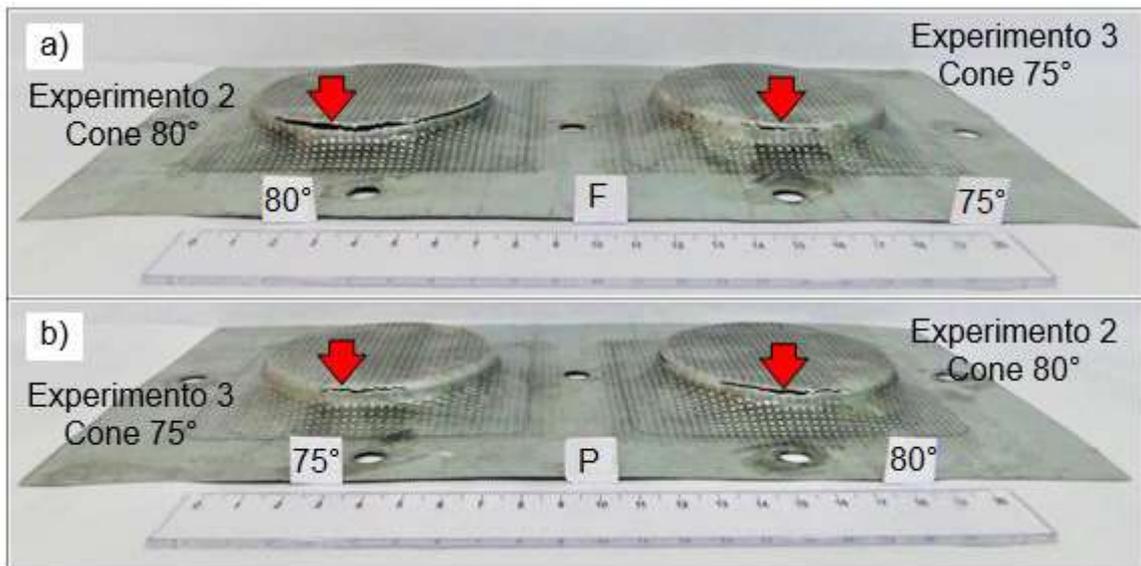


Figura 45: Experimentos 2 e 3: a) vista frontal, b) vista posterior.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 46 pode-se ver os experimentos 4 e 5, respectivamente cones com ângulo de parede planejados de $72,5^\circ$ e $71,25^\circ$ sendo a) vista frontal e b) vista posterior. Houve fratura na profundidade de 13,61 mm para o cone de $72,5^\circ$ e 15,3 mm para o cone de $71,25^\circ$. As fraturas em ambos experimentos se caracterizaram por cisalhamentos horizontais na parede do cone e surgiram exatamente no local por onde o punção passou durante a execução de sua última trajetória no centro de usinagem antes que fosse identificada a fratura e interrompido o processo. À medida que o ângulo de parede diminui a severidade da fratura também diminui, de modo que as fraturas no experimento 4 são mais severas que no experimento 5 devido ao maior ângulo de parede, além disso o experimento 5 possui apenas um ponto de fratura enquanto o experimento 4 possui dois pontos conforme pode ser visto nas setas da Figura 46a e 46b.

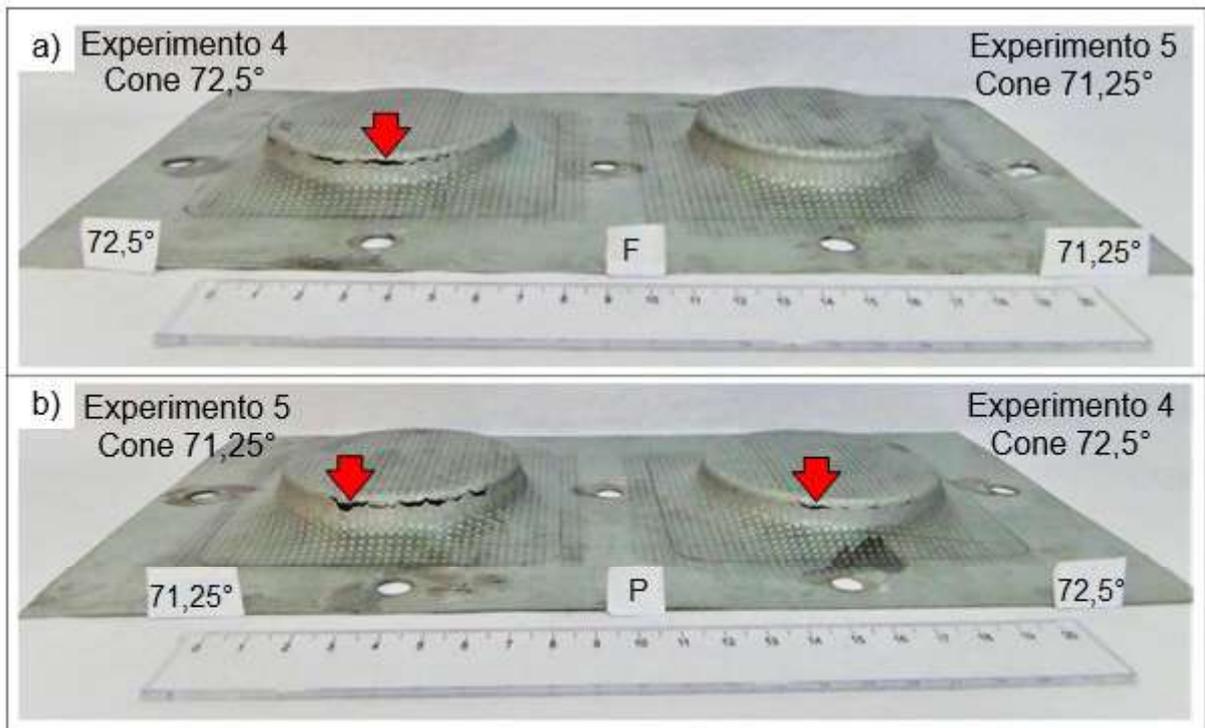


Figura 46: Experimentos 4 e 5: a) vista frontal. b) vista posterior.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 47 pode-se ver os experimentos 7 e 8, respectivamente cones com ângulo de parede planejados de $70,625^\circ$ e $70,3125^\circ$. O cone de $70,625^\circ$ do experimento 7 foi estampado até a profundidade de 28,55 mm quando foram identificadas fraturas. Houve mudança no tipo de fratura dos experimentos 2, 3, 4 e 5 para o experimento 7, respectivamente de cisalhamentos horizontais para orifícios na parede do cone o que indicou menor severidade que as demais fraturas observadas. Foi obtida maior profundidade de estampagem, maior integridade da parede do cone indicando o caminho para obtenção do limite de estampabilidade, objetivo deste trabalho.

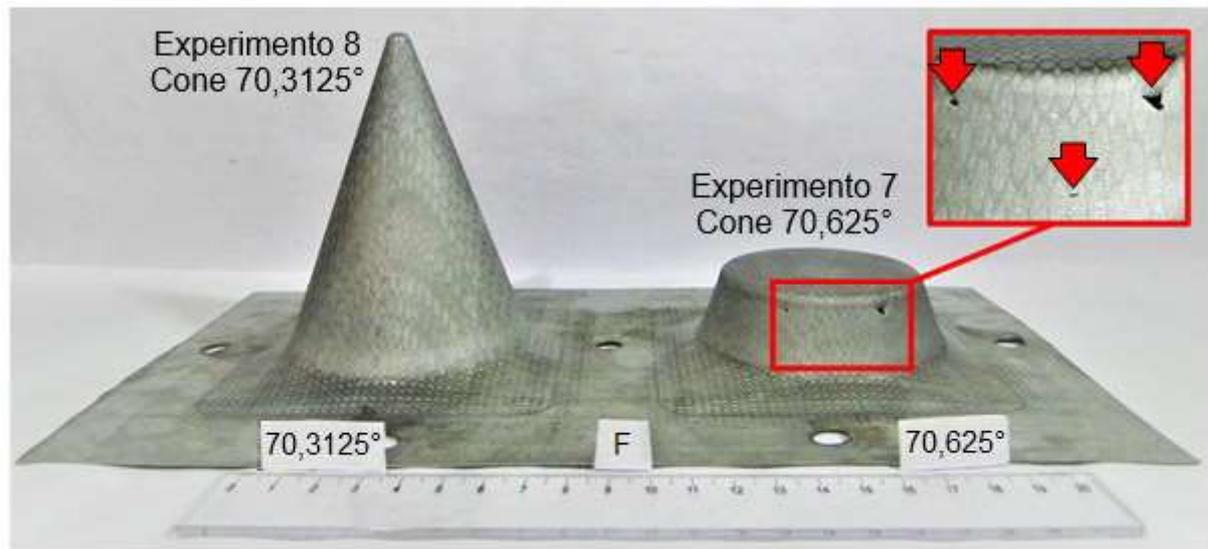


Figura 47: Experimento 7 e 8.

Fonte: Autoria Própria.

A principal constatação obtida nos experimentos foi que o ângulo de parede crítica da chapa de aço IF com espessura de 0,6 mm no processo *ISF* para a forma geométrica de um cone dentro dos parâmetros estabelecidos foi de $70,3125^\circ$ (ângulo planejado). Acima deste ângulo o cone está sujeito a fraturas em diferentes graus de severidade e em diferentes profundidades. Quanto maior o ângulo de parede acima do ângulo crítico maior a severidade da fratura e menor a profundidade atingida. Abaixo do ângulo de parede crítica o cone é estampado totalmente sem fraturas até a profundidade máxima planejada como pode ser visto nos experimentos 1, 6 e 8. Segundo Li et al. (2017) o ângulo de estampagem para geometrias pré-determinadas pode ser considerado como um indicador de estampabilidade no processo *ISF* devido ao fato de que uma peça com ângulo de estampagem maior que o crítico ainda pode ser estampada em uma profundidade menor que a limite. Neste tocante, a Figura 48 apresenta o gráfico para o indicador citado com a transição do ângulo de parede crítica entre os pontos dos experimentos 7 e 8, marcado com linha tracejada.

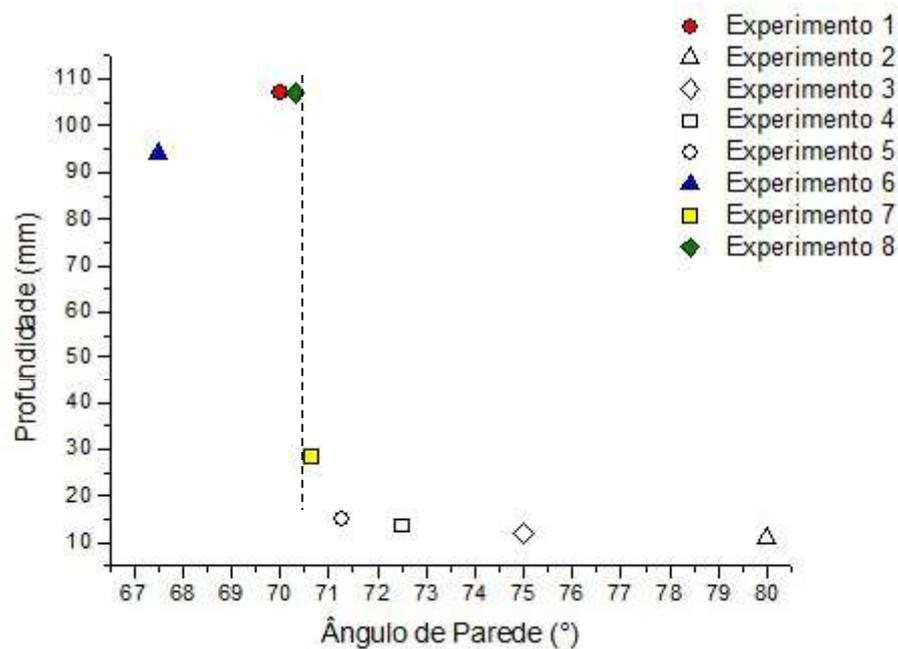


Figura 48: Relação profundidade x ângulo de parede.

Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser visto na Figura 35, o raio de 45 mm decorrente do diâmetro da base superior do cone (90 mm) possibilitou a formulação do indicador “raio da base do cone *versus* profundidade máxima de estampagem por ângulo de parede planejado” que pode servir de ponto de partida para futuros trabalhos. O indicador supracitado estabelece para cada ângulo de parede projetado um percentual de profundidade que se pode atingir em relação ao raio da base superior do cone conforme mostra a Tabela 8. Para os casos dos experimentos em que houve fratura o percentual a ser adotado para futuros trabalhos deverá ser menor que o indicado na Tabela 8 pois a profundidade de estampagem atingida nesses casos foi devida à ocorrência de fraturas na parede da peça.

Tabela 8: Relação raio da base superior do cone *versus* profundidade máxima de estampagem por ângulo de parede planejado.

Experim.	Ângulo de parede planejado (θ)	Profundidade de estampagem atingida no processo <i>ISF</i>	Houve Fratura?	% de profundidade em relação ao raio de 45 mm
1	70°	107,15 mm	Não	238 %
2	80°	11,07 mm	Sim	25 %
3	75°	12,07 mm	Sim	27 %
4	72,5°	13,61 mm	Sim	30 %
5	71,25°	15,30 mm	Sim	34 %
6	67,5°	94,15 mm	Não	210 %
7	70,625°	28,55 mm	Sim	63,5 %
8	70,3125°	107,15 mm	Não	238 %

Fonte: Autoria Própria.

4.2 Espessura da Parede dos Cones

Os experimentos 2, 3, 4 e 5 foram descartados da medição de espessuras devido à pequena profundidade atingida no processo *ISF* e ao cisalhamento horizontal que não possibilitaram pontos de medição com o micrômetro. No experimento 1, cone com ângulo de parede planejado de 70°, a média da espessura medida com o micrômetro na região de estabilidade de espessura (do ponto de medição 2 ao 20) foi de 0,211 mm e a espessura prevista pela lei do cosseno de 0,205 mm representando diferença média de 0,006 mm (3%). Na Tabela 9 pode-se ver as espessuras no cone do experimento 1 por ponto de medição sendo “PM” pontos de medição e “VM” valores medidos. O ponto de medição 1 não fez parte da média da espessura medida pois encontra-se na região de diminuição de espessura.

Tabela 9: Espessuras medidas no experimento 1.

PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VM (mm)	0,150	0,210	0,220	0,200	0,210	0,215	0,215	0,230	0,220	0,205
PM	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
VM (mm)	0,210	0,210	0,205	0,200	0,210	0,220	0,200	0,210	0,200	0,210

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 49 são mostrados os valores da espessura para cada ponto de medição do experimento 1, a linha cheia indica o valor médio na região de estabilidade de espessura (do ponto de medição 2 ao 20) e a linha tracejada a espessura prevista pela lei do cosseno. Observa-se que a linha de espessura média dos pontos está próxima à da espessura prevista. Neste experimento não foram realizadas medidas na região de dobramento da chapa e verifica-se no ponto de medição 1 a região de redução de espessura.

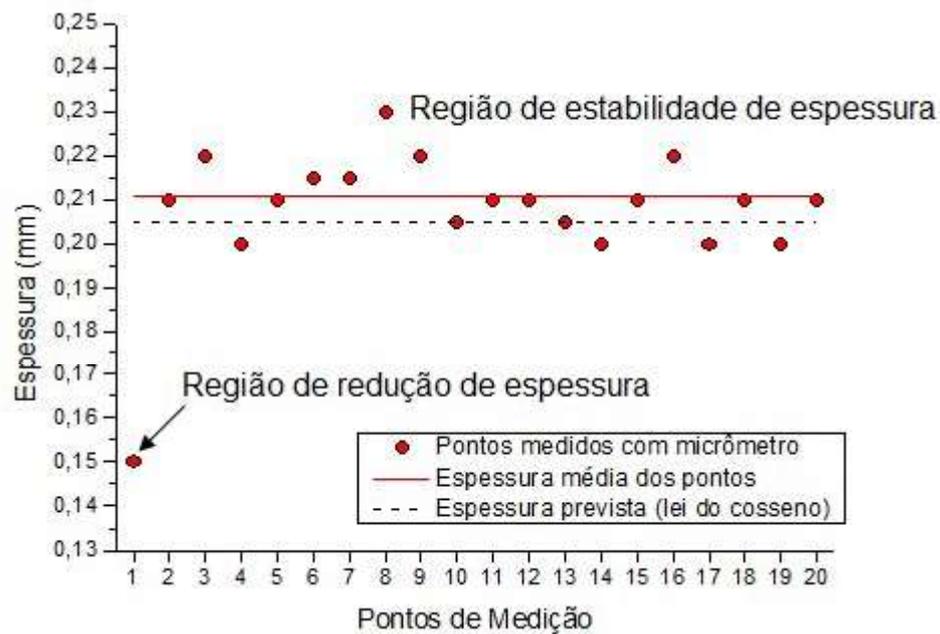


Figura 49: Espessuras medidas no experimento 1.

Fonte: Autoria Própria.

No experimento 6, cone com ângulo de parede planejado de $67,5^\circ$, a média da espessura medida com o micrômetro na região de estabilidade de espessura foi de 0,219 mm e a espessura prevista pela lei do cosseno de 0,230 mm representando diferença média de 0,011 mm (5%). Na Tabela 10 pode-se ver as espessuras no cone por ponto de medição. O ponto de medição 1 não fez parte da média da espessura medida pois encontra-se na região de diminuição de espessura.

Tabela 10: Espessuras medidas no experimento 6.

PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VM (mm)	0,180	0,230	0,240	0,210	0,230	0,220	0,225	0,230	0,220
PM	10	11	12	13	14	15	16	17	18
VM (mm)	0,220	0,210	0,220	0,220	0,220	0,220	0,215	0,180	0,210

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 50 é mostrado os valores da espessura para cada ponto de medição do experimento 6, a linha cheia mostra o valor médio das espessuras medidas na região de estabilidade de espessura (do ponto de medição 2 ao 18) e a linha tracejada a espessura prevista pela lei do cosseno. Neste experimento não foram realizadas medidas na região de dobramento da chapa e verifica-se no ponto de medição 1 a região de redução de espessura, exceto pelo ponto 17 que embora esteja na região de estabilidade de espessura apresenta mesmo valor de espessura da região diminuição de espessura.

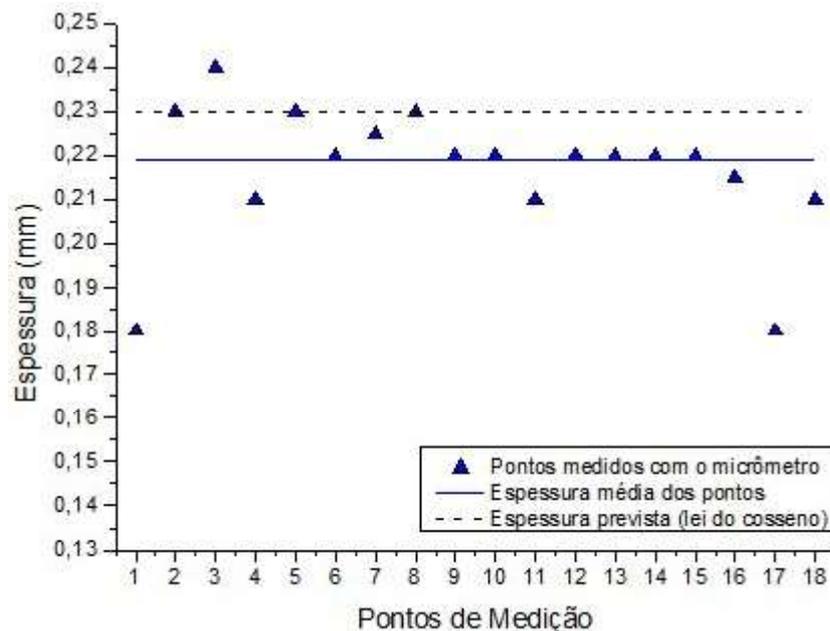


Figura 50: Espessuras medidas no experimento 6.

Fonte: Autoria Própria.

No experimento 7, cone com ângulo de parede planejado de $70,625^\circ$ foi possível medir apenas 4 pontos ao longo da parede do cone devido à pequena

profundidade de estampagem atingida. A média da espessura medida com o micrômetro na região de estabilidade de espessura (do ponto de medição 2 ao 4) foi de 0,177 mm e a espessura prevista pela lei do cosseno de 0,199 mm representando diferença média de 0,022 mm (11%). O ponto de medição 1 não fez parte da média da espessura medida pois encontra-se na região de diminuição de espessura. Na Tabela 11 pode-se ver as espessuras no cone por ponto de medição.

Tabela 11: Espessuras medidas no experimento 7.

PM	1	2	3	4
VM (mm)	0,140	0,160	0,190	0,180

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 51 são mostrados os valores da espessura para cada ponto de medição do experimento 7, a linha cheia mostra o valor médio das espessuras medidas na região de redução de espessura (do ponto de medição 2 ao 4) e a linha tracejada a espessura prevista pela lei do cosseno. Neste experimento não foram realizadas medidas na região de dobramento da chapa e verifica-se no ponto 1 a região de maior redução de espessura.

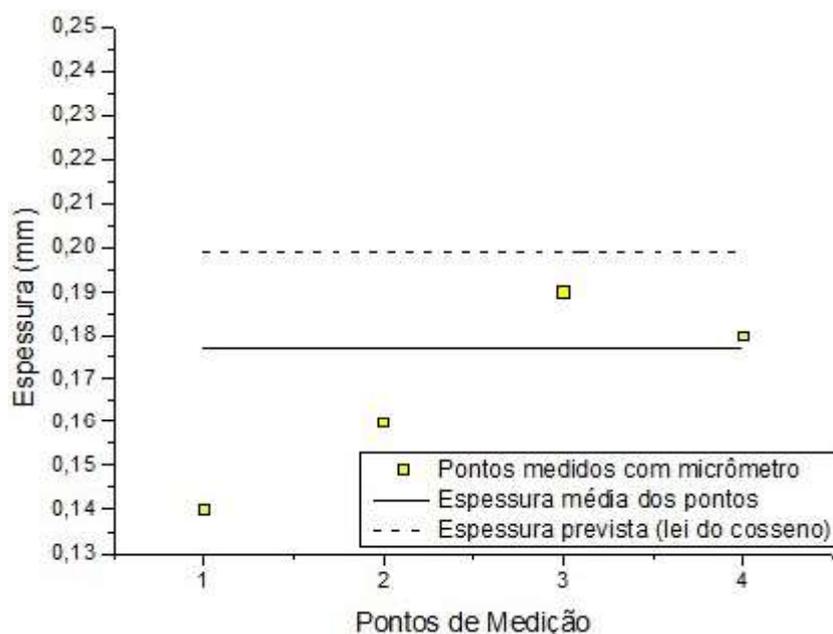


Figura 51: Espessuras medidas no experimento 7.

Fonte: Autoria Própria.

No experimento 8, cone com ângulo de parede de $70,3125^\circ$ a média da espessura medida com o micrômetro na região de estabilidade de espessura (do ponto de medição 2 ao 20) foi de 0,185 mm e a espessura prevista pela lei do cosseno de 0,202 mm representando diferença média de 0,017 mm (8,5%). O ponto de medição 1 não fez parte da média da espessura medida pois encontra-se na região de diminuição de espessura. Na Tabela 12 pode se ver as espessuras no cone por ponto de medição.

Tabela 12: Espessuras medidas no experimento 8.

PM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VM (mm)	0,140	0,200	0,200	0,230	0,190	0,200	0,190	0,190	0,190	0,180
PM	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
VM (mm)	0,180	0,170	0,180	0,190	0,180	0,170	0,160	0,160	0,160	0,190

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 52 são mostrados os valores da espessura para cada ponto de medição do experimento 8, a linha cheia refere-se ao valor médio das espessuras medidas na região de redução de espessura (do ponto de medição 2 ao 20) e a linha tracejada à espessura prevista pela lei do cosseno. Não foram realizadas medidas na região de dobramento da chapa, entretanto verifica-se que a região de redução de espessura está no ponto 1 e nos demais pontos nota-se que não há estabilidade da mesma. Deduz-se que essa tendência de maior variação na espessura na região de estabilidade, é devida ao fato de este experimento ter sido feito com o ângulo limite de estampabilidade do material provocando sua estrição (acima deste ângulo ocorre a fratura).

Na Figura 53 pode-se ver o valor médio das espessuras medidas na região de estabilidade de espessura dos experimentos analisados. Foi possível perceber que à medida com que o ângulo de parede do cone aumenta a espessura diminui. Em todos os experimentos os pontos de medição foram caracterizados por estarem na região de redução de espessura.

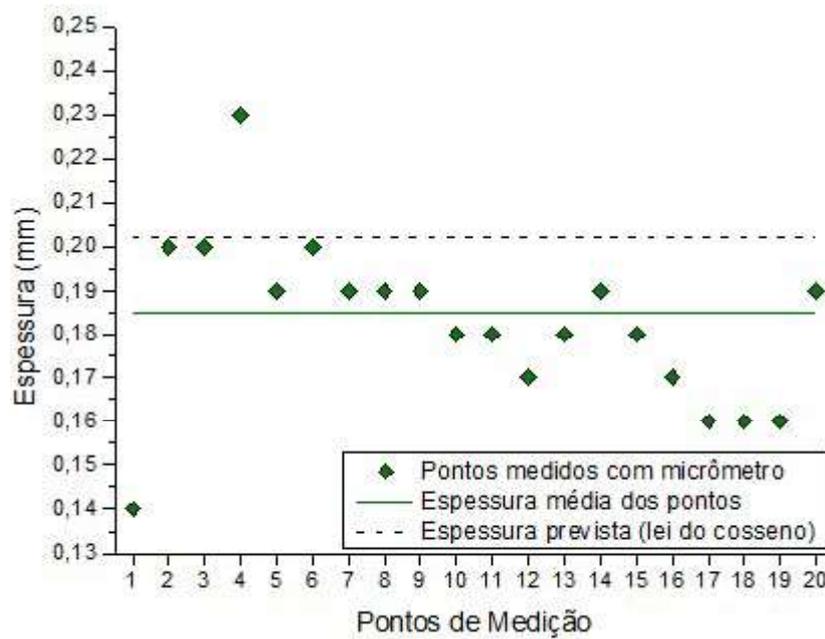


Figura 52: Espessuras medidas no experimento 8.

Fonte: Autoria Própria.

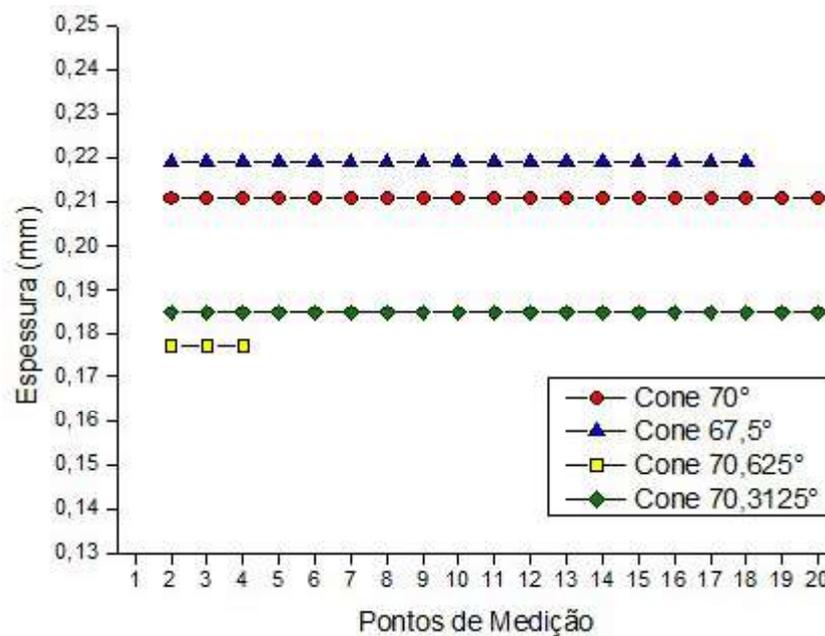


Figura 53: Média das espessuras medidas por experimento.

Fonte: Autoria Própria.

No primeiro ponto de medição de cada experimento, nas proximidades da base superior do cone, foi identificada a região de redução de espessura conforme pode ser visto nas Figuras 49, 50, 51 e 52 que corresponde ao ponto de medição 1 nas Tabelas 9, 10, 11 e 12. A Tabela 13 apresenta o percentual da diminuição da espessura na região de redução em relação ao valor médio calculado por experimento na região de estabilidade.

Tabela 13: Percentual da diminuição da espessura na região de redução.

Experimento	1	6	7	8
Ângulo	70°	67,5°	70,625°	70,3125°
Espessura média da parede do cone (mm) – região de estabilidade	0,211	0,219	0,177	0,185
Espessura medida no primeiro ponto (mm) – região de redução	0,15	0,18	0,14	0,14
Percentual de diminuição da espessura na região de redução	29%	18%	21%	24%

Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que a região de redução de espessura tem comportamento semelhante ao da redução de espessura geral, ou seja, quanto maior o ângulo de parede menor a espessura. Nos experimentos 7 e 8 o valor da espessura medida no primeiro ponto foram semelhantes devido à proximidade entre os ângulos de parede estampados. Em média o percentual da diminuição da espessura na região de redução em relação a espessura média da parede do cone foi de 23%. A variação média da espessura prevista pela lei do cosseno em relação a média das espessuras medidas foi de aproximadamente 7%.

Com os dados destes experimentos foi possível constatar que a redução percentual máxima de espessura que a parede da peça pode submetida sem que ocorra de fratura é de 31% em relação a espessura inicial. Esta constatação foi feita a partir do experimento 8 em que foi determinado o ângulo limite de estampabilidade da parede do cone (70,3125°) sendo a espessura inicial de 0,6 mm e final (média dos pontos medidos na região de estabilidade) de 0,185 mm.

4.3 Deformações Obtidas pelo Processo *ISF*

Na caracterização do aço IF quanto às deformações impostas pelo processo *ISF* foi analisado o experimento 7 cone com ângulo de parede de $70,625^\circ$. A escolha foi devida ao experimento estar próximo ao ângulo limite de estampabilidade e por ter sido possível medir elipses do tipo “bom”, “marginal” e “falha” pois as fraturas tiveram formato de orifícios que permitiram a medição. Nos experimentos 2, 3, 4 e 5 as fraturas do tipo cisalhamento horizontal e a pequena profundidade impossibilitaram a medição das elipses. Nos experimentos 1, 6 e 8 não ocorreram fraturas impossibilitando a classificação das elipses.

No total foram medidas 14 elipses sendo 7 com classificação de “falha”, 4 “marginal” e 3 “bom”. O DLC foi elaborado a partir dos valores de “ e_1 ” e “ e_2 ” de cada elipse e sua respectiva classificação conforme pode ser visto na linha tracejada da Figura 54. A CLC foi elaborada por meio do recurso de previsão linear do Origin® baseada nos dados de “ e_1 ” e “ e_2 ” das elipses “Marginal” indicando que a região abaixo da CLC foi segura para o processo *ISF* devido a concentração de elipses com classificação “bom” e acima da CLC fica sujeita a fraturas devido a concentração elipses com classificação de “falha”. Nesta mesma figura foram inseridos os dados de deformação obtidos no ensaio de Nakazima cuja CLC é representada pela linha cheia. Pode-se perceber no comparativo entre CLCs (linha tracejada *versus* linha cheia) que no processo *ISF* foi possível atingir deformação superior à do ensaio de Nakazima que simula processos convencionais de estampagem. Filice, Fratini e Micari (2002) explicam que a diferença entre CLCs pode ser justificada levando-se em conta a peculiaridade da mecânica do processo devido a deformação plástica induzida pelo punção ser fortemente localizada e confinada à área entorno da superfície de contato; a deformação plástica progride à medida que o punção se move ao longo do caminho atribuído de modo a alcançar maiores deformações antes que a fratura ocorra. Na Figura 54 ainda foi possível identificar que a região onde a CLC do processo *ISF* se encontra é semelhante às regiões encontradas na literatura conforme pode ser visto na Figura 24.

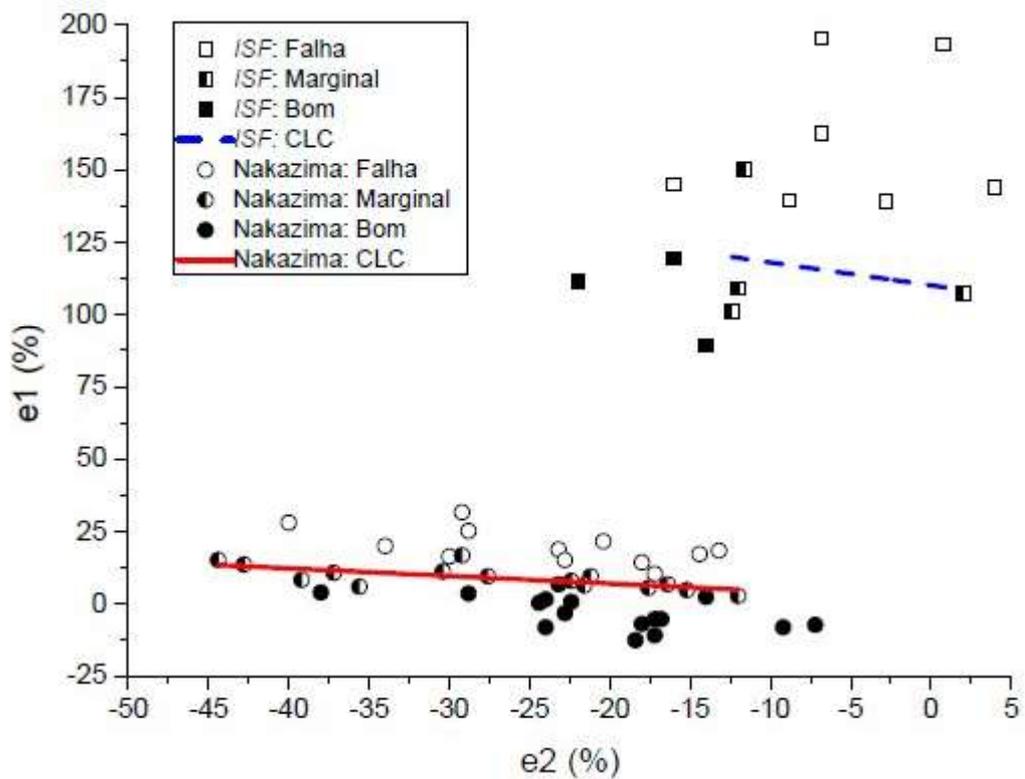


Figura 54: Diagrama Limite de Conformação: *ISF* x Nakazima.

Fonte: Autoria Própria.

No Anexo 3 são apresentados os dados de “e₁” e “e₂” que possibilitaram a construção do gráfico da Figura 54 sendo que a Tabela 14 apresenta o valor médio para cada tipo de elipse do processo *ISF*.

Tabela 14: *ISF* - Média percentual dos alongamentos para cada tipo de elipse.

Classificação da elipse	e ₁ (%)	e ₂ (%)
Bom	107	-17
Marginal	117	-8,5
Falha	160	-5

Fonte: Autoria Própria.

Os alongamentos percentuais médios do aço IF provenientes das deformações obtidas no ensaio de Nakazima e de tração quando comparados aos do processo *ISF* oferecem uma relação de previsibilidade de estampagem que pode ser o ponto de partida para outros estudos ou aplicações. Neste tocante a Figura 55 apresenta o gráfico comparativo gerado a partir de: i) processo *ISF* – considerado o valor médio de “ e_1 ” das elipses com classificação “falha” e “marginal” que correspondem respectivamente aos alongamentos médios de 160% e 117% (conforme pode ser visto na Tabela 14); ii) ensaio de tração: considerado o valor médio geral dos 3 sentidos de corpos de prova que corresponde ao alongamento médio de 38% (conforme pode ser visto na Tabela 2) e iii) ensaio de Nakazima – considerado o valor médio de “ e_1 ” das elipses com classificação “falha” e “marginal” que correspondem respectivamente aos alongamentos médios de 20% e 9% (conforme pode ser visto na Tabela 6). No critério de “falha” do material o alongamento médio obtido no processo *ISF* foi 8 vezes maior que no ensaio de Nakazima e 4 vezes maior que no ensaio de tração e o alongamento médio obtido no ensaio de tração foi aproximadamente 2 vezes maior que no ensaio de Nakazima. Observando-se os dados do material no critério “marginal” o alongamento médio obtido no processo *ISF* foi 13 vezes maior que no ensaio de Nakazima.

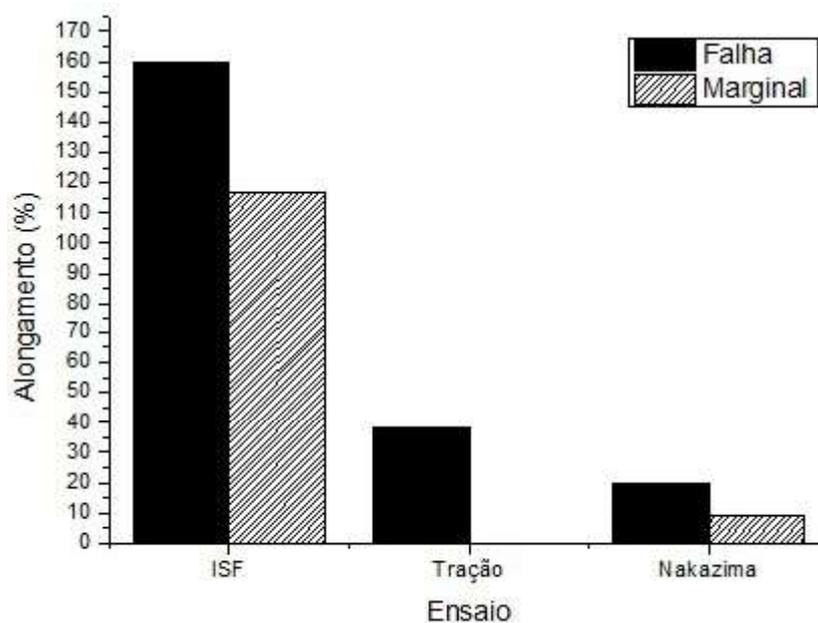


Figura 55: Comparativo dos alongamentos obtidos nos ensaios e processo *ISF*.

Fonte: Autoria Própria.

Desta forma e considerando-se geometrias simples como as estudadas nesta pesquisa o alongamento medido no ensaio de tração para um dado material pode ser uma ferramenta utilizada para se prever os alongamentos máximos que podem ser atingidos para este dado material quando estampado pelo processo *ISF*.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se com a realização dos experimentos no processo *ISF* que no aço IF de espessura 0,6 mm o ângulo de parede planejado de $70,3125^\circ$ para a geometria de cone é o maior ângulo alcançado sem que haja fratura na peça estampada. Neste ângulo foi possível atingir a profundidade máxima planejada para a peça de 107,15 mm sendo este limite a profundidade de segurança. Ângulos de parede maiores que $70,3125^\circ$ atingiram menores valores de profundidade devido a ocorrência de fraturas com diferentes graus de severidade que limitam a integridade da peça.

As medições dos experimentos mostraram que as espessuras da parede do cone não têm comportamento linear devido principalmente à região de redução de espessura. O limite seguro para diminuição de espessura do aço IF obtidos nos experimentos foi de 31% em relação à espessura inicial que corresponde ao ângulo planejado de $70,3125^\circ$. Para fins estimativos o cálculo teórico da espessura de parede pela lei do cosseno mostrou-se uma boa ferramenta variando em média 7% para mais ou para menos em relação as espessuras medidas.

Os alongamentos obtidos no processo *ISF* foram superiores aos dos ensaios de Nakazima conforme referenciado na literatura. Considerando-se as elipses classificadas como “Marginal”, situadas na região das CLCs mostradas na Figura 54, em termos percentuais, o processo *ISF* deste trabalho apresentou deformação média em “ e_1 ” de 117% em comparação ao ensaio de Nakazima que apresentou deformação média de 9%. Em valores absolutos o processo *ISF* teve capacidade de deformação 13 vezes maior que os processos de estampagem simulados por Nakazima, sendo o percentual de 107% o limite seguro de deformação do aço IF no processo *ISF* considerando-se o formato geométrico e os parâmetros adotados para este material.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O retorno elástico ocorrido nas peças estampadas pelo processo *ISF* tem sido amplamente estudado a fim de se corrigir eventuais imprecisões geométricas aproximando o processo de aplicações industriais. Nesse sentido, sugere-se a quantificação do retorno elástico de peças com geometria, material e parâmetros coincidentes aos dos experimentos realizados neste trabalho.

Outro viés, também estudado nos processos *ISF* e não contemplado neste trabalho, é de como o diâmetro da ponta do punção afeta a estampabilidade do material. Sugere-se fixar os parâmetros do processo, material e geometria similares aos utilizados neste trabalho e variar o punção com outros diâmetros de ponta.

Com relação à geometria sugere-se testar outros formatos, mantendo-se os mesmos parâmetros (Tabela 4, subitem 3.3.2), punção e material com o intuito de verificar se os limites de estampabilidade do cone, definido neste trabalho, são aplicáveis a outros formatos geométricos.

Para as fraturas as quais o processo *ISF* está sujeito sugere-se a elaboração de modelo matemático que possa prever a ocorrência e propagação das mesmas antes da execução da peça pretendida. O estudo sob este enfoque tem sido conduzido predominantemente em simulações com elementos finitos.

Por fim, a sugestão é aplicar a mesma geometria e parâmetros utilizados neste trabalho com aços IF a outros tipos de materiais com diferentes espessuras de modo a determinar quais materiais têm perfil mais adequado ao processo *ISF* e suas respectivas limitações.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, D. W. ***Improvements on single point incremental forming through electrically assisted forming, contact area prediction and tool development***. 2013. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Filosofia, Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais, Queen's University, Kingston, 2013. Disponível em: <https://qspace.library.queensu.ca/bitstream/handle/1974/8491/Adams_David_W_201311_PhD.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 jul. 2017.
- AMBROGIO, G.; FILICE, L.; GAGLIARDI, F.. ***Improving industrial suitability of incremental sheet forming process***. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [s.l.], v. 58, n. 9-12, p.941-947, 28 jun. 2011. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3448-6>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8 / E8M-16a, ***Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials***, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. www.astm.org
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E112, ***Standard Test Methods for Determining Average Grain Size***, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. www.astm.org
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E2218, ***Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves***, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. www.astm.org
- ARAÚJO, A.. ***Estampabilidade a quente de chapa espessa da liga de magnésio AZ31***. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- ARFA, H.; BAHLOUL, R.; BELHADJSALAH, H.. ***Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts***. International Journal of Material Forming, [s.l.], v. 6, n. 4, p.483-510, 4 jun. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-012-1101-z>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ***NBR 5915: Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem***. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 6 p.
- ATTANASIO, A. et al. ***Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization***. Journal of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 197, n. 1-3, p.59-67, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.053>.

BAMBACH, M.; ARAGHI, B. T.; HIRT, G.. **Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming**. Production Engineering, [s.l.], v. 3, n. 2, p.145-156, 6 fev. 2009. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-009-0150-8>.

BENEDETTI, M. et al. **Single-point incremental forming of sheet metals: experimental study and numerical simulation**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, [s.l.], v. 231, n. 2, p.301-312, jan. 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405415612351>.

BRESCIANI F. E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T.. **Conformação Plástica dos Metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

BORGES, M.. **Estampagem Profunda**. Disponível em: <http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/estampagem.htm>. Acesso em: 23 ago. 2018.

BUTTON, S. T. **6. Textura em Produtos Conformados**. [s. L.]: UNICAMP, [s.d.]. 10 p. Apostila.

CALDIN, R.. **Estudo da conformabilidade na hidroconformação de recortes de chapas de aço soldados a laser**. 2006. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

CALLEGARI, M. et al. **Sheet Incremental Forming: Advantages of Robotised Cells vs. CNC Machines**. In: HUAT, Low Kin. **Industrial Robotics: Programming, Simulation and Simulation**. Germany: Pro Literatur Verlag, 2006. Cap. 25. p. 493-514. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/industrial_robotics_programming_simulation_and_applications/sheet_incremental_forming__advantages_of_robotised_cells_vs__cnc_machines>. Acesso em: 17 jul. 2017.

CASTELAN, J.. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. 2010. 117 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/28829>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

COLPAERT, H., **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, 4ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

DIAS, F. M. S. et al. **Textura e Comportamento Mecânico de Aços IF Estabilizados ao Ti e Nb-Ti**. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, [s.l.], v. 9, n. 4, p.394-301, 2012. Editora Cubo Multimídia. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2012.044>.

DIETER, G. E.. **Metalurgia Mecânica**, 2ª edição. Ed. Guanabara Dois, 1981, 653p.

EMMENS, W. C.; SEBASTIANI, G.; BOOGAARD, A. H. V. D. ***The technology of Incremental Sheet Forming — A brief review of the history***. Journal of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 210, n. 8, p.981-997, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014>.

FILICE, L.; FRATINI, L.; MICARI, F. ***Analysis of Material Formability in Incremental Forming***. CIRP Annals - Manufacturing Technology, [s.l.], v. 51, n. 1, p.199-202, 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61499-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61499-1).

FONSECA, M. A.; ALVES, W. B.; LACERDA, J. C.. **Estampabilidade dos aços IF e AA para aplicação automotiva**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2009, Belo Horizonte. Anais.... Belo Horizonte: COBEF, 2009. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/032002415.pdf>. Acesso em: 14 set. 2017.

FRATINI, L. et al. ***Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming***. CIRP Annals - Manufacturing Technology, [s.l.], v. 53, n. 1, p. 207-210, 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60680-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60680-5).

FRITZEN, D. et al. **Estudo do processo estampagem incremental em chapa de latão 70/30**. 31° SENAFOR, 2011, Porto Alegre.

FRITZEN, D.. **Estudo dos parâmetros de conformabilidade para o processo de estampagem incremental**. 2016. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GARG, A. et al. ***A comprehensive study in quantification of response characteristics of incremental sheet forming process***. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [s.l.], v. 89, n. 5-8, p.1353-1365, 26 jul. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9183-2>

GOLABI, S.; KHAZAALI, H.. ***Determining frustum depth of 304 stainless steel plates with various diameters and thicknesses by incremental forming***. Journal of Mechanical Science and Technology, [s.l.], v. 28, n. 8, p.3273-3278, ago. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-014-0738-6>.

GOMES, L. C. P.. **Estudo das propriedades mecânicas e da estampabilidade de aços IF**. 2012. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D.; ALMEIDA FILHO, C.. **Efeito do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de chapas finas de aço I.F. laminadas a frio**. In: 39° Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 39., 2002, Ouro Preto. Anais... . Ouro Preto: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.

- GUNASHEKAR, G; KISHORE, K. **Modeling and manufacturing of an aerospace component by single point incremental forming process**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). S. L, p. 600-603. jul. 2017.
- HAM, M.; JESWIET, J.. **Forming limit curves in single point incremental forming**. CIRP Annals, [s.l.], v. 56, n. 1, p.277-280, 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.064>.
- HAM, M.; JESWIET, J.. **Dimensional accuracy of single point incremental forming**. International Journal of Material Forming, [s.l.], v. 1, n. 1, p.1171-1174, abr. 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-008-0189-7>.
- HIRT, G. et al. **Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, [s.l.], v. 53, n. 1, p.203-206, 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60679-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60679-9).
- JACKSON, K.; ALLWOOD, J.. **The mechanics of incremental sheet forming**. Journal of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 209, n. 3, p.1158-1174, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025>.
- JESWIET, J. et al. **Asymmetric single point incremental forming of sheet metal**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, [s.l.], v. 54, n. 2, p.88-114, 2005. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60021-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60021-3).
- JESWIET, J. et al. **Metal forming progress since 2000**. CIRP Journal of Manufacturing Science And Technology, [s.l.], v. 1, n. 1, p.2-17, 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2008.06.005>.
- JESWIET, J. et al. **Single point and asymmetric incremental forming**. Advances In Manufacturing, [s.l.], v. 3, n. 4, p.253-262, 26 nov. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-015-0126-1>.
- KIM, T. J.; YANG, D. Y.. **Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process**. International Journal of Mechanical Sciences, Taejon, v. 2000, n. 42, p.1271-1286, mar. 1999.
- KUMAR, Y.; KUMAR, S.. **Incremental sheet forming (ISF)**. Advances in Material Forming And Joining, [s.l.], p.29-46, 2015. Springer Nature. http://dx.doi.org/10.1007/978-81-322-2355-9_2
- LI, Y. et al. **A review on the recent development of incremental sheet-forming process**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [s.l.], p.1-1, 3 abr. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0251-z>.
- LU, B. et al. **Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [s.l.], v. 85, p.14-29, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007>.

- MADEIRA, T. et al. **Failure in single point incremental forming**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [s.l.], v. 80, n. 9-12, p.1471-1479, 19 abr. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6381-7>.
- MALWAD, D. S.; NANDEDKAR, V. M.. **Deformation mechanism analysis of single point incremental sheet metal forming**. Procedia Materials Science, [s.l.], v. 6, p.1505-1510, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.130>
- MARTINS, P. A. F. et al. **Theory of single point incremental forming**. CIRP Annals, [s.l.], v. 57, n. 1, p.247-252, 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.047>.
- MARTINS, P. A. F. et al. **Single point incremental forming of polymers**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, [s.l.], v. 58, n. 1, p.229-232, 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.095>.
- MCANULTY, T.; JESWIET, J.; DOOLAN, M.. **Formability in single point incremental forming: a comparative analysis of the state of the art**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, [s.l.], v. 16, p.43-54, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.07.003>.
- MILAN, M. T.; MALUF, O.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W. W.. **Metais: uma visão objetiva**. [s.l.]: [s.n.], 2004.
- NARAYANASAMY, R.; NARAYANAN, C. S.. **Forming limit diagram for interstitial free steels supplied by Ford India Motors**. Materials & Design, [s.l.], v. 28, n. 1, p.16-35, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.021>.
- OLEKSIK, V.. **Influence of geometrical parameters, wall angle and part shape on thickness reduction of single point incremental forming**. Procedia Engineering, [s.l.], v. 81, p.2280-2285, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.321>.
- OLIVEIRA, A. F.. **Caracterização de um aço IF após relaminação no laminador de encruamento**. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- PACHORI, R.; AGRAWAL, N.. **Modeling and experimental analysis of effect of tool geometry on single point incremental sheet metal forming**. Global Journal of Researches in Engineering: a Mechanical and Mechanics Engineering. Mewar, p. 39-44. jan. 2017.
- PARK, J.; KIM, Y.. **Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique**. Journal of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 140, n. 1-3, p.447-453, set. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00768-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00768-4).

REGONE, W.. **Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (IF) através de ensaios de torção**. 2001. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

SALEM, E. et al. ***Investigation of thickness variation in single point incremental forming***. Procedia Manufacturing, [s.l.], v. 5, p.828-837, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.068>.

SHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. 2ª ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 167 p.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R.. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 664 p.

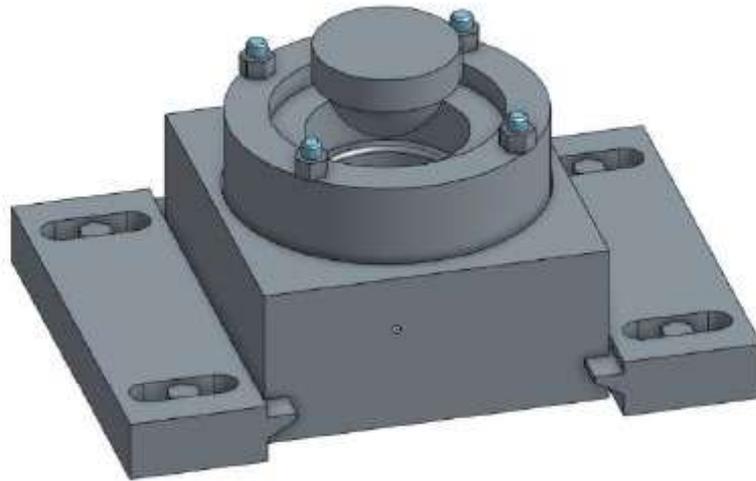
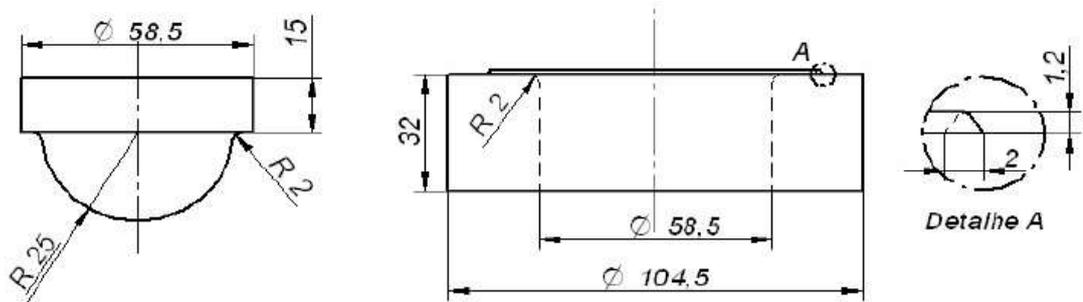
SILVA, M. B. et al. ***Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis***. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [s.l.], v. 48, n. 1, p.73-83, jan. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.004>.

TIBURI, F.. **Aspectos do processo de estampagem incremental**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WONG, C. C.; DEAN, T. A.; LIN, J.. ***A review of spinning, shear forming and flow forming processes***. International Journal of Machine Tools and Manufacture, [s.l.], v. 43, n. 14, p.1419-1435, nov. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(03\)00172-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(03)00172-x).

XAVIER, M. D.. **Análise da estampabilidade de chapas de aço de baixo e médio carbono através de deformações plásticas uniaxiais e ortogonais quase planares**. 2014. 245 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

ZHANG, Z. et al. ***Springback reduction by annealing for incremental sheet forming***. Procedia Manufacturing, [s.l.], v. 5, p.696-706, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.057>.

ANEXO 1 – DISPOSITIVO DO ENSAIO DE NAKAZIMA

(ARAÚJO,2017)

ANEXO 2 – MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO NAKAZIMA

CP	N.º da elipse	Classificação da elipse	Medida vertical (mm)	Medida horizontal (mm)	e ₁ (%)	e ₂ (%)
r30	1	Falha	3,13	1,78	25,2	-29
r30	2	Falha	2,93	2,14	17,2	-14
r30	5	Falha	2,97	1,92	18,8	-23
r30	6	Falha	2,88	1,93	15,2	-23
r40	2	Falha	3,20	1,50	28	-40
r40	3	Falha	3,00	1,65	20	-34
r40	8	Falha	2,91	1,75	16,4	-30
r40	5	Falha	3,29	1,77	31,6	-29
d100	5	Falha	2,76	2,07	10,4	-17
d100	6	Falha	3,04	1,99	21,6	-20
d100	7	Falha	2,96	2,17	18,4	-13
d100	8	Falha	2,86	2,05	14,4	-18
r20	6	Bom	2,32	2,32	-7,2	-7
r20	7	Bom	2,33	2,05	-6,8	-18
r20	8	Bom	2,30	2,27	-8	-9
r20	9	Bom	2,37	2,07	-5,2	-17
r30	22	Bom	2,30	1,90	-8	-24
r30	23	Bom	2,42	1,93	-3,2	-23
r30	15	Bom	2,52	1,94	0,8	-22
r30	26	Bom	2,51	1,89	0,4	-24
r40	9	Bom	2,59	1,78	3,6	-29
r40	23	Bom	2,60	1,55	4	-38
r40	A	Bom	2,56	2,15	2,4	-14
r40	B	Bom	2,67	1,92	6,8	-23
d100	13	Bom	2,54	1,90	1,6	-24
d100	22	Bom	2,37	2,08	-5,2	-17
d100	A	Bom	2,23	2,07	-10,8	-17
d100	B	Bom	2,19	2,04	-12,4	-18
r30	19	Marginal	2,74	1,97	9,6	-21
r30	21	Marginal	2,65	1,61	6	-36
r30	20	Marginal	2,70	1,94	8	-22
r30	17	Marginal	2,66	1,96	6,4	-22
r40	10	Marginal	2,77	1,57	10,8	-37
r40	11	Marginal	2,71	1,52	8,4	-39
r40	16	Marginal	2,74	1,81	9,6	-28
r40	C	Marginal	2,78	1,74	11,2	-30
r45	5	Marginal	2,84	1,43	13,6	-43
r45	6	Marginal	2,88	1,39	15,2	-44
r45	7	Marginal	2,92	1,77	16,8	-29
r100	11	Marginal	2,57	2,20	2,8	-12
d100	17	Marginal	2,64	2,06	5,6	-18
d100	18	Marginal	2,62	2,12	4,8	-15
d100	16	Marginal	2,67	2,09	6,8	-16

ANEXO 3 – MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO DO PROCESSO ISF

Cone	N.º da elipse	Classificação da elipse	Medida vertical (mm)	Medida horizontal (mm)	e1 (%)	e2 (%)
70,625°	4	Falha	5,99	2,28	139,6	-9
70,625°	31	Falha	6,10	2,60	144	4
70,625°	14	Falha	5,98	2,43	139,2	-3
70,625°	8	Falha	7,38	2,33	195,2	-7
70,625°	9	Falha	7,33	2,52	193,2	1
70,625°	25	Falha	6,12	2,10	144,8	-16
70,625°	17	Falha	6,56	2,33	162,4	-7
70,625°	1	Bom	4,73	2,15	89,2	-14
70,625°	3	Bom	5,49	2,10	119,6	-16
70,625°	34	Bom	5,29	1,95	111,6	-22
70,625°	2	Marginal	5,23	2,20	109,2	-12
70,625°	13	Marginal	5,18	2,55	107,2	2
70,625°	7.17	Marginal	5,03	2,19	101,2	-12
70,625°	21	Marginal	6,25	2,21	150	-12