



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais
PPGE3M

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CONFORMABILIDADE PARA O PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Daniel Fritzen

Porto Alegre
Setembro de 2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais
PPGE3M

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CONFORMABILIDADE PARA O PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Daniel Fritzen

Tese desenvolvida no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), e no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro, Portugal, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL



Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais
PPGE3M

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE CONFORMABILIDADE PARA O PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Doutorando: Daniel Fritzen

Orientador: Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer

Co – orientador: Prof. Dr. Jovani Castelan

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Anderson Daleffe (Faculdade SATC – SC)

Prof. Dr. Eng. Fábio André Lora

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Folle (UniRitter – RS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

*Ao Marcelo, ao Pedro e à Juliane,
fontes para minha disciplina e perseverança.*

Aos meus pais, por tudo...

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer, pelo estímulo, atenção e condução deste trabalho, e por ser diretamente o maior responsável pela minha qualificação profissional.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Jovani Castelan, que além de auxiliar no desenvolvimento desta pesquisa, foi um grande incentivador, sobretudo para sua realização em Portugal.

Ao Prof. Ricardo José Alves de Sousa, PhD, pela especial atenção e auxílio na realização das atividades experimentais, durante minha estadia em Aveiro.

Ao colega Anderson Daleffe, pelo suporte técnico na execução dos ensaios e disponibilidade para fabricação dos dispositivos e ferramentas utilizados neste trabalho, além das várias discussões válidas sobre o assunto.

À Faculdade SATC, pela disponibilidade de equipamentos e ferramentas para a execução dos experimentos deste trabalho, além do apoio e motivação para a realização de parte do trabalho em Portugal, especialmente pelo Diretor Carlos Antônio Ferreira.

À Universidade de Aveiro, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) por disponibilizar excelentes equipamentos, decisivos para realização dos experimentos e perfeita interpretação dos seus resultados.

Ao Professor Daniel Afonso, da Escola Superior Aveiro Norte – ESAN, na disponibilização dos equipamentos e auxílio nas digitalizações dos experimentos em SPIF.

Ao Professor Anónio Festas, responsável pelos Laboratórios de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, que auxiliou na fabricação das matrizes utilizadas no processo e SPIF e na medição das deformações.

Aos colegas de departamento, Ricardo Bastos, Fabio Fernandes, Dmitri Tchepel e Carlos Henrique Lauro, pelo agradável convívio durante minha estada em Aveiro.

Ao CNPq, pela disponibilização da bolsa de estudo [Processo 234851 - 2014-7] em Portugal, proporcionando o contato à novas tecnologias e uma experiência singular em minha vida acadêmica.

Ao coordenador do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, Joeci Casagrande pelo incentivo na realização deste trabalho.

Aos colegas do LdTM, especialmente ao Eng Uilian Boff, pela sua colaboração como revisor, com observações importantes ao trabalho.

À Industrial Pagé, na pessoa do senhor Renato Américo, que disponibilizou o corte dos corpos de prova na máquina de corte a laser da empresa.

À todos os colegas da SATC que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Aos meus filhos Pedro e Marcelo e à minha esposa Juliane, que foram pacientes e compreensivos comigo durante a elaboração deste trabalho, sobretudo no período que estive em Portugal, desprovido do calor dos seus abraços.

Aos meus pais, por sempre acreditarem na educação, e, deste modo, me proporcionar isto desde cedo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS DOS EXPERIMENTOS.....	XVIII
LISTA DE SIMBOLOS	XX
LISTA DE SIMBOLOS GREGOS	XXII
RESUMO.....	XXIII
ABSTRACT	XXIV
1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 Motivação.....	26
1.2 Objetivos	29
2 ESTADO DA ARTE	31
2.1 Estampagem Incremental	31
2.1.1 <i>Descrição do Processo de Estampagem Incremental</i>	33
2.1.2 <i>Configurações da Estampagem Incremental</i>	33
2.1.2.1 Estampagem Incremental de Ponto Simples	34
2.1.2.2 Estampagem Incremental de Ponto Duplo.....	34
2.1.2.3 Derivações das Configurações da Estampagem Incremental.....	36
2.1.3 <i>Aplicações da Estampagem Incremental</i>	42
2.1.4 <i>Vantagens e Limitações da Estampagem Incremental</i>	44
2.1.5 <i>Parâmetros da Estampagem Incremental</i>	46
2.1.5.1 Velocidade de Avanço e Rotação da Ferramenta.....	47
2.1.5.2 Passe Vertical	47
2.1.5.3 Estratégia de Estampagem	48
2.1.5.4 Ferramenta de Estampagem	50
2.1.5.5 Lubrificação	52
2.1.6 <i>Geometrias de Experimentos ISF</i>	53
2.1.7 <i>Análise das Forças no Processo de Estampagem Incremental</i>	56
2.1.8 <i>Análise do Atrito no Processo de Estampagem Incremental</i>	58
2.1.9 <i>Simulação Numérica na Estampagem Incremental</i>	59
2.1.10 <i>Máquinas Utilizadas na Estampagem Incremental</i>	65

2.2	Estados de Deformação	67
2.3	Critérios de Falha para a Conformação de Chapas	71
2.3.1	<i>Curva Limite de Conformação</i>	71
2.3.2	<i>Linha de Fratura na Conformação</i>	73
2.4	Análise e Caracterização dos Materiais para Estampagem	74
2.4.1	<i>Ensaio de Tração</i>	74
2.4.2	<i>Curvas de Escoamento</i>	76
2.4.3	<i>Índice de Anisotropia</i>	77
2.4.4	<i>Análise Química da Ligas de Zn/Cu</i>	78
2.4.5	<i>Análise Metalográfica de Ligas de Zn/Cu</i>	79
2.4.6	<i>Aplicações da Chapa de Latão C-268</i>	79
3	CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA	82
3.1.1	<i>Curva Tensão x Deformação (Convencional)</i>	82
3.1.2	<i>Curva de Escoamento</i>	84
3.1.3	<i>Índice de Anisotropia</i>	85
3.1.4	<i>Curva Limite de Conformação</i>	86
4	ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO SPIF	89
4.1.1	<i>Objetivo Geral dos Experimentos SPIF</i>	89
4.1.2	<i>Considerações Gerais</i>	89
4.1.3	<i>Método de Gravação e Medição das Deformações</i>	90
4.1.4	<i>Descrição dos Experimentos SPIF</i>	91
4.1.5	<i>Força de Conformação e Atrito no Processo SPIF</i>	94
4.1.6	<i>Análise da Geometria</i>	96
4.1.7	<i>Linha de Fratura na Conformação</i>	98
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EXPERIMENTOS	101
5.1.1	<i>Força de Conformação no Processo SPIF</i>	101
5.1.2	<i>Atrito no Processo SPIF</i>	103
5.1.3	<i>Análise da Geometria dos Experimentos</i>	105
5.1.4	<i>Linha de Fratura Conformação</i>	109
6	CONCLUSÕES	113
7	PESQUISAS FUTURAS	116
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
	APÊNDICE A	126

APÊNDICE B.....	129
APÊNDICE C	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de Pesquisa e Experimento os Estudos da Tese	26
Figura 2: Experimento realizado em estudos por Arruda [14].	27
Figura 3: Experimento realizado em estudos por Tiburi [15].	27
Figura 4: Experimento realizado em estudos por Cavaler [16].	28
Figura 5: Experimento realizado em estudos por Castelan [17].	28
Figura 6: Experimento realizado em estudos por Castelan [13].	28
Figura 7: Experimento realizado em estudos por Daleffe [18].	28
Figura 8: Experimento realizado em estudos por Daleffe [19].	29
Figura 9: Experimento realizado em estudos por Fritzen [20].	29
Figura 10: Experimento realizado em estudos por Lora [21].	29
Figura 11: Elementos básicos necessários para a estampagem incremental de chapas [27]....	32
Figura 12: Equipamento de ISF utilizado no Ford Freeform Fabrication Technology [12]. ...	32
Figura 13- Princípio do processo de estampagem incremental [24]	33
Figura 14- Modelo de blocos da configuração SPIF [26].	34
Figura 15- Modelo de blocos da configuração TPIF: a) Suporte Parcial; b) Suporte Completo [26].	35
Figura 16: Modalidade TIPF com dois diferentes tipos de suporte inferior. Adaptado de [13]	35
Figura 17: Estratégia de Múltiplos Estágios em TPIF [27].	36
Figura 18: Estratégias de MSPIF a) Duflou et al. [31]; b) Skjoedt et al. [32]; c) Malhotra et al. [33]	37
Figura 19: Dispositivo desenvolvido para o processo híbrido de estampagem incremental e estiramento [35].	38
Figura 20: Comparação entre o processo híbrido de SF + ISF, e puramente ISF [35].	39
Figura 21: Comparação da espessura entre processo híbrido de SF + ISF, e puramente ISF [35].	39
Figura 22: ISF assistida por laser a) Representação esquemática; b) Aplicação real de ISF e laser [36].	40
Figura 23: Esquema do equipamento utilizado no processo SPIF com aquecimento [6].	40
Figura 24: Modelo de blocos da configuração DSIF [26]	41

Figura 25: Modelo de blocos da configuração SPIF+HF [39].	42
Figura 26: Aplicações da ISF: a) Superfície refletora para farol; b) Proteção Térmico/Ruído [27]; c) Capô dianteiro de automóvel [41]	43
Figura 27: Processo integrado de fabricação por ISF+SF [36].	43
Figura 28: a) Prótese Craniana desenvolvida por ISF [19]; b) Pótese da coroa dentária [41].	43
Figura 29: Cobertura por elementos geométricos estampados [43].	44
Figura 30: Peças decorativas desenvolvidas por ISF [41] [44]	44
Figura 31: a) Incremento Vertical com valor constante; b) Incremento Vertical variável [48].	48
Figura 32: Estratégias de estampagem: a) Contorno; b) Espiral [26].	49
Figura 33: Representação esquemática da estratégia de estampagem: a) “out-to-in”; b) “in-to-out” [33].	49
Figura 34: Ferramenta Hemisférica: a) Metal duro; b) Revestimento em “Plástico”; [27]; c) Ferramenta Semiesférica em aço W300 [44]	50
Figura 35: Ferramenta de estampagem: a) Ferramenta rígida; b) Ferramenta Vertical Rolante; c) Ferramenta Oblíqua Rolante [45].	51
Figura 36: Aspectos da Ferramenta VRB: a) Limitação ao Ângulo de Parede; b) Acabamento Superficial provocado pela ação da esfera rolante e haste [45].	52
Figura 37: Ferramenta ORB: a) Aspectos construtivos; b) Simulação do processo de ISF [45]	52
Figura 38: Experimentos em ISF: a) Tronco de Cone; b) Tronco de Pirâmide [53].	54
Figura 39: Fraturas em experimentos ISF: a) Tronco de Cone; b) Tronco de Pirâmide [53].	54
Figura 40: Deformações Verdadeiras em um Tronco de Cone [5].	55
Figura 41: Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide com perfil curvilíneo em suas paredes verticais [54].	56
Figura 42: Evolução de FZ no processo SPIF em diferentes experimentos: a) RT: 10 mm b) RT: 5 mm [58].	57
Figura 43: Distribuição das Forças Verticais e Horizontais em função da profundidade do experimento SPIF: a) Alumínio AA1050; b) Aço DP780 [52].	58
Figura 44: Atrito de Deslizamento (μ) durante o processo SPIF: a) Alumínio AA1050; b) Aço DP780 [52].	58
Figura 45: Trajetória da ferramenta: a) Software CAM; b) Trajetória ajustada para LS-DYNA; c) Simulação Numérica da ISF [63]	60

Figura 46: Diferentes topologias de malha utilizados em simulação numérica de ISF: a) Elemento com 1x1 mm; b) 2x2 mm; c) 4x4 mm; d) 4x4 mm, com malha refinada no trajeto de deformação da ferramenta [65].....	61
Figura 47: Análises experimentais e numéricas do processo SPIF [6].	62
Figura 48: Estratégias de deformação utilizadas no software de simulação de elementos finitos LS-Dyna® [6].....	62
Figura 49: Representação dos anéis fatiados [6].	63
Figura 50: Diagrama das deformações no software LS-DYNA: a) Tronco de Pirâmide; b) Tronco de Cone [53].....	64
Figura 51: Comparativo entre perfil XZ Experimental e Simulado [61]	64
Figura 52: Máquinas dedicadas ao processo de estampagem incremental: a) Máquina Dedicada da Universidade de Cambridge [67]; b) Máquina da Amino Corporation [66].	65
Figura 53: Máquina SPIF-A: a) Atuadores Cinemáticos; b) Base Móvel da Plataforma Stewart; c) Conjunto do Spindle [71].	66
Figura 54: Detalhes construtivos da SPIF-A: a) Sistema cinemático (Plataforma Stewart) e Spindle; b) Disposição das células de cargas sobre o Spindle [71].....	67
Figura 55: Dimensões esquemáticas num ensaio de tração [72].....	68
Figura 56: Exemplo de deformações em um componente estampado [73].....	69
Figura 57: Princípio da determinação das deformações. [72]	69
Figura 58: Tipos de deformação em chapa metálica. [72]	70
Figura 59: Formato e dimensões dos Corpos de Prova para determinar a CLC [76].....	72
Figura 60: Diagrama com as Curvas Limite de Conformação de diferentes materiais [77]. ...	72
Figura 61: Deformações principais (ϕ_1 , ϕ_2) de experimentos SPIF em AISI 304 utilizando ferramentas de diâmetros de 10 e 20 mm, e Incremento Vertical de 0,2 e 0,5 mm [46].....	74
Figura 62: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa [72].	75
Figura 63: Corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração. a) CP antes do ensaio; b) CP após o ensaio; [82].	75
Figura 64: Curvas de Escoamento do latão C270, a partir Corpos de Provas com espessuras e larguras diferentes [84].....	77
Figura 65: Corpos de Prova no ensaio de anisotropia [72].....	78
Figura 66: Microestruturas da chapa de latão recozido C-260 [89].	79
Figura 67: Produtos fabricados em latão -268: a) Fechadura; b) Cuba para pia; c) Instrumento musical de sopro	80

Figura 68: Núcleo de Radiador Automotivo; fabricado em latão -268.	80
Figura 69: Corpo de prova para ensaio de tração [82].	82
Figura 70: Curvas Tensão x Deformação do latão C-268, no sentido longitudinal de laminação da chapa.	83
Figura 71: Curvas de Escoamento do latão C-268, no sentido longitudinal de laminação da chapa.	85
Figura 72: Dimensões dos CP's para o ensaio CLC.....	86
Figura 73: Corpos de prova lixados após o processo de corte a laser.	86
Figura 74: Corpos de prova com 1,00 mm de espessura após o ensaio CLC.....	86
Figura 75: Curva CLC experimental do latão C-268.	87
Figura 76: Análise das deformações: a) Processo de gravação eletroquímica; b) Processo de medição das deformações; c) Suporte para fixação dos experimentos.	90
Figura 77: Geometrias dos experimentos: a) Tronco de Pirâmide com parede radial; b) Tronco de Cone com parede radial;	91
Figura 78: Programa CAM: a) Trajeto da ferramenta de estampagem; b) Detalhe do Incremento Vertical (ΔZ).	92
Figura 79: Processo SPIF: a) Máquina Dedicada – SPIF-A; b) Matriz de Estampagem	93
Figura 80: Força Axial e Radial em função da profundidade (DF) $s_0=1.00$ mm $\Delta z=1.00$ mm	94
Figura 81: Gráfico Simplificado das Forças Axial e Radial em função da profundidade (DF) $s_0=1.00$ mm $\Delta z=1.00$ mm.....	95
Figura 82: Evolução do Atrito de Deslizamento (μ) em função da profundidade (DF) $s_0=1.00$ mm $\Delta z=1.00$ mm	95
Figura 83: Gráfico da evolução do Atrito de Deslizamento (μ) em função da profundidade (DF) $s_0=1.00$ mm $\Delta z=1.00$ mm.....	96
Figura 84: Método geométrico para determinação do ângulo de parede (Ψ).....	97
Figura 85: Análise geométrica: a) Mesa CNC de Medição Tridimensional; b) Detalhe do apalpador de contato e área de medição; c) Arquivo tridimensional gerado pela medição	97
Figura 86: Análise geométrica de um experimento SPIF $s_0=1.00$ mm $\Delta z=1.00$ mm	98
Figura 87: Medição das espessuras (s_1) na região estampada.....	98
Figura 88: Elipses próximas a fratura analisadas para a elaboração da LFC.	99
Figura 89: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $s_0 = 0,50$ mm.....	99

Figura 90: Força de Estampagem no Processo SPIF ($s_0: 0.50 \mid \square Z: 1.00 \text{ mm}$).....	101
Figura 91: Relação das Máximas Forças (F) de estampagem alcançadas nos experimentos SPIF	102
Figura 92: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF.	103
Figura 93: Atrito de Deslizamento (\square) de experimentos SPIF ($s_0: 0.50 \mid \varnothing 15 \text{ mm}$).....	104
Figura 94: Atrito de Deslizamento (\square) de experimentos SPIF ($\square Z: 1.00 \mid \varnothing 15 \text{ mm}$).....	104
Figura 95: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,50 \text{ mm} \mid \Delta Z: 0,10 \text{ mm}$	105
Figura 96: Experimentos SPIF: a) Tronco de Cone b) Tronco de Pirâmide [$s_0: 0.50 \mid \square Z: 1.00$ $\mid \varnothing 10 \text{ mm}$].....	106
Figura 97: Valores das profundidades máximas atingidas em todos os experimentos.	107
Figura 98: Menores valores de espessura final (s_1) medido nos experimentos.....	108
Figura 99: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $\mid s_0 = 0,50 \text{ mm}$	109
Figura 100: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $\mid s_0 = 0,70 \text{ mm}$	110
Figura 101: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $\mid s_0 = 1.00 \text{ mm}$	111
Figura 102: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 0.50 \text{ mm} \mid s_0: 0.50 \text{ mm}$).....	126
Figura 103: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 0.10 \text{ mm} \mid s_0: 0.50 \text{ mm}$).....	126
Figura 104: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 1.00 \text{ mm} \mid s_0: 0.70 \text{ mm}$).....	127
Figura 105: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 0.50 \text{ mm} \mid s_0: 0.70 \text{ mm}$).....	127
Figura 106: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 0.10 \text{ mm} \mid s_0: 0.70 \text{ mm}$).....	127
Figura 107: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 1.00 \text{ mm} \mid s_0: 1.00 \text{ mm}$).....	128
Figura 108: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 0.50 \text{ mm} \mid s_0: 1.00 \text{ mm}$).....	128
Figura 109: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\square Z: 0.10 \text{ mm} \mid s_0: 1.00 \text{ mm}$).....	128
Figura 110: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 0.50 \text{ mm} \mid s_0: 0.50 \text{ mm}$).....	129
Figura 111: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 0.10 \text{ mm} \mid s_0: 0.50 \text{ mm}$).....	129
Figura 112: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 1.00 \text{ mm} \mid s_0: 0.70 \text{ mm}$).....	130
Figura 113: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 0.50 \text{ mm} \mid s_0: 0.70 \text{ mm}$).....	130
Figura 114: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 0.10 \text{ mm} \mid s_0: 0.70 \text{ mm}$).....	130
Figura 115: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 1.00 \text{ mm} \mid s_0: 1.00 \text{ mm}$).....	131
Figura 116: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 0.50 \text{ mm} \mid s_0: 1.00 \text{ mm}$).....	131
Figura 117: Atrito Deslizante (\square) no processo SPIF ($\square Z: 0.10 \text{ mm} \mid s_0: 1.00 \text{ mm}$).....	131
Figura 118: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,50 \text{ mm} \mid \Delta Z: 0,50 \text{ mm}$	132
Figura 119: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,50 \text{ mm} \mid \Delta Z: 1,00 \text{ mm}$	132
Figura 120: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,70 \text{ mm} \mid \Delta Z: 0,10 \text{ mm}$	133

Figura 121: Perfis dos experimentos SPIF: s_0 : 0,70 mm ΔZ : 0,50 mm	133
Figura 122: Perfis dos experimentos SPIF: s_0 : 0,70 mm ΔZ : 1,00 mm	133
Figura 123: Perfis dos experimentos SPIF: s_0 : 1,00 mm ΔZ : 0,10 mm	134
Figura 124: Perfis dos experimentos SPIF: s_0 : 1,00 mm ΔZ : 0,50 mm	134
Figura 125: Perfis dos experimentos SPIF: s_0 : 1,00 mm ΔZ : 1,00 mm	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados experimentais da ISF com aquecimento da ferramenta [37].....	41
Tabela 2: Valores médios da força de conformação máxima [46].....	47
Tabela 3: Lista dos lubrificantes utilizados [52].	53
Tabela 4: Limites de formabilidade em SPIF nas geometrias cônicas com ângulo de parede variável [54].....	56
Tabela 5: Parâmetros do processo de ISF e da geometria [6].	61
Tabela 6: Relação entre Experimentos e análise FEM da formabilidade em SPIF de geometrias cônicas [54].....	63
Tabela 7: Terminologias da geometria do Corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração.	76
Tabela 8: Limites de composição química das ligas de latão [%]. [88].....	78
Tabela 9: Propriedades físico-químicas do latão C-268 [86] [88] [90].....	81
Tabela 10: Dados dos ensaios de tração uniaxial obtidos do Latão C-268, no sentido longitudinal de laminação da chapa.	84
Tabela 11: Propriedades mecânicas obtidas do Latão C-268 com $s_0 = 0,50$ mm.....	85
Tabela 12: Índices de Anisotropia dos ensaios.....	85
Tabela 13: Parâmetros dos Experimentos SPIF.	93
Tabela 14: Valores dos Ângulos de Parede (Ψ) e profundidades máximas dos experimentos SPIF.	106
Tabela 15: Valores dos Ângulos de Parede (Ψ) e profundidades máximas dos experimentos SPIF.	108

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CAM	Manufatura assistida por computador (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CLC	Curva Limite de Conformação (<i>Forming Limit Curve</i>)
CNC	Comando Numérico Computadorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
CP	Corpo de Prova
DDDA	Descendente, Descendente, Descendente, Ascendente
DADD	Descendente, Ascendente, Descendente, Descendente
DLC	Diagrama Limite de Conformação (<i>Forming Limit Diagram</i>)
DSIF	Estampagem Incremental com Ferramentas dos Dois Lados (<i>Double Side Incremental Sheet Forming</i>)
EI	Estampagem Incremental (<i>Incremental Sheet Forming – ISF</i>)
FEM	Método de Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
FC	Tronco de Cone (<i>Frusutm Cone</i>)
FP	Tronco de Pirâmide (<i>Frusutm Pyramid</i>)
LFC	Linha de Fratura na Conformação (<i>Fracture Forming Line - FFL</i>)
MSPIF	Estampagem Incremental de Ponto Simples por Múltiplos Estágios (<i>Multistage Single Point Incremental Forming</i>)
SPIF	Estampagem Incremental de Ponto Simples (<i>Single Point Incremental Forming</i>)
SF	Estampagem por Estiramento (<i>Stretch Forming – SF</i>)
TPIF	Estampagem Incremental de Ponto Duplo (<i>Two Point Incremental Forming</i>)

LISTA DE ABREVIATURAS DOS EXPERIMENTOS

FC_D10	Tronco de Cone D_T : 10 mm
FP_D10	Tronco de Pirâmide D_T : 10 mm
FC_D15	Tronco de Cone D_T : 15 mm
FP_D15	Tronco de Pirâmide D_T : 15 mm
FC_P1.0_S0.5_D15	Tronco de Cone ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 15 mm
FP_P1.0_S0.5_D15	Tronco de Pirâmide ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 15 mm
FC_P0.5_S0.5_D15	Tronco de Cone ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 15 mm
FP_P0.5_S0.5_D15	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 15 mm
FC_P0.1_S0.5_D15	Tronco de Cone ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 15 mm
FP_P0.1_S0.5_D15	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 15 mm
FC_P1.0_S0.5_D10	Tronco de Cone ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 10 mm
FP_P1.0_S0.5_D10	Tronco de Pirâmide ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 10 mm
FC_P0.5_S0.5_D10	Tronco de Cone ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 10 mm
FP_P0.5_S0.5_D10	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 10 mm
FC_P0.1_S0.5_D10	Tronco de Cone ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 10 mm
FP_P0.1_S0.5_D10	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.5 mm D_T : 10 mm
FC_P1.0_S0.7_D15	Tronco de Cone ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 15 mm
FP_P1.0_S0.7_D15	Tronco de Pirâmide ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 15 mm
FC_P0.5_S0.7_D15	Tronco de Cone ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 15 mm
FP_P0.5_S0.7_D15	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 15 mm
FC_P0.1_S0.7_D15	Tronco de Cone ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 15 mm
FP_P0.1_S0.7_D15	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 15 mm
FC_P1.0_S0.7_D10	Tronco de Cone ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 10 mm
FP_P1.0_S0.7_D10	Tronco de Pirâmide ΔZ : 1.0 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 10 mm
FC_P0.5_S0.7_D10	Tronco de Cone ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 10 mm
FP_P0.5_S0.7_D10	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.5 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 10 mm
FC_P0.1_S0.7_D10	Tronco de Cone ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 10 mm
FP_P0.1_S0.7_D10	Tronco de Pirâmide ΔZ : 0.1 mm s_0 : 0.7 mm D_T : 10 mm
FC_P1.0_S1.0_D15	Tronco de Cone ΔZ : 1.0 mm s_0 : 1.0 mm D_T : 15 mm
FP_P1.0_S1.0_D15	Tronco de Pirâmide ΔZ : 1.0 mm s_0 : 1.0 mm D_T : 15 mm

FC_P0.5_S1.0_D15	Tronco de Cone Δ_Z : 0.5 mm s_0 : 1.0 mm D_T : 15 mm
FP_P0.5_S1.0_D15	Tronco de Pirâmide Δ_Z : 0.5 mm s_0 : 1.0 mm D_T : 15 mm
FC_P0.1_S1.0_D15	Tronco de Cone Δ_Z : 0.1 mm s_0 : 1.0 mm D_T : 15 mm
FP_P0.1_S1.0_D15	Tronco de Pirâmide Δ_Z : 0.1 mm s_0 : 1.0 mm D_T : 15 mm
Fxy_FC_D10	Força resultante no plano XY Tronco de Cone D_T : 10 mm
Fxy_FP_D10	Força resultante no plano XY Tronco de Pirâmide D_T : 10 mm
Fxy_FC_D15	Força resultante no plano XY Tronco de Cone D_T : 15 mm
Fxy_FP_D15	Força resultante no plano XY Tronco de Pirâmide D_T : 15 mm
Fz_FC_D10	Força no sentido do eixo Z Tronco de Cone D_T : 10 mm
Fz_FP_D10	Força no sentido do eixo Z Tronco de Pirâmide D_T : 10 mm
Fz_FC_D15	Força no sentido do eixo Z Tronco de Cone D_T : 15 mm
Fz_FP_D15	Força no sentido do eixo Z Tronco de Pirâmide D_T : 15 mm

LISTA DE SIMBOLOS

A_0	Área inicial	[mm ²]
a	Comprimento do eixo maior da elipse	[mm]
b	Comprimento do eixo menor da elipse	[mm]
b_0	Largura inicial	[mm]
b_1	Largura final	[mm]
b_u	Largura interna do CP para ensaio CLC	[mm]
B_{MA}	Base maior do cone	[mm]
B_{ME}	Base menor do cone	[mm]
c	Calor específico do material	[0,09 cal/g°C]
d_0	Diâmetro inicial	[mm]
d'	Distância do ponto de partida	[mm]
D_F	Profundidade da fratura (<i>Depth Fracture</i>)	[mm]
D_T	Diâmetro da Ferramenta	[mm]
F	Força	[N]
F_V	Força Vertical	[N]
F_H	Força Horizontal	[N]
F_R	Velocidade de Avanço	[mm/min]
F_{XY}	Força Resultante no plano XY	[N]
$F_{Z_{max}}$	Força Máxima de estampagem no eixo Z	[N]
h	Profundidade do tronco de cone	[mm]
l_0	Comprimento inicial	[mm]
l_1	Comprimento final	[mm]
l_c	Comprimento Paralelo do Corpo de Prova	[mm]
l_t	Comprimento Total do Corpo de Prova	[mm]
k_f	Tensão de Escoamento	[Mpa]
r_0	Anisotropia (Longitudinal ao sentido de laminação)	[–]
r_{90}	Anisotropia (Transversal ao sentido de laminação)	[–]
r_{45}	Anisotropia (Oblíqua ao sentido de laminação)	[–]
R_I	Raio interno do CP para ensaio CLC	[mm]
R_T	Raio da Ferramenta	[mm]

s_0	Espessura inicial da chapa	[mm]
s_1	Espessura final da chapa	[mm]
S	Rotação	[rpm]
X	Eixo X da máquina-ferramenta	[–]
Y	Eixo Y da máquina-ferramenta	[–]
Z	Eixo Z da máquina-ferramenta	[–]

LISTA DE SIMBOLOS GREGOS

σ	Tensão	[N / mm ²]
σ_B	Tensão Máxima (Limite de Resistência)	[N / mm ²]
σ_E	Tensão Limite de Escoamento	[N / mm ²]
Δb	Deformação absoluta na largura da chapa	[mm]
Δl	Deformação absoluta no comprimento da chapa	[mm]
Δs	Deformação absoluta na espessura da chapa	[mm]
Δz	Incremento Vertical da Ferramenta	[mm]
ε	Deformação relativa	[%]
ε_l	Deformação relativa no comprimento da chapa	[%]
ε_b	Deformação relativa na largura da chapa	[%]
$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação relativa máxima	[%]
ε_s	Deformação relativa na espessura da chapa	[%]
E	Módulo de Elasticidade	[GPa]
μ	Atrito de Deslizamento	[-]
δ	Alongamento	[%]
φ	Deformação verdadeira	[-]
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Deformação verdadeira nas direções 1, 2 e 3	[-]
φ_l	Deformação verdadeira no comprimento	[-]
φ_b	Deformação verdadeira na largura	[-]
φ_s	Deformação verdadeira na espessura	[-]
ρ	Densidade do material	[g/cm ³]
ν	Coefficiente de Poisson	[-]
Ψ	Ângulo de Parede	[°]
Ψ_s	Ângulo de Parede Simulado	[°]

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o processo de Estampagem Incremental de Chapas, em Latão C-268 de diferentes espessuras (s_0 : 0.50, 0.70 e 1.00 mm), motivado pela inobservância de pesquisas desta matéria prima neste processo de conformação de chapas. Atualmente, este material tem grande aplicação na confecção de utensílios domésticos (baixelas, travessas, etc) e ferragens para construção civil (espelhos, cubas, etc), instrumentos musicais de sopro e núcleos de radiadores automotivos, tendo assim, um amplo campo de aplicação industrial, e potencial para as aplicações do processo de Estampagem Incremental de Chapas.

A pesquisa está pautada na caracterização das matérias primas, para a obtenção de dados como as Curvas de Escoamento, Índices de Anisotropia (r), Curvas Limite de Conformação (CLC) e em experimentos de Estampagem Incremental de Chapas, realizados em uma máquina dedicada a este processo de conformação. Para a realização dos experimentos, foram utilizados Incrementos Verticais com diferentes valores (Δz : 0.10, 0.50 e 1.00 mm), assim como duas ferramentas de estampagem (D_T : Ø10 e Ø15 mm). Foram aplicadas duas formas geométricas diferentes: Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide, ambos com perfil radial das paredes verticais. Ao todo, foram realizados 15 experimentos diferentes na modalidade SPIF. Os experimentos foram realizados em uma máquina dedicada ao processo, capaz da aquisição dos valores de Força (F_x , F_y e F_z) durante a realização dos testes.

Com a realização dos experimentos SPIF, foi possível a elaboração da Linha Limite de Fratura – LFC da chapa latão C-268 nas três espessuras investigadas, onde os resultados apontam para valores maiores de deformação verdadeira (φ_1 vs φ_2), quando comparados aos valores da CLC. Adicionalmente, a LFC das três espessuras de chapas analisadas, apontam os valores das maiores deformações verdadeiras (φ_1) muito próximos, evidenciando neste caso que a diminuição do Incremento Vertical (Δz) é mais relevante para a estampagem do que o aumento da espessura da chapa.

As geometrias Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide apresentaram discrepâncias geométricas toleráveis em relação ao perfil projetado, mas diferentes entre si, influenciados pelo retorno elástico diferente de cada geometria. Entretanto, suas fraturas apresentaram o mesmo comportamento, propagação no sentido meridional. Os experimentos SPIF realizados com a ferramenta de estampagem com Ø10mm proporcionaram as maiores profundidades.

A medição da espessura final (s_1) próximas as regiões fraturadas, comprovou os valores medidos não ultrapassaram os respectivos valores resultantes da expressão matemática Lei do Seno, e ainda, que quanto menor a espessura inicial (s_0) da chapa, menor a variação dos valores medidos e calculados.

A análise das Forças (F_x , F_y e F_z) resultantes do processo SPIF mostram que quanto maior o Incremento Vertical (Δz), maior a espessura inicial (s_0) da chapa, e maior do diâmetro (D_T) da ferramenta de estampagem, maiores serão as Forças necessárias no SPIF. Adicionalmente, foi possível determinar os valores de Atrito (μ), obtidos em função das Forças (F_x , F_y e F_z) do processo SPIF.

Palavras-chave: Estampagem Incremental, Latão C-268, Força (F) de Estampagem, Atrito (μ).

ABSTRACT

This paper presents a study of the Incremental Sheet Forming process, in Brass C-268 of different thicknesses (s_0 : 0.50, 0.70 and 1.00 mm), motivated by non-observance of research of this raw material in this sheet forming process. Currently, this material has great application in the manufacture of household items (plates, platters, etc.) and hardware for building (locks, vats, etc.), wind musical instruments and automotive radiator cores, having thus, a large industrial application field, and potential for the applications of the Incremental Sheet Forming process.

The research is based on the characterization of raw materials, to obtain data such as Flow Curves, Anisotropy Indices (r), Forming Limit Curve and in Incremental Sheet Forming experiments, performed on a machine dedicated to this forming process. For the realization of the experiments, Vertical Increments with different values were used (Δz : 0.10, 0.50 e 1.00 mm), As well as two forming tools (D_T : $\varnothing 10$ e $\varnothing 15$ mm). Two different geometric forms were applied: Cone Frustum and Pyramid Frustum, both with radial profile of vertical walls. In all, 15 different SPIF experiments were performed. The experiments were carried out in a machine dedicated to the process, able to acquire the values of Force (F_x , F_y e F_z) during the tests.

With the realization of SPIF experiments, it was possible to elaborate the Fracture Forming Line – FFL of Brass C-268 sheet, In the three thicknesses investigated, Where the results indicate higher values of true strain (φ_1 vs φ_2), when compared to the FLC values. Additionally, the FFL of the three sheet thicknesses analyzed, indicate the values of the highest true deformations (φ_1) very close, evidencing in this case, that the decrease of Vertical Increment (Δz) is more relevant for the forming than the increase in sheet thickness.

The Cone Frustum and Pyramid Frustum geometries presented tolerable geometric discrepancies in relation to the projected profile, more different from each other, influenced by different springback of each geometry. However, their fractures presented the same behavior, meridional direction propagation. The SPIF experiments performed with the forming tool with $\varnothing 10$ mm provided the greatest depths.

The final thickness (s_1) measurement near the fractured regions, proved the measured values did not exceed the respective values resulting from the mathematical expression Sine Law, and also, that the lower the initial thickness (s_0) of sheet, lower the variation of the measured and calculated values.

Analysis of Forces (F_x , F_y e F_z) resulting from the SPIF process, show that the larger the Vertical Increment (Δz), larger the initial thickness (s_0) of the sheet, and larger diameter (D_T) of the forming tool, larger will be the necessary forces in SPIF. In addition, it was possible to determine the values of Friction (μ), obtained in function of the SPIF Forces (F_x , F_y e F_z).

Keywords: Incremental Sheet Metal Forming, C-268 Brass, Forming Force (F), Friction (μ).

1 INTRODUÇÃO

O atual cenário mundial aponta um aprimoramento contínuo e incessante em todos os setores industriais, com a melhoria dos processos e a adaptação de novos materiais objetivando a flexibilidade, melhoria de qualidade e redução dos custos. Dentro deste viés, a Estampagem Incremental - EI (*Incremental Sheet Forming – ISF*) tem ganhado muito espaço nas pesquisas a nível mundial [1].

A grande maioria dos produtos oriundos da conformação de chapas metálicas deriva do processo convencional, combinação de matriz e prensa, responsável especialmente para produção em massa. Destes processos, citam-se utensílios domésticos, ferragens para construção civil, carrocerias e peças de automóveis, componentes aeronáuticos, etc [2].

A EI atualmente figura entre os principais tópicos de pesquisa na área de conformação de chapas, pois é ideal para produção de pequenos lotes de peças e prototipagem rápida. Tem grande flexibilidade e um reduzido custo operacional, quando comparado aos processos convencionais de conformação [3]. O processo consiste na conformação de uma geratriz, empregando um pequeno punção, comandado por controle numérico (CNC), que vai conformando aos poucos a peça através de pequenas deformações [4].

O custo reduzido envolvido no processo se deve a inexistência de uma matriz, ou quando existir, a mesma pode ser fabricada com material de qualidade inferior, comparada às dos processos convencionais, e podendo ainda ser aplicada de forma parcial ao processo [5].

Além das novas técnicas de produção industrial, atualmente é inegável a importância das técnicas de simulação numérica para processos de fabricação de peças, a fim de aperfeiçoar as soluções, reduzir os tempos de desenvolvimento e os custos de material. A simulação computacional é uma das ferramentas que a engenharia pode utilizar para prever falhas, prever a geometria final da peça manufaturada, as tensões e deformações [6].

Deste modo, é de fundamental importância a alimentação precisa do *software* com dados referentes ao material simulado, como a curva de escoamento, índice de anisotropia, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. No caso de produtos decorrentes da conformação mecânica de chapas, as Curvas Limite de Conformação (CLC) são primordiais, para poder prever as possíveis regiões de falha do material na simulação. Contudo, alguns estudos apontam a CLC como ineficaz na previsão de limite de conformação no processo de ISF, onde, recentes pesquisas [7, 8] apontam os dados da Curva Limite de Tensão na

Deformação (CLTD) e da Linha de Fratura na Conformação (LFC) como mais promissores no campo da simulação numérica para ISF [9, 10].

Deste modo, o principal objetivo deste trabalho de estudo concentra-se no estudo das forças de conformação e dos parâmetros (CLC e LFC) como delimitadores da conformação no processo de ISF do latão C268 (Cu35Zn), material amplamente aplicado na indústria mecânica, mas ainda com pesquisas incipientes nesta área, avaliando experimentalmente os dados coletados, comparando com outros materiais clássicos, como ligas de aço, alumínio e titânio. Alguns trabalhos anteriores desenvolvidos servirão de base inicial para o desenvolvimento da pesquisa, principalmente associados as dissertações de mestrado e teses de doutorado desenvolvidas neste tema. O fluxograma do trabalho segue exposto na Figura 1.

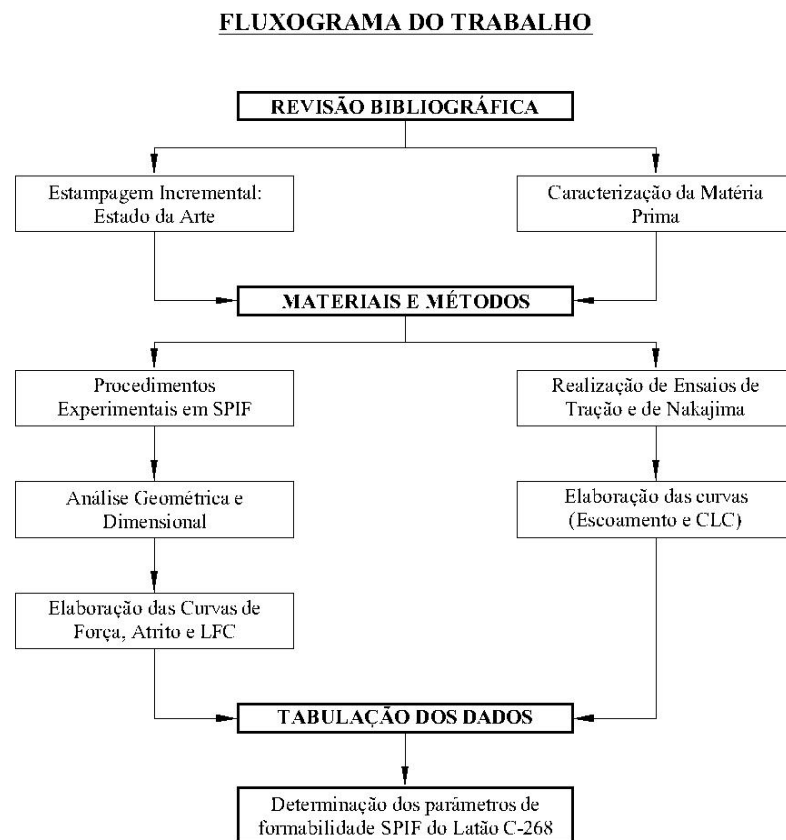


Figura 1: Fluxograma de Pesquisa e Experimento os Estudos da Tese

1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação para pesquisa ocorre visto que atualmente há uma enorme concentração de trabalhos focados em materiais clássicos da indústria, como ligas de aço, alumínio e titânio, sem trabalhos específicos em outras ligas metálicas, como é o caso deste material investigado.

Adicionalmente, este trabalho avaliará as forças de conformação e o atrito durante o processo de ISF, e assim, fomentando novas pesquisas deste material.

Além da empresa japonesa Amino [11], que já comercializa esta técnica com a produção de máquinas dedicadas para o processo de ISF, especialmente para produtos da linha automotiva, também já existem pesquisas junto a empresa americana Ford [12] na utilização desta técnica para a prototipagem de produtos da sua linha automotiva também. Além da área industrial, o processo de ISF vem ganhando espaço no campo biomédico, com a fabricação de próteses cranianas [13].

Deste modo, justifica-se que está pesquisa trará dados substanciais do processo de SPIF em latão C-268, informando seus parâmetros de conformabilidade, o comportamento das forças envolvidas durante o processo de ISF, o atrito resultante, posicionando-a como referência bibliográfica para novas pesquisas experimentais, ou ainda, a utilização destes resultados na simulação numérica do processo SPIF para este tipo de material.

Complementando a importância das pesquisas sobre ISF, este trabalho faz parte de uma série de projetos desenvolvidos pelo LdTM:



Figura 2: Experimento realizado em estudos por Arruda [14].

Arruda [14] desenvolveu um processo de fabricação flexível para placa absorvedora de um coletor solar, empregando a técnica da Estampagem Incremental e simulação numérica no processo de conformação, utilizando a liga de alumínio AA 1100 com 1 mm de espessura (Figura 2).



Figura 3: Experimento realizado em estudos por Tiburi [15].

Tiburi [15] concentrou-se em pesquisar e apresentar as principais características do processo de Estampagem Incremental, suas aplicações, vantagens e limitações assim como verificar sua viabilidade econômica em aplicações industriais, utilizando a liga de alumínio AA 1100 com 1 mm de espessura (Figura 3).

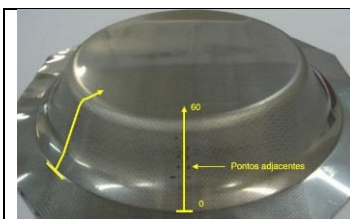


Figura 4: Experimento realizado em estudos por Cavaler [16].

Cavalier [16], em seu trabalho verificou o comportamento do aço inoxidável austenítico AISI 304L, quando aplicado ao processo de Estampagem Incremental, baseando-se nos parâmetros: Raio da ferramenta (R_T), Ângulo de Parede (ψ) e Incremento Vertical (Δ_z) (Figura 4).

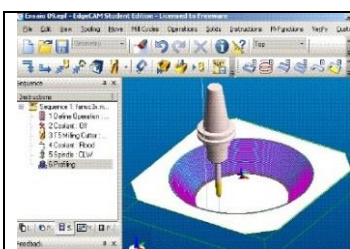


Figura 5: Experimento realizado em estudos por Castelan [17].

Castelan, num primeiro momento [17], ateu-se às pesquisas sobre a adaptação de um equipamento CNC e ferramentas computacionais CAD/CAM na conformação de chapas de alumínio comercialmente puro por meio do processo de Estampagem Incremental, utilizando a liga de alumínio série 1000, com 0,50 mm de espessura (Figura 5).



Figura 6: Experimento realizado em estudos por Castelan [13].

Em seguida, Castelan [13], concentrou suas investigações na fabricação de implante craniano a base de chapas de titânio comercialmente puro por meio do processo de Estampagem Incremental, utilizando chapas de Titânio Puro Grau 2, com 0,50 mm espessura (Figura 6).

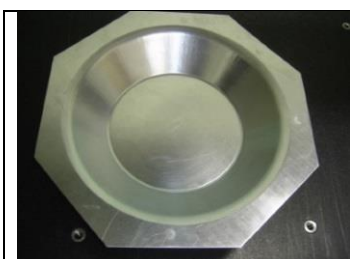


Figura 7: Experimento realizado em estudos por Daleffe [18].

Daleffe [18], concentrou suas ações no desenvolvimento de um dispositivo (matriz) voltado à aplicação da Estampagem Incremental, analisando os limites de estampabilidade e de espessura da chapa de alumínio puro, com 0,50 mm de espessura (Figura 7).



Figura 8: Experimento realizado em estudos por Daleffe [19].

Em outra pesquisa, Daleffe [19], dedicou seus esforços na fabricação de prótese craniana personalizada em titânio puro, por meio da Estampagem Incremental, objetivando um melhor resultado estético e menor custo para o paciente (Figura 7).

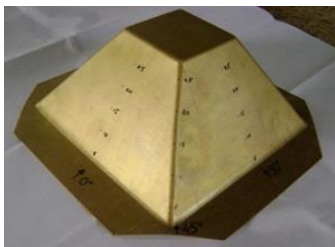


Figura 9: Experimento realizado em estudos por Fritzen [20].

Fritzen [20], pesquisou o comportamento da chapa de latão C-260, com 0,50 mm de espessura, para o processo de Estampagem Incremental, baseando-se nos parâmetros: Ângulo de parede (ψ) e Incremento vertical (Δ_z) e estratégia do caminho da ferramenta. Neste trabalho, foi analisado o acabamento da superfície conformada, as deformações verdadeiras (ϕ) e a espessura final (s_1) ao final do processo (Figura 9).



Figura 10: Experimento realizado em estudos por Lora [21].

Lora [21], avaliou a aplicação do processo de estampagem híbrido (processo convencional e incremental) em uma mesma chapa metálica, analisando o comportamento das deformações ocorridas na geratriz, o que até então só havia sido analisado separadamente, sem um aprofundamento aplicado ao processo híbrido. Para a pesquisa, foi utilizado chapas de aço EM 10130 com Grau DC04 (Figura 10).

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa se concentra no estudo e análises dos parâmetros que ditam os limites seguros de conformação de chapas e as forças envolvidas no processo de ISF do latão C-268, de tal modo que possam ser usados em *software* de simulação numérica e que sirvam de referência para outras investigações. O trabalho será conduzido teórica e experimentalmente, sendo os objetivos específicos os seguintes:

- Caracterização química e física das chapas de Latão C-268, com espessuras de 0.50, 0.70 e 1.00 mm, largamente usado na produção. Definição das Curvas Limite de Conformação e Fratura (CLC e LFC) do material proposto, por meio de experimentos práticos.
- Concluída esta etapa, experimentos práticos com geometrias e incrementos verticais (Δz) distintos em ISF serão realizados.
- Com os dados experimentais tabulados e definidos, análise e discussão dos resultados, confrontando-os conforme a variação de incremento vertical (Δz) e espessura inicial (s_0).

2 ESTADO DA ARTE

O presente capítulo apresenta as investigações atuais a nível experimental e numérico, relacionadas a estampagem incremental, com ênfase na modalidade por ponto simples (SPIF) e sobre os critérios de falhas estudados e aplicados a este processo, verificando as curvas limites de conformação e de fratura, recorrendo aos resultados oriundos de vários investigadores, com a finalidade de examinar e avaliar os parâmetros que influenciam neste processo de conformação. Do mesmo modo, será apresentado os resultados encontrados em outras literaturas, referentes às características da chapa de latão utilizada nos experimentos.

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

O processo de estampagem incremental foi descrito e patenteado por Lezak em 1967 [22], época que a tecnologia CNC ainda era elementar. Por conta disso, apenas na década de 90, com a evolução tecnológica dos equipamentos CNC, sobretudo graças aos avanços no campo eletrônico, as pesquisas sobre ISF retornaram, sendo amplamente pesquisada e desenvolvida [23, 24]. Deste período investigativo, além de peças-protótipos em geral, componentes automotivos (para-lama, capô, suporte de farol), componentes aeroespaciais (carenagens) e componentes náuticos (chapas para o casco de embarcações) foram desenvolvidos com sucesso [25].

Para um processo de estampagem convencional, são necessárias ferramentas e componentes específicos para a realização do trabalho, como matrizes dedicadas e prensas, acarretando no aumento do prazo de entrega do produto final e o custo operacional.

No processo de estampagem incremental, a partir de poucos recursos (prensa-chapas, punção e uma máquina CNC), é possível conformar uma série de produtos com formatos diversos, permitindo tamanha flexibilidade de projeto e manufatura das peças, tornando-se uma alternativa competitiva economicamente e eficazmente fabricar pequenos lotes de produtos estampados em chapas de metal. Por isso, oferece um processo de produção válido para corresponder à necessidade de customização em massa, o que é considerado como o futuro da fabricação. No processo ISF, a chapa metálica é presa em um prensa-chapas, com uma abertura, em uma máquina programável, e uma ferramenta com a ponta esférica/hemisférica se move sobre a chapa fixada, a deformando por meio de incrementos verticais à chapa, de acordo com as instruções CNC recebidas (Figura 11) [26].

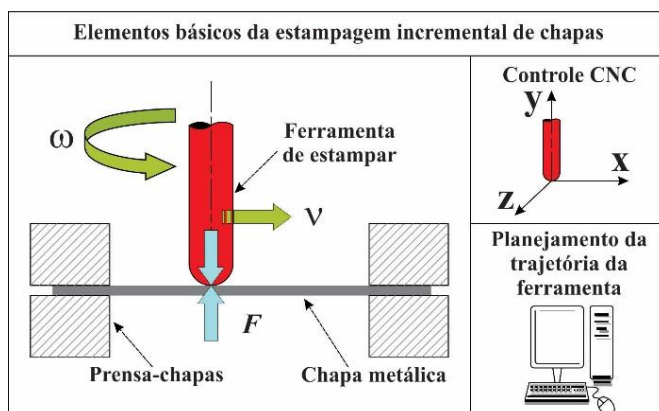


Figura 11: Elementos básicos necessários para a estampagem incremental de chapas [27]

Antigamente, a economia das indústrias estava baseada na produção em massa, no entanto, uma combinação de avanços crescentes na tecnologia e informação, tornam possível fabricar produtos personalizados. No mercado mundial competitivo, os clientes estão exigindo um design mais flexível e pessoal em qualidade, desempenho, serviços e estética dos produtos com aproximadamente o mesmo custo (se não menor) e qualidade (se não mais) [26].

Por se tratar de um processo recente, a ISF não possui atualmente um uso industrial consolidado, muito embora seu potencial é mencionado em diversas literaturas [26, 27, 28, 29]. Contudo, a sua simplicidade processual aliada à extrema necessidade de as indústrias minimizarem seu “lead-time”, já impulsiona um olhar com mais afinco neste processo.

A exemplo disso, a empresa norte americana *Ford Motor Company*®, por meio do seu laboratório de prototipagem F3T (*Ford Freeform Fabrication Technology*), pertencente ao seu centro de pesquisa e inovação (*Ford Research and Innovation Center*), já estuda e aplica o processo de estampagem incremental, utilizando tecnologias CNC e robótica, em parceria com universidades, centros científicos e com o Departamento de Energia do país. Seu objetivo é simples, diminuir o tempo em que seu “produto” permanece no F3T, para liberá-lo na produção mais rapidamente possível [12].



Figura 12: Equipamento de ISF utilizado no Ford Freeform Fabrication Technology [12].

2.1.1 Descrição do Processo de Estampagem Incremental

No processo de estampagem incremental, a chapa a ser conformada (*blank*) é presa em um suporte fixo (prensa-chapas), geralmente junto a uma máquina CNC. Acoplado ao eixo árvore (*spindle*), uma ferramenta simples (haste cilíndrica com a ponta esférica/hemisférica) produz uma pequena deformação na chapa. A medida que a ferramenta se desloca sobre a chapa, com gradativos incrementos verticais negativos (Δz), vai deformando as novas regiões de contato (Figura 13) [23]. Geralmente o produto a ser fabricado e a trajetória de deformação da ferramenta, são gerados a partir dos *softwares* CAD¹ / CAM².

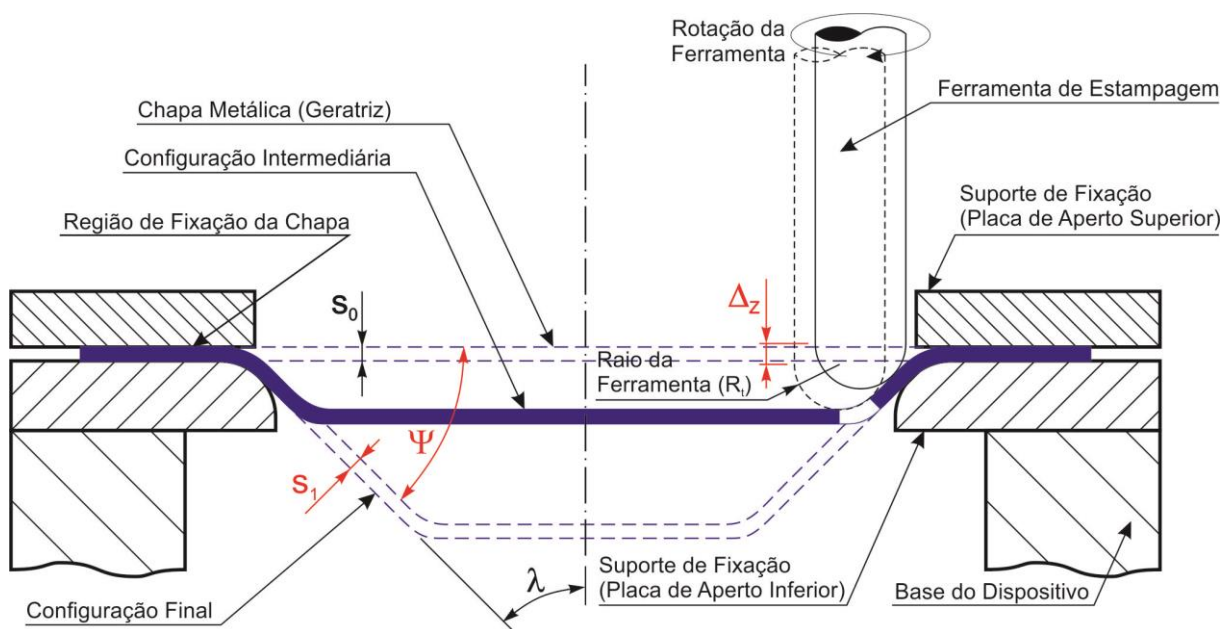


Figura 13- Princípio do processo de estampagem incremental [24]

2.1.2 Configurações da Estampagem Incremental

O processo de ISF pode ser classificado quanto a utilização (completo/parcial) ou não de suportes (matrizes) envolvidos no processo de conformação [27]. Na configuração de ISF que utiliza algum tipo suporte inferior, proporciona uma gama ampla de possibilidades de trabalho, diferente da configuração sem suporte. Estas configurações são descritas a seguir.

¹Do inglês *Computer Aided Design*, que significa *Desenho Assistido por Computador*.

²Do inglês *Computer Aided Manufacturing*, que significa *Manufatura Assistido por Computador*.

2.1.2.1 Estampagem Incremental de Ponto Simples

Quando a estampagem incremental é realizada sem suporte algum, é classificada como Ponto Simples (*Single-Point Incremental Forming - SPIF*), e é a mais antiga e simples forma de estampagem incremental [26].

A Figura 14 ilustra a configuração SPIF, com uma ferramenta com ponta esférica, a chapa fixada à um prensa-chapas, e sem suporte inferior. Nesta configuração, geralmente a ferramenta entra em contato com a chapa perto do limite de fixação do prensa-chapas, num local programado, movimentando-se conforme a programação CNC [26]. Como pode se perceber na Figura 14, não existe qualquer tipo de apoio inferior, de modo que o formato final da peça é determinado apenas pelo movimento da ferramenta. Esta configuração da ISF também é conhecida por “*die-less*”, que significa sem ferramenta.

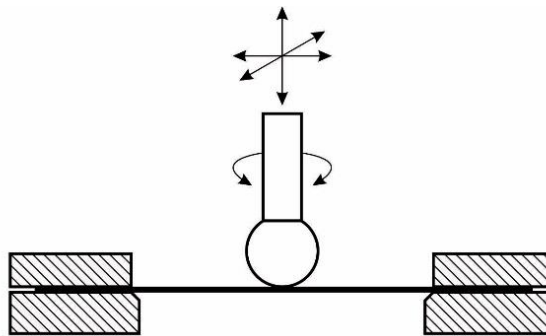


Figura 14- Modelo de blocos da configuração SPIF [26].

2.1.2.2 Estampagem Incremental de Ponto Duplo

Quando a estampagem incremental é realizada com suporte inferior, é classificada como Ponto Duplo (*Two Points Incremental Forming - TPIF*), é uma outra modalidade de ISF, realizada pela primeira vez em 2001, por Matsubara [26].

Pela Figura 15 é possível visualizar a chapa fixada ao prensa-chapas, e abaixo o suporte de apoio à estampagem. Conforme o processo de estampagem incremental é realizado, o prensa-chapas move-se adequadamente no sentido de Z, conforme as setas indicadas na Figura 15. Nesta mesma figura é possível verificar um suporte “parcial” e um suporte “completo” [26].

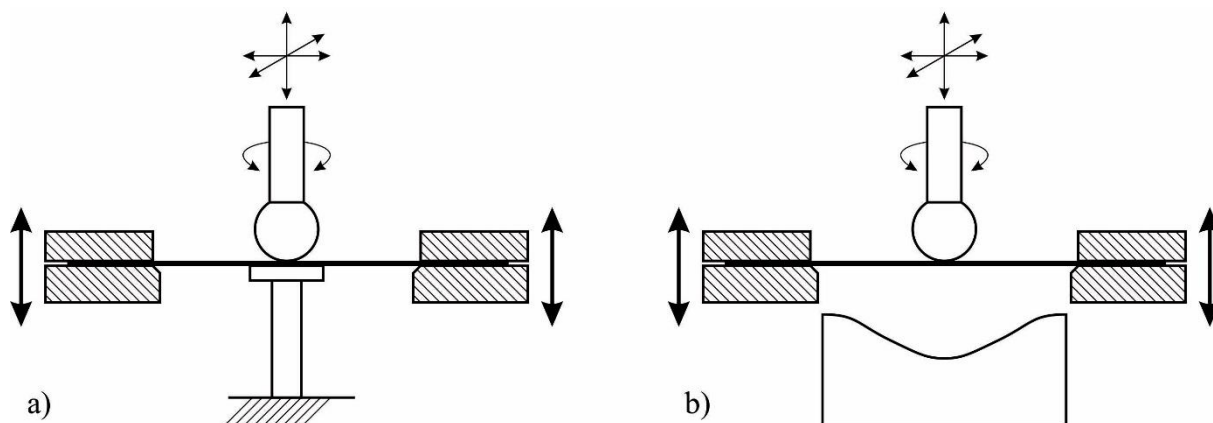


Figura 15- Modelo de blocos da configuração TPIF: a) Suporte Parcial; b) Suporte Completo [26].

A utilização de suportes completos na TPIF divide-se ainda em positivo (ressalto) (Figura 16a) ou negativo (cavidade) (Figura 16b). Neste caso, é evidente que para alcançar formas com maior precisão neste processo se utiliza suporte inferior (matriz) específico no formato desejado, principalmente para obtenção de superfícies complexas e orgânicas. Estes suportes podem ser fabricados a partir de materiais simples, como polímeros, diminuindo o tempo de fabricação [23, 28, 30].

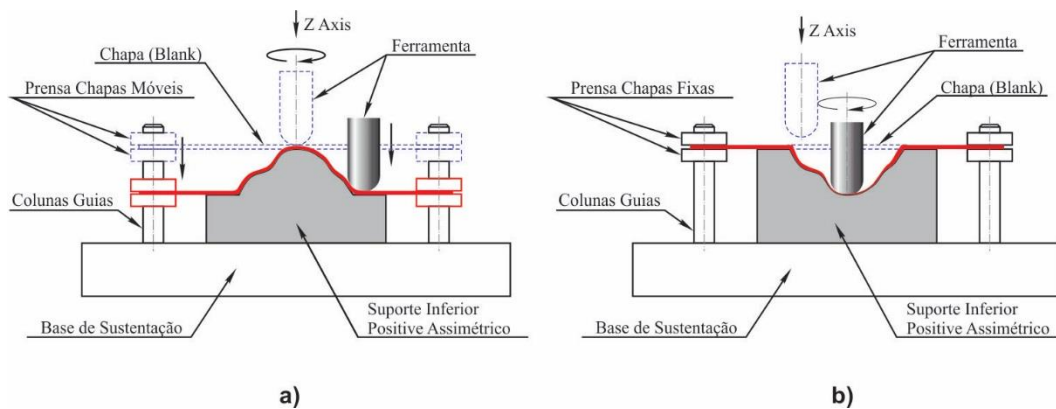


Figura 16: Modalidade TPIF com dois diferentes tipos de suporte inferior. Adaptado de [13]

Para a realização da ISF com um molde inferior positivo, é necessário que o dispositivo do prensa-chapas tenha liberdade nos movimentos verticais (colunas guias e talas deslizantes), algo desnecessário para a realização da ISF com suporte inferior negativo [13]. O fato do prensa-chapas deslocar-se livremente, reduz a quantidade de força necessária para deformar a chapa e, conseqüentemente, as tensões residuais, fazendo com que o retorno elástico seja menor ao desprender o prensa-chapas [25].

2.1.2.3 Derivações das Configurações da Estampagem Incremental

A medida que alguns aspectos das configurações SPIF e TPIF foram sendo compreendidos, ou algumas limitações ainda impediam uma evolução nas pesquisas, novas configurações, ou “derivações” destas modalidades, começaram a ser utilizadas no campo investigativo.

Por meio de várias investigações, já se demonstrou com sucesso que os processos SPIF e TPIF alcançam ângulos de parede (ψ) entre 60° e 70° para vários tipos de alumínio e chapas de aço com 1 mm de espessura, utilizando parâmetros adequados no processo, como diâmetro da ferramenta, avanço e rotação da ferramenta, além do passe vertical. Todavia, ângulo de parede (ψ) com 90° não é possível desta forma, pois quanto maior o ângulo de parede (ψ), menor será a espessura final da chapa na região conformada, ocasionando a fratura da chapa, devido à sua fragilidade mecânica decorrente do afinamento da chapa.

A lei do Seno (*Sine Law*) é uma equação matemática (*Eq. 1*) usada para determinar a espessura da chapa na região deformada, em função da inclinação do ângulo de parede (ψ).

$$s_1 = s_0 \times \text{sen}(90 - \Psi) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

s_1 = espessura final da chapa [mm]

s_0 = espessura inicial da chapa [mm]

ψ = ângulo de parede [$^\circ$]

Entretanto, a Lei do Seno não prevê como ocorre a variação da espessura ao longo do processo, e apresenta diferenças com medições experimentais [27].

Para alcançar ângulos de parede (ψ) maiores, Hirt *et al.* [27] propôs a utilização de Múltiplos Estágios no processo TPIF, alternando o movimento da ferramenta de estampagem de ascendente para descendente, e assim, alcançando 80° no ângulo de parede (ψ),

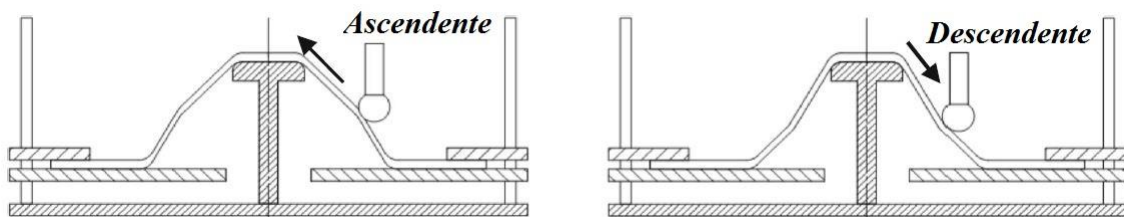


Figura 17: Estratégia de Múltiplos Estágios em TPIF [27].

Duflou *et al.* [31] realizaram Estampagem Incremental de Ponto Simples por Múltiplos Estágios (*Multistage Single Point Incremental Forming - MSPIF*) em peças cônicas em Al3003-O, utilizando 5 estágios de deformação, onde o trajeto da ferramenta sempre foi descendente, deslocando-se da parte externa para a interna da peça (Figura 18a).

Skjoedt *et al.* [32] também realizou experimentos em MSPIF, utilizando 5 estágios de deformação, mas alternando as estratégias do caminho da ferramenta em (Figura 18b):

- Descendente, Descendente, Descendente, Ascendente (DDDA)
- Descendente, Ascendente, Descendente, Descendente (DADD)

Foi observado na estratégia DADD houve fratura na última etapa, enquanto que na estratégia DDDA se obteve sucesso no processo. Além disso, foi demonstrado que a variação da espessura é influenciada pela trajetória da ferramenta (Ascendente – Descendente).

Malhotra *et al.* [33] realizou experimentos MSPIF alternando simultaneamente o trajeto da ferramenta (Ascendente – Descendente) a fim de deslocar o material de ambas as regiões da base e da parede para o canto do componente cilíndrico, obtendo um ângulo de parede de 90 ° com êxito (Figura 18c).

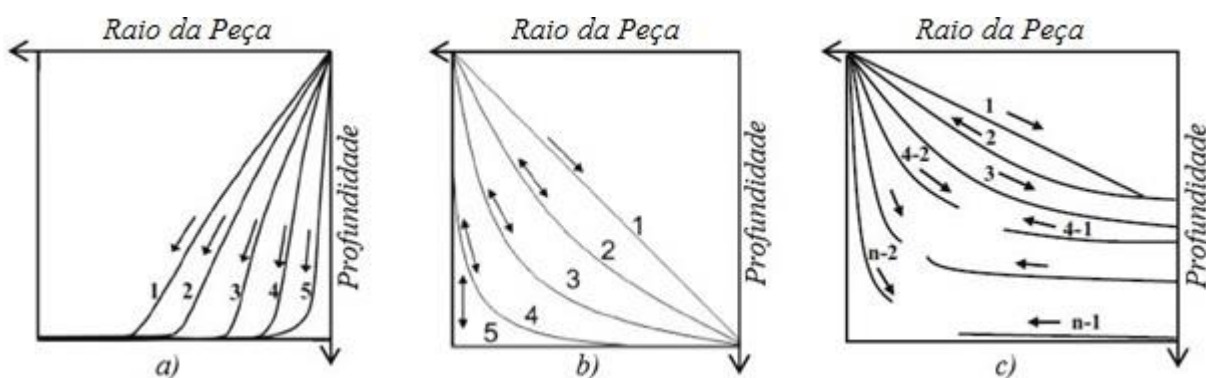


Figura 18: Estratégias de MSPIF a) Duflou *et al.* [31]; b) Skjoedt *et al.* [32]; c) Malhotra *et al.* [33]

Recentemente, Lingan *et al.* [34] apresentaram uma metodologia para prever a geometria formada a cada etapa do MSPIF, obtendo bons resultados.

No intuito de reduzir o tempo de estampagem, e proporcionar uma melhor distribuição da espessura da chapa e precisão geométrica, Araghi *et al.* propuseram a junção do processo de estiramento de chapas (*Stretch Forming - SF*) e a estampagem incremental, criando um processo híbrido (SF + ISF), haja vista que o estiramento de chapas é conhecido por obter peças com uma boa precisão, devido ao estado de tensão à tração [35].

Para a realização do experimento, Araghi *et al.* Projetaram e desenvolveram um dispositivo em que se pudesse fazer o estiramento e a estampagem incremental.

A Figura 19 mostra uma máquina de conformação DNLC AMINO-RB em que o sistema de controle hidráulico original foi substituído por quatro fusos (eixo árvore), acionados por servo motor. Os movimentos de parafuso são controlados por um sistema de controle de circuito fechado [35].

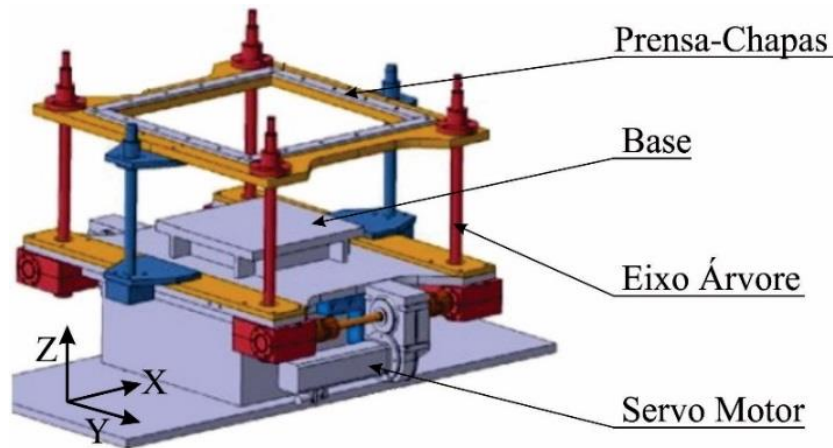


Figura 19: Dispositivo desenvolvido para o processo híbrido de estampagem incremental e estiramento [35].

Com esta configuração hidráulica, todo o conjunto do prensa-chapas é movimentado na vertical (eixo Z), podendo exercer uma força de 50 kN a fim de realizar as experiências com conformação por estiramento. No centro do dispositivo encontra-se a base onde é fixado o suporte para o processo de estampagem incremental e estiramento.

Nos experimentos realizados, foi desenvolvido em alumínio um suporte positivo com formato semi hemisférico e com um rebaixo circunferencial. A chapa utilizada nos testes foi de aço DC06 com 0,70 mm de espessura [35].

Para a realização dos experimentos, Araghi *et al.* separaram em duas formas:

- SF + ISF: inicialmente uma pré-forma é criada pelo processo de estiramento da chapa sobre o suporte inferior. O prensa-chapas é deslocado a uma profundidade de 80 mm em relação ao cume do suporte inferior. Depois disso, o rebaixo circunferencial é deformado pelo processo de ISF (Figura 20).
- ISF: para ter condições comparáveis para entre SF + ISF, o processo ISF é realizado em duas fases: em primeiro lugar, um pré-forma é criada, que corresponde à pré-forma criada pelo processo de SF. Num segundo momento, o rebaixo circunferencial é deformado (Figura 20). Para as operações ISF, tanto in híbrido e em ISF puro, foram usadas uma ferramenta com diâmetro de 30 mm e um incremento vertical (Δ_z) de 0,1 mm.

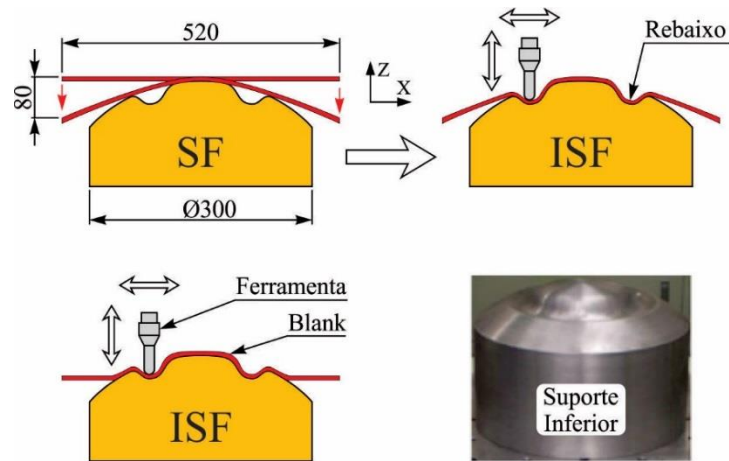


Figura 20: Comparação entre o processo híbrido de SF + ISF, e puramente ISF [35].

Os resultados experimentais apresentaram uma redução notável do tempo de produção pelo processo híbrido, comparado com ISF, especialmente quando as regiões que devem ser processadas por ISF são identificadas previamente.

Uma análise por elementos finitos (*Finite Element Analysis – FEA*) realizada também se mostrou promissora na redução do tempo necessário para a simulação, então, um planejamento do processo SF + ISF com base em FEA parece ser mais viável do que para o puramente ISF.

A distribuição da espessura na região do rebaixo circunferencial se apresentou mais homogênea no processo híbrido, contudo, a região central da estampagem apresentou uma redução da espessura em torno de 6% neste processo, enquanto que pelo processo de ISF quase que se manteve nulo (Figura 21).

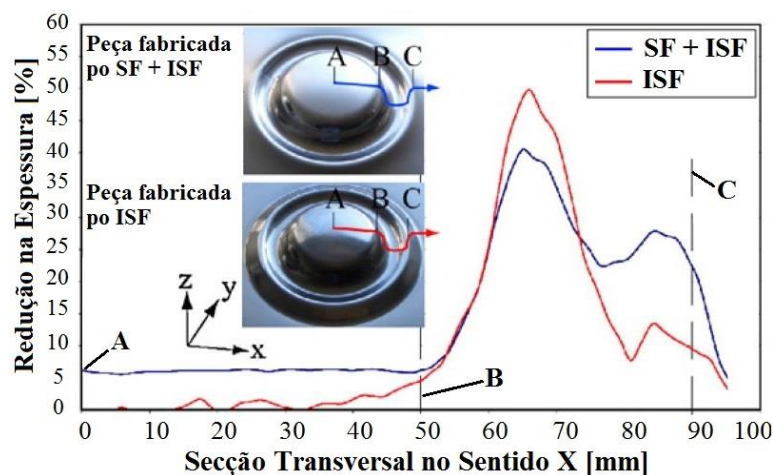


Figura 21: Comparação da espessura entre processo híbrido de SF + ISF, e puramente ISF [35].

Aproveitando esta configuração híbrida em outra pesquisa, Araghi *et al.* [36] utilizaram raio laser para aquecer a região a ser estampada por ISF. A motivação decorre do

fato que ligas de Titânio e Magnésio normalmente apresentam uma limitada conformabilidade à temperatura ambiente, devido a microestrutura hexagonal.

Nesta pesquisa com aquecimento por laser, Araghi *et al.* [36], avaliaram a conformabilidade e endurecimento da liga de magnésio AZ31, com 1,55 mm de espessura. A Figura 22a ilustra de forma esquemática os testes experimentais, já a Figura 22b apresenta o este processo no momento de uso.

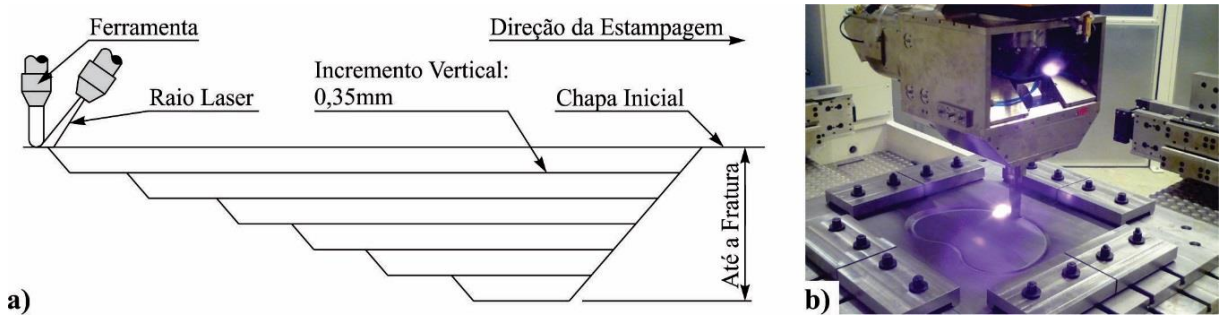


Figura 22: ISF assistida por laser a) Representação esquemática; b) Aplicação real de ISF e laser [36]

Os resultados apresentaram um aumento considerável da conformabilidade a uma temperatura elevada de 200° C, devido a uma intensa ativação do sistema de deslizamento dos grãos. Com uma temperatura ainda mais elevada de 250° C, a conformabilidade não aumentou, apenas a dureza da chapa.

Já Ambrogio *et al.* [37], utilizaram uma fonte de energia DC para aquecer a ferramenta de estampagem incremental, com o objetivo de aumentar o ângulo de parede (ψ) das ligas de alumínio (AA2024-T3), magnésio (AZ31B-O) e titânio (Ti6Al4V), todas com 1 mm de espessura. Um tronco de cone com base maior de 120 mm e 40 mm de profundidade foi estampado utilizando uma ferramenta com 12 mm de diâmetro (Figura 23).

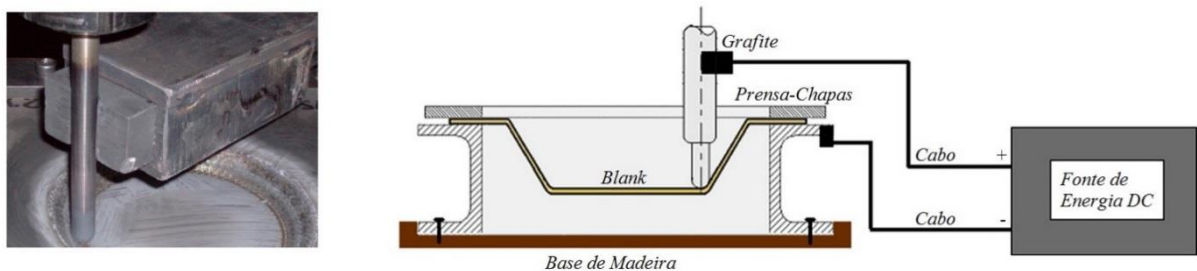


Figura 23: Esquema do equipamento utilizado no processo SPIF com aquecimento [6].

Foram realizados experimentos em temperatura ambiente, a 20°C. Para descobrir os limites de cada material foi utilizado uma inclinação 20°. Em seguida, foram realizados testes utilizando o aquecimento da ferramenta para verificar quanto seria o aumento do limite de estampabilidade de cada material. A Tabela 1 apresenta os resultados alcançados nos experimentos.

Tabela 1: Resultados experimentais da ISF com aquecimento da ferramenta [37].

Material	Inclinação do Cone	
	Temperatura Ambiente	Com Aquecimento
Alumínio (AA2024-T3)	30°	40°
Magnésio (AZ31B-O)	20° (Rompimento com 20mm de profundidade)	60°
Titânio (Ti6Al4V)	20°	45°

Recentemente, uma modalidade de TPIF, na qual, em vez de um suporte inferior como ponto de contato, utiliza uma outra ferramenta de conformação controlada independentemente, proporcionando maior versatilidade e flexibilidade ao processo (Figura 57).

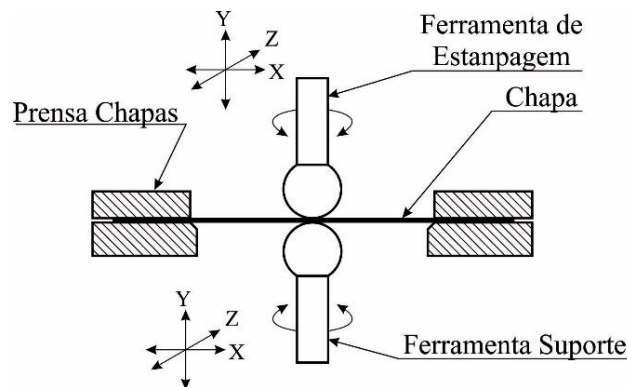


Figura 24: Modelo de blocos da configuração DSIF [26]

Pelo fato de possuir duas ferramentas trabalhando simultaneamente, uma em cada lado da chapa, é classificada como Dupla Face (*Double Side Incremental Forming – DSIF*). Esta configuração aumenta a complexidade dos componentes que podem ser estampados e reduz muitas das limitações associadas ao processo de estampagem incremental [26].

Embora este processo tem sido proposto há anos, só há pouca pesquisa sobre esse processo e ainda há muitas questões em aberto não respondidas [38].

Ainda na linha de derivações do processo puro de ISF, Kumar [39] relata a utilização de fluido no processo ISF, nomeando de *Single Point Incremental Hydro-Forming – SPIF+HF*. Trata-se de um processo SPIF normal, mas na superfície da chapa que não tem contato com a ferramenta de estampagem, é suportada por um fluido hidráulico pressurizado (Figura 25).

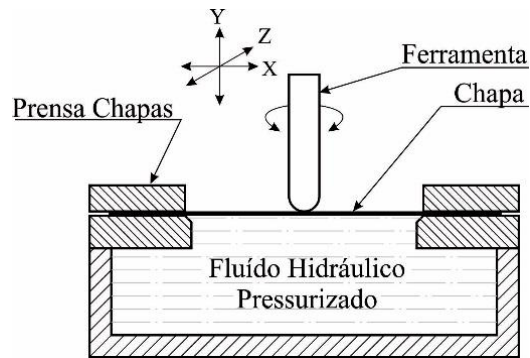


Figura 25: Modelo de blocos da configuração SPIF+HF [39].

Embora o autor relate esta derivação da ISF, o mesmo não descreve maiores detalhes sobre as características construtivas do dispositivo, tão pouco menciona alguma vantagem, desvantagem ou aplicação direta desta técnica.

2.1.3 Aplicações da Estampagem Incremental

O fato de a ISF ser um processo flexível, possibilita sua utilização em várias áreas com a fabricação de diferentes tipos de componentes. Jeswiet *et al.* [40] citam em seu trabalho possíveis áreas e produtos que a ISF pode fabricar:

- Indústria Automobilística: Partes da carroceria de um automóvel (Protótipo, lote pequeno). Outras peças em chapa metálica do automóvel, estrutural ou estética (customização – pós venda);
- Indústria Aeronáutica: Fuselagens e carenagens;
- Indústria Náutica: Peças para o casco de navios;
- Área de Saúde: Próteses e órteses;
- Arquitetura: Painéis decorativos, coberturas e estruturas de sustentação;
- Produtos da linha branca: Protótipos, lote pequeno e customização

O fato do processo de ISF fazer parte da indústria metal mecânica, o credência há muitas possibilidades de aplicação, que não estão relacionadas anteriormente, mas que pode ser perfeitamente aplicado desde que não haja limitações no processo. Alguns resultados da aplicação da ISF, puramente e com suas derivações, são ilustrados e discutidos a seguir.

Jeswiet *et al.* [27] cita sua utilização na indústria automobilística, com a fabricação rápida de protótipos, como a de uma superfície refletora para faróis e um protetor térmico/ruído nos coletores de escape do motor (Figura 26).



Figura 26: Aplicações da ISF: a) Superfície refletora para farol; b) Proteção Térmico/Ruído [27]; c) Capô dianteiro de automóvel [41]

A indústria aeronáutica é outro ramo que tem muito a ganhar com a utilização da ISF, pois trabalha com lotes menores que a indústria automotiva. É possível fabricar ou prototipar partes da fuselagem das aeronaves, ou outros componentes. A exemplo disso, Araghi *et al.* [36] apresentam em seu trabalho um estudo de caso de uma produção integrada de uma estrutura de reforço de uma porta hidráulica do AIRBUS A320, feito em aço inoxidável 1.4541, com 1,00 mm de espessura (Figura 27).

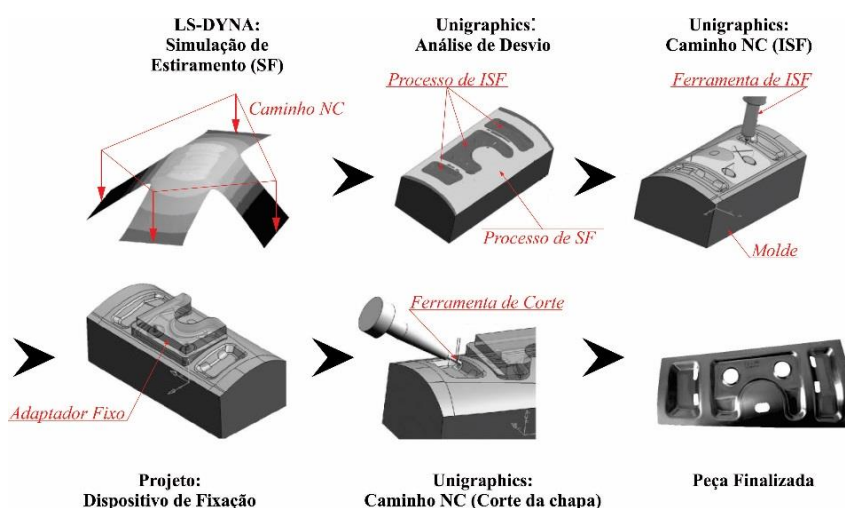


Figura 27: Processo integrado de fabricação por ISF+SF [36].

Na área médica, alguns autores apresentaram sua potencialidade na fabricação de próteses [19, 42], suportes ortopédicos [27]. No campo ortodôntico também há aplicação possível (Figura 28).

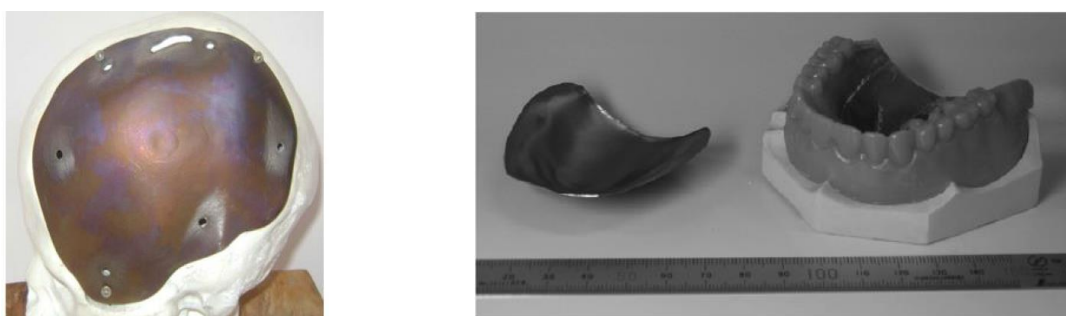


Figura 28: a) Prótese Craniana desenvolvida por ISF [19]; b) Pótese da coroa dentária [41].

Trautz [43] criou protótipos de pirâmides de base triangular e hexagonal por meio da ISF, demonstrando o potencial para a arquitetura e engenharia estrutural, pois é um método eficaz para a construção porque fornece a estrutura de suporte de carga e proteção ao mesmo tempo, além de ser uma estrutura leve.

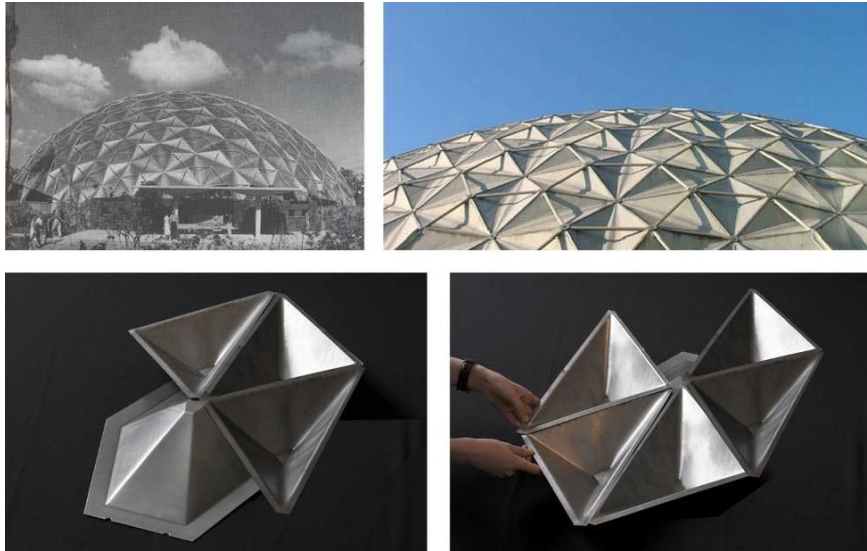


Figura 29: Cobertura por elementos geométricos estampados [43].

Componentes decorativos também podem ser desenvolvidos por meio da ISF.



Figura 30: Peças decorativas desenvolvidas por ISF [41, 44]

2.1.4 Vantagens e Limitações da Estampagem Incremental

Embora o processo de ISF vem sendo pesquisado há mais de 20 anos, tem sido limitada suas aplicações na indústria. O processo ainda carece de informações precisas, como sobre os limites de conformabilidade e os mecanismos de fratura dos diversos materiais usados nos mais variados ramos da indústria.

Várias razões podem ser atribuídas, Lu *et al.* [45], por exemplo, citam conformabilidade insatisfatória, imprecisão geométrica, ou tolerância geométrica maior do que

o aceitável, longo tempo de execução, severo afinamento da chapa e um acabamento superficial questionável. Araghi *et al.* [35] acrescenta ainda a falta de ferramentas de planejamento e modelamento de processos dedicados a ISF.

Contrapondo estes fatos relatados, Reddy *et al.* [26] relatam que recentemente a indústria renovou seu interesse sobre a ISF processos devido à mudança na psicologia do consumidor, sobretudo a respeito da personalização em massa dos produtos.

Esta necessidade atual dos consumidores, desperta nos fabricantes mundiais que a ISF é um processo capaz de fazê-los crescer na produção e competitividade, pois, necessitam de processos de fabricação flexíveis, com o mínimo de custo ferramental e de *set up* ao longo do tempo. Esta nova tendência leva a produtos com pequenos ciclos de vida, baixo volume de um modelo de produto e rentabilidade que é tão dependente da velocidade com que novos modelos e produtos são introduzidos no custo direto [26].

Em 2005, Jeswiet *et al.* [27] elencou as vantagens e desvantagens do processo de estampagem incremental. As vantagens, relatadas a seguir, fazem parte das necessidades que a personalização em massa está exigindo das indústrias atualmente:

- Peças utilizáveis podem ser conformados diretamente de dados CAD/CAM com um mínimo de ferramentas especializadas. Estes podem ser rápidos protótipos ou pequenas séries de produção;
- Flexibilidade na alteração do design da peça, pois sua alteração é realizada diretamente sobre o arquivo CAD/CAM;
- A utilização de matrizes parciais (ou nenhuma) feitas em materiais não tão nobres, reduz o custo de ferramental;
- Rápida prototipagem de peças metálicas, decorrentes de processos de conformação;
- Devido a sua pequena deformação plástica durante o processo, contribui para uma maior maleabilidade, aumentando a conformabilidade das chapas;
- Utilização de Centro de Usinagem CNC ou Torno CNC;
- O tamanho da peça é apenas limitado pelo tamanho da máquina.
- As forças envolvidas no processo são pequenas, pois a zona de contato e tamanho dos incrementos verticais são pequenos;
- A operação é calma e relativamente livre de ruídos.

Como desvantagens, Jeswiet *et al.* [27] relatam alguns aspectos, que ao longo dos anos forma sendo investigados e minimizados:

- A principal desvantagem é o tempo de conformação, que é muito mais longo do que os processos competitivos, tais como a estampagem profunda;
- Como um resultado, o processo é limitado à produção de lotes pequenos de tamanho (o que para as novas tendências, torna-se uma ótima vantagem, se considerar os custos envolvidos);
- A conformação de ângulo reto não pode ser realizada em uma única etapa, mas requer um processo com múltiplos passos, acarretando num maior tempo;
- Ocorrência de retorno elástico (no entanto, vários pesquisadores já conseguiram minimizar este efeito, com a utilização de algoritmos que corrigem a trajetória da ferramenta, por exemplo).

Em face destas próprias limitações relatadas e pela inquietude dos investigadores, alguns resultados positivos foram alcançados com a utilização de processos híbridos na ISF:

- Por meio da DISF, é possível produzir componentes mais complexos, e reduz muitas das limitações associadas ao processo de ISF [38];
- Pelo processo de híbrido de SF + ISF, se obtém redução no tempo de estampagem, pois, a conformação por estiramento é mais rápida do que ISF. Este fato induz há um tempo de simulação numérica menor, muito mais viável que o processo puro de ISF. Também resulta numa deformação homogênea da chapa e uma precisão geométrica melhor, devido as tensões de tração no estiramento [36].
- Com a utilização de raio laser para aquecer a região a ser estampada por ISF, Araghi *et al.* [36], alcançaram uma melhor formabilidade em ligas de Titânio e Magnésio;
- Com a mesma motivação, mas usando uma fonte de energia DC para aquecer a ferramenta de estampagem incremental, Ambrogio *et al.* [37] também aumentaram o ângulo de parede (ψ) das ligas de alumínio, magnésio e titânio.

2.1.5 Parâmetros da Estampagem Incremental

A grande maioria dos trabalhos pesquisados utilizam máquinas ferramentas CNC para a realização dos experimentos em ISF [1, 6, 13, 19, 23, 24, 27, 37, 46]. Por essa razão, os principais parâmetros de máquina considerados durante o processo serão abordados.

Estes parâmetros também são relatados em vários trabalhos, inclusive como foco principal de investigação em alguns, pois também influenciam na formabilidade e rugosidade da chapa metálica.

2.1.5.1 Velocidade de Avanço e Rotação da Ferramenta

Em 2005, para a fabricação de um forno solar por ISF, Jeswiet [27] fabricou por ISF um forno solar utilizando o eixo árvore (*spindle*) livre de rotação (S), de tal modo que a ferramenta de estampagem rotacionava de acordo com os esforços solicitados em cada momento, proporcionando uma menor fricção entre ferramenta e chapa. Este método é usado em máquinas dedicadas a ISF. Contudo, a utilização de rotação no o eixo árvore proporciona um aumento da formabilidade da chapa metálica, devido ao aquecimento gerado pela fricção da ferramenta e chapa.

Centeno *et al.* [46] investigaram o efeito da utilização do *spindle* livre e com rotação em ISF, para averiguar as Força Máxima de estampagem ($F_{z_{max}}$) durante o processo de ISF em chapas de aço inox 304 com 0,8mm de espessura.

Foi observado que a utilização do *spindle* livre de rotação desempenha um papel importante na diminuição das forças, fato este, interessante para a integridade de máquinas não dedicadas ao processo de ISF (Tabela 2).

Tabela 2: Valores médios da força de conformação máxima [46].

Diâmetro da Ferramenta	Incremento Vertical (Δ_z)			
	0,2 mm		0,5 mm	
	$S = Livre$	$S = 1000 rpm$	$S = Livre$	$S = 1000 rpm$
20 mm	2,421 kN	3,581 kN	1,902 kN	2,525 kN
10 mm	1,665 kN	2,077 kN	1,548 kN	1,827 kN
6 mm	1,492 kN	1,757 kN	1,468 kN	1,688 kN

Hamilton, em 2010 [47], analisou o efeito de altas velocidades de avanço e rotação da ferramenta no processo SPIF. Para o deslocamento da ferramenta, se utilizou 5.080, 6.985 e 8.890 mm/min, enquanto os valores da rotação 400, 1.200 e 2.000 rpm. Os resultados da distribuição do material da chapa foram semelhantes aos resultados de Duflou *et al* [31], que usaram 2.000 mm/min e 100 rpm, demonstrando que a SPIF pode ser realizada a velocidades maiores, tornando-se mais atraente aos fabricantes.

2.1.5.2 Passe Vertical

O Passe Vertical (Δ_z) refere-se a distância entre cada trajeto (contorno) completo da ferramenta no sentido do eixo Z da máquina. Trata-se de um parâmetro, no trabalho publicado por Jeswiet *et al.* [27] relata que quanto maior for o Passe Vertical (Δ_z), mais diminui a formabilidade e aumenta a rugosidade e a força de conformação, fatos estes também relatados em vários outros trabalhos [26, 31, 34, 47, 48, 49].

Para geometrias do tipo calota esférica, Attanasio *et al.* [48] cita em seu trabalho que a utilização de Passe Vertical (Δz) variável, que é a utilização de um fator chamado *constant scallop*, ou, “altura de crista”, representado pela letra “h” na Figura 31, produz um acabamento superficial melhor.

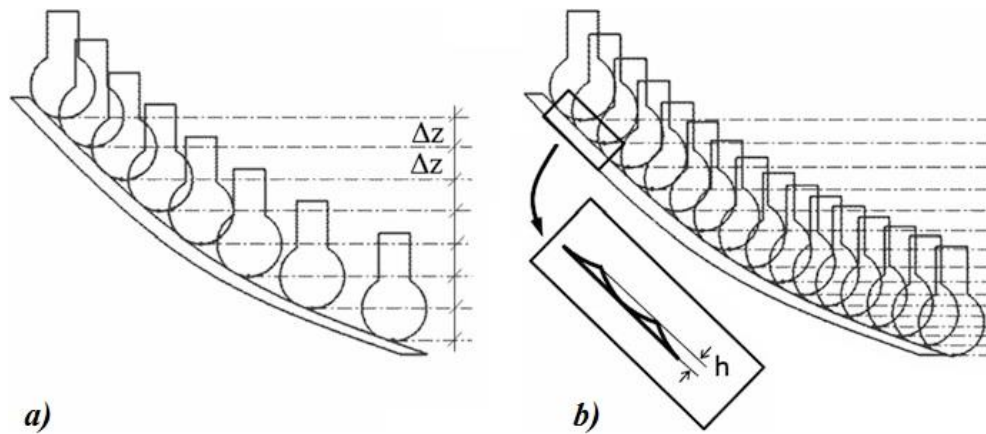


Figura 31: a) Incremento Vertical com valor constante; b) Incremento Vertical variável [48].

Bhattacharya *et al.* [50], investigaram a influência do ângulo de parede ($\psi = 20^\circ, 40^\circ$ e 60°), diâmetro da ferramenta (4, 6 e 8 mm) e o Passe Vertical ($\Delta z = 0,20, 0,60$ e $1,00$ mm) no acabamento superficial. Eles concluíram que a rugosidade da superfície diminui com o aumento do diâmetro da ferramenta para todas as profundidades incrementais, devido ao aumento da sobreposição entre as trajetórias vizinhas da ferramenta com aumento do seu diâmetro.

2.1.5.3 Estratégia de Estampagem

A estratégia de estampagem, ou planejamento do trajeto da ferramenta de estampagem, usualmente é realizada por um *software* CAM, e desempenhada em uma máquina CNC. Está diretamente ligada à rotação, avanço e diâmetro da ferramenta, além do Passe Vertical (Δz).

Do mesmo modo que os parâmetros anteriores, ela também desempenha um papel importante na formabilidade da peça, na precisão geométrica, distribuição da espessura da chapa, acabamento superficial e tempo de estampagem.

Existem dois tipos de estratégia, nomeados de “contorno” e “espiral” [26]. Na estratégia de contorno, a ferramenta se move para baixo, equivalente Passe Vertical (Δz), a cada início de contorno (Figura 32a), enquanto na estratégia espiral, a ferramenta se move para baixo, também igual ao Passe Vertical (Δz), gradualmente até completar o contorno completo do trajeto (Figura 32b). Pelo fato da ferramenta sempre fazer o movimento de incremento no início

do próximo contorno, acaba criando uma marcação na região (Figura 32c), ao contrário da estratégia espiral (Figura 32d).

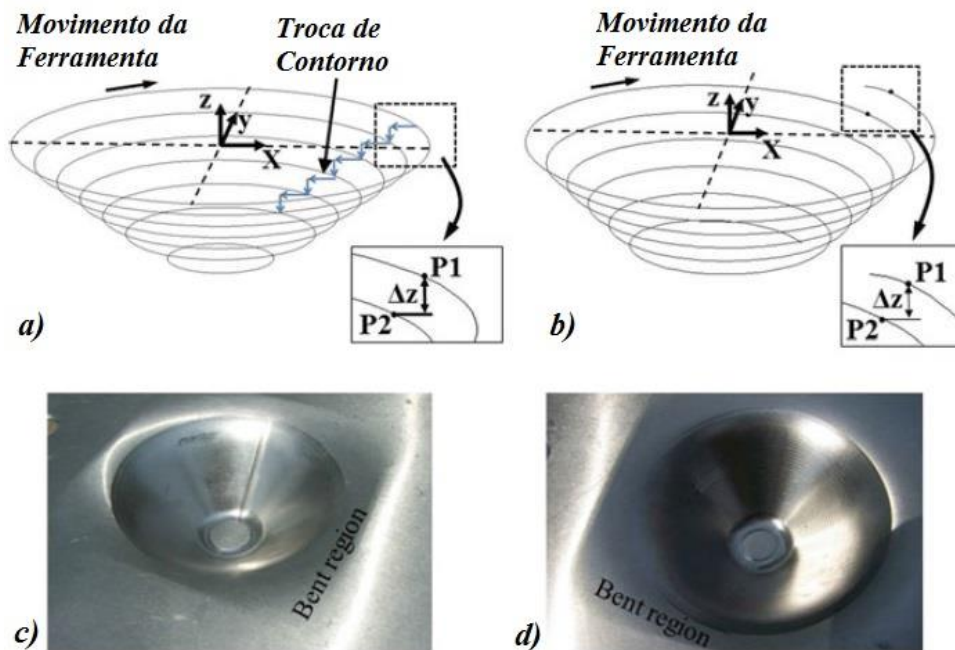


Figura 32: Estratégias de estampagem: a) Contorno; b) Espiral [26]

Dentro destas duas estratégias de estampagem, é possível controlar o sentido de movimento da ferramenta, como feito por Malhotra *et al.* [33] em seu trabalho com MSPIF.

Neste trabalho, Malhotra *et al.* [33] propôs os trajetos da ferramenta como “out-to-in”, ou seja, o movimento da ferramenta parte da periferia externa em direção ao centro da chapa, e “in-to-out” que se refere ao movimento da ferramenta partindo do centro da chapa para a periferia exterior.

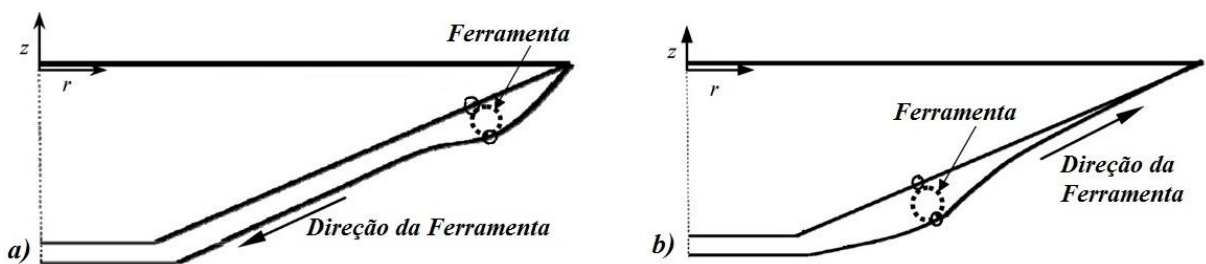


Figura 33: Representação esquemática da estratégia de estampagem: a) “out-to-in”; b) “in-to-out” [33]

Behera *et al.* [49] proporam uma metodologia de geração de caminho da ferramenta compensada por SPIF para melhorar a precisão geométrica utilizando MARS (*Multivariate Adaptive Regression Splines*) como uma ferramenta de previsão de erro. O MARS gera superfícies de resposta de erro contínuas para características individuais e combinações de recursos. O método constitui-se de duas fases:

- a) Digitalização de um experimento ISF realizado, para gerar uma nuvem de pontos que são comparados com a nuvem de pontos do modelo STL (CAD criado) para gerar um relatório de precisão, que será usado para construir os parâmetros do MARS;
- b) Os dados do relatório de precisão são compilados pelo MARS, e um novo modelo STL é gerado. Um novo experimento em ISF é realizado, e repete-se a primeira etapa.

Com a utilização do caminho da ferramenta compensada, foi possível reduzir em aproximadamente 0,4 mm os desvios de geometria da peça e do modelo CAD. Todavia, foi observado uma limitação deste sistema quando na fabricação de componentes em que os limites de formabilidade estejam no limite. Tal limitação pode ser superada com a utilização do MSPIF juntamente com os recursos do MARS.

2.1.5.4 Ferramenta de Estampagem

Diretamente ligada à estratégia de estampagem, a ferramenta de estampagem tem relevante influência no processo ISF. Na maior parte das investigações sobre ISF, é utilizada uma ferramenta maciça com ponta hemisférica ou semiesférica pois, garante um ponto de contato permanente entre a chapa e a ferramenta. Na estampagem de ângulos de parede muito íngremes, a utilização de uma ferramenta de estampagem com o diâmetro da haste menor do que o diâmetro esférico, evita o contato entre a chapa e a haste.

Normalmente emprega-se aços ferramenta para fabricação das ferramentas de estampagem em ISF, possibilitando inclusive, a aplicação de tratamento térmico para aumentar sua dureza e resistência ao desgaste, reduzindo o atrito [44], ou ainda a aplicação de revestimentos, como metal duro (Figura 34). Para alguns processos de ISF, as ferramentas de estampagem recebem um revestimento em “plástico” para evitar reações químicas com o material de chapa e, assim, aumentar a qualidade da superfície [27].

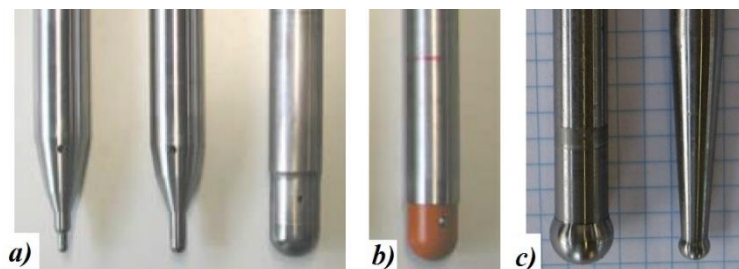


Figura 34: Ferramenta Hemisférica: a) Metal duro; b) Revestimento em “Plástico”; [27]; c) Ferramenta Semiesférica em aço W300 [44]

Nos trabalhos investigativos sobre ISF, não há um valor específico quanto ao diâmetro da ferramenta. Normalmente, ferramentas com diâmetro de 10 mm à 20 mm são mais comuns [30, 44]. Contudo, Martins *et al.* [24] explica que ferramentas com diâmetro menor proporcionam uma melhor formabilidade, devido à concentração das tensões em uma pequena região de deformação na chapa, enquanto ferramentas com diâmetro maior tendem a distribuir as tensões através de uma área maior tornando o processo mais semelhante à estampagem convencional. Tal fato é observado nos resultados de Centeno *et al.* [46], que obtiveram um aumento na formabilidade do SPIF à medida que o diâmetro da ferramenta diminuiu.

Devido a capacidade de deformação localizada na chapa, as condições de atrito entre a ferramenta e a chapa desempenha um importante papel na deformação do material e influenciando no acabamento superficial.

Visando um acabamento superficial melhor no processo de ISF, Lu *et al.* [45] investigaram a influência de três diferentes modelos de ferramenta de estampagem (Figura 35):

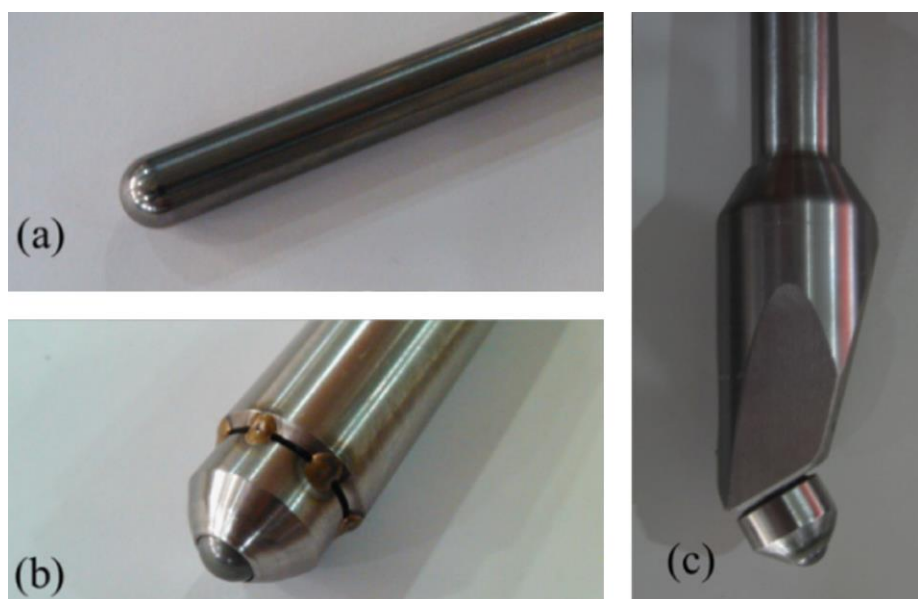


Figura 35: Ferramenta de estampagem: a) Ferramenta rígida; b) Ferramenta Vertical Rolante; c) Ferramenta Oblíqua Rolante [45].

A Figura 35 (a) ilustra uma ferramenta de estampagem rígida e inteiriça, tradicional em ISF, com ponta hemisférica, diâmetro de 10 mm, feita em aço ferramenta [45].

A Figura 35 (b) apresenta um modelo de ferramenta vertical rolante (VRB – Vertical Roller-Ball), desenvolvida com uma esfera rolante em sua ponta de contato, todavia, seu aspecto construtivo sofre influência do ângulo de parede, limitando seu perfeito desempenho, pois com ângulos de parede mais íngremes, haverá o contato com a haste da ferramenta, sobretudo em máquinas CNC com 3 eixos (Figura 36) [45].

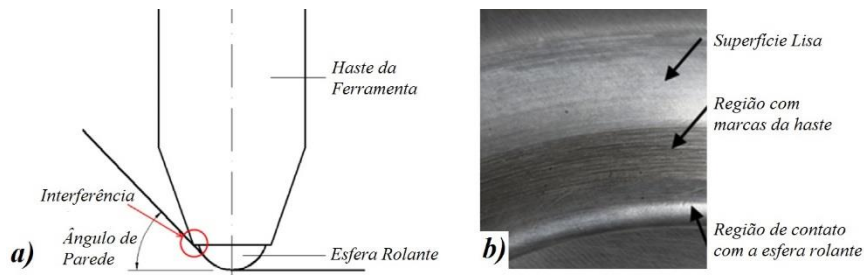


Figura 36: Aspectos da Ferramenta VRB: a) Limitação ao Ângulo de Parede; b) Acabamento Superficial provocado pela ação da esfera rolante e haste [45].

A Figura 35 (c) mostra a ferramenta oblíqua rolante (ORB - Oblique Roller-Ball), desenvolvida justamente para suprir esta deficiência da ferramenta VRB. A Figura 37 (a) ilustra o aspecto construtivo da ferramenta ORB, enquanto a Figura 37 (b) ilustra a rotação do spindle de uma máquina CNC com 3 eixos, ajustado à direção e taxa de alimentação, garantindo que a face Frontal da ferramenta sempre fique posicionada para a superfície da chapa metálica [45].

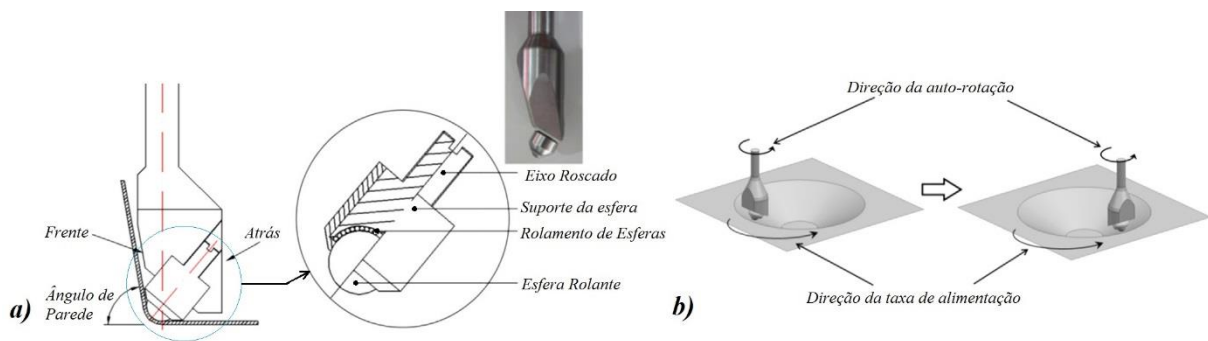


Figura 37: Ferramenta ORB: a) Aspectos construtivos; b) Simulação do processo de ISF [45]

Recentemente, Ghamdi e Hussain [51] pesquisaram a relação entre o raio da ferramenta e a espessura do *blank* (R_T/s_0) em SPIF. Os resultados apontam que esta relação tem influência determinante na maleabilidade em SPIF e que a maximização da maleabilidade em SPIF está intimamente ligada com a realização de deformação estável (sem nenhum corte na superfície ou compressão no metal), que é alcançada quando o raio da ferramenta atinge um valor crítico em termos de espessura do *blank*. Este raio crítico, denominado como de raio limite, e para as condições consideradas neste trabalho, o seu valor é igual a $R_T \approx 2.2s_0$.

2.1.5.5 Lubrificação

A utilização de lubrificantes durante o processo de conformação influencia na qualidade final do produto e processo. Com a lubrificação adequada, é possível ter uma vida mais longa das ferramentas, redução do desgaste e atrito, por conseguinte, a distribuição do calor.

Azevedo *et al.* [52] pesquisaram a rugosidade superficial em chapas de aço (DP780) e alumínio (AA1050-T4) estampadas em SPIF, alterando os tipos de lubrificantes. Ao todo, cinco tipos diferentes de lubrificantes foram utilizados nos experimentos práticos. Suas características são descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Lista dos lubrificantes utilizados [52].

<i>Lubrificante</i>	<i>Tipo</i>	<i>Viscosidade à 40°C [mm²/s]</i>	<i>Densidade [kg/l]</i>	<i>Ponto de Fusão [°C]</i>
<i>Repsol SAE 30</i>	<i>Óleo Mineral</i>	<i>105</i>	<i>0,884</i>	<i>215</i>
<i>Total Finarol B 5746</i>	<i>Óleo Mineral</i>	<i>9,75</i>	<i>0,904</i>	<i>150</i>
<i>Moly Slip AS 40</i>	<i>Pasta</i>		<i>1,76</i>	<i>190</i>
<i>Weicon AL-M (allround)</i>	<i>Pasta</i>	<i>185</i>	<i>0,92</i>	
<i>Moly Slip HSB (high speed bearing)</i>	<i>Pasta</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>195</i>

Para a realização dos experimentos, foi utilizado o tronco de cone como modelo, sendo sua base maior com 120 mm de diâmetro, profundidade de 40 mm e ângulo de parede (ψ) de 45°. A estratégia de deformação escolhida foi a helicoidal, com 0,3mm de Incremento vertical (Δz).

Nos experimentos em alumínio (AA1050-T4), apontam o lubrificante AL-M como o melhor para ser utilizado, enquanto o Finarol B5746 apresentou o pior resultado dos valores de rugosidade medidos [52].

Para os experimentos no aço (DP780), justamente os melhores resultados de rugosidade alcançados foram com Finarol B5746, ao contrário dos experimentos em alumínio, apresentando valores semelhantes ao lubrificante AS 40. Os piores valores de rugosidade foram registrados com o lubrificante SAE 30 [52].

De acordo com os resultados, existe uma relação aparente entre a viscosidade do lubrificante e a dureza do material estampado no que diz respeito à qualidade do acabamento da superfície. Para materiais mais macios, um lubrificante com a viscosidade elevada proporciona melhores resultados na superfície final. Em uma tendência oposta, para materiais mais duros, como aço DP780, lubrificantes com valores de menor viscosidade fornecem produtos mais acabados [52].

2.1.6 Geometrias de Experimentos ISF

Como descrito anteriormente, no capítulo 2.1.3 Aplicações da Estampagem Incremental, as possibilidades geométricas de fabricação por ISF são várias. Contudo, nos

trabalhos investigativos sobre o processo de Estampagem Incremental de Chapas, os formatos geométricos de “Tronco de Cone” e/ou “Tronco de Pirâmide” são os mais utilizados nas pesquisas.

No trabalho de Minutolo *et al.* [53], é avaliado o ângulo de parede (ψ) máximo em chapas de alumínio (7075-T0) com 1 mm de espessura, analisando estas duas geometrias, sendo o Tronco de Cone com diâmetro de 70 mm e o Tronco de Pirâmide com lados de 70 mm de comprimento (Figura 38). Em ambas geometrias a profundidade era de 39 mm. A estratégia de estampagem utilizada foi a paralela de contorno, com Incremento Vertical (Δz) de 0,50 mm.

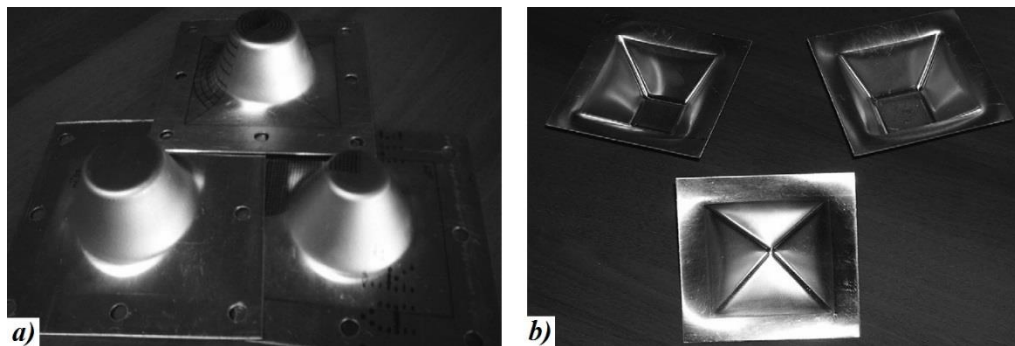


Figura 38: Experimentos em ISF: a) Tronco de Cone; b) Tronco de Pirâmide [53].

Para os experimentos foi considerado um incremento no ângulo de parede (ψ) de 5° para cada teste, iniciando com 50° para o Tronco de Cone, e 45° para o Tronco de Pirâmide. Com esta configuração, ambos formatos atingiram 60° sem fraturas. Realizando novos testes, aumentando o ângulo de parede (ψ) 1° por experimento, foi possível alcançar um Tronco de Cone com $\psi = 66^\circ$, o Tronco de Pirâmide com $\psi = 63^\circ$, ambos sem fratura [53].

Sobre as fraturas nos experimentos realizados, foi constatado que na geometria Tronco de Cone, a fratura se propagou de forma radial, quase que por toda a circunferência (Figura 39a). Enquanto que na geometria Tronco de Pirâmide, as fraturas ocorreram próximas aos cantos, sem a propagação para os outros lados (Figura 39b).

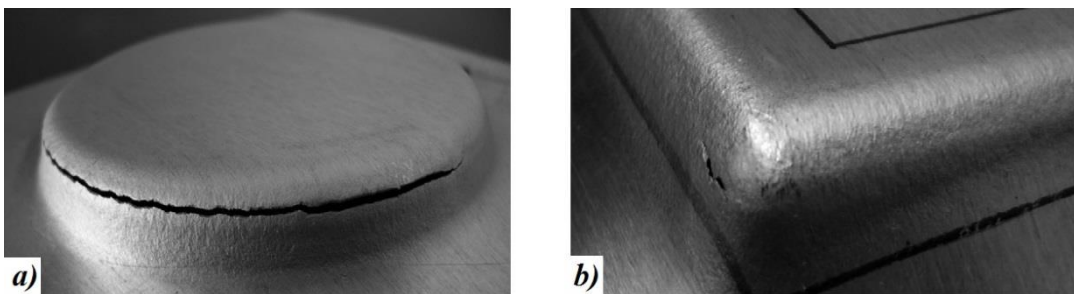


Figura 39: Fraturas em experimentos ISF: a) Tronco de Cone; b) Tronco de Pirâmide [53].

Os autores explicam que no caso da geometria Tronco de Pirâmide, as deformações são baseadas em duas regiões do Diagrama de Deformações: Deformação Plana ($\varphi_2 = 0$) ao longo das paredes verticais, e Estiramento Biaxial ($\varphi_1 = \varphi_2$) nos cantos da pirâmide. Na geometria Tronco de Cone, as deformações são homogêneas, e encontram-se no quadrante positivo do Diagrama de Deformações. Lora *et al.* [5] realizaram experimentos ISF a partir de uma geometria cônica, onde, observaram que o posicionamento das deformações se encontravam no primeiro quadrante do diagrama das deformações (φ_1 e φ_2 positivas) – Figura 40 – como observado por Minutolo *et al.* [53] em sua investigação.

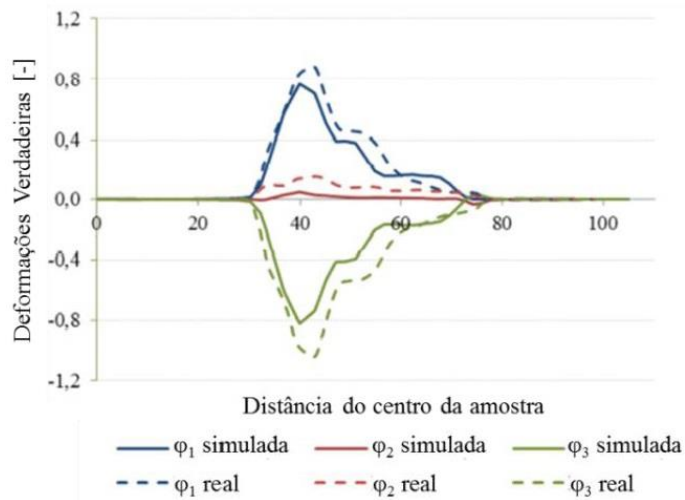


Figura 40: Deformações Verdadeiras em um Tronco de Cone [5].

Minutolo *et al.* [53] explica que a fratura no Tronco de Pirâmide ocorre no canto em que o estado de deformação é influenciada pela presença do outro lado. A tensão na chapa é amplificada quando o punção entra em contato com ambos os lados. Assim que o punção descola o primeiro lado, a tensão diminui e a fratura não é propagada. No caso da geometria Tronco de Cone, a tensão é uniforme para todos os pontos da trajetória da ferramenta, deste modo, a fratura se espalha ao longo da circunferência.

Enquanto os formatos de Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide relatados anteriormente possuem um perfil “retilíneo” nas paredes verticais, Suresh e Regalla [54] analisaram a formabilidade em SPIF de aço automobilístico para estampagem profunda (*Extra Deep Drawing - EDD*) usando as mesmas geometrias, mas com as paredes verticais no formato circular, elíptico, parabólico e segmentos de curva exponencial Figura 41.

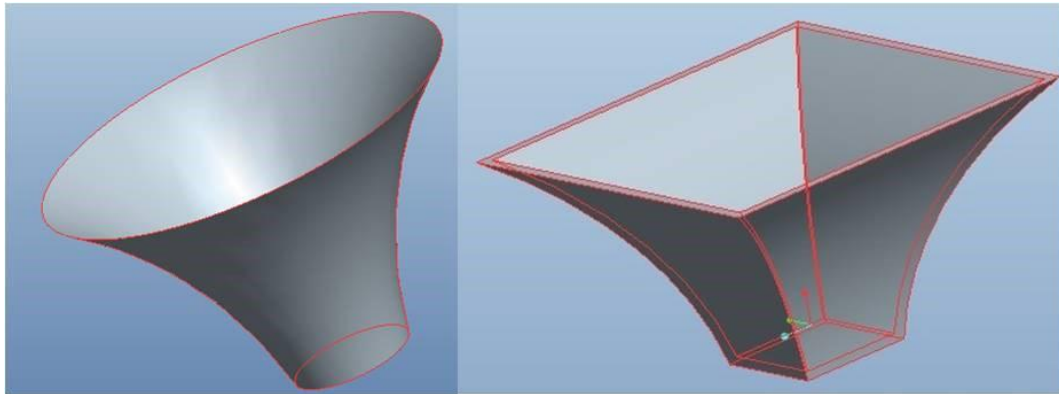


Figura 41: Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide com perfil curvilíneo em suas paredes verticais [54]

Os testes foram realizados em uma Máquina CNC de 3 eixos, em *blanks* com 250 x 250 x 1 mm. Foi usado uma ferramentas de estampagem com diâmetro de 10 mm, Incremento Vertical (Δz) de 0,50 mm e Velocidade de Avanço de 750mm/min. As geometrias Tronco de Cone foram modeladas com diâmetro de 110mm na sua base, e o ângulo variando de 40° a 80°. Para as geometrias Tronco de Pirâmide, a base cônica foi modelada a partir de quadrada com lado 110mm, e utilizando os mesmos valores de ângulos [54]. A Tabela 4 apresenta a profundidade da fratura (D_F) e o Ângulo de Parede (ψ) correspondente.

Tabela 4: Limites de formabilidade em SPIF nas geometrias cônicas com ângulo de parede varável [54].

Perfil da Parede Vertical	Tronco de Cone		Tronco de Pirâmide	
	Profundidade Fratura (D_F) [mm]	Ângulo de Parede Máximo (ψ) [°]	Profundidade Fratura [mm]	Ângulo de Parede Máximo (ψ) [°]
Circular	63,00	77,40	54,00	72,76
Elíptico	63,50	75,42	62,00	74,60
Parabólico	51,50	73,21	41,00	71,47
Exponencial	72,50	75,05	59,16	72,67

Segundo os resultados de Minutolo *et al.* [53], as geometrias baseadas em Tronco de Cone alcançaram resultados maiores de formabilidade que as geometrias baseadas em Tronco de Pirâmide.

2.1.7 Análise das Forças no Processo de Estampagem Incremental

Como descrito anteriormente, a maioria das pesquisas em SPIF são realizadas em Centro de Usinagem CNC, adaptando-se esta máquina ferramenta a este processo de conformação. Contudo, por conta de sua proposta de trabalho, estas máquinas não possuem sistema de aquisição de dados, no que tange as forças aplicadas durante a manufatura.

Para suprir esta carência, algumas pesquisas SPIF realizadas em Centro de Usinagem CNC utilizaram células de carga adaptadas à ferramenta de conformação [55, 56, 57], ou à própria matriz de conformação [58, 59], ou ainda, a aplicação de extensometria (*Strain Gauges*) na ferramenta de estampagem, como realizado por De Lucca [60], onde analisou a aplicabilidade desta tecnologia para a verificação das forças horizontais na ferramenta de estampagem, durante o processo de estampagem incremental.

Aerens *et al.* [59] utilizaram um dinamômetro rígido, do tipo quartzo – que permite medir os três componentes ortogonais de uma força – embaixo da matriz de estampagem. Durante a realização do SPIF, é produzido um sinal estável para F_z e dois sinais senoidais para F_x e F_y , estas duas últimas, as componentes de força no plano XY. A força resultante no plano (F_{XY}) pode ser calculada pela equação a seguir:

$$F_{XY} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad [\text{N}] \quad \text{Eq. 2}$$

No trabalho de Bagudanch *et al* [58]., é apresentado dois gráficos comparativos de F_z durante o processo SPIF em chapa de AISI 304 com 0.80 mm de espessura (Figura 42), com diferentes incrementos verticais (Δz), onde é possível perceber a oscilação do sinal durante o processo de estampagem incremental

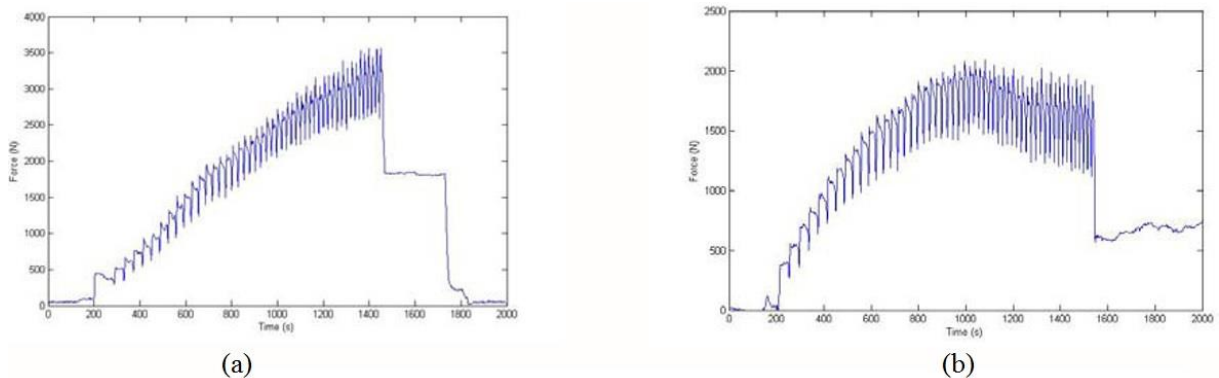


Figura 42: Evolução de F_z no processo SPIF em diferentes experimentos: a) R_T : 10 mm b) R_T : 5 mm [58].

Nas pesquisas de Azevedo *et al.* [52], além dos valores de F_z , também foram apresentados os valores das F_{XY} resultantes do processo SPIF em chapas de Alumínio AA1050 e Aço DP780., ambas com 1.00 mm de espessura. A Figura 43 apresenta os referidos gráficos de forças, porém, com as “curvas” tratadas, sem o aspecto oscilatório apresentado na Figura 42.

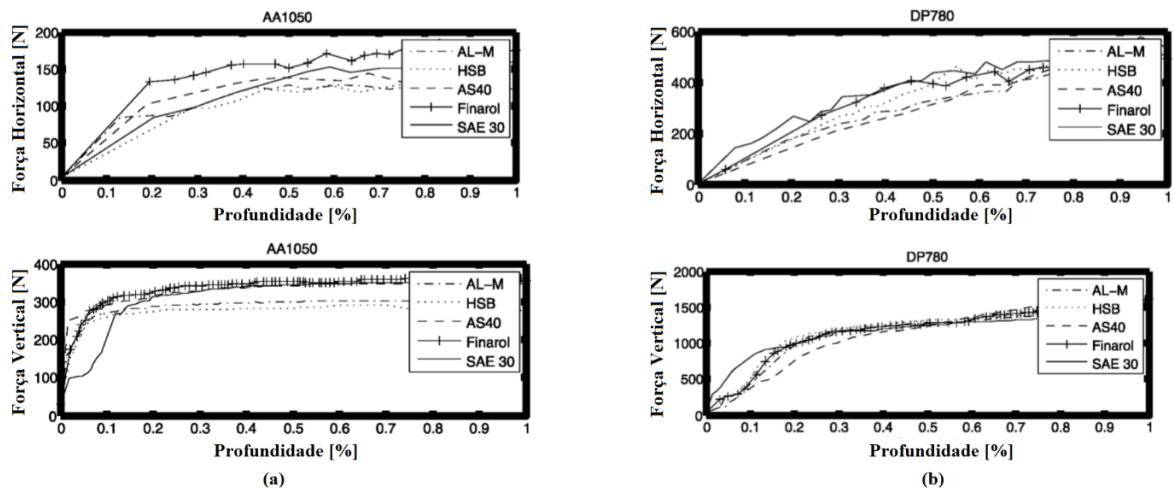


Figura 43: Distribuição das Forças Verticais e Horizontais em função da profundidade do experimento SPIF: a) Alumínio AA1050; b) Aço DP780 [52].

O conhecimento das forças possibilita o projeto seguro de máquinas dedicadas ao processo, ou ainda, se a máquina em questão tem condições seguras de realizar o processo desejado, quando exposta a um material diferente.

2.1.8 Análise do Atrito no Processo de Estampagem Incremental

Azevedo *et al.* [52] descrevem em suas pesquisas diversos estudos em SPIF, que o uso de lubrificante em testes é apenas referido, mas nunca descrevendo seu tipo ou a sua influência sobre os resultados obtidos. Desta forma, os autores realizaram experimentos em Aço (DP780) e Alumínio (AA1050-T4) na tecnologia SPIF, analisando cinco tipos diferentes de lubrificantes, no intuito de verificar o acabamento superficial dos experimentos. Adicionalmente, os autores investigaram a evolução do atrito durante o processo de estampagem incremental (Figura 44).

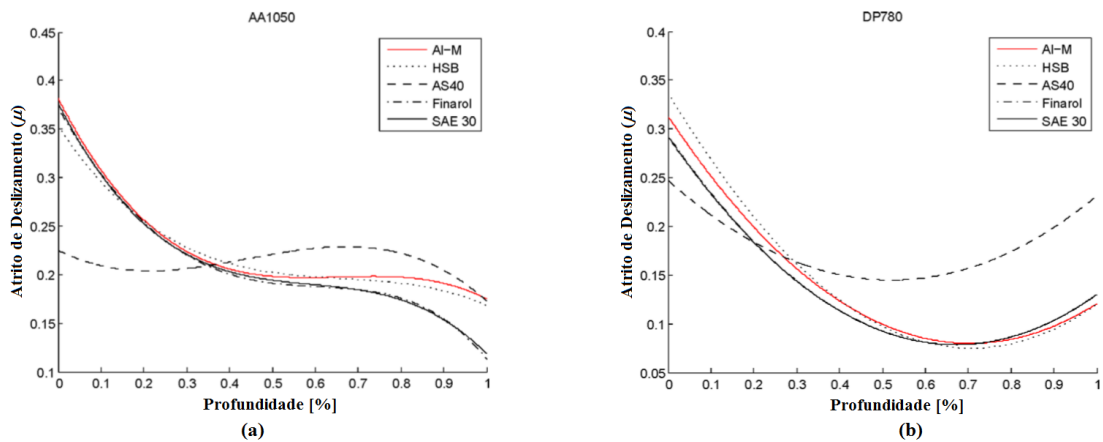


Figura 44: Atrito de Deslizamento (μ) durante o processo SPIF: a) Alumínio AA1050; b) Aço DP780 [52].

Azevedo *et al.* [52] descrevem em seu trabalho o Atrito de deslizamento (μ) durante o processo SPIF como:

$$\mu = \frac{\sqrt{F_X^2 + F_Y^2}}{F_Z} \quad [-] \quad \text{Eq. 3}$$

2.1.9 Simulação Numérica na Estampagem Incremental

Atualmente, o processo de Simulação Numérica é uma importante ferramenta utilizada nos processos de fabricação na indústria. Do mesmo modo que houve o avanço tecnológico dos *softwares* CAD/CAM, com uma aplicação maciça nas indústrias, os *softwares* de Métodos de Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) utilizados nas simulações computacionais, também evoluíram significativamente e estão sendo utilizados industrialmente.

As principais vantagens de ter um modelo FEM são a redução de custos de testes (relacionados com a máquina, a ferramenta e os custos do trabalho, bem como a duração do ensaio) e a possibilidade de identificar as melhores condições de trabalho em termos das geometrias de matriz e *blank*, prensa-chapas e parâmetros do processo. Salientando-se que nas simulações o tempo de “cálculo” é um fator importante, e além das variáveis do processo e material, está relacionado com a capacidade de processamento computacional [48].

A função da simulação numérica é prover resultados confiáveis, aproximando-se ao máximo dos resultados reais do experimento. Para tanto, isso só é possível se o *software* receber o máximo de informações reais do material e do processo que está sendo simulado [21].

Nos processos de conformação de chapas que devam ser simulados, dentre as principais características a serem fornecidas para a simulação, estão as propriedades da chapa (resistência mecânica, índice de encruamento, índice de anisotropia, curva limite de conformação, entre outras) e as variáveis do processo de conformação (velocidade do punção, diâmetro da chapa inicial, geometria da matriz e punção, força de prensagem e coeficiente de atrito) [21].

Alguns trabalhos utilizaram a simulação no processo de estampagem computacional focando nas geometrias finais das peças, as deformações alcançadas e o retorno elástico, comparando com os resultados dos experimentos práticos. Observou-se uma grande similaridade entre os dados, confirmando o potencial dos *softwares* de simulação numérica por elementos finitos para ferramentas [4, 6, 29, 61, 62].

Robert *et al.* [10] relatam que as simulações FEM dão bons resultados, no entanto, o tempo de cálculo são longos, devido ao elevado grau de não-linearidade destes problemas. Com o objetivo de diminuir o tempo de cálculo, os autores analisaram pelo método de elementos finitos explícito do código ABAQUS, no processo SPIF, utilizando o critério de Hill 48 para chapas metálicas anisotrópicas.

Suresh *et al.* [63] desenvolveram uma metodologia para gerar a trajetória da ferramenta, necessária para simulações numéricas, diretamente a partir do programa NC gerado por um *software* CAM. A metodologia proposta foi validada experimentalmente, por meio de SPIF, e numericamente, por meio do *software* LS-DYNA (Figura 45).

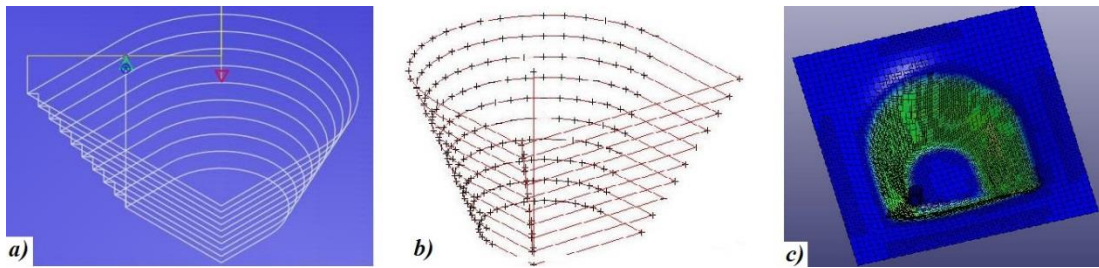


Figura 45: Trajetória da ferramenta: a) *Software* CAM; b) Trajetória ajustada para LS-DYNA; c) Simulação Numérica da ISF [63]

Ayed *et al.* [64] abordaram um processo de FEM, no código ABAQUS, simplificado para ISF, com o objetivo principal de desenvolver um modelo simples de elemento finito suficientemente preciso para simular o processo de ISF e eficiente em termos de tempo de CPU.

Na simulação numérica o tamanho elemento (malha) tem um efeito significativo sobre a precisão dos resultados de elementos finitos, bem como no tempo de processamento. Uma malha fina pode melhorar a precisão dos resultados; mas, aumenta o tempo de processamento necessário para fazer a simulação. Uma malha grossa conduz a resultados inconsistentes, mas num tempo menor simulação [65].

No intuito de convergir um tempo de processamento menor na simulação, mas com resultados consistentes, Suresh *et al.* [65] desenvolveram uma estratégia em que a malha “grossa” (tempo menor de processamento) é refinada (*re-remeshing*) adaptativamente no trajeto de deformação da ferramenta de ISF utilizando o código de elementos finitos explícito LS-DYNA (Figura 46).

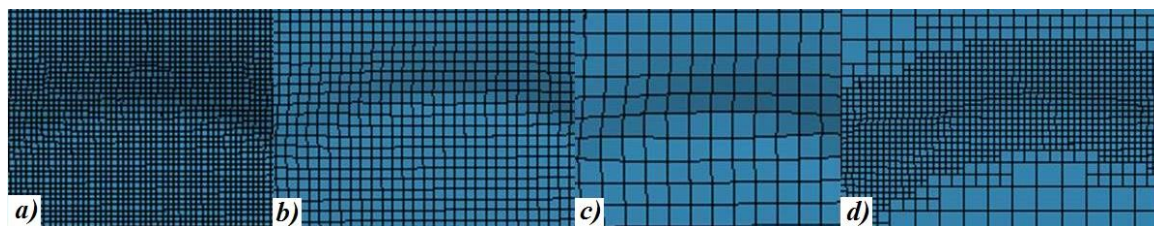


Figura 46: Diferentes topologias de malha utilizados em simulação numérica de ISF: a) Elemento com 1x1 mm; b) 2x2 mm; c) 4x4 mm; d) 4x4 mm, com malha refinada no trajeto de deformação da ferramenta [65].

Li *et al.* [66] utilizaram o código de elementos finitos explícito LS-DYNA® para investigar o mecanismo de deformação no processo de ISF, analisando o comportamento de deformação de estiramento, de flexão e de cisalhamento durante o processo.

Dejardin *et al.* [6] realizaram estudos experimentais e numéricos sobre o processo SPIF na fabricação de um tronco de cone, analisando a precisão geométrica e o retorno elástico. Para os testes utilizaram chapa de alumínio AA 1050 com 1 mm de espessura (s_0). Para o processo de ISF utilizaram um óleo mineral como lubrificante, demais informações do experimento são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros do processo de ISF e da geometria [6].

Descrição	Valor
Diâmetro da Ferramenta (R_T)	10 mm
Incremento Vertical (Δz)	0,2 mm
Rotação (S)	400 rpm
Velocidade de Avanço (F_R)	500 mm/min ⁻¹
Base Maior do Cone (B_{MA})	Ø140 mm
Altura do Cone (h)	50 mm
Inclinação – Ângulo de Parede (ψ)	45°

Como a estampagem incremental é um processo progressivo de conformação, caracterizado por grandes deslocamentos e grandes deformações localizadas, um esquema de solução explícita foi adotado, resultando na escolha do *software* de simulação de elementos finitos LS-Dyna®. Este método explícito de elementos finitos é adequado para analisar a conformação de geometrias simples como cones ou pirâmides [6].

Analisando a geometria do experimento, Dejardin *et al.* perceberam uma diferença de 3,7% entre a geometria do Perfil 1 (XZ) com o Perfil 2 (YZ), como ilustrado na Figura 47. Tal diferença entre os perfis foi associada ao Incremento Vertical (Δz) de 0,2 mm que é realizado a cada ciclo [6].

Comparando os resultados dos perfis numéricos e experimentais, uma adequada correlação pode ser observada, constatando uma diferença geométrica entre os dois perfis com

um erro máximo não maior do que 3% (Figura 47). Neste sentido, a simulação por elementos finitos para SPIF em peças simples mostrou-se promissor no primeiro momento (Figura 47).

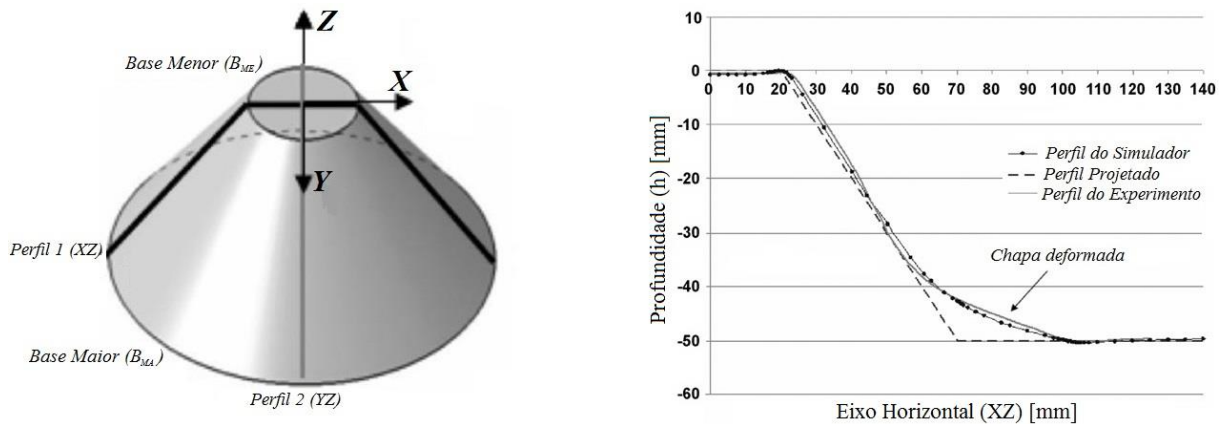


Figura 47: Análises experimentais e numéricas do processo SPIF [6].

A fim avaliar a influência do tipo de estratégia de deformação adotado em SPIF, Dejardin *et al* [6] realizaram uma nova simulação com outra estratégia de deformação.

A Estratégia 1 adotada inicialmente, se caracteriza pela alternância do sentido de deformação do contorno a cada novo incremento em Z. A Figura 48a mostra a alteração de sentido horário para anti-horário entre os passos 2 e 4. A Estratégia 2, apresentada na Figura 48b, mostra apenas o sentido horário de deformação para todos os contornos.

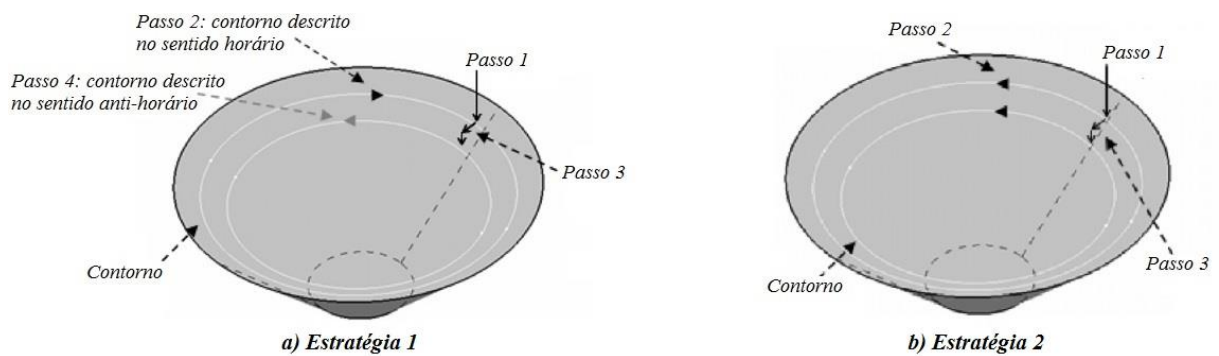


Figura 48: Estratégias de deformação utilizadas no software de simulação de elementos finitos LS-Dyna® [6].

Para avaliar o retorno elástico na região deformada, o tronco de cone foi fatiado de forma radial em várias regiões, formando “anéis truncados”. No *software* de simulação de elementos finitos LS-Dyna®, o procedimento foi realizado digitalmente. No experimento físico, o corte foi realizado com uma máquina de eletro-erosão por corte à fio, de modo a não causar mais tensões à chapa [6].

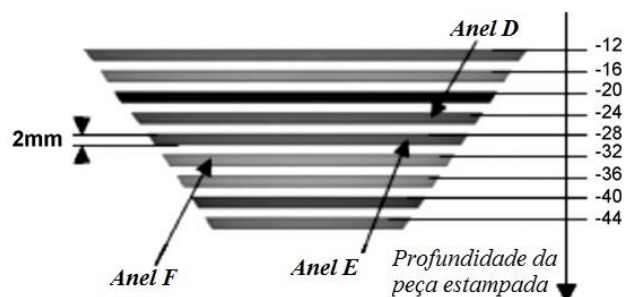


Figura 49: Representação dos anéis fatiados [6].

No trabalho de Suresh e Regalla [54], foi analisado experimentalmente e numericamente a formabilidade de aço para estampagem extra profunda no processo SPIF (Figura 41). As simulações numéricas foram realizadas pelo método de elementos finitos explícito do código LS-DYNA, em função da CLC do material. Os resultados experimentais e numéricos foram comparados, apontando uma boa correlação nos valores (Tabela 6). A diferença entre os resultados experimentais e simulados, tratado pelo autor como “erro”, é o resultado da razão entre o Ângulo de Parede (Ψ) Experimental e o Ângulo de Parede Simulado (Ψ_s).

Tabela 6: Relação entre Experimentos e análise FEM da formabilidade em SPIF de geometrias cônicas [54].

Perfil da Parede Vertical	Erro de Previsão [%]	
	Tronco de Cone	Tronco de Pirâmide
Circular	1,02	0,79
Elíptico	1,18	0,63
Parabólico	1,16	0,49
Exponencial	3,62	2,65

Enquanto os formatos de Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide relatados anteriormente possuem um perfil “retilíneo” nas paredes verticais, Suresh e Regalla [54] analisaram a formabilidade em SPIF de aço automobilístico para estampagem profunda (*Extra Deep Drawing - EDD*) usando as mesmas geometrias, mas com as paredes verticais no formato circular, elíptico, parabólico e segmentos de curva exponencial (Figura 41).

Nas pesquisas para determinar o ângulo de parede (ψ) máximo em chapas de alumínio (7075-T0) com 1 mm de espessura, por Minutolo *et al.* [53], os autores utilizaram o programa LS-DYNA, baseados na CLC do material. Na Figura 50 são apresentados os valores de deformações verdadeiras (φ_1 e φ_2) em relação a “CLC” do processo SPIF ($\varphi_1+\varphi_2$) criada automaticamente pelo software LS-DYNA.

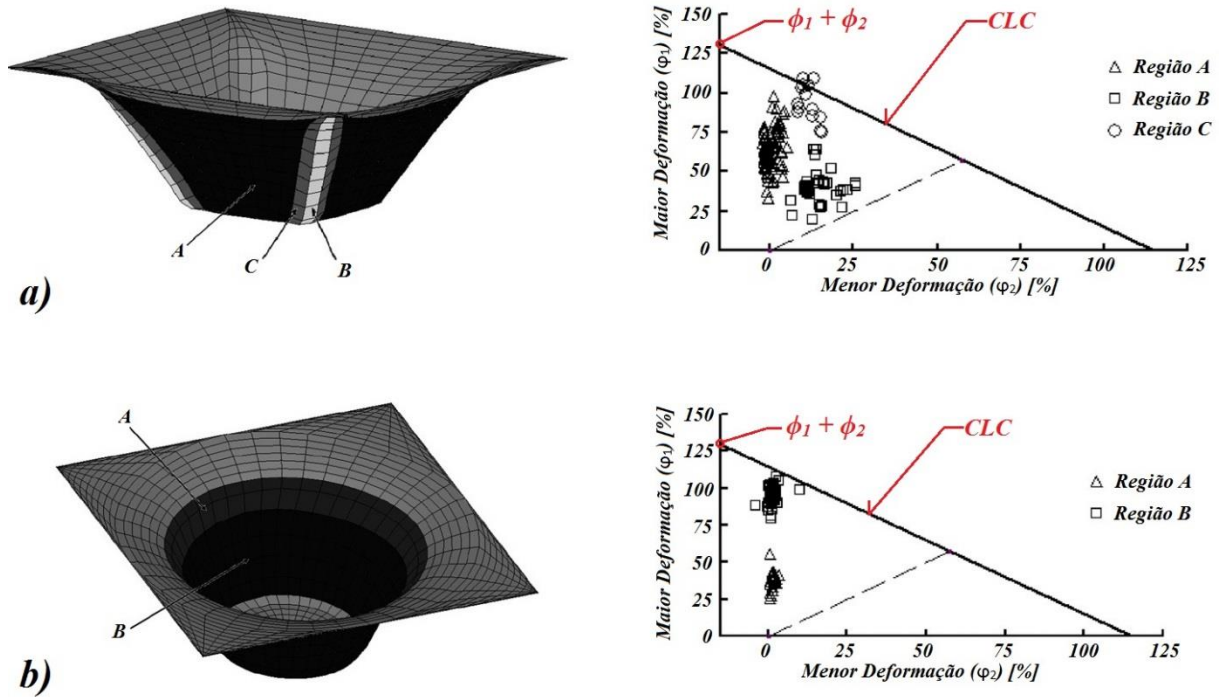


Figura 50: Diagrama das deformações no software LS-DYNA: a) Tronco de Pirâmide; b) Tronco de Cone [53].

Bambach e Hirt [61] utilizaram a simulação numérica no processo SPIF em aço DC04 com 1,5 mm de espessura, utilizando o software ABAQUS, variando os tipos de elementos e as leis constitutivas, que neste caso foram: (i) critério de plasticidade de von Mises com o endurecimento isotrópico; (ii) critério de plasticidade de von Mises com endurecimento isotrópico e cinemático combinados; (iii) critério de plasticidade de Hill'48 com endurecimento isotrópico. Os resultados entre as análises usando o critério de plasticidade de von Mises e Hill'48 não apresentaram diferenças significativas. Os resultados das medições experimentais e numéricas são mostrados na Figura 51.

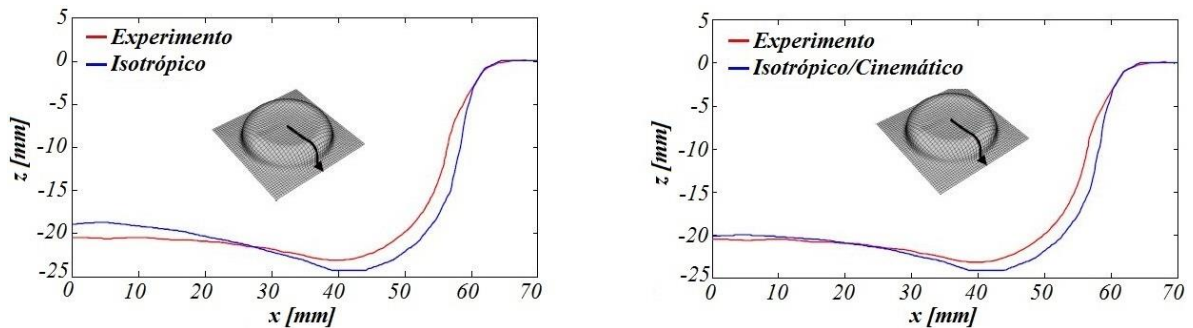


Figura 51: Comparativo entre perfil XZ Experimental e Simulado [61]

Adicionalmente, os resultados apresentados na Figura 51 mostram uma melhor previsão geométrica da peça quando o endurecimento cinemático é contabilizado na simulação.

2.1.10 Máquinas Utilizadas na Estampagem Incremental

Como relatado no início deste capítulo, apenas com a evolução tecnológica dos equipamentos CNC que as investigações em ISF tiveram um amplo desenvolvimento na comunidade científica [23] [24]. Por este fato, a maioria das pesquisas realizadas em ISF utilizam máquinas de usinagem CNC adaptadas para o processo de estampagem incremental.

Diversos exemplos desta aplicação podem ser encontrados em trabalhos desenvolvidos por Allwood *et al.*, 2010 [1], Dejardin *et al.*, 2010 [6], Hirt *et al.* 2005 [23], Martins *et al.*, 2008 [24], Jeswiet *et al.*, 2005 [27], Duflou *et al.*, 2008 [31], Ambrogio *et al.*, 2012 [37], Centeno *et al.*, 2014 [46], citando apenas alguns renomados pesquisadores nesta área.

Excetuando a utilização de máquinas de usinagem CNC no processo de ISF, há trabalhos desenvolvidos em máquinas dedicadas, como os do grupo de Julian Allwood, da Universidade de Cambridge [67] e da empresa japonesa *Amino Corporation*, como o realizado por Li *et al.*, 2015 [66] (Figura 52). Também existem algumas investigações em ISF utilizando robôs, como as de Lamminen *et al.*, 2005 [68], Meier *et al.*, 2009 [69] e 2011 [70].

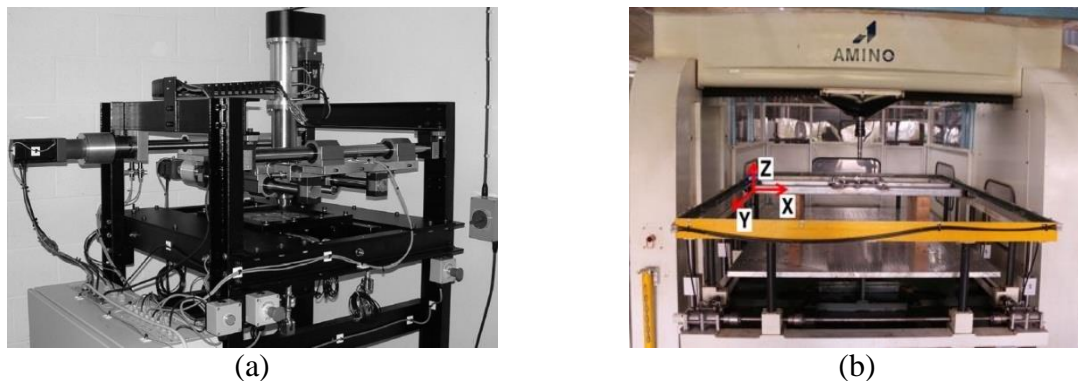


Figura 52: Máquinas dedicadas ao processo de estampagem incremental: a) Máquina Dedicada da Universidade de Cambridge [67]; b) Máquina da Amino Corporation [66].

Adicionalmente ao grupo de máquinas dedicadas ao processo de estampagem incremental, há a SPIF-A ("A" homenagem Aveiro), projetada e desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Este projeto foi motivado pela necessidade de conformar materiais mais duros e com espessuras maiores, o que exige maiores cargas admissíveis de conformação. Para atender esta necessidade, a SPIF-A foi desenvolvida com base em uma plataforma de Stewart (cinemática paralelas), com seis graus de liberdade independentes impulsionado por atuadores hidráulicos, proporcionando uma melhor rigidez e precisão a grandes forças de conformação. A possibilidade de translação e rotação simultânea movimentos, confere o potencial de propor

caminhos de ferramenta alternativa para o punção, posicionando-o de modo a reduzir a quantidade de forças laterais durante o processo [71].

O eixo árvore (*Spindle*) não possui acionamento ou travamento, assim, a rotação se dá por conta do atrito gerado durante o processo. Construtivamente, o *spindle* possui um conjunto “independente” montado abaixo da plataforma de Stewart (Figura 53).

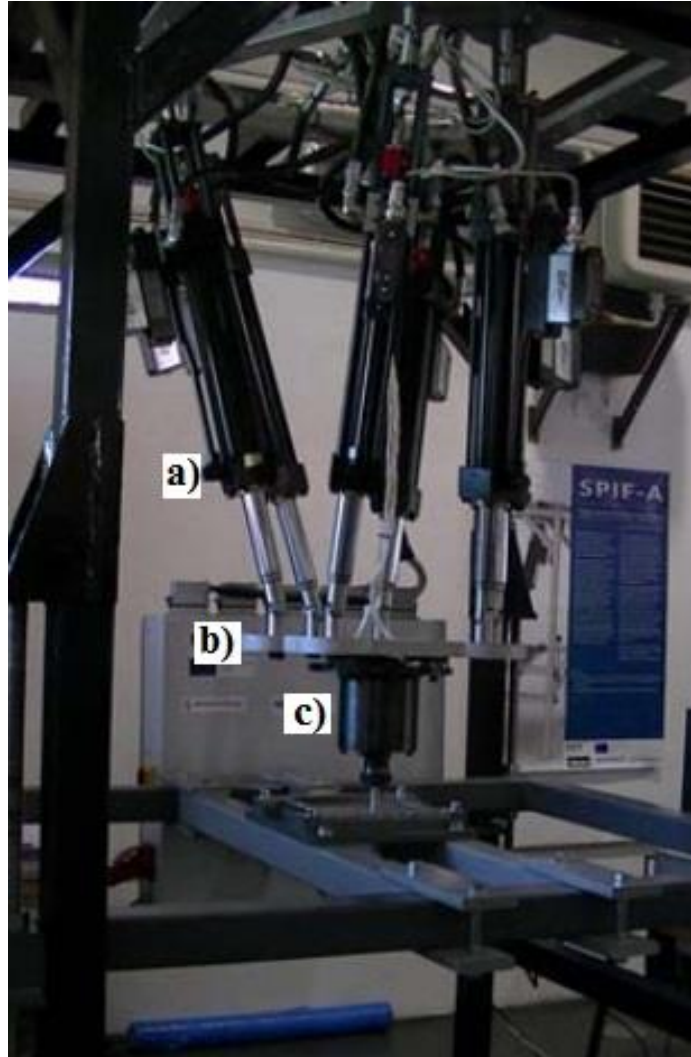


Figura 53: Máquina SPIF-A: a) Atuadores Cinemáticos; b) Base Móvel da Plataforma Stewart; c) Conjunto do Spindle [71].

A máquina possui com uma área de trabalho de 1000 mm x 1000 mm e um deslocamento vertical máximo de 400 mm. Em seu projeto foi admitido suportar cargas compressivas e laterais e de 13 kN e 6,5 kN, respectivamente, para isto, a SPIF-A dispõe de três células de cargas tri-axial (medição das forças nos três eixos), colocadas entre o eixo-árvore e base móvel da plataforma de Stewart, igualmente espaçadas (Figura 54).

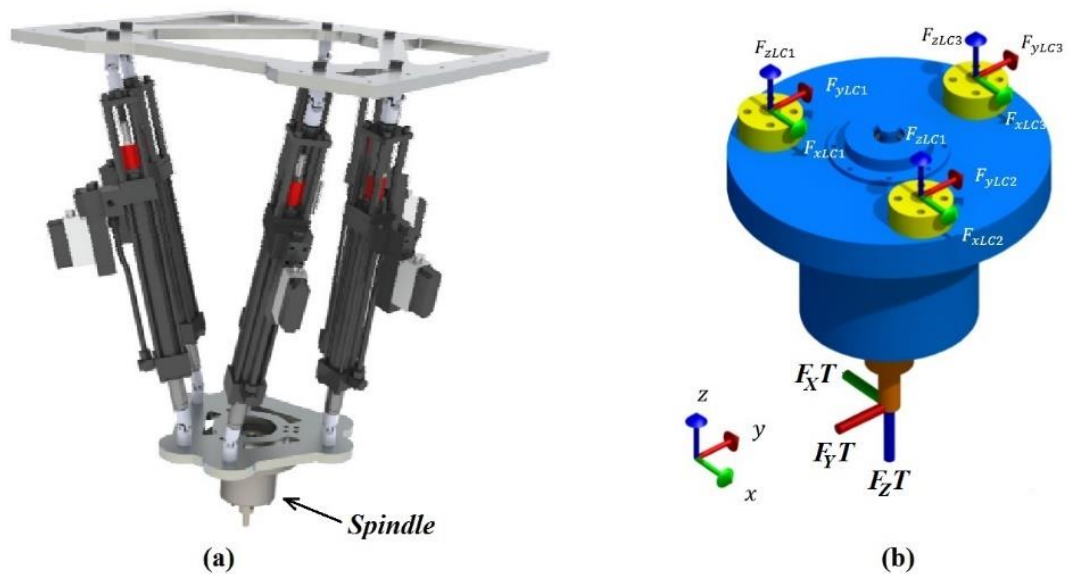


Figura 54: Detalhes construtivos da SPIF-A: a) Sistema cinemático (Plataforma Stewart) e Spindle; b) Disposição das células de cargas sobre o Spindle [71].

Onde, os autores descrevem que as contribuições no plano, de cada célula de carga, podem ser consideradas equivalentes, e as verticais podem assumir valores diferentes:

$$F_{xLC1} = F_{xLC2} = F_{xLC3} = F_{xT}$$

$$F_{yLC1} = F_{yLC2} = F_{yLC3} = F_{yT}$$

$$F_{zLC1} \neq F_{zLC2} \neq F_{zLC3}$$

Sendo:

F_{xT} : Força medida na ferramenta no sentido do eixo X

F_{yT} : Força medida na ferramenta no sentido do eixo Y

F_{zT} : Força medida na ferramenta no sentido do eixo Z

Do mesmo modo que uma máquina de usinagem CNC, a SPIF-A utiliza programação do Código G para a execução da estampagem incremental.

2.2 ESTADOS DE DEFORMAÇÃO

Segundo Schaeffer [72], as deformações podem ser caracterizadas por diversas formas:

- Deformações absolutas;
- Deformações relativas;
- Deformações verdadeiras.

A Figura 55 mostra as principais geometrias em um ensaio de tração convencional que serve de base para o esclarecimento das principais formas de se definir as deformações.

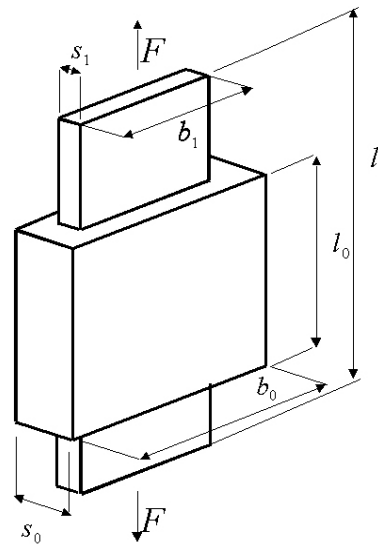


Figura 55: Dimensões esquemáticas num ensaio de tração [72]

As deformações verdadeiras são os parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação. O conhecimento das deformações que ocorrem num processo de conformação pode fornecer informações importantes, tais como situação das tensões internas, possibilidades de reduzir etapas de processo, conhecimento sobre o limite máximo de deformações etc [72].

A deformação verdadeira no comprimento φ_l é calculada por:

$$\varphi_l = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad \text{Eq. 4}$$

A deformação verdadeira na largura φ_b é calculada por:

$$\varphi_b = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \quad \text{Eq. 5}$$

A deformação verdadeira na espessura φ_s é calculada por:

$$\varphi_s = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

l_0 [mm]: Comprimento inicial do corpo de prova

l_1 [mm]: Comprimento final do corpo de prova

b_0 [mm]: Largura inicial do corpo de prova

b_1 [mm]: largura final do corpo de prova

s_0 [mm]: Espessura inicial do corpo de prova

s_1 [mm]: Espessura final do corpo de prova

As deformações em diferentes locais de um componente estampado variam enormemente de um ponto a outro. É de interesse prático a determinação quantitativa dessas deformações, pois pode se analisar as situações das tensões internas, possibilidades de reduzir etapas de processo, conhecimento sobre o limite máximo de deformações, etc [72]. As deformações verdadeiras que ocorrem na chapa podem ser medidas através do procedimento de Análise por Grade de Círculos (*Circle Grid Analysis*), que consiste na gravação grade círculos a superfície do *blank*, antes da estampagem (Figura 56a), onde, após o processo de conformação, estes pequenos círculos transformam-se em pequenas elipses (Figura 56b).

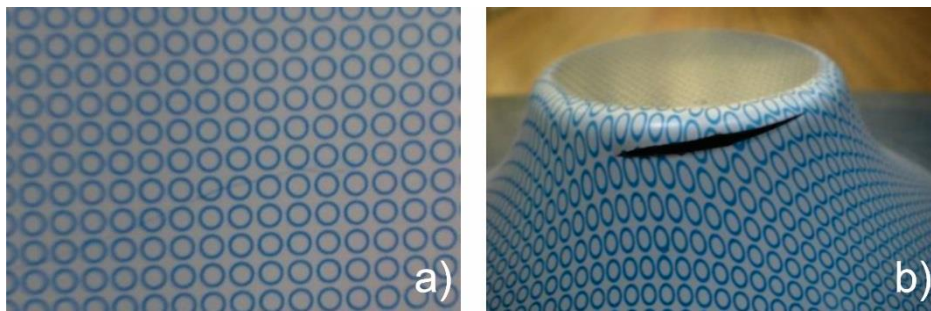
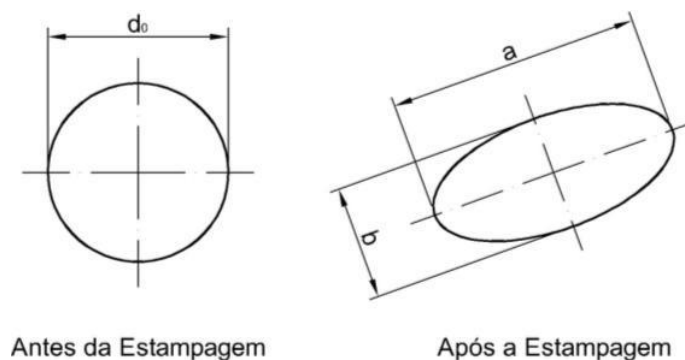


Figura 56: Exemplo de deformações em um componente estampado [73]

Depois de realizado o processo de estampagem avalia-se as deformações desta grade, sendo a elipse (Figura 57) a geometria a ser medida após a estampagem [13].



Antes da Estampagem

Após a Estampagem

Figura 57: Princípio da determinação das deformações. [72]

Deste modo, as três deformações principais são calculadas por:

a) φ_1 é a deformação verdadeira na direção do comprimento da elipse (maior deformação - Figura 57)

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right) \quad \text{Eq. 7}$$

b) φ_2 é a deformação verdadeira na direção da largura da elipse (menor deformação - Figura 57):

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad \text{Eq. 8}$$

c) φ_3 é a deformação verdadeira na espessura:

$$\varphi_3 = \ln\left(\frac{S_1}{S_0}\right) \quad \text{Eq. 9}$$

Considerando a lei de Constância de Volume se tem:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad \text{Eq. 10}$$

Ou:

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad \text{Eq. 11}$$

As medições na rede deformada levam a uma relação entre as deformações. Na Figura 58 observa-se como podem ser classificadas as deformações em função das solicitações que ocorreram durante a estampagem.

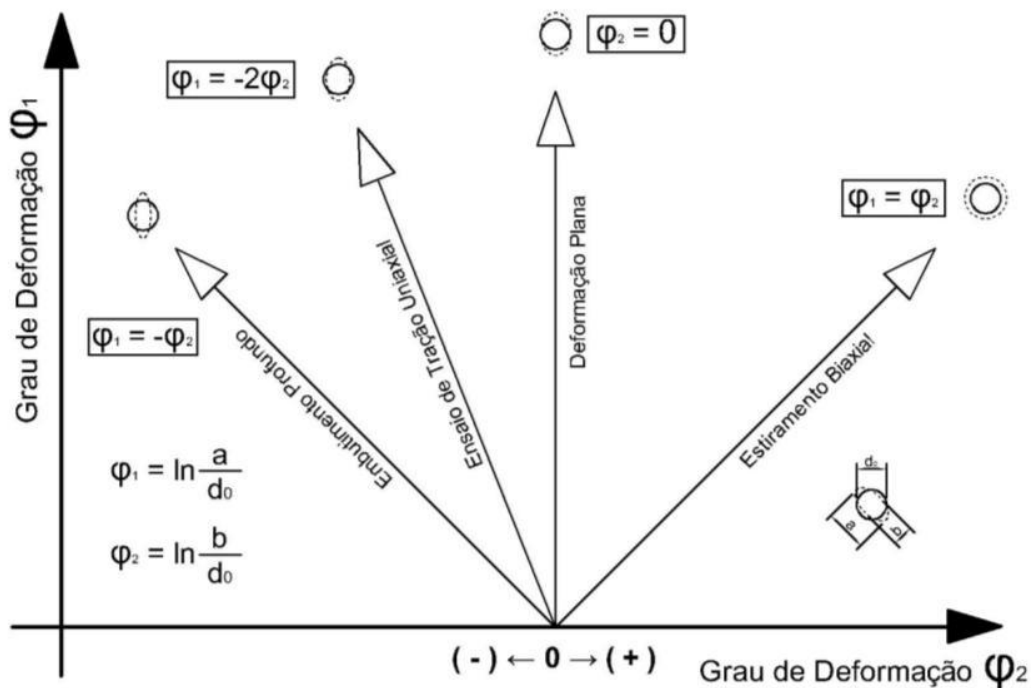


Figura 58: Tipos de deformação em chapa metálica. [72]

2.3 CRITÉRIOS DE FALHA PARA A CONFORMAÇÃO DE CHAPAS

A conformabilidade da chapa de metal é geralmente definida como a capacidade do metal em se deformar na forma desejada, sem estiramento ou fratura. Geralmente, o limite de deformação da chapa de metal é imposto pelo aparecimento de estiramento localizado, o que leva eventualmente à fratura dúctil [7].

Nos últimos anos, estudos teóricos têm sido desenvolvidos para prever a iniciação de fratura nos metais dúcteis. Para chapas metálicas dúcteis a falha mecânica é muitas vezes entendida como a iniciação da estricção na peça conformada, deste modo, o aparecimento da estricção é considerado o limite de conformabilidade [44].

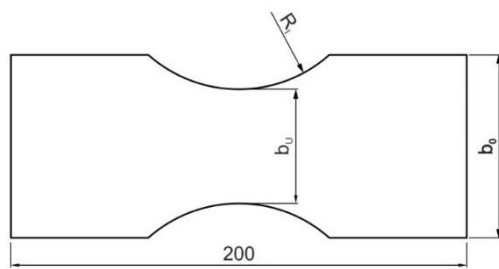
No caso da estampagem incremental, não existe estricção nas peças deformadas antes que a fratura ocorra [44], tornando-a inviável na previsão da fratura neste caso, distinguindo-a dos processos convencionais, necessitando de uma abordagem diferente ao problema [9].

Para o maior entendimento dos mecanismos que auxiliam na previsão de falha nas chapas metálicas dúcteis, a seguir, serão abordadas as características de critérios utilizados na previsão da falha do material, objetivando a relação com a estampagem incremental.

2.3.1 Curva Limite de Conformação

Um dos mecanismos mais utilizados na previsão de falha em peças estampadas é o Diagrama Limite de Conformação (DLC) ou *Forming Limit Diagram (FLD)*. Trata-se de um diagrama onde são as deformações maiores (φ_1) e menores (φ_2) de um material são plotadas uma em relação à outra e conectadas de forma a obter a Curva Limite de Conformação (CLC) ou *Forming Limit Curve (FLC)*, indicando as possíveis deformações admissíveis e catastróficas que o material está sujeito durante o processo de conformação [8, 74, 75].

A elaboração da CLC inicia-se com os ensaios tecnológicos do material proposto, conforme a norma ASTM E 2218-04 (ensaio de altura limite de domo), onde corpos de prova com diferentes larguras, e, cada qual aparados distintamente (Figura 59), são devidamente fixados em um prensa-chapas e submetidos a ação de punção hemisférico com diâmetro de 100 mm, até o seu rompimento.



CP	R _i [mm]	b _u [mm]	b ₀ [mm]
1	100	10	40
2	90	20	50
3	80	30	60
4	70	40	70
5	60	50	80
6	50	60	100
7	40	80	120
8	25	100	150

Figura 59: Formato e dimensões dos Corpos de Prova para determinar a CLC [76].

Esses corpos de prova com diferentes tamanhos geram diferentes estados de tensão e deformação durante o processo de conformação. A curva CLC representa um critério de falha baseado em deformação, o qual descreve a transição desde o comportamento seguro do material até sua falha. Para a análise das deformações, aplica-se o procedimento da Análise por Grade de Círculos no *blank*, e após os ensaios de altura limite de domo, as elipses próximas a região fraturada são medidas.

O comportamento das deformações de um componente estampado é comparado com a CLC do material em questão; qualquer combinação situada abaixo da curva significa deformações que o material pode suportar e, conseqüentemente, as localizadas acima serão referentes a deformações que o material não suportará [74]. De forma geral, as CLC's são baseadas na premissa de que o trajeto de deformação é linear ou quase linear, ou seja, $d\phi_2/d\phi_1 \approx \text{constante}$ [8]. A Figura 60 apresenta o Diagrama Limite de Conformação com curvas de diferentes materiais.

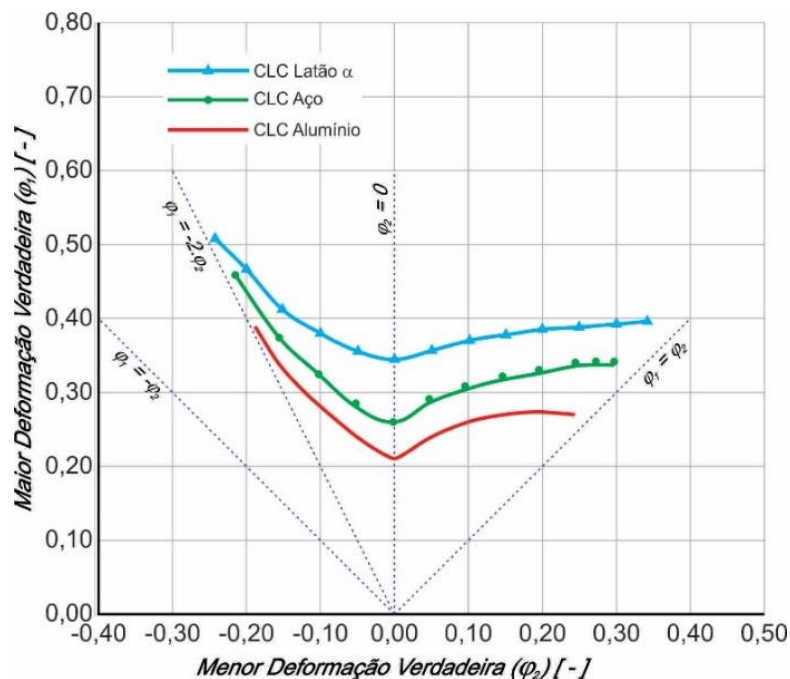


Figura 60: Diagrama com as Curvas Limite de Conformação de diferentes materiais [77].

Durante o processo de estampagem há uma redistribuição do metal, quando ocorre a transformação do *blank* (bidimensional) na peça (tridimensional), submetendo a chapa plana a um estado complexo de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo.

2.3.2 Linha de Fratura na Conformação

O limite de conformabilidade por fratura, ou simplesmente Linha de Fratura na Conformação (LFC), do inglês *Fracture Forming Line (FFL)*, proposto por Atkins [78], onde relata que a fratura inicia-se com a formação, crescimento e aglutinação de micro vazios nas regiões que são altamente deformadas pelo processo de estampagem, recuperou interesse nos últimos anos devido ao desenvolvimento dos processos de ISF, que falham por fratura sem estiramento anterior, e devido à evolução recente das pesquisas sobre a mecânica da fratura, modelos matemáticos de fratura foram desenvolvidos e aplicados em *softwares* de elementos finitos para a simulação do processo de estampagem incremental [46, 79].

Neste sentido, Isik *et al.* [79], propuseram em suas pesquisas identificar um novo nível de compreensão sobre os limites de conformabilidade por fratura no espaço das deformações principais, mesclando o conceito de Linha de Fratura na Conformação, a redução crítica na espessura da chapa e os valores críticos da fratura, com base na razão da triaxialidade média das tensões para as tensões efetivas, que é a base da mecânica da fratura dúctil com base em modelos do crescimento dos vazios.

Em suas pesquisas a respeito da Linha de Fratura na Conformação, Centeno [46] e colaboradores, desenvolveram experimentos SPIF em um modelo troncônico, utilizando chapas de AISI 304 com 0,80 mm de espessura, empregando diferentes incrementos verticais (Δ_z), 0,20 e 0,50 mm, e diâmetros das ferramentas (R_T), 10 e 20 mm, para cada caso. Conforme a Figura 61, para os experimentos com a ferramenta de 20 mm de diâmetro, observa-se as deformações principais (ϕ_I) até 0,9, bem acima da CLC e não tão longe da LFC. Já para os experimentos com a ferramenta de 10 mm de diâmetro, as deformações principais (ϕ_I) alcançam a LFC, fato este, devido ao aumento da conformabilidade da chapa, haja vista, que em ISF, quanto maior o diâmetro da ferramenta, são maiores as tensões envolvidas na conformação diminuindo sua conformabilidade, como já explicado por Martins *et al.* [24] em sua investigação.

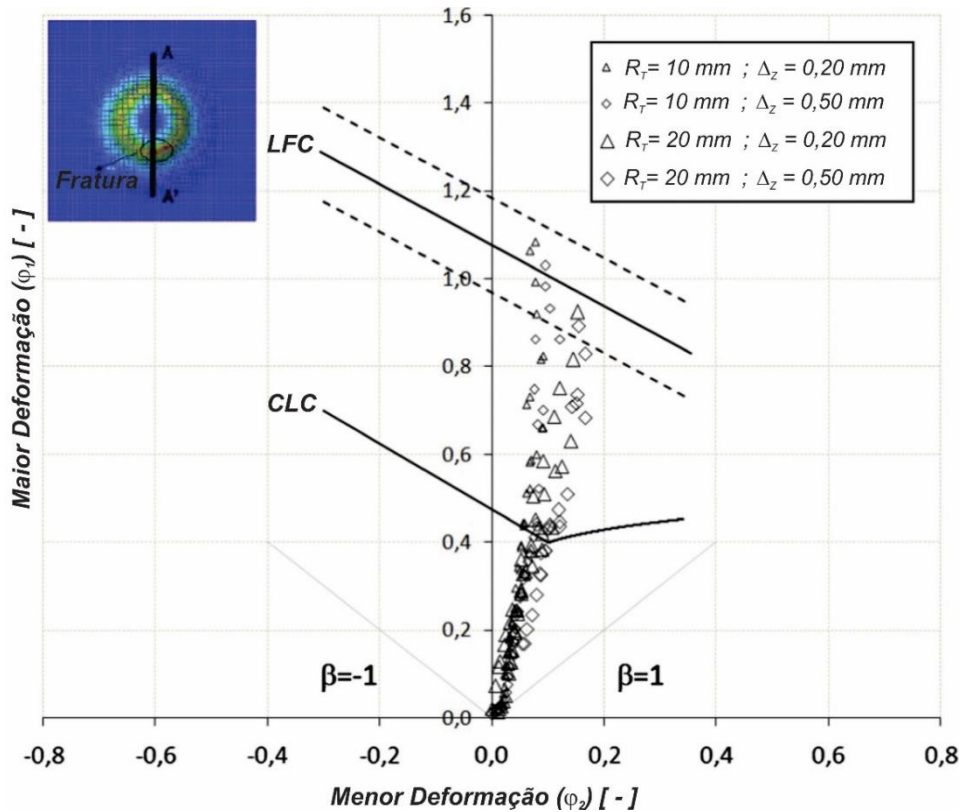


Figura 61: Deformações principais (ϕ_1 , ϕ_2) de experimentos SPIF em AISI 304 utilizando ferramentas de diâmetros de 10 e 20 mm, e Incremento Vertical de 0,2 e 0,5 mm [46].

2.4 ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARA ESTAMPAGEM

Neste capítulo são descritos os aspectos da caracterização da matéria prima em chapas, descrevendo sobre o processo de ensaio de tração, os resultados que se obtém a partir do mesmo e o que eles representam no processo de estampagem.

Também será abordado bibliograficamente as características mecânicas, físicas e químicas do latão C-268, objeto de estudo deste trabalho, mencionando suas aplicabilidades na indústria.

2.4.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração pode ser classificado como um ensaio mecânico de utilização universal, pois, por ser relativamente simples, de rápida realização e fornece informações importantes sobre o material ensaiado [72, 80], como:

- Módulo de Elasticidade (E) [GPa];
- Tensão de Escoamento Convencional ($\sigma_{0,2}$) ou (σ_e) [MPa];
- Limite de Resistência ou Tensão Máxima (σ_B) [MPa];

- Limite de Ruptura (σ_R) [MPa];
- Alongamento (δ) [%]
- Grau de encruamento (n)
- Índice de anisotropia (r)

Ainda, observa-se para este tipo de ensaio que a temperatura, velocidade de deformação, tamanho de grão, porcentagem de impurezas e anisotropia (r) do material, influenciam intensamente os resultados dos ensaios [81]. A Figura 62 mostra o diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa.

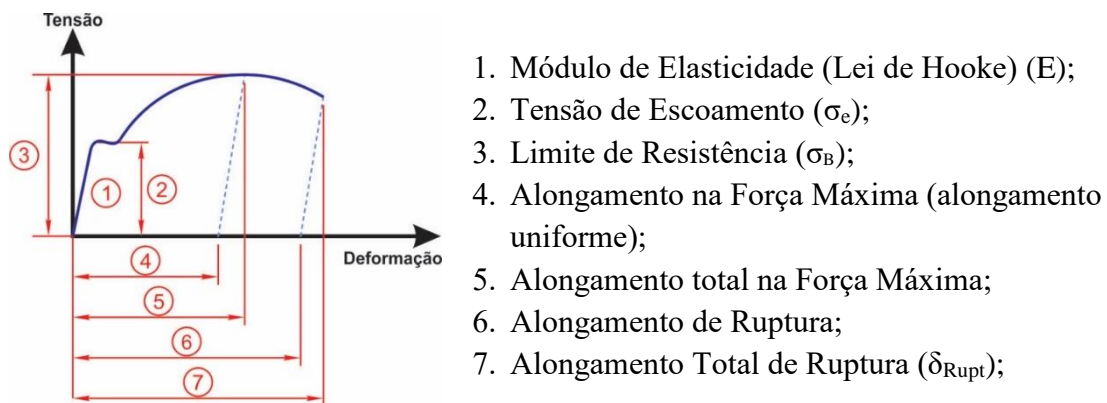


Figura 62: Diagrama convencional Tensão x Deformação Relativa [72].

Conforme a normas ABNT 6152, o ensaio de tração consiste em fixar um corpo de prova nas garras de uma máquina de ensaios mecânicos, garantindo um estado uniaxial de tensões. O corpo de prova é tracionado com velocidade constante até a ruptura registrando-se a força (F) e o comprimento instantâneo (l). A Figura 63 mostra o formato típico dos corpos de prova usinados de seção retangular e a Tabela 7 apresenta os detalhes destes itens:

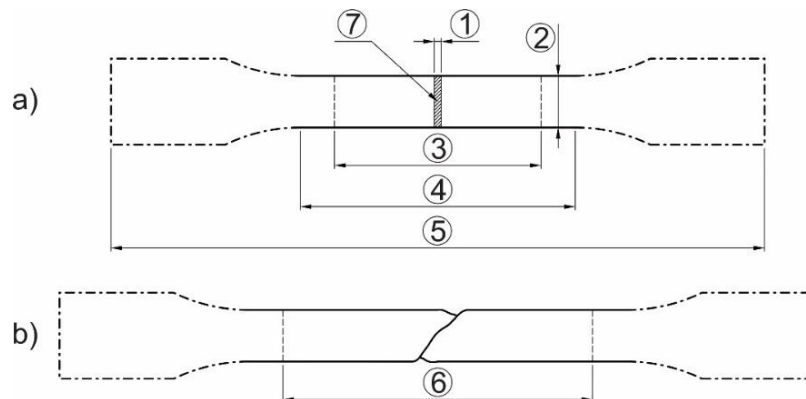


Figura 63: Corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração. a) CP antes do ensaio; b) CP após o ensaio; [82].

Tabela 7: Terminologias da geometria do Corpos de prova usinados de seção retangular para ensaio de tração.

Número de referência	Símbolo	Unidade	Designação
1	s_0	mm	Espessura de um corpo de prova plano.
2	b_0	mm	Largura do comprimento paralelo do corpo de prova plano.
3	l_0	mm	Comprimento de medida original.
4	l_c	mm	Comprimento paralelo.
5	l_t	mm	Comprimento total do corpo de prova.
6	l_1	mm	Comprimento de medida final após ruptura.
7	A_0	mm ²	Área da seção transversal original do comprimento paralelo

Para construção da Curva Tensão (σ) x Deformação Relativa (ε), basta dividir a força medida (F) pela área inicial (A_0) da secção transversal do corpo de prova (Eq. 12), obtendo-se a tensão (σ):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Eq. 12}$$

E a deformação absoluta no comprimento da chapa (Δl) pelo valor do comprimento inicial (l_0), obtendo-se a deformação relativa (ε) em cada instante do ensaio (Eq. 13) [80]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \therefore \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \text{ [%]} \quad \text{Eq. 13}$$

Onde:

F [N]: Força aplicada.

Δl [mm]: deformação absoluta no comprimento da chapa durante o ensaio.

2.4.2 Curvas de Escoamento

A Tensão de Escoamento (k_f) é a tensão aplicada a um corpo de prova submetido a um carregamento uniaxial que provoca o escoamento do material, a partir do início da deformação plástica, Tensão Limite de Escoamento (σ_E), ocorrendo até a Tensão Máxima (σ_B) [83].

Michel e Picart [84] apresentam em seu trabalho curvas de escoamento do latão C-270 (CuZn36), para avaliar a influência do tamanho do CP sobre a tensão de escoamento. Na Figura 64, é possível verificar as variações das curvas de escoamento, conforme os tamanhos dos corpos de prova, onde s_0 e b_0 referem-se respectivamente à espessura e largura iniciais dos CP's.

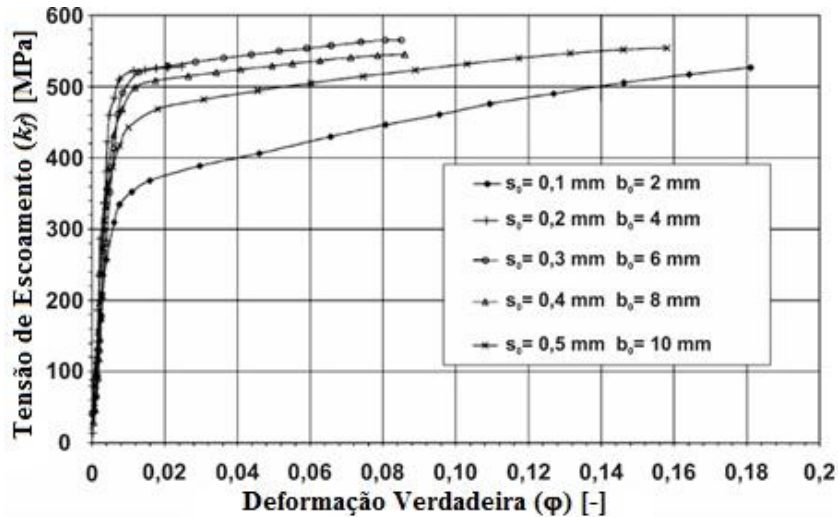


Figura 64: Curvas de Escoamento do latão C270, a partir Corpos de Provas com espessuras e larguras diferentes [84].

2.4.3 Índice de Anisotropia

Conforme Rodrigues e Martins [80], as propriedades mecânicas dos materiais metálicos variam em função da direção da sollicitação considerada, fenômeno este chamado de anisotropia, e deve-se à estrutura metalográfica, teor dos elementos de liga e aos tratamentos térmicos e mecânicos submetidos. As chapas metálicas, por exemplo, que são concebidas pelo processo da laminação de lingotes, inevitavelmente, acarreta o surgimento da anisotropia, pois os grãos do material enquanto lingote, que inicialmente encontram-se organizados aleatoriamente, são deformados e redistribuídos segundo a orientação do sentido de laminação, consequentemente, variando suas propriedades mecânicas.

O índice de anisotropia (r), é a razão entre a deformação verdadeira na largura (b) e na espessura (s) de um CP de tração (Eq. 14).

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad \text{Eq. 14}$$

Aplicando a lei da constância do volume, se reduz a imprecisão do valor de medição da deformação verdadeira na espessura (Eq. 15).

$$r = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)} \quad \text{Eq. 15}$$

Conforme a norma ASTM E 517 – 00, o índice de anisotropia (r) é calculado em três direções de laminação da chapa (Figura 65), onde r_{0° é a anisotropia no sentido de laminação (longitudinal), r_{45° e r_{90° são os índices de anisotropia a 45° e 90° do sentido de laminação, respectivamente [85].

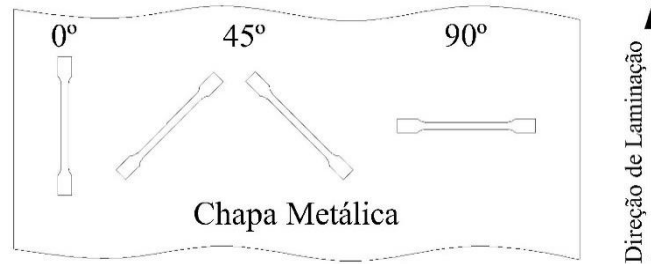


Figura 65: Corpos de Prova no ensaio de anisotropia [72]

O índice de anisotropia média (r_m) é um indicador de quanto uma chapa metálica resiste ao afinamento, quando submetida a forças de tração/compressão, no plano da chapa. Provém dos índices de anisotropia r_{0° , r_{45° e r_{90° (Eq. 16).

$$r_m = \frac{(r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ})}{4} \quad \text{Eq. 16}$$

Quando um material possui $r_m = 1$, significa que não apresenta alterações mecânicas conforme o sentido de laminação, nomeado de isotrópico. Quanto maior o valor de r_m , maior será a resistência da chapa à diminuição da espessura, apresentando boas qualidades de conformabilidade, sobretudo para embutimento profundo [13].

Conforme os estudos de Ferrarini [86], o latão C-268 apresentou um índice de anisotropia média (r_m) de 0,841.

2.4.4 Análise Química da Liga de Zn/Cu

Denomina-se latão a liga constituída basicamente de cobre e zinco, sendo o último, com teores de 4% a 39%, podendo ainda conter outros elementos de liga presentes, como ferro, chumbo, alumínio, níquel e estanho, mas com baixos teores [87]. Por conta desta diversificada gama de combinações possíveis nas ligas, existe uma série de latões padronizados, conforme seus constituintes de ligas. A Tabela 8 apresenta alguns tipos padronizados de latões, apresentando os teores dos elementos constituintes de cada liga.

Tabela 8: Limites de composição química das ligas de latão [%]. [88]

Liga	Cu	Pb	Fe	Outros	Zn
C-210	94,00 – 96,00	Máx. 0,05	Máx. 0,05		Restante (4,00 – 6,00)
C-240	78,50 – 81,50	Máx. 0,05	Máx. 0,05		Restante (18,50 – 21,50)
C-260	68,50 – 71,50	Máx. 0,07	Máx. 0,05	Máx. 0,15	Restante (28,50 – 31,50)
C-268	64,00 – 68,50	Máx. 0,15	Máx. 0,05		Restante (31,50 – 36,00)
C-270	63,00 – 68,50	Máx. 0,10	Máx. 0,07		Restante (31,50 – 37,00)
C-280	59,00 – 63,00	Máx. 0,30	Máx. 0,07		Restante (41,00 – 37,00)
C-330	65,00 – 68,00	0,20 a 0,80	Máx. 0,07	Máx. 0,50	Restante (32,00 – 35,00)
C-360	60,00 – 63,00	2,50 a 3,70	Máx. 0,35	Máx. 0,50	Restante (33,50 – 35,45)
C-370	59,00 – 62,00	0,90 a 1,40	Máx. 0,15	Máx. 0,50	Restante (36,00 – 39,00)

2.4.5 Análise Metalográfica de Ligas de Zn/Cu

Latões são ligas de cobre (Cu) e zinco (Zn), onde as ligas contendo até cerca de 35% de zinco são ligas monofásicas, consistindo de uma solução sólida de zinco e cobre alfa (α), apresentando uma coloração gradual do amarelo ouro ao vermelho, à medida que se aumenta o teor de zinco até 35% [89].

O zinco é o principal elemento desta liga e participa da estrutura cúbica de faces centradas (CFC) do cobre como um átomo substitucional, formando uma solução sólida do tipo α . A Figura 66 ilustra a microestrutura da liga de latão C-260 [89].

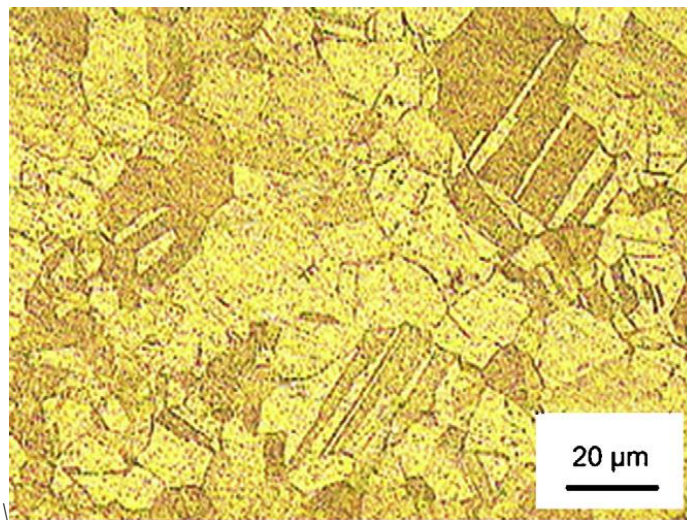


Figura 66: Microestruturas da chapa de latão recozido C-260 [89].

2.4.6 Aplicações da Chapa de Latão C-268

Por possuir uma excelente trabalhabilidade a frio e uma boa formabilidade a quente, as ligas de latão são aplicadas na fabricação de diversos produtos das mais diferentes áreas e por diferentes processos de produção, dentre elas cita-se a fabricação de:

- Grades de arquitetura, fechos, dobradiças e fechaduras para a construção civil (Figura 67);
- Cartuchos de munição e armas para a indústria bélica;
- Aparelhos médicos e cirúrgicos para área médica;
- Além de instrumentos musicais de sopro, ornamentações, joias e bijuterias, entre outros (Figura 67).

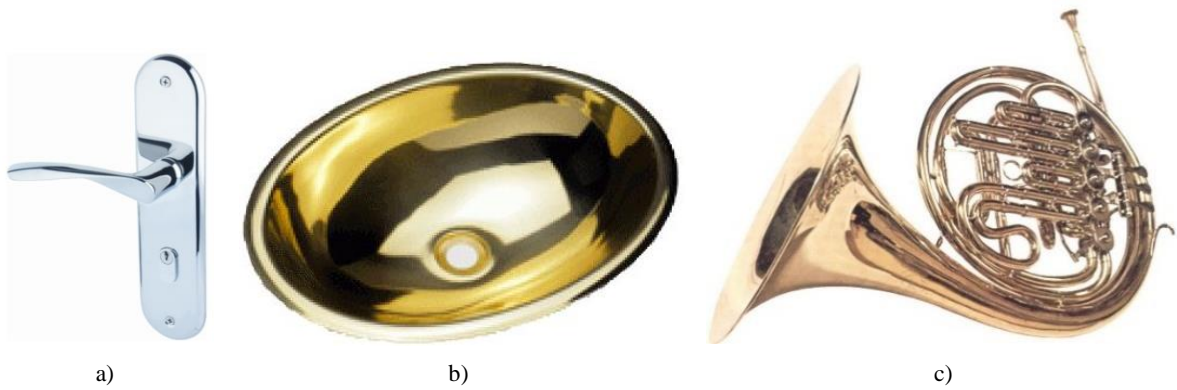


Figura 67: Produtos fabricados em latão -268: a) Fechadura; b) Cuba para pia; c) Instrumento musical de sopro

O material abordado nesta pesquisa, latão C-268, segue a norma SAE J463, que trata dos Forjados de Cobre e suas ligas. [88]. Dentre os produtos fabricados a partir desta matéria prima em chapa, destaca-se:

- Núcleos de radiadores automotivos;
- Terminais elétricos, parafusos, refletores, conchas da lanterna, dispositivos elétricos da lâmpada, soquete para área elétrica;
- Trocadores de calor, sistemas de aquecimento doméstico, painéis de absorção de energia solar;



Figura 68: Núcleo de Radiador Automotivo; fabricado em latão -268.

Considerando os produtos normalmente fabricados a partir deste material investigado, e, relacionando com o processo SPIF, evidencia-se a possibilidade de fabricação e/ou prototipagem dos produtos destacados na Figura 67 (espelho da fechadura, cuba e parte cônica do instrumento musical – esta, com geometria semelhante à vários experimentos investigados em SPIF) e Figura 68, com a parte superior do Núcleo de Radiador Automotivo.

Tabela 9 apresenta algumas propriedades físico-químicas da chapa de latão C-268 encontradas na literatura.

Tabela 9: Propriedades físico-químicas do latão C-268 [86, 88, 90]

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
<i>Densidade (ρ)</i>	<i>8,47 g/cm³</i>
<i>Ponto de Fusão</i>	<i>930 °C</i>
<i>Temperatura de Solidificação</i>	<i>905 °C</i>
<i>Calor Específico a 20°C</i>	<i>0,09 cal/g°C</i>
<i>Módulo de Elasticidade (E)</i>	<i>105 GPa</i>
<i>Alongamento (50 mm) (δ)</i>	<i>66 %</i>
<i>Limite de Resistência à Tração (σ_E)</i>	<i>340 a 615 MPa</i>
<i>Tensão de Escoamento Convencional (σ_E)</i>	<i>97 a 427 MPa</i>
<i>Tensão de Escoamento (kf)</i>	<i>715 MPa</i>
<i>Índice de Encruamento (n)</i>	<i>0,65</i>
<i>Coefficiente de Poisson (ν)</i>	<i>0,45 a 0,50</i>
<i>Dureza</i>	<i>132 HV</i>
<i>Faixa de Temperatura de Recozimento</i>	<i>425 a 700°C</i>
<i>Faixa de Temperatura para Trabalho a Quente</i>	<i>700 a 820°C</i>
<i>Resistividade Elétrica (R) a 20°C</i>	<i>0,064 ohm mm² / m</i>

3 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

A caracterização das chapas metálicas se deu por ensaios de tração uniaxial e ensaio de conformabilidade (Nakajima). As aplicações destes ensaios servem para obter valores próprios das chapas que serão experimentadas, não se baseando apenas nos valores de literatura. Os ensaios citados são amplamente aplicados na caracterização de chapas metálicas [72].

Para a caracterização da chapa de latão C-268, realizada antes dos testes de estampagem incremental, foram utilizados equipamentos e insumos descritos a seguir.

3.1.1 Curva Tensão x Deformação (Convencional)

A chapa de latão C-268, com espessuras de 0.50, 0.70 e 1.00 mm, foram adquiridas junto à Servicorte Indústria e Comércio de Metais de Porto Alegre – RS. Para os ensaios foram retirados três (3) corpos de prova para cada sentido de laminação (0° , 45° e 90°) das três espessuras das chapas, conforme a norma ABNT 6152 (Figura 69)

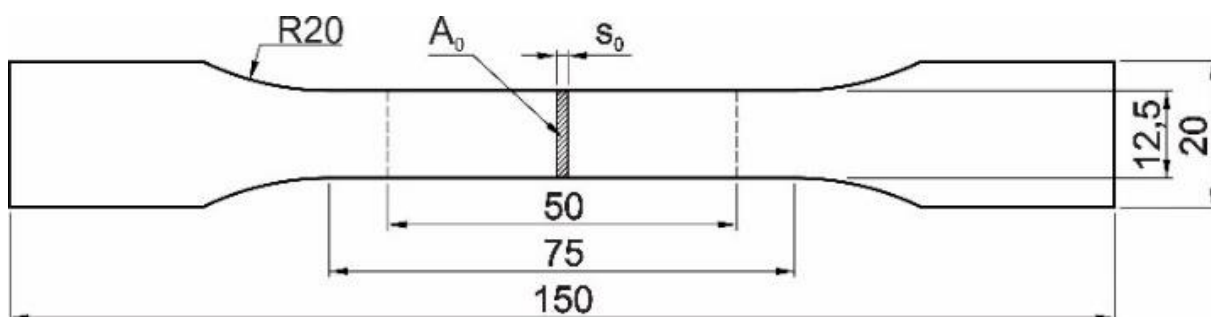


Figura 69: Corpo de prova para ensaio de tração [82].

Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina de ensaio de tração EMIC DL-10000, com capacidade para 100kN. Para a obtenção da curva “Tensão x Deformação”, foram realizados três (3) ensaios de tração por direção de laminação (0° , 45° e 90°), nas espessuras citadas (Figura 70).

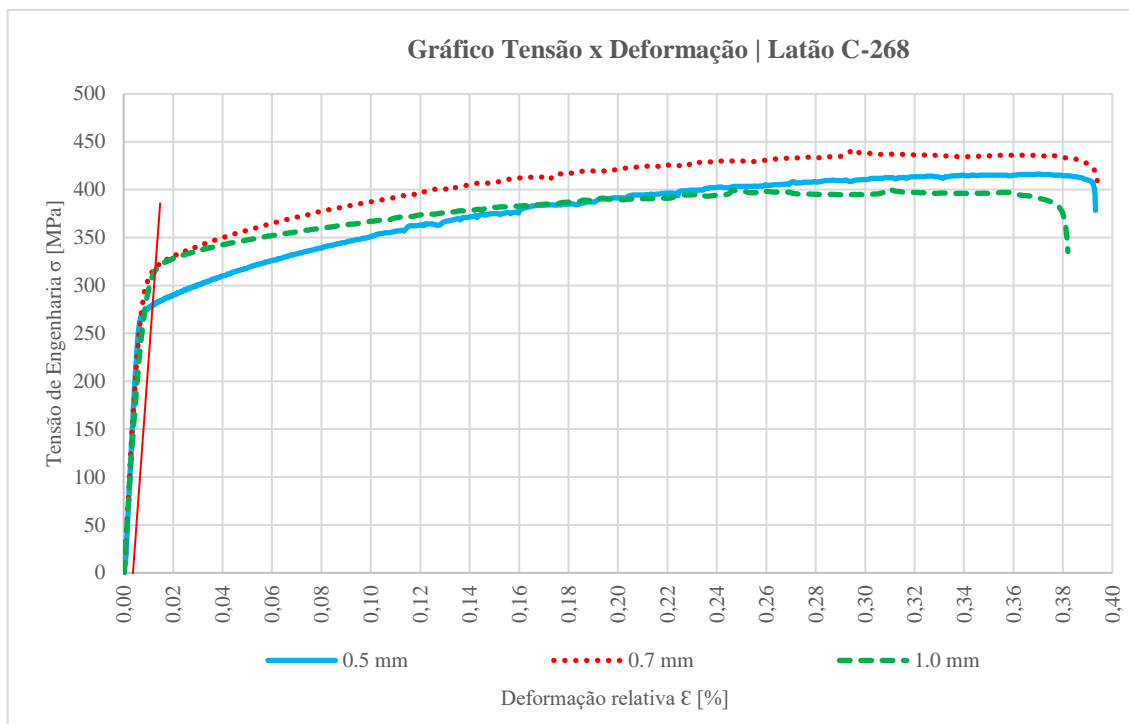


Figura 70: Curvas Tensão x Deformação do latão C-268, no sentido longitudinal de laminação da chapa.

Das curvas Tensão x Deformação plotadas na Figura 70, percebe-se uma semelhança entre as curvas resultantes das chapas com espessuras de 0,50 e 1,00 mm, enquanto a curva resultante da chapa com espessuras de 0,70 apresenta valores de tensão maiores. Tal discrepância no valor da σ_B , do CP's de 0,70 mm para dos demais pode ser atribuída ao seu encruamento originado na laminação.

Como não fica evidente a região característica da mudança de regime elástico para regime plástico – a tensão de escoamento (σ_e) – uma reta paralela a região elástica das curvas é traçada em $\epsilon = 0,002$ (0,2%), de modo que o ponto de intersecção desta reta paralela à cada curva, indica tensão de escoamento ($\sigma_{e0,02}$) dos materiais.

Com as realizações dos ensaios de tração nos CP's de latão C-268 nas espessuras citadas, também se obteve os valores de deformação relativa (ϵ), alongamento (δ), tensão máxima (σ_B) e a curva de escoamento do material (Figura 71).

Os valores de alongamento (δ) e área inicial (s_0) foram obtidos por medição na chapa, antes e depois de rompida. As fórmulas usadas seguem descritas a seguir:

- Deformação Relativa (ϵ)

$$\epsilon = \left(\frac{l_1 - l_0}{l_0} \right) \quad \text{Eq. 17}$$

- Alongamento (δ)

$$\delta = l_{max} - l_0 \quad Eq. 18$$

- Tensão máxima (σ_B)

$$\sigma_B = \frac{F_{máx}}{A_0} \quad Eq. 19$$

A Tabela 10 apresenta os valores dos dados relatados anteriormente.

Tabela 10: Dados dos ensaios de tração uniaxial obtidos do Latão C-268, no sentido longitudinal de laminação da chapa.

Espessura	σ_B [MPa]	$\sigma_{e 0,02}$ [MPa]	$\epsilon_{máx}$	δ [mm]
$s_0 = 0,50$ mm	416,3	272,9	0,39	19,66
$s_0 = 0,70$ mm	442,2	305,8	0,39	19,70
$s_0 = 1,00$ mm	401,1	309,8	0,38	19,10

3.1.2 Curva de Escoamento

No caso das curvas de escoamento, elas também podem ser descritas por uma função matemática. Schaeffer e Rocha [91] citam que na deformação a frio, tal função matemática dar-se-á por:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad Eq. 20$$

Onde:

C é uma constante do material, para $\varphi = 1$

n é o índice de encruamento do material.

Os demais dados necessários para a determinação algébrica da curva de escoamento são:

- A deformação relativa (ϵ) no instante de tensão máxima (σ_B);
- Para o instante da tensão máxima (σ_B), tem-se que a deformação (φ) é igual ao coeficiente de encruamento (n).

$$\varphi = n \quad Eq. 21$$

A deformação verdadeira (φ) correspondente à tensão máxima (σ_B) é calculada com o valor da deformação relativa (ϵ) no instante de tensão máxima (σ_B) retirado do ensaio de tração.

$$\varphi = \ln(1 + \epsilon) \quad Eq. 22$$

A Figura 71 representa a curva de escoamento com a equação k_f do latão C-268, nas espessuras analisadas, considerando apenas o sentido longitudinal de laminação das chapas.

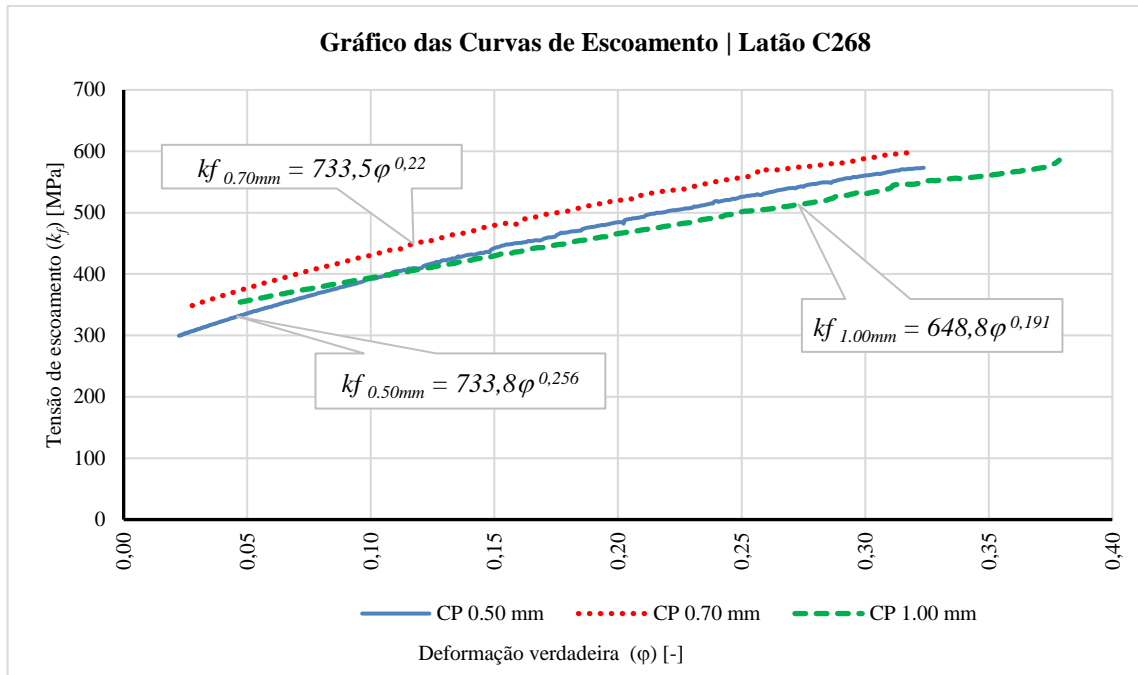


Figura 71: Curvas de Escoamento do latão C-268, no sentido longitudinal de laminação da chapa.

A Tabela 11 apresenta os valores descritos na Figura 71, acrescentando os valores de k_f , conforme cada espessura analisada.

Tabela 11: Propriedades mecânicas obtidas do Latão C-268 com $s_0 = 0,50$ mm.

Ensaio	k_f	k_{f0}
$s_0 = 0,50$ mm	$733,8 \varphi^{0,256}$	299,5
$s_0 = 0,70$ mm	$733,5 \varphi^{0,22}$	347,0
$s_0 = 1,00$ mm	$648,8 \varphi^{0,191}$	346,9

3.1.3 Índice de Anisotropia

Na laminação de chapas a frio, ocorre o fenômeno de alongamento dos grãos no sentido da laminação, tornando o material anisotrópico, e com isso, alterando suas propriedades mecânicas. Com os valores obtidos do ensaio de tração, foi possível obter os índices de anisotropia (r) para os corpos de prova retirados paralelos ao sentido de laminação (0°), oblíquo (45°) e perpendicular (90°), como descrito no capítulo 2.4.3 Índice de Anisotropia.

A Tabela 12 apresenta os valores de anisotropia (r) e anisotropia média (r_m) dos ensaios realizados nas três espessuras de material.

Tabela 12: Índices de Anisotropia dos ensaios

Espessura (s_0) [mm]	Índice de Anisotropia (r) x Sentido de Laminação			Índice de Anisotropia Média (r_m)
	0°	45°	90°	
0.50	1,80	1,58	2,44	1,85
0.70	2,36	2,92	3,34	2,88
1.00	2,39	2,19	2,58	2,34

Já a anisotropia média r_m é assim chamada porque mede a resistência à deformação na espessura da chapa, ou seja, é anisotropia plástica através da espessura. Um coeficiente $r_m = 1$ indica que existe igualdade entre a resistência à deformação na largura e na espessura. Para $r_m > 1$, significa que a chapa oferece maior resistência à deformação plástica na espessura [75], apresentando boas características de conformabilidade, sobretudo para estampagem profunda.

3.1.4 Curva Limite de Conformação

Para a realização dos experimentos da CLC, os corpos de prova (CP) foram desenhados (Figura 72), conforme a norma ASTM E 2218-04 (ensaio de altura limite de domo) e organizados adequadamente para serem cortados em uma máquina de corte laser. Foram produzidos CP's da chapa de latão com 0.50, 0.70 e 1.00 mm de espessura.

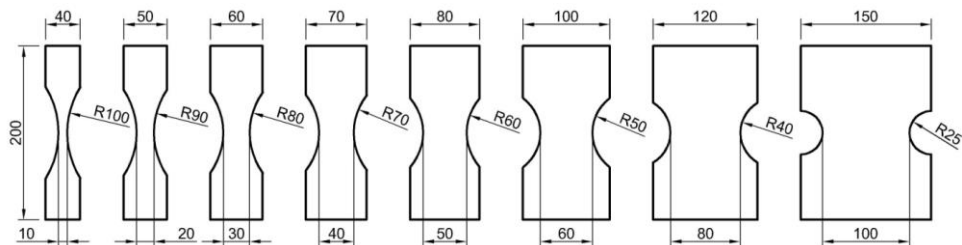


Figura 72: Dimensões dos CP's para o ensaio CLC.

Após o corte, todos os CP's tiveram suas arestas lixadas, tomando-se o cuidado de não deixar “sulcos” nestas regiões (Figura 73).



Figura 73: Corpos de prova lixados após o processo de corte a laser.

Na superfície de cada CP, antes da execução dos ensaios, por meio de um processo eletroquímico e uma tela serigráfica, uma grade com vários círculos de $\varnothing 2,75\text{mm}$ foi gravada, a fim de analisar as deformações resultantes após os ensaios (Figura 74).



Figura 74: Corpos de prova com 1,00 mm de espessura após o ensaio CLC.

Após os ensaios, todos os CP's tiveram suas marcações elípticas próximas as regiões fraturadas analisadas e medidas, como apresentado anteriormente na Figura 57. A partir dos valores medidos de cada elipse, por meio das equações 7 e 8, as deformações verdadeiras (φ_1 e φ_2) são calculadas, e, posteriormente, plotadas em um gráfico. A elaboração do gráfico, e seus respectivos resultados são plotados no gráfico φ_1 vs φ_2 , onde, o Eixo das Ordenadas refere-se aos valores da maior deformação verdadeira (φ_1), e o Eixo das Abscissas aos valores da menor deformação verdadeira (φ_2). Com todos os pontos plotados, uma linha de tendência é gerada, resultando na Curva Limite de Conformação (CLC) do material (Figura 75).



Figura 75: Curva CLC experimental do latão C-268.

No DLC referente a chapa com 0,50 mm de espessura, as deformações encontram-se entre as linhas $\varphi_1 = -2\varphi_2$ (Ensaio de Tração Uniaxial) e a linha $\varphi_1 = \varphi_2$ (Estiramento Biaxial). Ainda, de acordo com o gráfico, no ponto em que a CLC possui deformação plana plena, o φ_1 é de aproximadamente 0,27. Também pode ser observado que as maiores deformações φ_1 ficaram próximas a 0,50, com uma deformação φ_2 de aproximadamente -0,20, enquanto no quadrante do estiramento biaxial, observa-se as deformações φ_1 e φ_2 com valores de aproximadamente 0,35 e 0,12, respectivamente.

Outro aspecto observado refere-se à posição das CLC's no gráfico, uma vez que a CLC da chapa com s_0 : 0.50 mm de espessura, apresenta um posicionamento mais alto do que as CLC's das chapas com as outras duas espessuras, sendo que a chapa com s_0 : 1.00 mm de espessura, apresenta o posicionamento mais baixo de todas as CLC's. Neste caso, os testes e análises sugerem que para estes materiais e estas espessuras, a chapa com s_0 : 0.50 mm apresenta os maiores valores de deformação φ_1 que as outras espessuras analisadas, enquanto a chapa com s_0 : 1.00 mm apresenta os menores valores de deformação φ_1 .

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO SPIF

4.1.1 *Objetivo Geral dos Experimentos SPIF*

O objetivo primordial dos testes é avaliar a utilização de chapas de latão C-268, de diferentes espessuras, perante o processo SPIF, gerando material técnico-científico relevante, demonstrando a possibilidade de maiores deformações que este material pode alcançar, e assim, projetando novas aplicações científicas e industriais.

4.1.2 *Considerações Gerais*

As atividades relacionadas a este trabalho envolveram etapas de planejamento e execução, e são descritas pormenorizadas nos itens subsequentes.

- **Método de análise de medição das deformações nos experimentos e ensaios:** Inicialmente, antes de qualquer experimento ou ensaio mecânico, uma malha circular foi gravada na superfície das chapas metálicas, por um processo eletroquímico. Para a medição das deformações foi utilizado um estereoscópio digital.
- **Determinação dos experimentos e parâmetros para a ISF:** O formato geométrico dos experimentos e os parâmetros do processo SPIF foram baseados na literatura existente. Para definir o limite do Ângulo de Parede (ψ), foram usados o formato de Tronco de Cone e de Pirâmide, com paredes em forma de arco. Para determinar a Linha de Fratura Conformação, os experimentos SPIF realizados tiveram as deformações medidas próximas as regiões fraturadas.
- **Determinação das Curvas de Força (F) e Atrito em SPIF:** A elaboração destas curvas dar-se-ão a partir dos sinais adquiridos das três células de cargas fixadas na SPIF-A. Os sinais coletados (F_x , F_y e F_z) são apenas tratados, e organizados para uma melhor apresentação, enquanto, os dados do Atrito do processo SPIF são calculados partindo de F_x , F_y e F_z .

- **Análise Geométrica:** Como itens importantes a serem analisados, foi verificado os ângulos máximos (Ψ) alcançados pelos experimentos – em função das profundidades – assim como as discrepâncias entre o perfil geométrico projetado e o experimentado, e ainda, a variação da espessura inicial (s_0) no processo SPIF.

4.1.3 Método de Gravação e Medição das Deformações

Para ser possível a análise das deformações nas chapas metálicas, normalmente é realizada a marcação eletroquímica de elementos geométricos (pontos, círculos, quadrados) com dimensões padronizadas.

Neste trabalho foi aplicada a gravação de círculos com $\varnothing 2,75$ na superfície das chapas antes dos experimentos. Foi utilizado um equipamento da marca UMS, modelo ME3000T, eletrólito tipo comercial ME5 e uma solução neutralizante MN2, ambos, próprios para metais não ferrosos, da mesma marca do equipamento.

Para o processo de gravação, a chapa metálica é apoiada sobre uma base metálica conectada ao equipamento. Posicionada a tela com as marcações circulares sobre a chapa metálica, aplica-se o eletrólito ME5. Em seguida, usando um eletrodo com “rolo” conectado ao equipamento, é feita a gravação (Figura 76a). Após a gravação eletroquímica, é aplicada a solução neutralizante MN2 sobre a superfície da chapa.

Após a realização dos experimentos nas chapas gravadas, as regiões que sofreram deformações plásticas, tem suas marcas circulares transformadas em elípticas. Estas “elipses” foram medidas por meio de um estereoscópio digital, com resolução de 400x (Figura 76b). Como auxílio para as medições, um suporte metálico foi desenvolvido para a correta fixação dos experimentos analisados (Figura 76c).

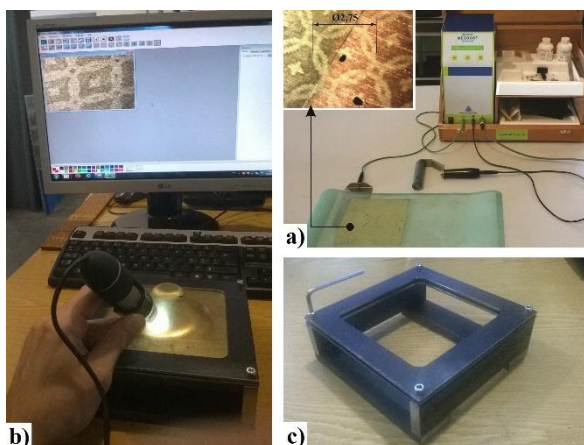


Figura 76: Análise das deformações: a) Processo de gravação eletroquímica; b) Processo de medição das deformações; c) Suporte para fixação dos experimentos.

4.1.4 Descrição dos Experimentos SPIF

Como descrito anteriormente, foi empregado chapas de latão C-268 com três diferentes espessuras ($s_0 = 0.50, 0.70$ e 1.00mm). Cada experimento foi realizado em *blanks* com $150 \times 150\text{mm}$. Para verificar Ângulo de Parede (ψ) máximo que cada chapa suporta, foi definido dois modelos de geometrias: Tronco de Cone e de Pirâmide, ambos com parede radial. Os formatos geométricos foram propostos de acordo com os exemplos encontrados na literatura [53, 54]. A Figura 77 ilustra as geometrias utilizadas.

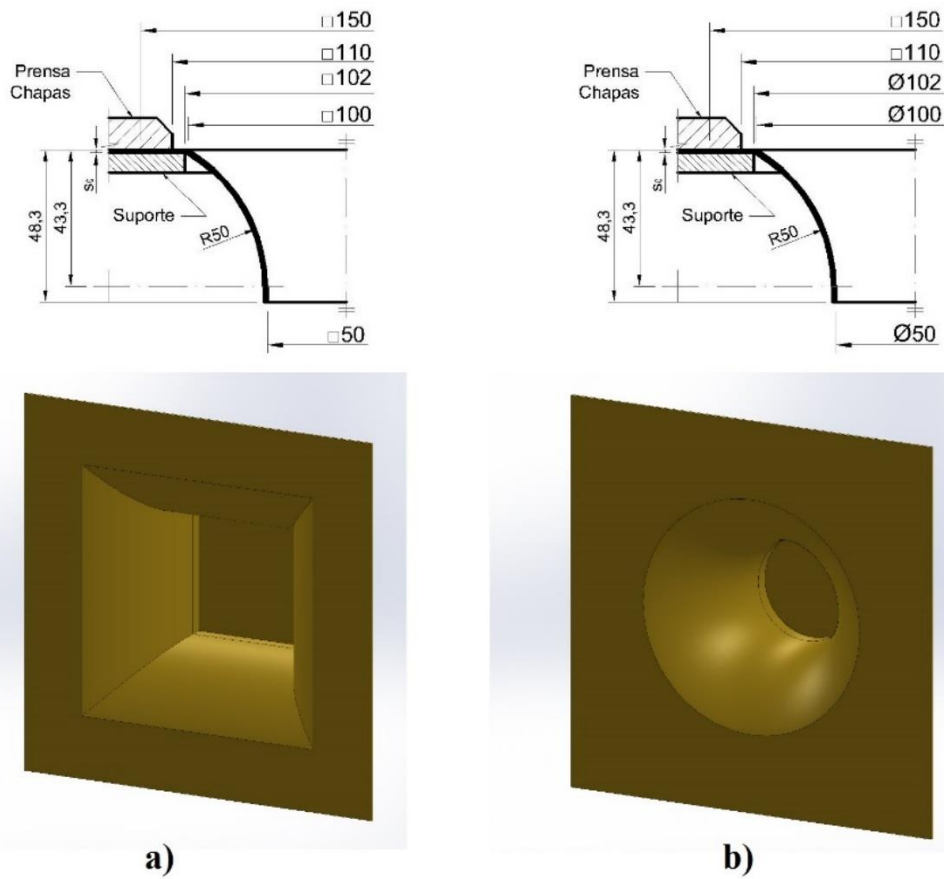


Figura 77: Geometrias dos experimentos: a) Tronco de Pirâmide com parede radial; b) Tronco de Cone com parede radial;

Para a realização do programa de estampagem incremental, fora utilizado o *software* EdgeCAM®, e para o modelamento CAD 3D do formato dos experimentos o programa SolidWorks®. Como descrito anteriormente, há duas formas de elaborar a estratégia de estampagem, nomeadas de “contorno” e “espiral”. Muito embora já esteja comprovado em investigações sobre o processo SPIF que a estratégia espiral seja mais adequada, pois decompõem o Incremento Vertical (Δz) ao longo de todo contorno, e produz um acabamento superficial melhor do que a estratégia de contorno, para os experimentos desta investigação,

optou-se pela estratégia de contorno (Incremento Vertical (Δ_z) localizado) a fim de analisar o comportamento da Força Vertical (F_z) durante o processo SPIF (Figura 78).

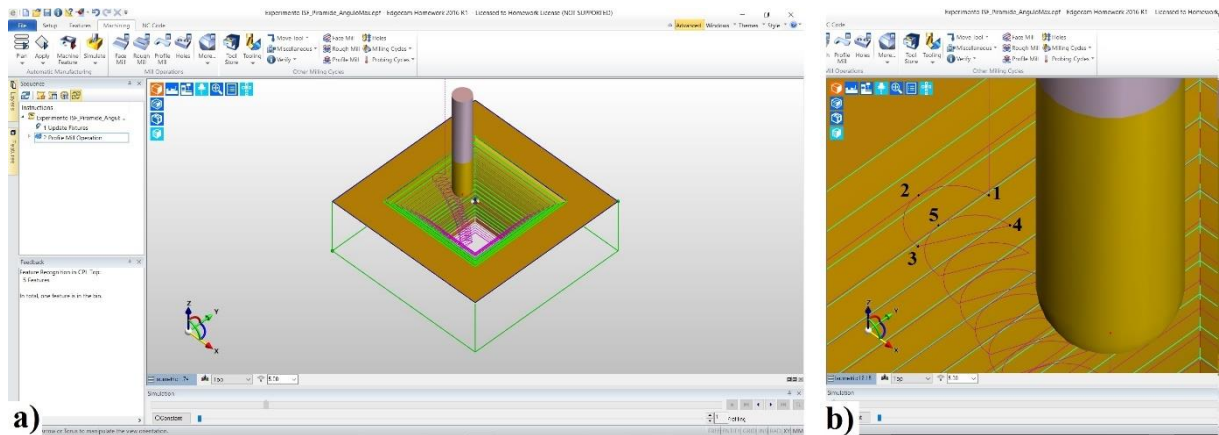


Figura 78: Programa CAM: a) Trajeta da ferramenta de estampagem; b) Detalhe do Incremento Vertical (Δ_z).

A Figura 78a evidencia o ponto de Incremento Vertical (Δ_z), que, como consequência, gera uma marcação na superfície do experimento. Figura 78b ilustra o trajeto que é realizado o Incremento Vertical (Δ_z), explicando:

- 1º: A ferramenta desce verticalmente até o ponto 1;*
- 2º: Desloca-se até o ponto 2, no mesmo plano horizontal (XY) – Inicia o trajeto elaborado no programa CAM;*
- 3º: Após retornar ao ponto 2, desloca-se até o ponto 3 no mesmo plano horizontal (XY);*
- 4º: Desloca-se até o ponto 4, no plano vertical (XZ) – momento do Incremento Vertical (Δ_z);*
- 5º: Desloca-se até o ponto 5, no mesmo plano horizontal (XY), e repete-se as etapas anteriores.*

Adicionalmente à elaboração do programa CAM, as Velocidades de Avanço (F_R) foram definidas em 1.000 mm/min, com Rotação (S) livre, ou seja, a ferramenta de conformação rotaciona de acordo com a necessidade imposta durante o SPIF. Para a lubrificação do processo de estampagem incremental, objetivando um menor atrito, e, consequentemente, menores forças de conformação, foi utilizado óleo mineral Repsol SAE 30. Como a influência da lubrificação nos objetos de pesquisa não foram colocados em prática, a utilização deste lubrificante se deu em função de sua disponibilidade para a realização dos

experimentos. Os parâmetros utilizados nos testes desta pesquisa foram baseados nas investigações de outros trabalhos, descritos no corpo da tese [13, 19, 27, 31, 46, 52].

Os experimentos SPIF foram realizados na **SPIF-A** – Máquina dedicada ao processo de ISF – (Figura 79a), com seis graus de liberdade independentes impulsionados por atuadores hidráulicos, como descrita no capítulo 2.1.10 Máquinas Utilizadas na Estampagem Incremental. Adicionalmente, uma matriz (Figura 79b) para a fixação dos *blanks* foi desenvolvida e utilizada.

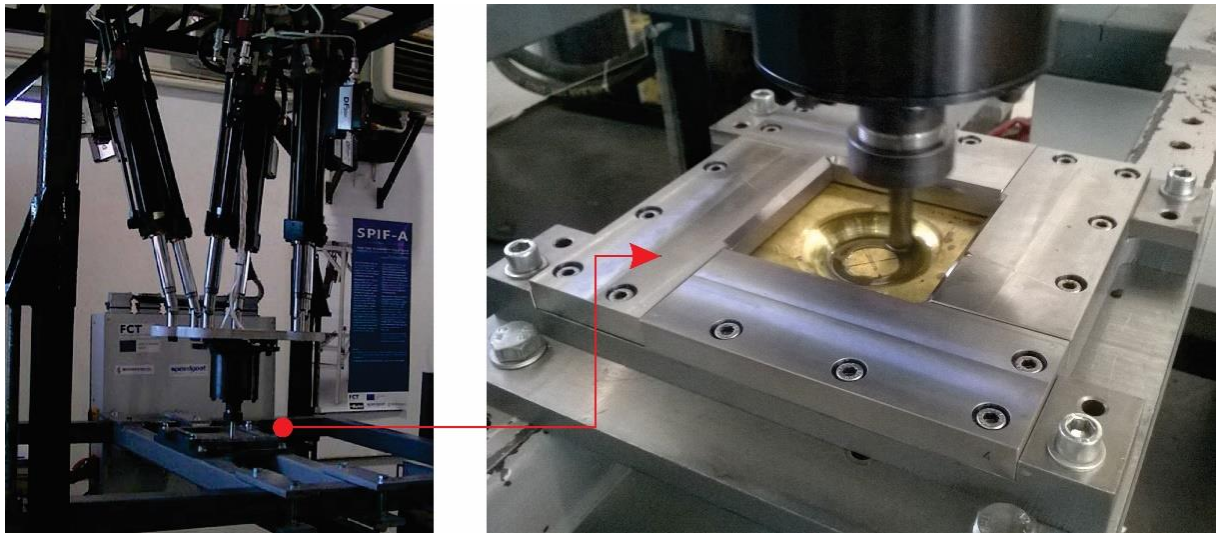


Figura 79: Processo SPIF: a) Máquina Dedicada – SPIF-A; b) Matriz de Estampagem

Como parâmetros variáveis da pesquisa, foi alterado apenas o Diâmetro da Ferramenta (D_T) e o Incremento Vertical (Δz). A Tabela 13 apresenta os parâmetros utilizados nos quinze (15) experimentos realizados.

Tabela 13: Parâmetros dos Experimentos SPIF.

<i>Espessura (s_0) [mm]</i>	<i>Incremento Vertical (Δz) [mm]</i>	<i>Diâmetro da Ferramenta [mm]</i>
0,50	0,10	10,00
	0,50	
	1,00	
0,70	0,10	10,00
	0,50	
	1,00	
1,00	0,10	15,00
	0,50	
	1,00	

As ferramentas de estampagem utilizadas ($\varnothing 10$ e $\varnothing 15$ mm) foram feitas em aço de trabalho a frio (X210CrW12), que de acordo com Jeswiet *et al.* [27] é um material adequado para os trabalhos em ISF. Adicionalmente, ambas as ferramentas sofreram tratamento térmico,

umentando suas durezas para 58HRC. Muito embora a rugosidade superficial das pontas das ferramentas não foi analisada, as mesmas sofreram um processo de lixamento (foram utilizadas lixas 600, 800, 1000 e 1200 *mesh*), apresentando um ótimo aspecto visual, livre de marcações profundas ou oxidações.

4.1.5 Força de Conformação e Atrito no Processo SPIF

Os experimentos realizados na SPIF-A permitiram a aquisição das forças (Axial e Radial) de conformação durante o processo SPIF. A Figura 80 apresenta a evolução das forças radiais (F_X e F_Y) e axial (F_Z) durante a o processo SPIF.

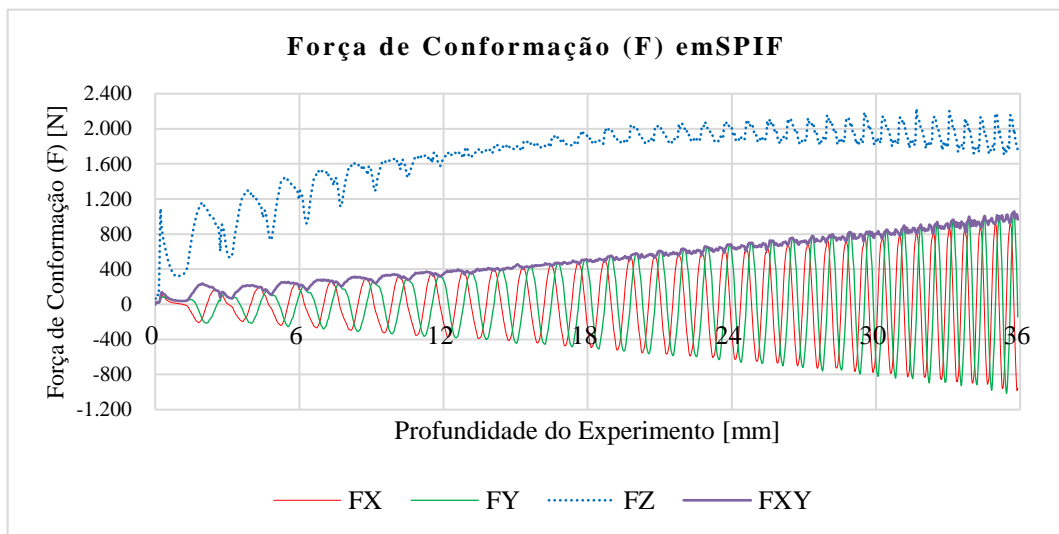


Figura 80: Força Axial e Radial em função da profundidade (D_F) / $s_0=1.00$ mm / $\Delta z=1.00$ mm

Como relatado por Aereus *et al.* [59], durante a realização do processo SPIF foi observado o sinal “estável” – com pouca oscilação, e no plano positivo das forças – para F_Z e dois sinais senoidais para F_X e F_Y . Os autores explicam que o aspecto senoidal das forças radiais, decorre do formato simétrico dos experimentos, onde, em um dado momento as células de cargas estão adquirindo sinais de tração, e no momento seguinte, sinais de compressão, caracterizando tal aspecto. Adicionalmente, na Figura 80 é possível observar a força resultante no plano XY (F_{XY}) durante o processo SPIF, aplicando-se a Eq. 2, juntamente com a equação da reta.

Considerando que todos os experimentos realizados produziram seus respectivos gráficos de força (F) com as mesmas características apresentadas na Figura 80, e, não apresentando nenhuma discrepância que mereça um tratamento específico, para a sequência do trabalho, objetivando uma melhor interpretação das forças (F) nos experimentos realizados, no

que tange as comparações entre os experimentos, os gráficos subsequentes não apresentarão a característica anterior. As F_X e F_Y serão apresentadas apenas pela Força Resultante no plano (F_{XY}), e a F_Z por uma curva média simplificada. A Figura 81 ilustra os mesmos dados do gráfico anterior (Figura 80), quando aplicados nesta metodologia simplificada.

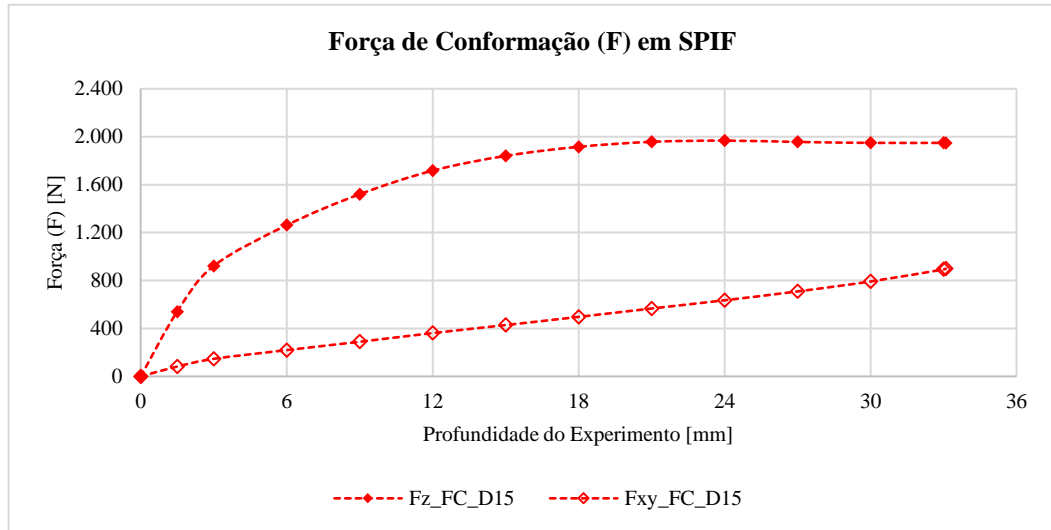


Figura 81: Gráfico Simplificado das Forças Axial e Radial em função da profundidade (D_F) / $s_0=1.00$ mm / $\Delta z=1.00$ mm

Do mesmo modo que a Força Resultante no plano XY (F_{XY}), o Atrito de Deslizamento (μ) também foi calculado a partir das F_X , F_Y e F_Z , por meio da Eq. 3, como apresentado na Figura 82.

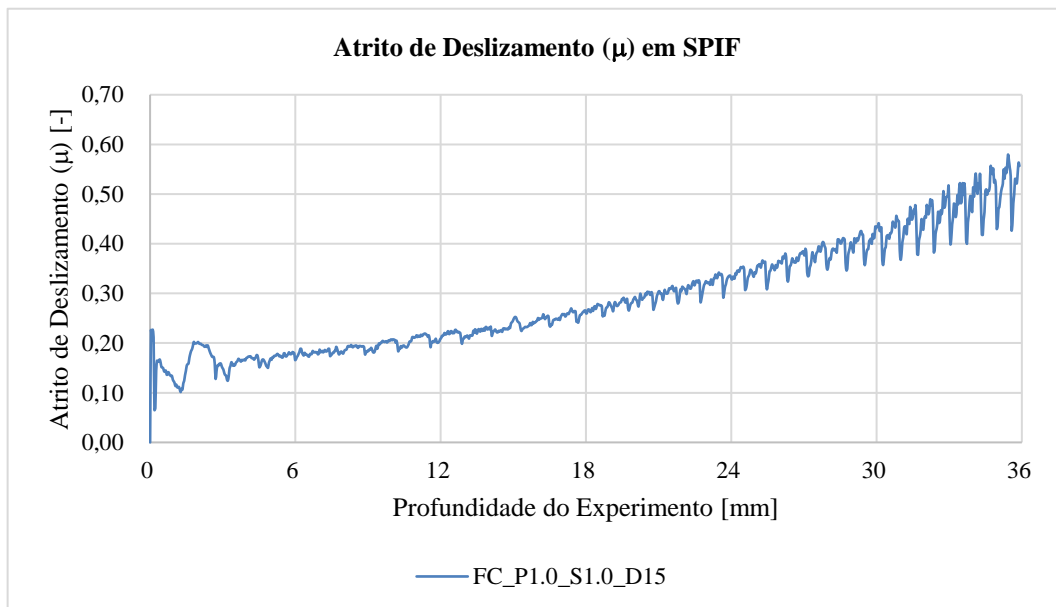


Figura 82: Evolução do Atrito de Deslizamento (μ) em função da profundidade (D_F) / $s_0=1.00$ mm / $\Delta z=1.00$ mm

Considerando que o Atrito de Deslizamento (μ) é calculado a partir das Forças adquiridas (F_x , F_y e F_z) durante o processo, e como já apresentado e discutido na Figura 80, o aspecto “oscilatório” destas forças resulta no gráfico do Atrito Deslizante (μ) com as mesmas características. Como aplicado para os gráficos de forças (F), o gráfico do Atrito Deslizante (μ) também foi simplificado (Figura 83), objetivando um melhor entendimento para as comparações com os demais resultados dos experimentos relacionados.

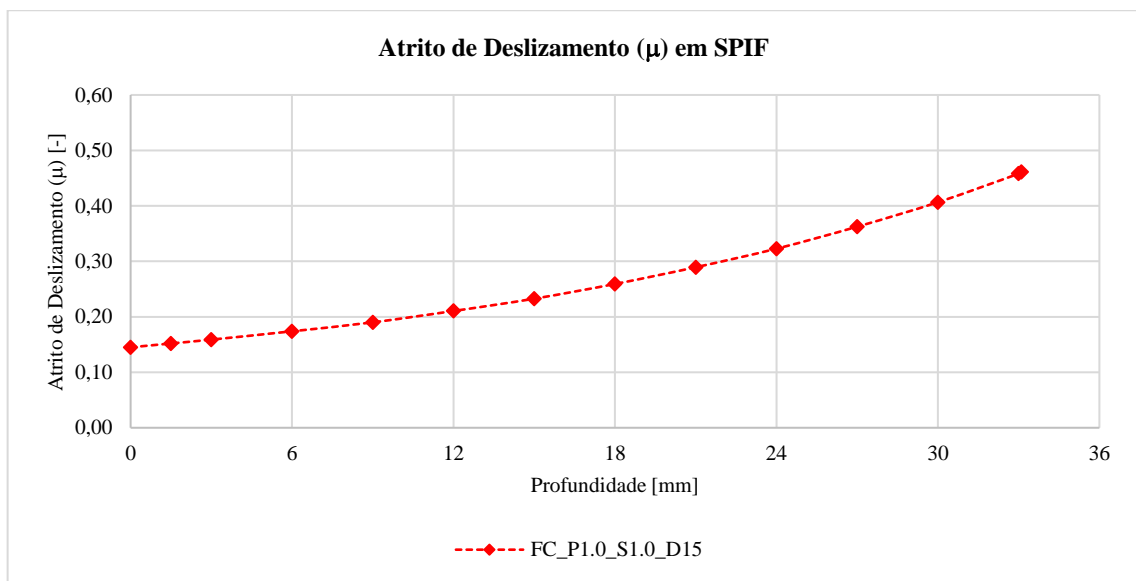


Figura 83: Gráfico da evolução do Atrito de Deslizamento (μ) em função da profundidade (D_F) | $s_0=1.00$ mm / $\Delta z=1.00$ mm

Deste modo, tanto para os gráficos de Força (F) quanto de Atrito de Deslizamento (μ), as análises e discussões tornam-se mais precisas e serão apresentados desta forma no capítulo de Resultados.

4.1.6 Análise da Geometria

No trabalho descrito por Rodrigues *et al.* [80], os autores descrevem a típica região da fratura como sendo a zona compreendida pela interceptação de uma dada reta, que liga o centro da ferramenta de estampagem à superfície de contato da chapa, de forma perpendicular - fato este observado nas fraturas dos experimentos realizados. Para a determinação do ângulo parede (Ψ), se faz necessário o traçado de uma nova reta perpendicular à reta anterior, de modo que, o ângulo formado entre ela e a reta horizontal do plano inicial de estampagem do *blank*, resulta no ângulo parede (Ψ), como apresentado na Figura 84

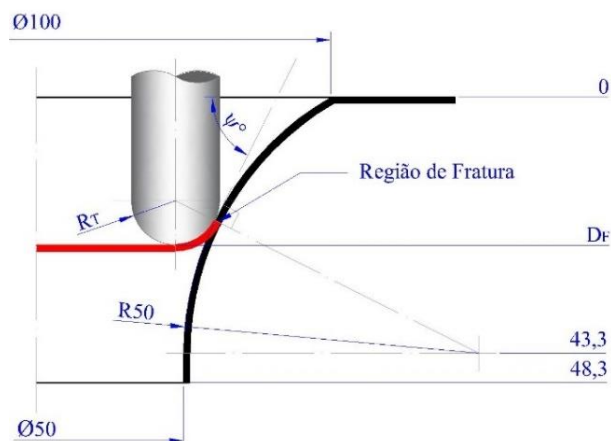


Figura 84: Método geométrico para determinação do ângulo de parede (Ψ).

Para a análise do perfil geométrico, e conseqüentemente, a profundidade de fratura (D_F), foi utilizado uma Mesa CNC de Medição Tridimensional, modelo Cyclone Série 2, da marca Renishaw, com precisão de 0,005mm. Para estas análises, cada experimento foi fixado no suporte desenvolvido para a análise das deformações (Figura 76c / pág. 90). A utilização deste suporte faz com que o experimento a ser analisado, retorne à condição de quando exposto ao processo SPIF, descaracterizando o retorno elástico na chapa, que neste caso, influencia diretamente no formato geométrico. A Figura 85 ilustra o processo de medição tridimensional de um experimento SPIF.

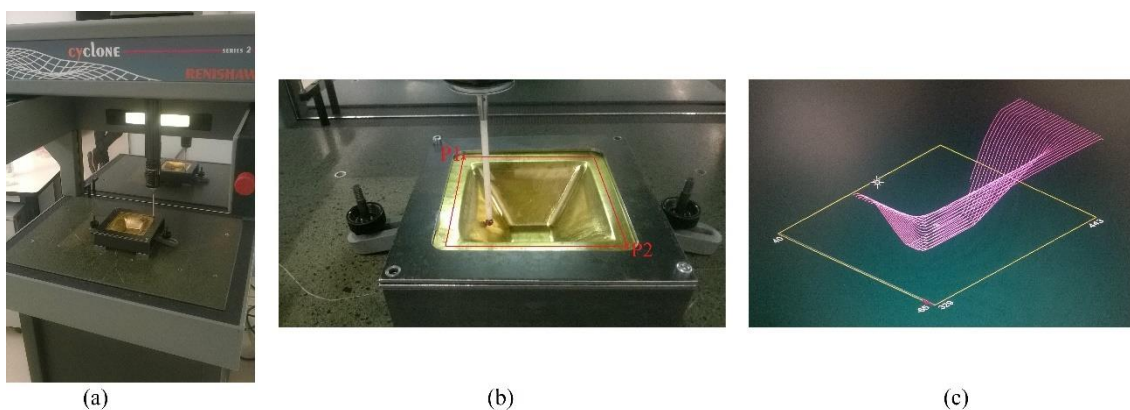


Figura 85: Análise geométrica: a) Mesa CNC de Medição Tridimensional; b) Detalhe do apalpador de contato e área de medição; c) Arquivo tridimensional gerado pela medição

Para a utilização da Mesa CNC de Medição Tridimensional, inicialmente, se faz necessário determinar a área de medição, descrita na Figura 85b, pelos pontos P1 e P2. Em seguida, é configurado o espaçamento de varredura que o apalpador deverá seguir, ilustrado pela Figura 85c. Ao final do processo de medição, se tem como resultado um arquivo com as informações captadas pelo equipamento. Para este caso, optou-se por arquivos de extensão DXF (*Drawing Exchange Format*), que se trata de um arquivo de intercâmbio para modelos de CAD.

Para a análise comparativa das geometrias experimentadas com a geometria projetada, foi utilizado software AutoCAD ®, onde um segmento completo do respectivo arquivo DXF (retirado da região mediana da geometria) foi comparado com o perfil CAD idealizado (Figura 86).

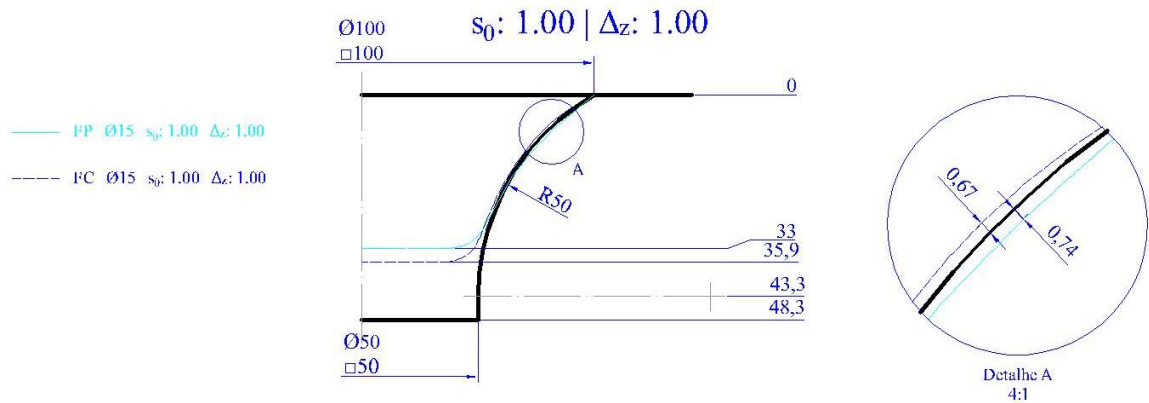


Figura 86: Análise geométrica de um experimento SPIF / $s_0=1.00 \text{ mm}$ / $\Delta z=1.00 \text{ mm}$

Adicionalmente, ao que concerne à análise geométrica, foi realizada a medição da espessura final da chapa dos experimentos. Para esta atividade foi utilizado um Micrômetro Externo, da marca Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm, com as ponteiros de medição no formato cônica, afim de se obter medições precisas (Figura 87).



Figura 87: Medição das espessuras (s_1) na região estampada

4.1.7 Linha de Fratura na Conformação

A Linha de Fratura na Conformação – LFC – é elaborada a partir da realização de experimentos em estampagem incremental, repetindo-se o procedimento para a elaboração da CLC, ou seja, após os experimentos SPIF, as marcações elípticas próximas as regiões fraturadas foram analisadas e medidas, e os valores das deformações verdadeiras (φ_1 e φ_2) calculados por meio das equações 7 e 8, e após, plotados no gráfico φ_1 vs φ_2 (Figura 88).

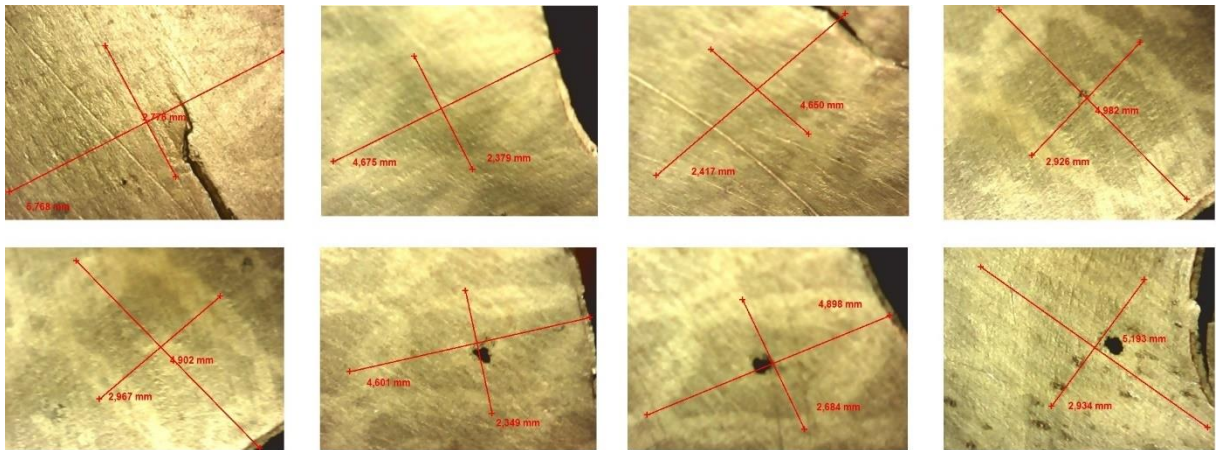


Figura 88: Elipses próximas a fratura analisadas para a elaboração da LFC.

A Figura 89 ilustra as deformações verdadeiras (ϕ_1 e ϕ_2) analisadas de experimentos SPIF com espessura inicial (s_0) de 0.50 mm e Incremento Vertical (Δ_z) de 0.10 mm e plotadas no gráfico.

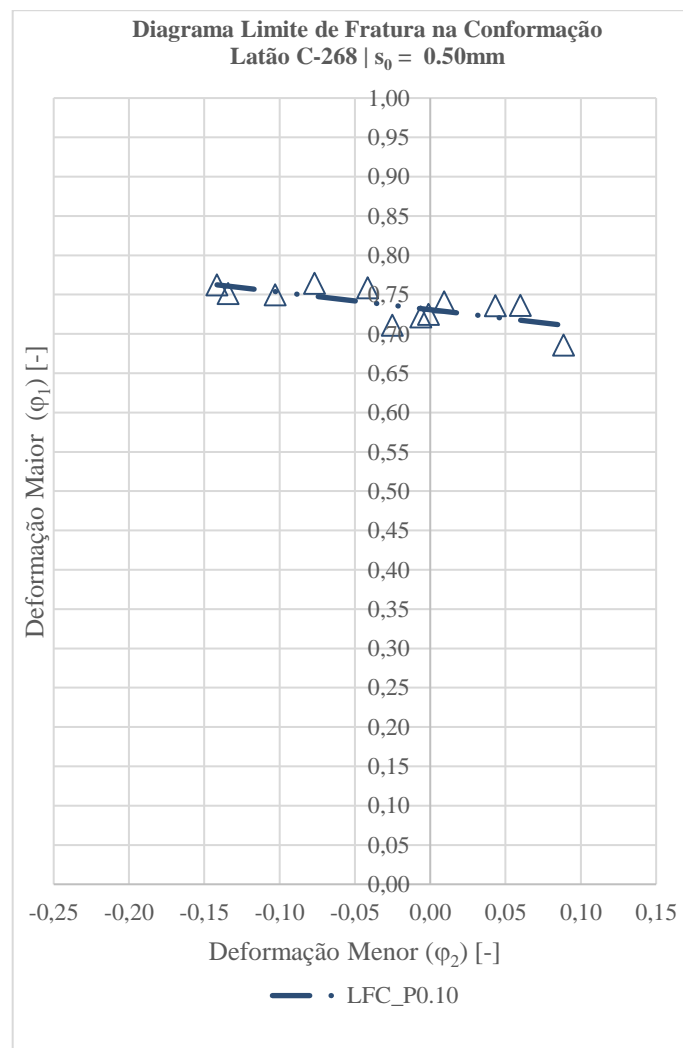


Figura 89: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $s_0 = 0,50\text{ mm}$

Com a medição das elipses nos experimentos SPIF, se observou que os valores calculados das deformações, tanto para os experimentos com ferramenta de Ø10 mm, quanto para a ferramenta de Ø15 mm, são iguais, e, do mesmo modo, das geometrias do Tronco de Cone e de Pirâmide.

Diferentemente, o Incremento Vertical (Δ_z) produz valores de deformações diferentes, quando comparados, deste modo, os dados da Linha de Fratura na Conformação serão exibidos em três (3) gráficos, separados pelas espessuras iniciais (s_0) das chapas, e, apresentando a LLF proveniente de cada Incremento Vertical (Δ_z).

Diferentemente dos resultados obtidos na CLC do material, observa-se um comportamento diferente das deformações verdadeiras, onde, o resultado final apresenta uma linearização na posição dos valores φ_1 vs φ_2 plotados no gráfico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EXPERIMENTOS

A análise dos resultados descrita a seguir, retrata os dados obtidos dos experimentos SPIF realizados em Latão C-268, seguindo a metodologia descrita anteriormente.

5.1.1 Força de Conformação no Processo SPIF

Embora, durante os testes seja possível acompanhar a alteração dos valores das forças Verticais e Horizontais (F_x , F_y e F_z), as análises somente podem ser feitas após a conclusão dos experimentos. Deste modo, as análises das Forças (F) de estampagem exercidas nos experimentos SPIF realizados foram agrupadas considerando os mesmos critérios em comum, neste caso, a espessura inicial (s_0) da chapa e o Incremento Vertical (Δz), conseqüentemente, os resultados comparativos dar-se-ão em função das duas ferramentas ($\varnothing 10$ e $\varnothing 15$ mm) utilizadas nos experimentos, e as duas formas geométricas projetadas, o Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide (Figura 90).

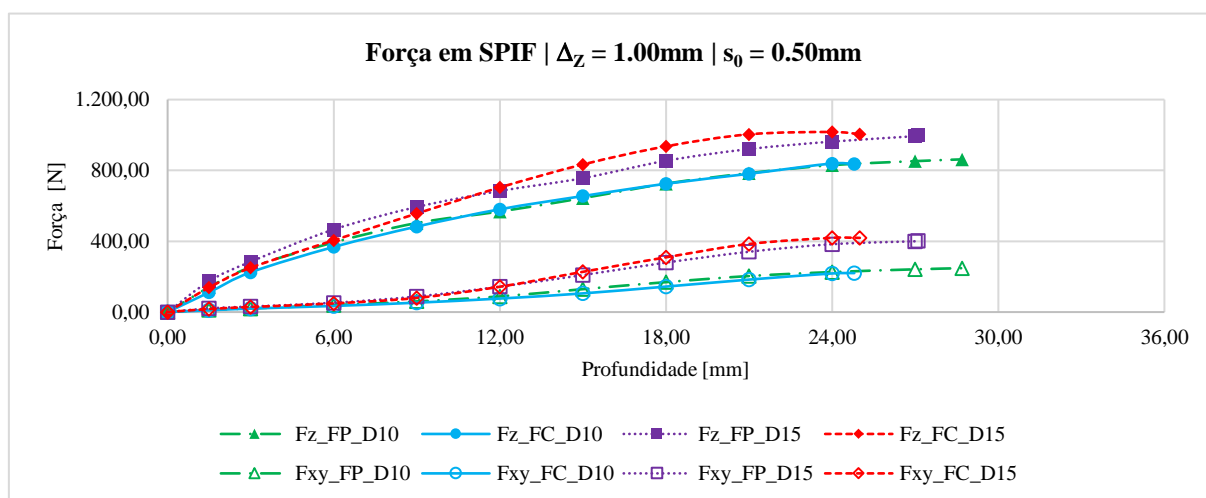


Figura 90: Força de Estampagem no Processo SPIF ($s_0: 0.50$ / $\Delta z: 1.00$ mm)

Baseado na Figura 90, observa-se que as curvas das Forças (F_z e F_{xy}) se assemelham, comparando-as pelo diâmetro das ferramentas, logo, pressupõem que para estes dois tipos de geometria analisados a evolução das Forças (F_z e F_{xy}) não se alteram durante o processo SPIF. Evidentemente, as curvas do gráfico apontam para o aumento das Forças (F_z e F_{xy}) à medida que há o aumento da profundidade do experimento, contudo, a geometria do perfil radial projetado para as paredes de ambos experimentos, faz com que o Ângulo de Parede (Ψ) aumente com o aumento da profundidade do experimento. Deste modo, é possível presumir que a

evolução contínua do gráfico das Forças (F_z e F_{XY}) pode ser em função do aumento contínuo do Ângulo de Parede (Ψ), decorrente da geometria experimentada, e não apenas em função da profundidade do experimento.

Adicionalmente, também é possível perceber valores de Força menores nos experimentos que utilizaram a ferramenta com $\varnothing 10$ mm. Isso é explicado em razão da ferramenta de $\varnothing 10$ mm produzir uma área de deformação menor do que a área produzida pela ferramenta com $\varnothing 15$ mm. Segundo Martins *et al.* [24], quanto maior o diâmetro da ferramenta de estampagem, mais se assemelha o processo ISF ao processo convencional de conformação, com valores de forças (F) muito maiores aos apresentados na figura anterior. No Apêndice A constam as demais figuras comparativas das Forças (F_z e F_{XY}) dos experimentos SPIF.

No trabalho de Azevedo *et al.* [52] são analisadas as Forças (F_z e F_{XY}) de dois materiais diferentes, o Alumínio AA1050 e Aço DP780, ambos com 1 mm de espessura, e, embora haja uma grande diferença nas forças coletadas (350N e 1500N, respectivamente), existe semelhança nas curvas. Neste sentido, as curvas de força obtidas a partir das chapas de latão também se apresentaram semelhantes.

A fim de ilustrar a magnitude das Forças Verticais (F_z) no processo SPIF, a Figura 91 apresenta os máximos valores de forças analisados em cada experimento, separadas de acordo com suas espessuras.

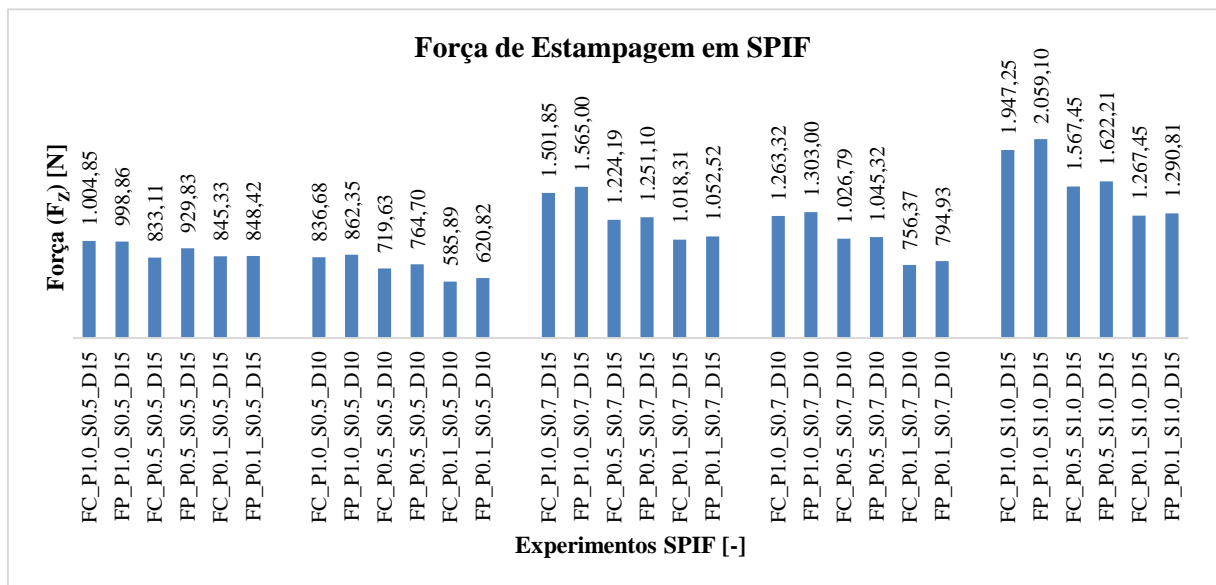


Figura 91: Relação das Máximas Forças (F) de estampagem alcançadas nos experimentos SPIF

Do mesmo modo que descrito anteriormente, as duas formas geométricas analisadas apresentaram semelhança nos máximos valores de Força Vertical (F_z). Ainda, observa-se que as forças diminuem a medida que o Incremento Vertical (Δz) também diminui.

5.1.2 Atrito no Processo SPIF

Seguindo a mesma forma de organização dos resultados das Forças (F_Z e F_{XY}), os efeitos do Atrito (μ) no processo SPIF são apresentados na Figura 92.

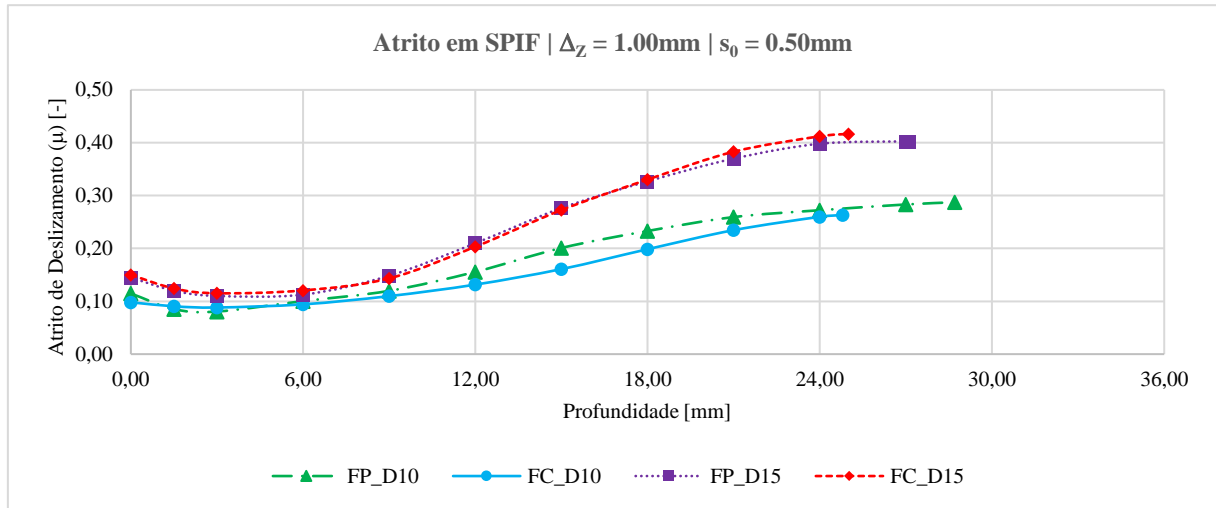


Figura 92: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF.

Como os valores do Atrito (μ) são calculados pela equação 3 (pág. 59) em função das Forças (F_Z e F_{XY}) é notório que as curvas apresentem o mesmo aspecto que as próprias curvas de Forças analisadas. Naturalmente, os valores do Atrito (μ) da ferramenta $\varnothing 15$ mm são maiores que os valores do Atrito (μ) da ferramenta $\varnothing 10$ mm, uma vez que esta ferramenta apresenta uma maior área de contato.

Como já relatado no capítulo anterior, é possível que a evolução das Forças (F_Z e F_{XY}) se dá não apenas em função da profundidade do experimento, mas também em função do aumento do Ângulo de Parede (Ψ), o que neste caso, implica diretamente no comportamento das curvas do gráfico da Figura 92.

Ainda sobre os resultados do Atrito (μ) nos testes realizados, se observa que o seu valor diminui do início do experimento até uma profundidade de $\pm 6,00$ mm, retornando a aumentar constantemente até o final do experimento. Como o valor do Atrito (μ) é decorrente das Forças (F_Z e F_{XY}) coletadas durante os experimentos SPIF, observando os gráficos de Força correspondentes (Figura 90, Figura 102 e Figura 103) é possível observar que os valores da Forças Resultantes no plano XY (F_{XY}) apresentam esta característica, e, logo, influenciam no resultado do Atrito (μ).

Também se constata uma relação do Atrito (μ) com a espessura inicial da chapa (s_0), onde, nos resultados apresentados dos experimentos com $s_0: 0.50$ mm, se observa que a “curva

do atrito” plotada no gráfico, tende a linearizar à medida que o Incremento Vertical (Δ_Z) diminui (1.00mm \rightarrow 0.10 mm) (Figura 93).

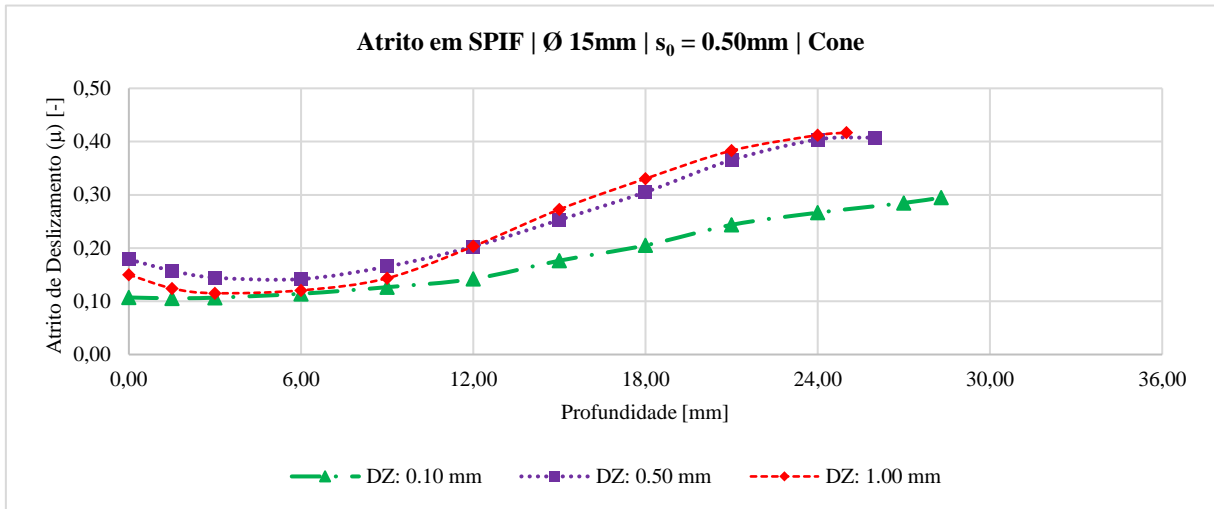


Figura 93: Atrito de Deslizamento (μ) de experimentos SPIF (s_0 : 0.50 | \varnothing 15 mm)

Nos resultados dos experimentos com as chapas de 0.70 e 1.00 mm de espessura, as “curvas do atrito” são mais discretas, quando comparadas às da chapa de 0.50 mm de espessura, e neste caso, os experimentos realizados com a chapa de 1.00 mm de espessura apresentam suas “curvas do atrito” semelhantes, tendendo à linearização. Deste modo, analisando separadamente os resultados de atrito das chapas de 0.50 e 1.00 mm de espessura, estima-se que à medida em que a espessura da chapa aumenta, a “curva do atrito” no processo SPIF tende a ser linear (Figura 94).

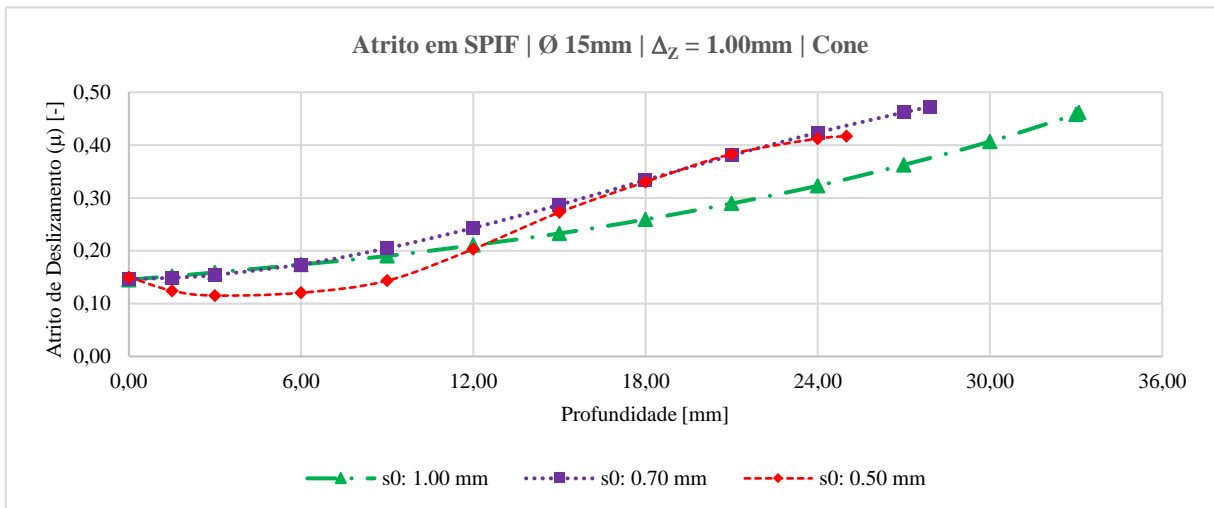


Figura 94: Atrito de Deslizamento (μ) de experimentos SPIF (Δ_Z : 1.00 | \varnothing 15 mm)

No Apêndice B constam as demais figuras comparativas do Atrito de Deslizamento (μ) dos experimentos SPIF.

5.1.3 Análise da Geometria dos Experimentos

As análises geométricas dos experimentos SPIF realizados foram agrupadas considerando os mesmos critérios explicado no capítulo sobre os resultados da Força de Conformação no Processo SPIF.

Todas as medições das geometrias SPIF se deram no sentido longitudinal da laminação (0°), pois, visualmente, apresentavam as maiores irregularidades geométricas. A Figura 95 ilustra comparativamente os perfis medidos com a seção do perfil projetado.

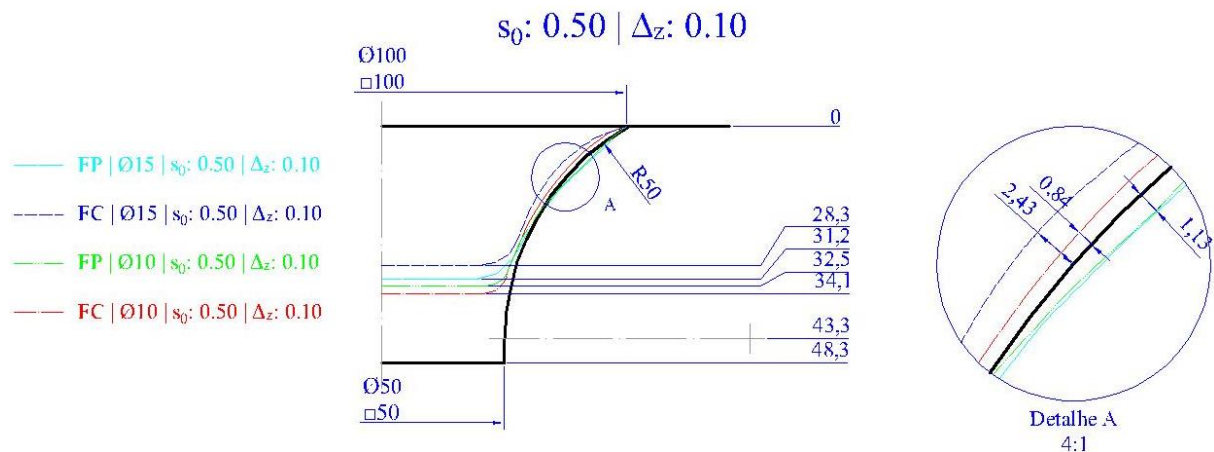


Figura 95: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,50 \text{ mm} \mid \Delta_z: 0,10 \text{ mm}$

Baseado na Figura 95, observa-se que nenhum dos perfis SPIF medidos equivalem ao perfil projetado, ou seja, todos apresentam discrepâncias dimensionais e geométricas. O detalhe ampliado desta figura (Detalhe A) ilustra a diferença entre os perfis. No Apêndice C constam as demais figuras comparativas dos perfis medidos com a seção do perfil projetado.

Os valores dimensionais apresentados, entre as diferenças dos perfis SPIF para o perfil projetado, corroboram com Allwood *et al.* [1], onde relatam que as tolerâncias dimensionais para componentes de chapa, aceitas pelas indústrias são normalmente de $\pm 0,2$ milímetros, todavia, os processos convencionais de ISF produzem peças com uma precisão dimensional de apenas $\pm 3\text{mm}$.

Outro fato observado, refere-se as profundidades alcançadas em cada experimento SPIF. Segundo Martins *et al.* [24], a utilização de ferramentas de estampagem com diâmetro menor (D_T) proporciona uma melhor conformabilidade, pois as concentrações das tensões estão em uma pequena região de deformação na chapa. Na Figura 95 é possível observar que os experimentos com ferramenta de $\text{Ø}10 \text{ mm}$ obtiveram as maiores profundidades, como observado por Centeno *et al.* [46] em seu trabalho.

Nas abas laterais, onde não houve a aplicação da ISF, mas apenas a ação do prensa-chapas, também constatou irregularidades na chapa após o término do processo de ISF. Allwood *et al.* [1] e Ambrogio *et al.* [92] descrevem este comportamento da chapa como sendo resultante do acúmulo de tensões residuais, aparecendo após a liberação do prensa-chapas.

Todos os experimentos realizados sofreram fratura na mesma região, ou seja, na zona de contato em que a ferramenta estava estampando a chapa. A Figura 96 apresenta os dois modelos de experimentos SPIF realizados.

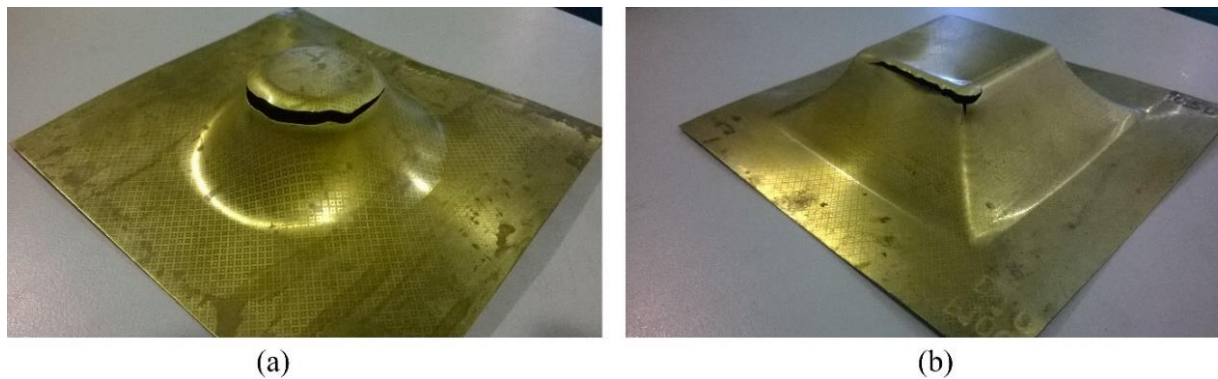


Figura 96: Experimentos SPIF: a) Tronco de Cone b) Tronco de Pirâmide [$s_0: 0.50$ / $\Delta z: 1.00$ / $\varnothing 10$ mm]

Observa-se que a fratura está localizada na área estampada, e ainda, que sua propagação se dá no mesmo plano, de forma meridional, no que seria a região de transição entre a área estampada e a que está em contato com a ferramenta, como já ilustrado na Figura 84 e também descrito por Rodrigues *et al.* [80].

Os resultados de todos os experimentos SPIF realizados, no que concerne as Profundidades de Fratura (D_F) e os respectivos Ângulos de Parede (Ψ) podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14: Valores dos Ângulos de Parede (Ψ) e profundidades máximas dos experimentos SPIF.

s_0 [mm]	Δz [mm]	$\varnothing 15$				$\varnothing 10$			
		Cone		Pirâmide		Cone		Pirâmide	
		D_F [mm]	Ψ [°]	D_F [mm]	Ψ [°]	D_F [mm]	Ψ [°]	D_F [mm]	Ψ [°]
0.50	0.10	28,30	66,90	31,20	70,10	34,10	75,10	32,50	73,20
	0.50	26,00	64,40	29,50	68,30	26,30	66,40	30,10	70,70
	1.00	25,00	63,30	27,10	65,70	24,80	64,70	28,70	69,10
0.70	0.10	29,20	67,90	29,20	67,90	30,70	71,40	34,20	75,10
	0.50	28,20	66,90	30,10	68,90	31,40	72,10	31,50	72,30
	1.00	27,90	66,50	26,80	65,30	29,70	70,30	29,80	70,30
1.00	0.10	32,80	71,80	31,40	70,30	-	-	-	-
	0.50	32,10	71,00	32,60	71,50	-	-	-	-
	1.00	33,10	72,10	33,00	72,00	-	-	-	-

Analisando os dados da Tabela 14, se observa que a maioria dos experimentos segue a ordem de maior profundidade, quando se é utilizado um Incremento Vertical (Δ_Z) menor, conforme descrito por outros autores [24, 46]. A Figura 97 ilustra os dados das profundidades (D_F) vs Incremento Vertical (Δ_Z).

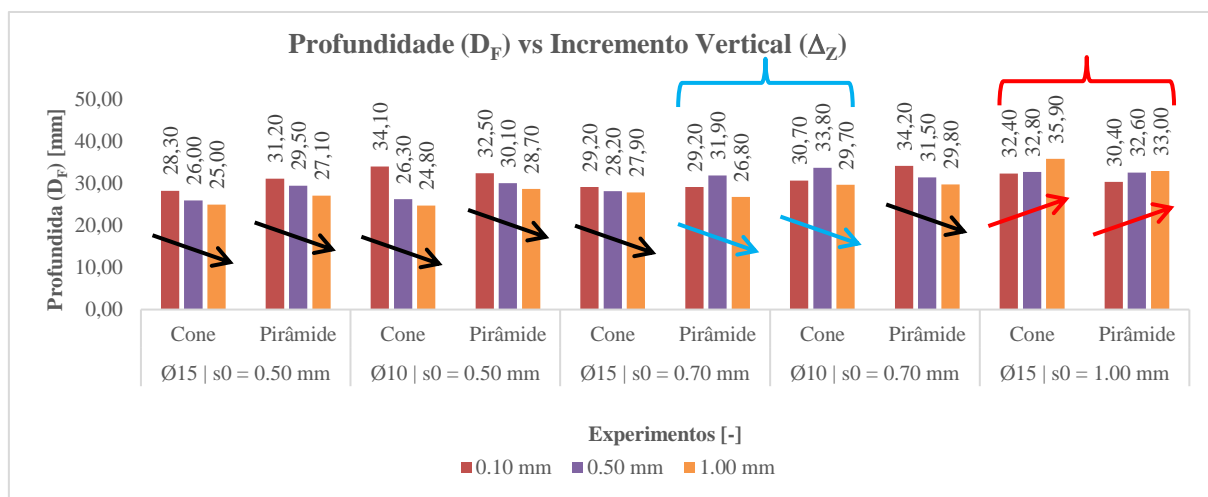


Figura 97: Valores das profundidades máximas atingidas em todos os experimentos.

Contudo, quatro experimentos não seguem esta tendência. No conjunto de experimentos 06 (s0: 0.70 mm | Ø15 mm | Pirâmide) observa-se uma maior profundidade no experimento com 0.50 mm de Incremento Vertical (Δ_Z), fato este também observado no conjunto de experimentos 07 (s0: 0.70 mm | Ø10 mm | Cone).

Comparativamente, o conjunto de experimentos 06 (Pirâmide) e o conjunto de experimentos 05 (Cone) possuem os mesmos parâmetros, onde, os valores de profundidade obtidos nos experimentos com Incremento Vertical (Δ_Z) de 0.10 e 0.50 mm divergem em uma diferença total menor do que 2 mm, e/ou 2° do Ângulo de Parede (Ψ), o que para experimentos SPIF fazem parte da precisão dimensional e geométrica dos experimentos.

A estas discrepâncias apresentadas nos experimentos, como análises micro estruturais não foram realizadas, estima-se a possibilidade de alguma diferença no experimento realizado, como a fixação incorreta do prensa-chapas, um desalinhamento da chapa, e deste modo, não estando perpendicular à ferramenta de estampagem, e neste caso, acarretando num movimento diferente dos realizados nos demais experimentos.

No conjunto de experimentos 09 (s0: 1.00 mm | Ø15 mm | Cone) e no conjunto de experimentos 10 (s0: 1.00 mm | Ø15 mm | Pirâmide), observa-se que a maior profundidade obtida foi a partir do teste realizado com Incremento Vertical (Δ_Z) de 1.00 mm. Mesmo assim, os demais valores de profundidade são próximos.

Avaliando o resultado destes dois conjuntos de experimentos, além das justificativas anteriores, adiciona-se a tese de que para estas condições geométricas e de parâmetros, a chapa de latão C-268 suporta estes valores limites.

A análise da espessura final (s_1) de cada experimento realizou-se para verificar a validade da Lei do Seno (Eq. 1) em SPIF. A Figura 98 apresenta os menores valores de espessura final (s_1) medidos (próximos a região fraturada, na área estampada) comparados com os valores calculados pela Equação 1 (Lei do Seno) em função dos ângulos de parede (Ψ), listados na Tabela 14.

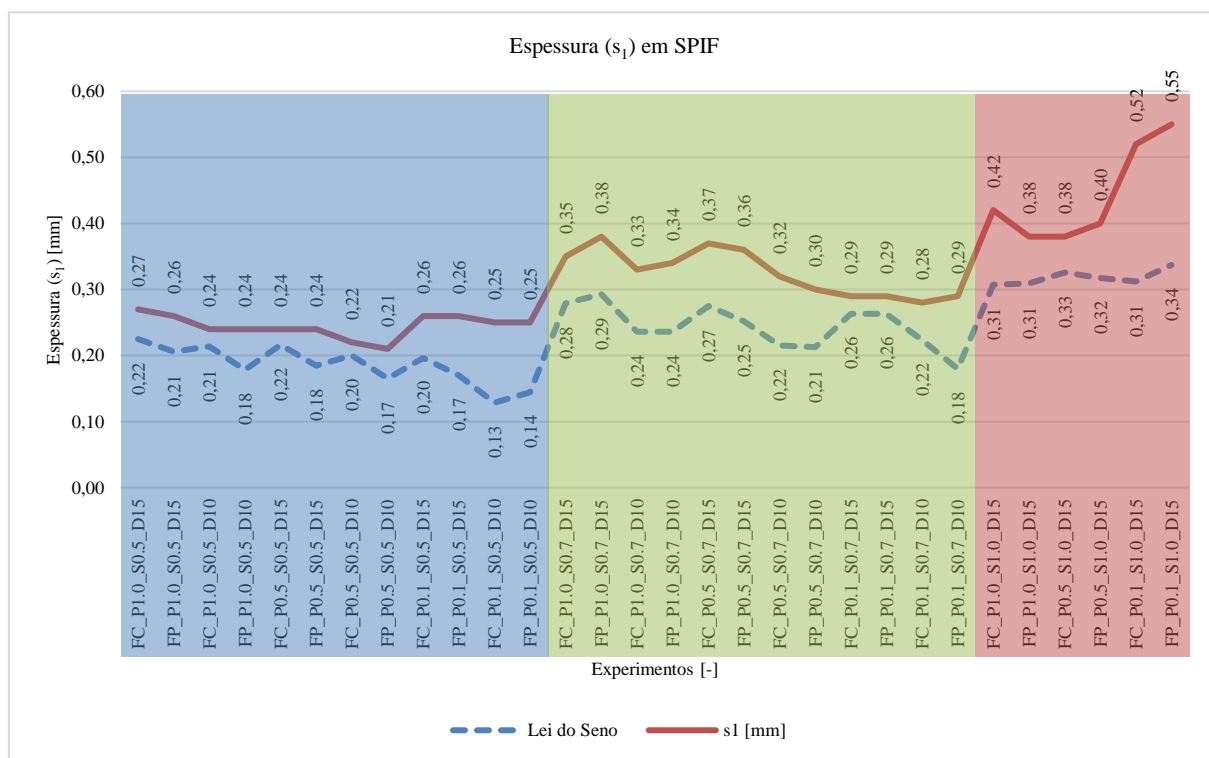


Figura 98: Menores valores de espessura final (s_1) medido nos experimentos.

Observando os dados da Figura 98, percebe-se que quanto menor a espessura inicial (s_0) da chapa, menor a variação dos valores medidos e calculados.

Analisando os dados da Figura 98, agrupados de acordo com a espessura inicial (s_0) das chapas, é possível observar uma distinta variação dos valores (Tabela 15).

Tabela 15: Valores dos Ângulos de Parede (Ψ) e profundidades máximas dos experimentos SPIF.

s_0 [mm]	Lei do Seno [mm]			s_1 [mm]		
	Valor Médio	Desvio Padrão	Redução da espessura	Valor Médio	Desvio Padrão	Redução da espessura
0,50	0,19	0,03	62,86%	0,25	0,02	51,00%
0,70	0,24	0,03	65,14%	0,33	0,04	53,57%
1,00	0,32	0,05	68,19%	0,44	0,07	55,83%

Pelos dados agrupados na Tabela 15, percebe-se que os valores calculados pela Lei do Seno, apontam para uma redução de 62% a 68% da espessura da chapa, enquanto que nos valores medidos da espessura da chapa, esta redução fica entre 51% e 55%, sendo que a redução da espessura da chapa tende a aumentar em chapas com espessuras maiores.

5.1.4 Linha de Fratura Conformação

A Linha de Fratura na Conformação é elaborada a partir da realização de experimentos em estampagem incremental, analisando as deformações (φ_1 e φ_2) das elipses inteiras próximas as regiões fraturadas. Com a medição das elipses nos experimentos SPIF, se observou que os valores calculados das deformações (φ_1 e φ_2) são iguais, independentemente do diâmetro da ferramenta ($D_T = \varnothing 10$ e $\varnothing 15$ mm) e dos formatos geométricos (Tronco de Cone e de Pirâmide). Deste modo, a Figura 99 ilustra as deformações analisadas de experimentos SPIF com s_0 : 0.50 mm de espessura, com as respectivas LFC de cada Incremento Vertical (Δz) utilizado nos experimentos.

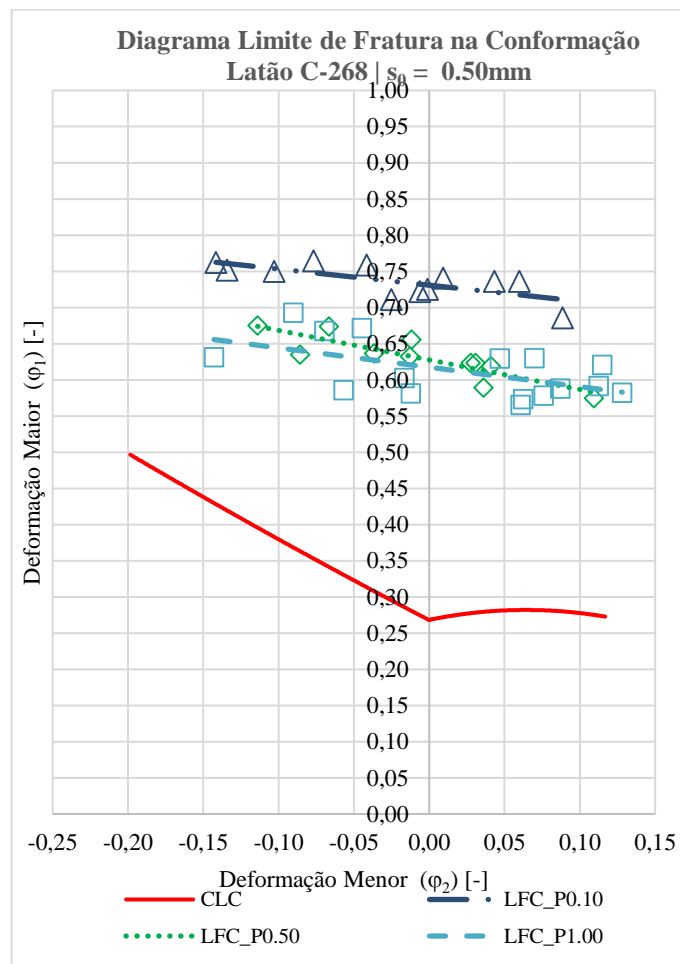


Figura 99: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $s_0 = 0,50$ mm

Conforme relatado por Jeswiet *et al.* [27], quanto menor o tamanho do Incremento Vertical (Δ_z) utilizado no processo ISF, maiores serão as deformações alcançadas na peça. A Figura 99 retrata precisamente este aspecto, onde as deformações maiores (φ_1) alcançadas pelos experimentos feitos com $\Delta_z = 0.10$ mm obtiveram valores de $\varphi_1 \cong 0,75$, enquanto os experimentos feitos com $\Delta_z = 1.00$ mm obtiveram valores de $\varphi_1 \cong 0,63$. A Figura 100 ilustra as deformações analisadas de experimentos SPIF com $s_0: 0.70$ mm de espessura.

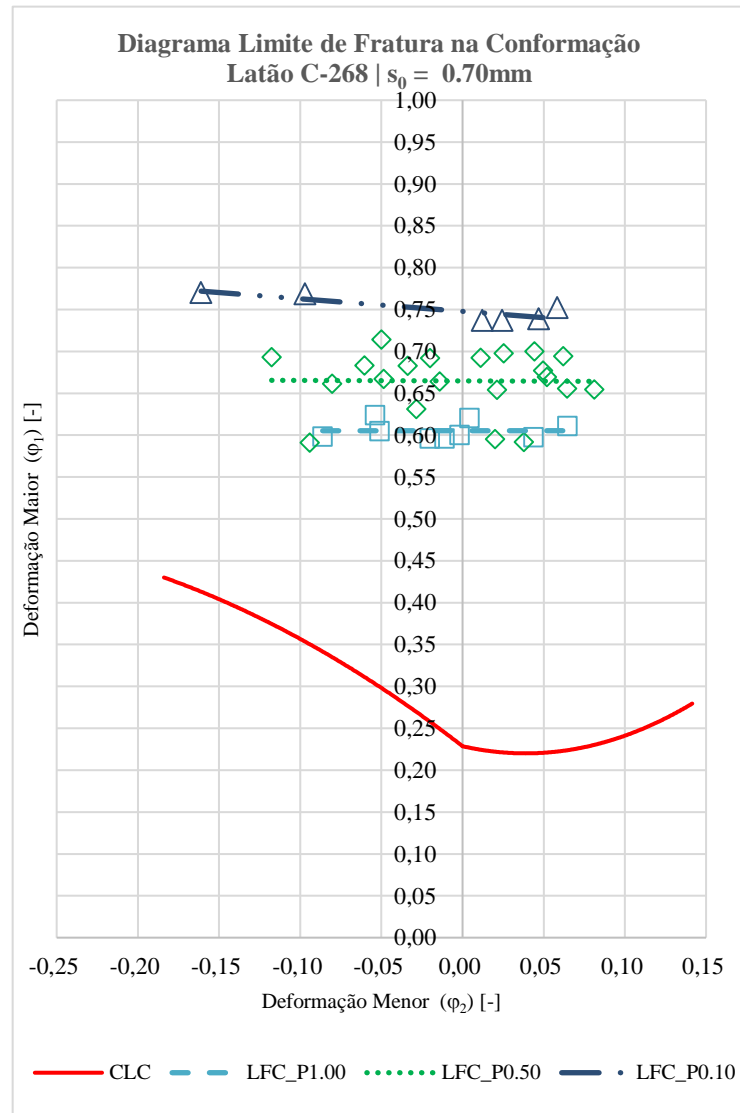


Figura 100: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $s_0 = 0,70$ mm

Sobre a Figura 100, se observa o mesmo comportamento das LFC resultantes, com as maiores deformações de φ_1 correspondentes ao menor Incremento Vertical ($\Delta_z = 0.10$ mm), e neste caso, com valores semelhantes ao da LFC da Figura 99. A LFC referente aos valores dos

experimentos com o Incremento Vertical (Δ_z) de 1.00 mm está ligeiramente abaixo do da LFC da Figura 99, enquanto a LFC com o 0.50 mm de Incremento Vertical (Δ_z) está um pouco acima.

A primeira situação ($\Delta_z = 1.00$ mm) sugere experimentos SPIF que sejam realizados com a chapa de latão de $s_0 = 0.70$ mm, terão menores deformações do que com a chapa de $s_0 = 0.50$ mm, enquanto a segunda situação ($\Delta_z = 0.50$ mm) o inverso.

A Figura 101 ilustra as deformações analisadas de experimentos SPIF com $s_0 = 1.00$ mm de espessura.

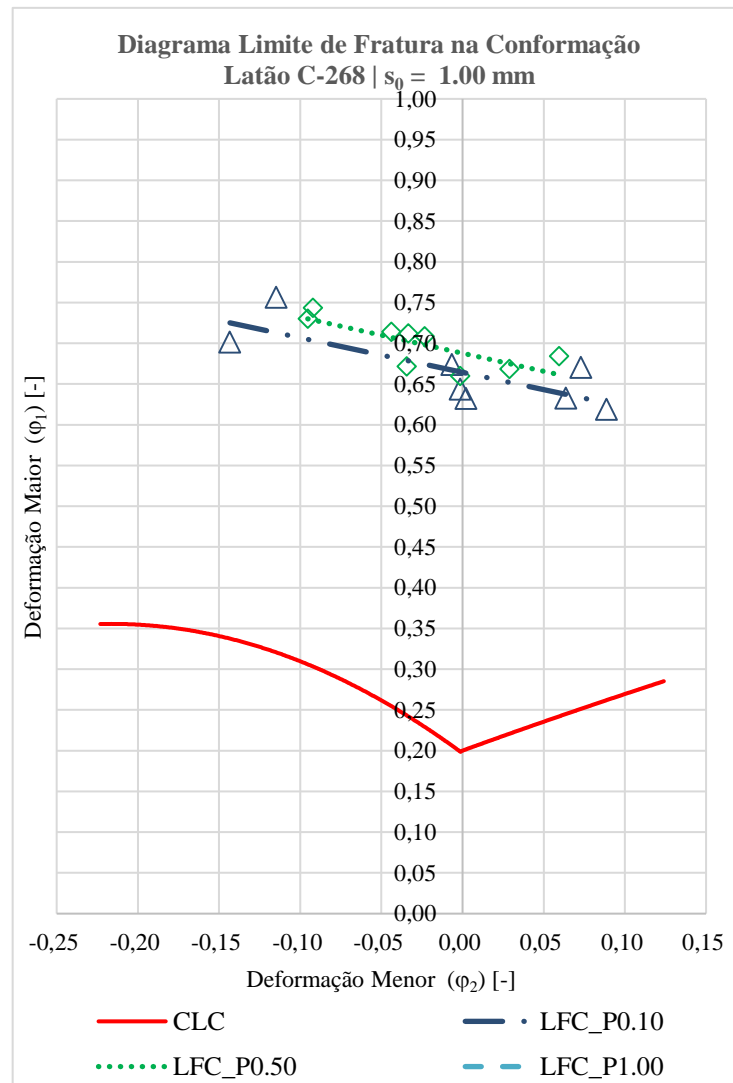


Figura 101: Linha Limite de Fratura experimental do latão C-268 com $s_0 = 1.00$ mm

Do mesmo modo que os gráficos de LFC anteriores, o menor Incremento Vertical (Δ_z) produz as maiores deformações. Contudo, para a chapa de latão com 1.00 mm de espessura observa-se uma proximidade das LFC, sobretudo das originadas Incremento Vertical (Δ_z) com 0.50 e 1.00 mm.

Outro aspecto observado nos gráficos das LFC, refere-se a diferença entre os valores (ϕ_1) das curvas CLC e LFC, onde a LFC apresenta valores de deformação (ϕ_1) maiores que os da curva CLC, evidenciando que as peças conformadas pelo processo ISF alcançam maiores deformações do que se produzidas pelos processos convencionais de estampagem.

Comparando os resultados dos três gráficos de LFC (Figura 99, Figura 100 e Figura 101), se evidencia que para experimentos SPIF, nas geometrias experimentadas e com as ferramentas utilizadas, os valores máximos de deformação verdadeira ϕ_1 são próximos, indicando um limite de deformação máximo para este material (nestas configurações experimentais), independente das três espessuras de chapas utilizadas, principalmente, pelos valores de deformação verdadeira ϕ_1 apresentados pela e Figura 101, decorrente da espessura inicial (s_0) de 1.00 mm.

Confrontando os resultados experimentais da LFC com o resultado obtido por Centeno *et al.* [46] (Figura 61), onde apresenta a Linha Limite de Fratura do aço AISI 304 com 0.80 mm de espessura, observa-se quão maiores são as deformações deste material em relação as chapas de latão pesquisadas, logo, este aço inox proporciona peças SPIF com maiores ângulos (Ψ).

6 CONCLUSÕES

No que tange a Estampagem Incremental, os trabalhos citados no capítulo do Estado da Arte, mostram quão diferenciadas podem ser as aplicações da ISF, abrangendo áreas distintas, como a indústria automobilística, aeronáutica, náutica e também em produtos da linha branca, auxiliando na produção de peças unitárias e protótipos. Adicionalmente, mostrando sua pluralidade, aplicações na arquitetura e na área da saúde, esta última, com a fabricação de próteses e órteses.

Ainda sobre o referencial bibliográfico utilizado neste trabalho, se observa a concentração de pesquisas de ISF nos mesmos materiais clássicos da indústria, como ligas de aço, alumínio e titânio [19, 27, 41, 42, 53, 54,58].

Neste mesmo viés, com a realização das investigações nas chapas de latão C-268, esta pesquisa inclui uma nova liga no *hall* dos materiais investigados no processo ISF. A realização dos experimentos SPIF, baseados nos dados das pesquisas em outras matérias primas, associado aos resultados das medições de Forças (F_x , F_y e F_z) e Atrito (μ) durante a efetivação dos testes, os resultados de caracterização e o potencial de aplicação industrial que a chapa de latão C-268 possui, credencia este trabalho como referência para outras investigações, científicas e industriais.

Considerando as geometrias dos testes e também as citadas pelos demais autores no decorrer deste trabalho, a realização dos experimentos SPIF utilizando os *softwares* CAD/CAM (projeto e manufatura) também se mostra viável para a fabricação de peças estampadas a partir da chapa latão C-268, sobretudo quando beneficiado pela adaptação deste processo de estampagem em um Centro de Usinagem, descaracterizando a necessidade de equipamento próprio e/ou dedicado.

Com os avanços tecnológicos dos últimos anos, as grandes indústrias, sobretudo a automobilística, sofrem com a grande concorrência, e a oferta de novos produtos no mercado ou ainda, produtos customizados, num menor prazo de tempo e num menor custo, possibilitando rentabilidade no mercado. Neste sentido, o processo de estampagem incremental em chapas de baixa espessura para a fabricação de peças únicas e/ou personalizadas é uma realidade, com amplo potencial de aplicação.

A realização dos experimentos SPIF e ensaios tecnológicos, proporcionaram resultados específicos do material investigado. Do mesmo modo que apresentado por Centeno

et al. [46], a Linha Limite de Fratura da chapa latão C-268 se posiciona consideravelmente acima da Curva Limite de Conformação no gráfico das deformações (ϕ_1 vs ϕ_2), deste modo, o processo SPIF na chapa latão C-268 também promove maiores deformações que o processo convencional de estampagem.

Adicionalmente, a LFC das três espessuras de Latão C-268 analisadas, nos parâmetros experimentais descritos, apontam os valores das maiores deformações verdadeiras (ϕ_1) muito próximos (s_0 : 0.50 e 0.70 mm \approx 0,75, s_0 = 1.00 mm \approx 0,70), evidenciando neste caso que a diminuição do Incremento Vertical (Δz) é mais relevante, em termos de deformação do material, do que o aumento da espessura da chapa.

A análise das Forças (F_x , F_y e F_z) resultantes do processo SPIF mostram que quanto maior o Incremento Vertical (Δz), maior será força de estampagem necessária, do mesmo modo, quanto maior a espessura inicial (s_0) da chapa, maiores serão as Forças necessárias no SPIF.

Também se evidenciou, pela Figura 90 e as demais figuras do Apêndice A, que as Forças (F_x , F_y e F_z) aumentam com a maior profundidade do experimento. A este fato, pode ser atribuído o encruamento do material, à medida que o mesmo vai sendo estampado e estirado, como também, proveniente do aumento contínuo do Ângulo de Parede (Ψ), decorrente da geometria experimentada, e não apenas em função da profundidade do experimento.

Também ficou constatado que a diferença de geometria (Tronco de Cone e Tronco de Pirâmide) não apresentaram diferenças suntuosas nas forças medidas. Todavia, a utilização de ferramenta de estampagem com diâmetros (D_T) diferentes apresenta valores desiguais, neste caso, quanto maior o diâmetro da ferramenta, maiores serão as Forças (F_x , F_y e F_z) no processo SPIF. Nos experimentos com a espessura inicial (s_0) da chapa de 0.50 mm, a ferramenta com $\varnothing 15$ mm apresentou $F_z = 1.004,85$ N, enquanto a ferramenta com $\varnothing 10$ mm apresentou $F_z = 862,23$ N (Figura 91). Nos experimentos com a espessura inicial (s_0) da chapa de 0.70 mm, a ferramenta com $\varnothing 15$ mm apresentou $F_z = 1.565,00$ N, enquanto a ferramenta com $\varnothing 10$ mm apresentou $F_z = 1.303,00$ N (Figura 91). Este fato é explicado por Martins *et al.* 2008 [24], onde, quanto maior o diâmetro da ferramenta de estampagem, mais se assemelha o processo de Estampagem Incremental ao processo convencional de conformação.

Como o Atrito de Deslizamento (μ) foi obtido em função das Forças (F_x , F_y e F_z) do processo SPIF, também tiveram os mesmos resultados, ou seja, o seu valor aumenta na medida em que o Incremento Vertical (Δz) e a espessura inicial (s_0) aumentam.

Na análise geométrica constatou-se discrepâncias geométricas e dimensionais entre o perfil projetado e os perfis experimentados. Mesmo assim, as diferenças de geometrias ficaram dentro do citado Allwood *et al.* 2010 [1], com uma precisão dimensional de $\pm 3\text{mm}$.

Neste caso, se observa que as geometrias Tronco de Pirâmide apresentaram nas regiões iniciais da área estampada (próximo a base do tronco), parte de sua geometria para fora do perfil projetado, enquanto as geometrias Tronco de Cone apresentaram-se inteiramente dentro do mesmo. A esta diferença de comportamento da chapa de Latão C-268, é atribuído o fato de que na geometria Tronco de Cone, não há um trajeto linear da estampagem, mas radial, desta forma, gerando equilíbrio e igualdade das tensões e do retorno elástico da chapa, fato este não observado na geometria Tronco de Pirâmide.

Os experimentos SPIF realizados com a ferramenta de estampagem com diâmetro menor ($\text{Ø}10\text{mm}$) obtiveram as maiores profundidades, sendo 34.10 mm, contra 28.30 mm para a espessura inicial (s_0) da chapa de 0.50 mm; e 34.20 mm, contra 29.20 mm para a espessura inicial (s_0) da chapa de 0.70 mm (Tabela 14). Este fato é descrito Martins *et al.* 2008 [24], onde a utilização de ferramentas com menor diâmetro, proporcionam uma melhor conformabilidade, pois as concentrações das tensões estão em uma pequena região de deformação na chapa.

As fraturas dos experimentos apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, região de transição entre a área estampada e a que está em contato com a ferramenta, propagando-se no mesmo plano, de forma meridional.

A medição da espessura final (s_1) mostrou que os valores medidos não ultrapassaram os respectivos valores resultantes da expressão matemática Lei do Seno. Também é observado pela da Figura 98 e pela Tabela 15, que quanto menor a espessura inicial (s_0) da chapa, menor a variação dos valores medidos e calculados. Neste caso, os valores calculados pela Lei do Seno, apontam para uma redução de 62% a 68% da espessura da chapa, enquanto que nos valores medidos da espessura da chapa, esta redução fica entre 51% e 55%, sendo que a redução da espessura da chapa tende a aumentar em chapas com espessuras maiores.

7 PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para pesquisas futuras, a realização destes experimentos SPIF por meio de Simulação Numérica, utilizando os resultados dos ensaios tecnológicos do latão C-268, bem como, dos experimentos realizados, proporcionaria uma análise de toda a investigação, inclusive, possibilitando discussões acerca desta pesquisa.

Em termos de aplicação prática, a realização de experimentos ISF considerando as possibilidades de se fabricar algum produto feito de chapa de latão C-268, como instrumentos musicais de sopro, ornamentações, núcleos de radiadores automotivos, trocadores de calor, sistemas de aquecimento doméstico.

Considerando as modalidades de estampagem incremental (SPIF, TPIF, MSPIF, SF + ISF, Aquecida), e a falta de pesquisas desta área em ligas de latão, torna-se uma boa sugestão para trabalhos futuros a investigação nesses processos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Allwood, J.; Braun, D. e Music, O. **"The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming"** *Journal of Materials Processing Technology*, p. 1501–1510, 2010.
- [2] Boff, U.; *et al.* **"Estampagem Incremental: Método Alternativo para Fabricação de Protótipos e Pequenos Lotes de Peças"** *Ferramental*, pp. 13-17, Maio/Junho 2012.
- [3] Sena, J. I. V. d. **"Estampagem incremental: Um novo conceito de produção"** *Dissertação de Mestrado*, Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.
- [4] Bambach, M.; Hirt, G.; e Ames, J. **"Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process"** *Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP)*, p. 6, 2004.
- [5] Lora, F. A.; *et al.* **"Validação do Processo de Simulação Computacional Aplicado ao Processo de Estampagem Incremental para Avaliação dos Caminhos de Deformações"** *Anais da 15ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 32º SENAFOR*, pp. 1-10, 2012.
- [6] Dejardin, S.; *et al.* **"Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts"** *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, p. 363–369, 2010.
- [7] Safari, M.; Hosseinipour, S. J.; e Azodi, H. D. **"Experimental and Numerical Analysis of Forming Limit Diagram (FLD) and Forming Limit Stress Diagram (FLSD)"** *Materials Sciences and Applications*, vol. 2, pp. 497-503, 2011.
- [8] Panich, S.; *et al.* J. **"O Uso do Diagrama-Limite de Tensão para Prever a Conformabilidade de Chapas"** *Corte & Conformação*, pp. 28-45, Outubro 2012.
- [9] Lopes, T. F. R. d. S. **"Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotura"** *Dissertação de Mestrado*, Universidade do Porto, Portugal, 2013.
- [10] Robert, C.; *et al.* **"Comparison between incremental deformation theory and flow rule to simulate sheet-metal forming processes"** *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, p. 1123–1131, Maio 2012.

- [11] Amino, "**Dieless NC Forming**" Amino Corporation, Fujinomiya, 2006.
- [12] Ponticel, P.; "<http://articles.sae.org/12385/>" *SAE International*®. [Online]. [Accessed 17 agosto 2015].
- [13] Castelan, J. "**Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**" *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [14] Arruda, R. P. d.; "**Estampagem Incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos**" *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [15] Tiburi, F. "**Aspectos do Processo de Estampagem Incremental**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [16] Cavaler, L. C. d. C. "**Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L**" *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- [17] Castelan, J. "**Utilização das Tecnologias CAD/CAM para Estampagem Incremental do Alumínio Série 1000**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- [18] Daleffe, A. "**Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- [19] Daleffe, A. "**Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio Através da Estampagem Incremental**" *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- [20] Fritzen, D. "**Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Latão 70/30**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [21] Lora, F. A. "**Avaliação das Deformações no Aço DC04 quando Submetido ao Processo Híbrido de Estampagem Incremental Posterior ao Processo Convencional**," *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

- [22] Leszak, E. "**Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming**". *USA Patent US3342051A1*, 19 Settembre 1967.
- [23] Hirt, G.; *et al.* "**Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**" *Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP)*, p. 12, 2005.
- [24] Martins, P. A. F.; *et al.* "**Theory of single point incremental forming**" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, p. 247–252, 2008.
- [25] Allwood, J.; King, G.; e Duflou, J. "**A structured search for applications of the Incremental Sheet Forming process by produc segmentation**" *Proc I Mesh E, Part B, J Eng Manuf*, vol. 219, no. B2, pp. 239-244, 2004.
- [26] Reddy, N. V.; Lingam, R.; e Cao, J. "**Incremental Metal Forming Processes in Manufacturing**" *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, pp. 411-452, 2015.
- [27] Jeswiet, J.; *et al.* "**Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 2, pp. 88-114, 2005.
- [28] Allwood, J. M.; *et al.* "**A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming**" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 2006 220: 323*, pp. 323-327, 2005.
- [29] Ambrogio, G.; *et al.* "**Three-dimensional FE simulation of single point incremental forming: experimental evidences and process design improving**" *III International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS VIII). CIMNE*, 2005.
- [30] Attanasio, A.; Ceretti, E.; e Giardini, C. "**Optimization of tool path in two points incremental forming**" *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 409-412, 2006.
- [31] Duflou, J.; *et al.* "**Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths**" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 253-256, 2008.
- [32] Skjoedt, M.; *et al.* "**Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup**" *Int J Mater Form*, vol. 1, no. 1, p. 1199–1202, 2008.
- [33] Malhotra, R.; *et al.* "**A new methodology for multi-pass single point incremental forming with mixed tool paths**" *CIRPAnn Manuf Technol*, vol. 60, no. 1, p. 23–326, 2011.

- [34] Lingam, R.; Bansal, A.; e Reddy, N. V. "**Analytical prediction of formed geometry in multi-stage single point incremental forming**" *International Journal of Material Forming*, pp. 1-10, 2015.
- [35] Araghi, B. T.; *et al.* "**Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming**" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 225-228, 2009.
- [36] Araghi, B. T.; *et al.* "**Investigation on Incremental Sheet Forming Combined with Laser Heating and Stretch Forming for the Production of lightweight structures**" *Kes Engineering Materials*, vol. 473, pp. 919-928, 2011.
- [37] Ambrogio, G.; Filice, L.; e Gagliardi, F. "**Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming**" *Materials and Design*, vol. 34, p. 501–508, 2012.
- [38] Lu, B.; *et al.* "**Investigation of material deformation mechanism in double side incremental sheet forming**" *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 93, pp. 37-48, 2015.
- [39] Kumar, Y.; e Kumar, S. "**Incremental Sheet Forming (ISF)**" *Advances in Material Forming and Joining*, pp. 29-46, 2015.
- [40] Jeswiet, J.; *et al.* "**Metal forming progress since 2000**" *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 1, pp. 2-17, 2008.
- [41] Blaga, A. "**Contributions to the incremental forming of thin metal sheets**" *Tese de Doutorado, Universitatea "Lucian Blaga" din Sibiu, Sibiu*, 2011.
- [42] Castelan, J.; *et al.* "**Development of Cranial Implant Through Incremental Sheet Forming for Medical Orthopedic Applications**" *International Journal of Materials Engineering an Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 63-80, 2010.
- [43] Trautz, M.; e Herkrath, R. "**The application of folded plate principles on spatial structures with regular, irregular and free-form geometries**" *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, p. 13, 2009.
- [44] Sy, L. V. "**Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet**" *Tese de Doutorado, Università degli Studi di Padova, Itália*, 2009.
- [45] 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 & Manufacture*, vol. 85, pp. 14-29, 2014.

- [46] Centeno, G.; *et al.* "**Critical Analysis of Necking and Fracture Limit Strains and Forming Forces in Single-Point Incremental Forming**" *Materials and Design* 63 (2014) 20–29, vol. 63, pp. 20-29, 2014.
- [47] Hamilton, K.; e Jeswiet, J. "**Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences**" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 311-314, 2010.
- [48] Attanasio, A.; *et al.* "**Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization**" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 97, no. 1, pp. 56-67, 2008.
- [49] Behera, A. K.; *et al.* "**Tool path compensation strategies for single point incremental sheet forming using multivariate adaptive regression splines**" *Computer-Aided Design*, vol. 45, pp. 575-590, 2013.
- [50] Bhattacharya, A.; *et al.* "**Formability and surface finish studies in single point incremental forming**" *ASME J Manuf Sci Eng* 133:0610201–0610208, 2011.
- [51] Al-Ghamdi, K.; e Hussain, G. "**Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations**" *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 88, pp. 82-94, 2015.
- [52] Azevedo, N. G.; *et al.* "**Lubrication Aspects during Single Point Incremental Forming for Steel and Aluminum Materials**" *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 16, no. 3, pp. 1-7, 2015.
- [53] Minutolo, F.; Durante, M.; e Formisano, A. "**Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process,**" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 194, pp. 145 - 150, 2007.
- [54] Suresh, K.; e Regalla, S. "**Analysis of formability in single point incremental forming using finite element simulations**" *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 430 - 435, 2014.
- [55] Jeswiet, J.; Duflou, J. R.; e Szekeres, A. "**Forces in Single and Two Point Incremental Forming**" *Advanced Material Research*, Vols. 6-8, pp. 449-456, 2005.

- [56] Duflou, J.; Szekeres, A.; e VanHerck, **"Force Measurements for Single Point Incremental Forming: and experimental study"** *Journal Advanced Materials Research*, Vols. 6-8, pp. 441-448, 2005.
- [57] Belchior, B.; *et al.* **"Force prediction for correction of robot tool path in Single Point Incremental Forming"** *Key Engineering Materials*, Vols. 554-557, pp. 1282-1289, 2013.
- [58] Bagudancha, I.; *et al.* **"Forming force in Single Point Incremental Forming under different bending conditions"** *The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC*, vol. 63, pp. 354-360, 2013.
- [59] Aerens, R.; *et al.* **"Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations"** *Int J Adv Manuf Technol*, 2009.
- [60] De Lucca, G. d. S. **"Análise de Forças Durante o Processo de Estampagem Incremental com o Auxílio de Extensometria"** *Dissertação de Mestrado*, UFRGS, Porto Alegre, 2015.
- [61] Bambach, M.; Hirt, G.; **"Performance Assessment of Element Formulations and Constitutive Laws for the Simulation of Incremental Sheet Forming (ISF)"** *VIII International Conference on Computational Plasticity – COMPLAS. CIMNE*, 2005.
- [62] Bambach, M.; e Hirt, G. **"Error analysis in explicit finite element analysis of incremental sheet forming"** *Proceedings of International Numiform 07 Conference*, p. 859–864, 2007.
- [63] Suresh, K.; Khan, A.; e Regalla, S. **"Tool path definition for numerical simulation of single point incremental forming"** *International Conference On Design And Manufacturing, IConDM*, vol. 64, pp. 536 - 545, 2013.
- [64] Ayed, L.; *et al.* **"Simplified numerical approach for incremental sheet metal forming process"** *Engineering Structures*, Vols. 62-63, pp. 75 - 86, 2014.
- [65] Suresh, K.; e Regalla, S. **"Effect of mesh parameters in finite element simulation of single point incremental sheet forming process"** *Procedia Materials Science - 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC)*, vol. 6, p. 376 – 382, 2014.

- [66] Li, Y.; *et al.* "**Deformation mechanics and efficient force prediction in single point incremental forming**" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 221, pp. 100-111, 2015.
- [67] Allwood, J.; Houghton, N.; e Jackson, K. "**The design of an incremental forming machine**" *Proceedings of the 11th Conference on Sheet Metal*, pp. 471-478, 2005.
- [68] Lamminen, L. "**Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design**" *Trans Tech Publications - TTP*, pp. 457-464, 2005.
- [69] Meier, H.; *et al.* "**Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming**" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 233-238, 2009.
- [70] Meier, H.; Magnus, C.; e Smukala, V. "**Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools**" *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, p. 4, 2011.
- [71] Sousa, R.; *et al.* "**SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine**" *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 49, no. 5, pp. 645-660, 2014.
- [72] Schaeffer, L. "**Conformação de Chapas Metálicas**" Porto Alegre, RS: *Imprensa Livre*, 2004, p. 193.
- [73] Marques, T. A. F. "**Estampagem Incremental de Polímeros**" *Dissertação de Mestrado*, IST, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2010.
- [74] Folle, L. F.; *et al.* "**Escolha do Lubrificante Correto Torna mais Precisa a Curva-Limite de Conformação**" *Corte & Conformação de Metais*, pp. 64 - 76, Abril 2008.
- [75] Lora, F. A. "**Avaliação do Processo de Estampagem Profunda de Chapas de Aço BH 180 e BH 220 Utilizado na Indústria Automobilística**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [76] Netto, S. E. S. "**Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- [77] Ali, W. J.; Edrees, A. O. "**Theoretical Determination of Forming Limit Diagram for Steel ,Brass and Aluminum alloy sheets**" *Mechanical Engineering Department, University of Mosul*, pp. 01-24, 2006.

- [78] Atkins, A. G. "**Fracture in Forming**" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 56, pp. 609-618, 1996.
- [79] Isika, K.; *et al.* "**Formability Limits by Fracture in Sheet Metal Forming**" *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, p. 1557–1565, 2014.
- [80] Rodrigues, J. M. d. C.; e Martins, P. A. F. "**Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica**" 2 ed., *Vols. I - Fundamentos Teóricos*, Lisboa: Escolar Editora, 2010, p. 695.
- [81] Garcia, A.; Spim, J. A.; e Santos, C. A. d. "**Ensaio dos Materiais**" Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008, p. 247.
- [82] ABNT.NBR-6152, "**Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**" ABNT, Rio de Janeiro, 2002.
- [83] Schaeffer, L. "**Conformação Mecânica**" 1 ed., Porto Alegre, RS: *Imprensa Livre*, 1999, p. 167.
- [84] Michel, J. F.; e Picart, P. "**Size effects on the constitutive behaviour for brass in sheet metal forming**" *Journal of Materials Processing Technology*, p. 439–446, 2003.
- [85] ASTM E 517 - 00, "**Standard Test Method for Plastic Strain Ratio "r" for Sheet Metal**"
- [86] Ferrarini, J. L. "**Caracterização de Materiais para o Processo de Estampagem**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- [87] Martins, A. B. "**Avaliação da Utilização de Ligas de Cobre-Zinco (Latão) em Permutadores de Calor que Trabalham com Água de Resfriamento na UN-RECAP/PETROBRAS**" *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [88] I. ASM, "**ASM HANDBOOK - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**" vol. 2, USA: ASM INTERNATIONAL, 1992, p. 3470.
- [89] Pasebani, S.; Toroghinejad, M. R. "**Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process,**" *Materials Science and Engineering A*, p. 491–497, 2010.

- [90] Doege†, E.; e Behrens, B. A. "**Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen**", 2 ed., Hannover: 3, 2010, p. 916.
- [91] Schaeffer, L.; e Rocha, A. d. S. "**Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação**" Porto Alegre: *Imprensa Livre*, 2007, p. 243.
- [92] Ambrogio, G.; *et al.* "**Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing**" *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 156 - 162, 2005.
- [93] I. ASM, **ASM HANDBOOK - Forming and Forging**, vol. 14, USA: *ASM International*, 1993, p. 2110.

APÊNDICE A

Comparativos das Força de Conformação (F) nos Experimentos SPIF.

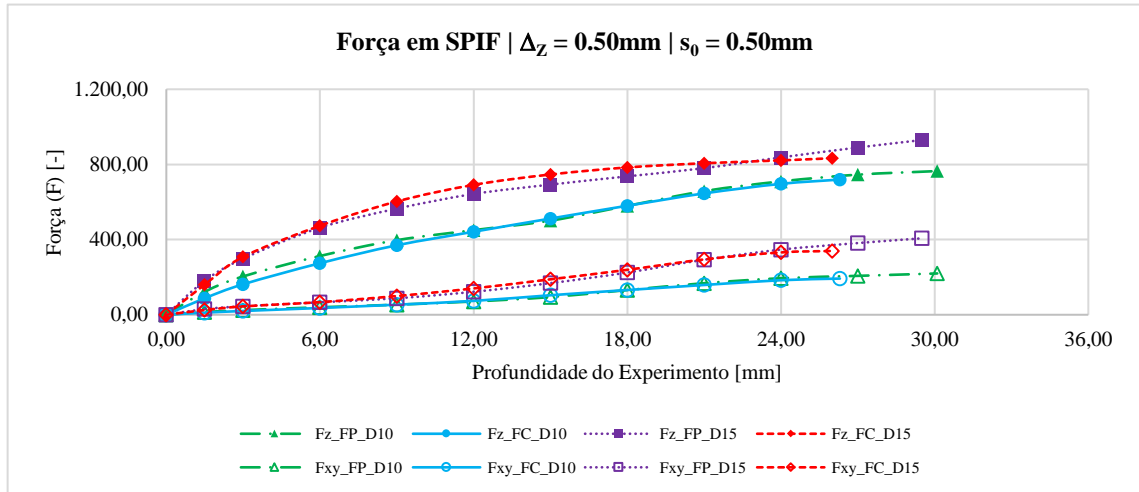


Figura 102: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.50\text{ mm}$ / $s_0: 0.50\text{ mm}$).

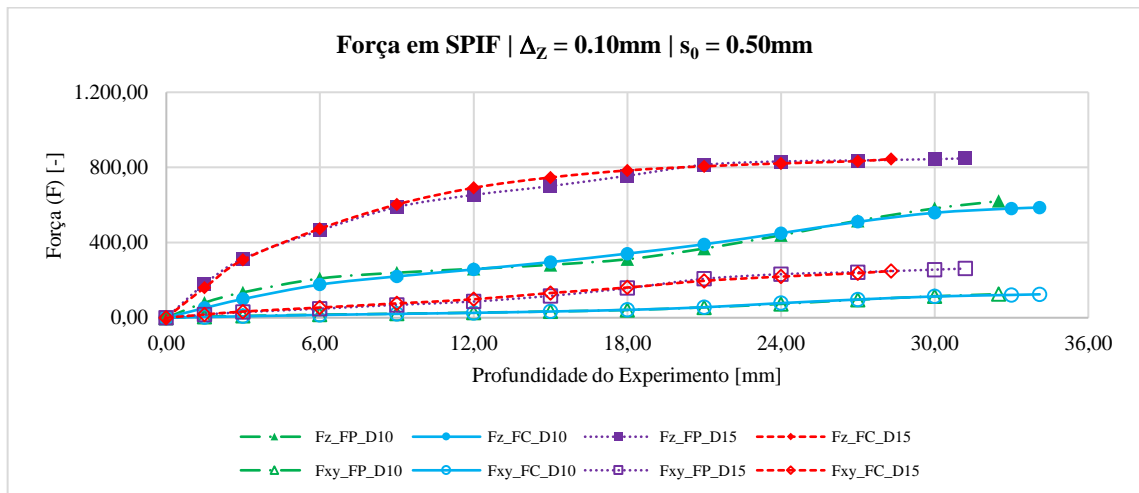


Figura 103: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.10\text{ mm}$ / $s_0: 0.50\text{ mm}$).

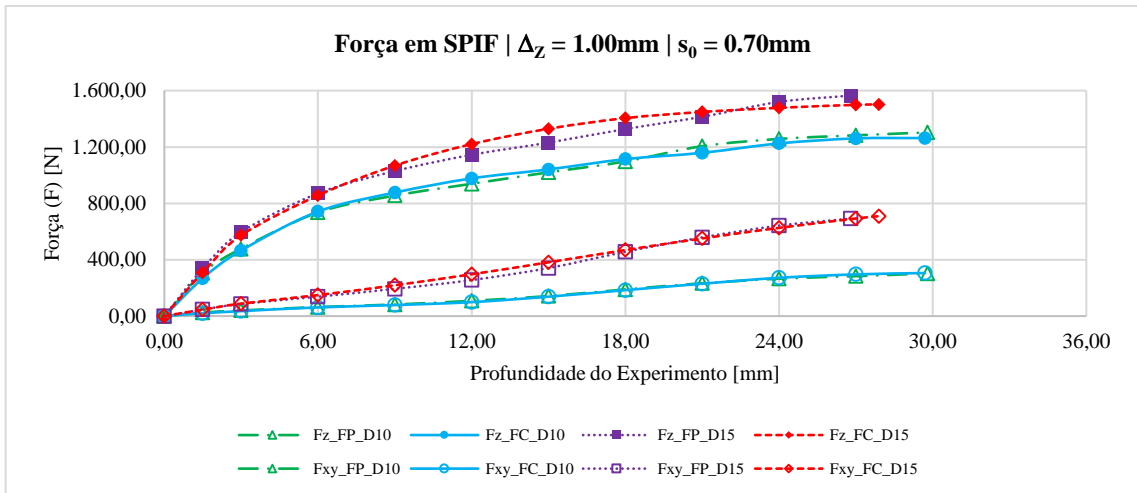


Figura 104: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 1.00\text{ mm}$ / $s_0: 0.70\text{ mm}$).

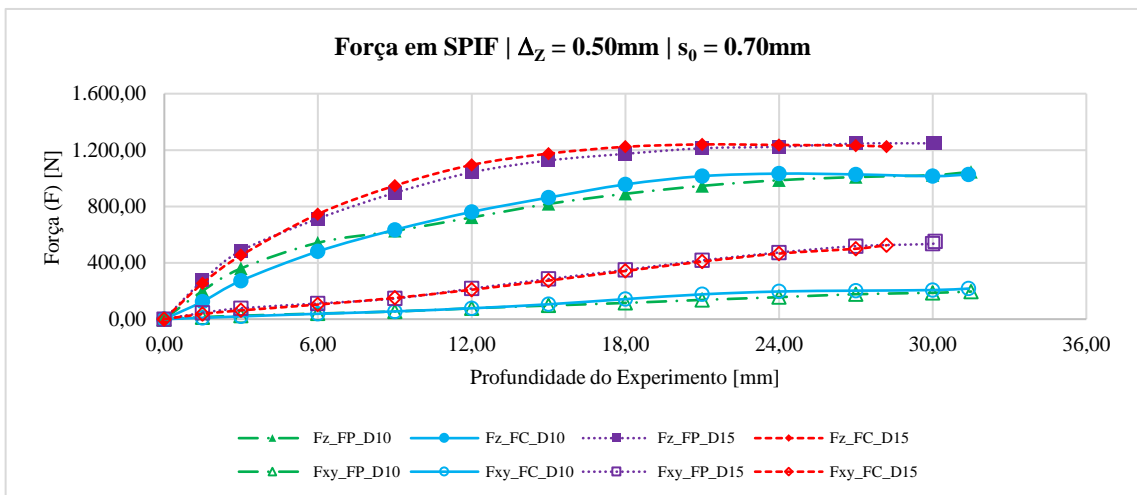


Figura 105: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.50\text{ mm}$ / $s_0: 0.70\text{ mm}$).

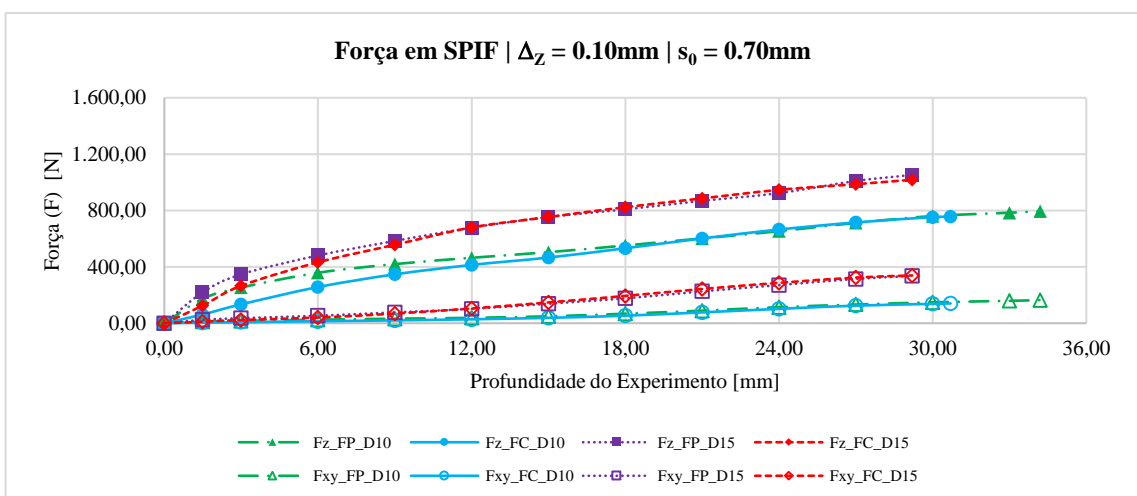


Figura 106: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.10\text{ mm}$ / $s_0: 0.70\text{ mm}$).

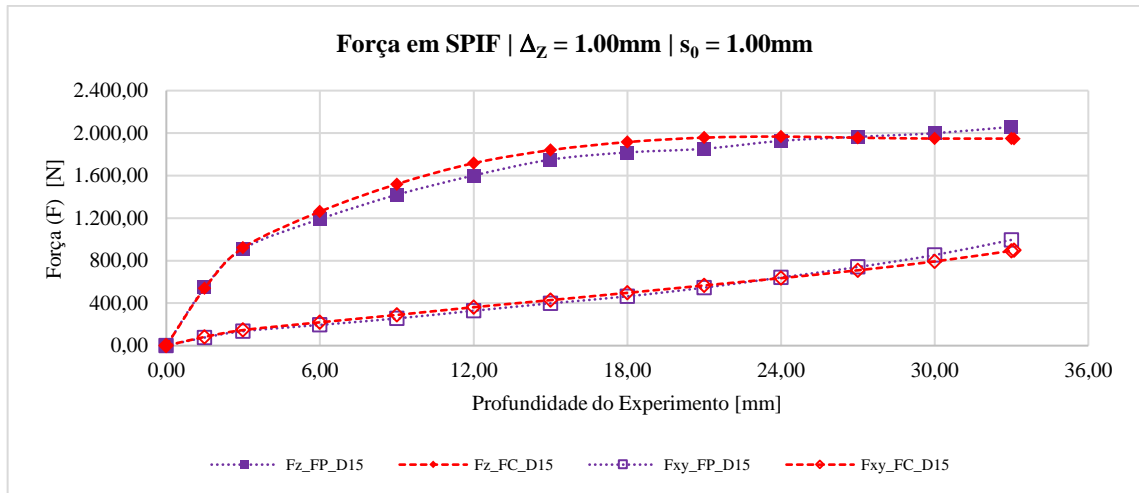


Figura 107: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 1.00\text{ mm}$ / $s_0: 1.00\text{ mm}$).

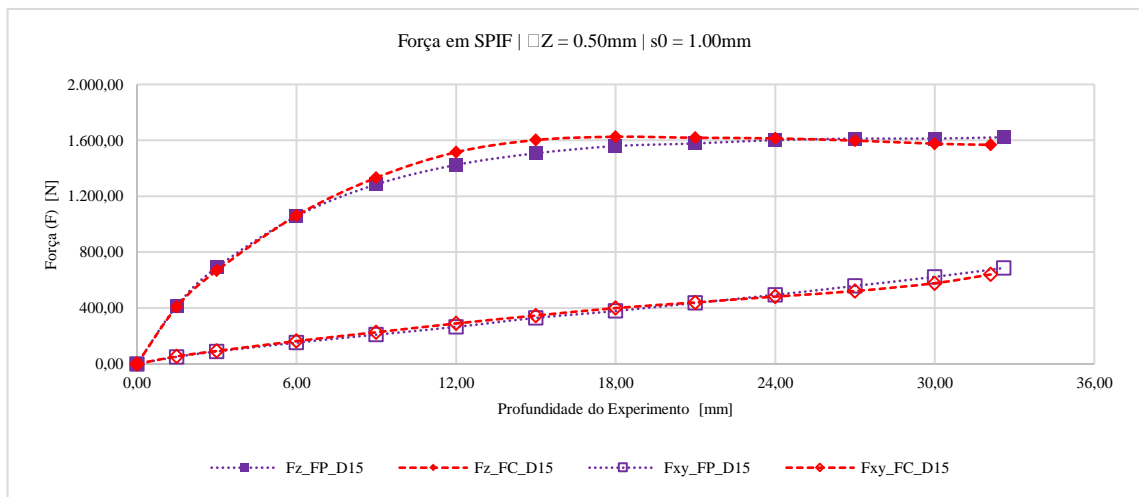


Figura 108: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.50\text{ mm}$ / $s_0: 1.00\text{ mm}$).

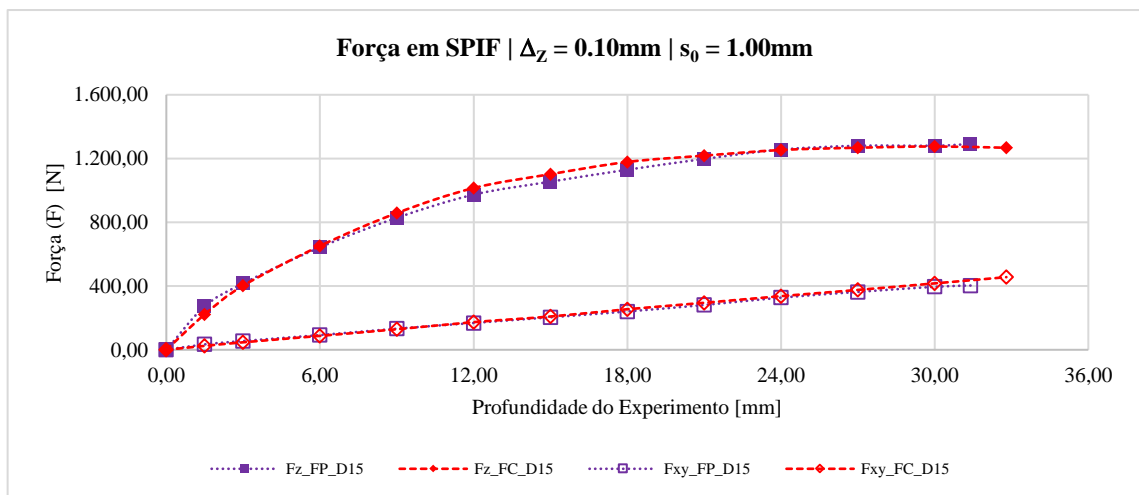


Figura 109: Força de Conformação (F) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.10\text{ mm}$ / $s_0: 1.00\text{ mm}$).

APÊNDICE B

Comparativos das curvas do Atrito de Deslizamento (μ) nos Experimentos SPIF.

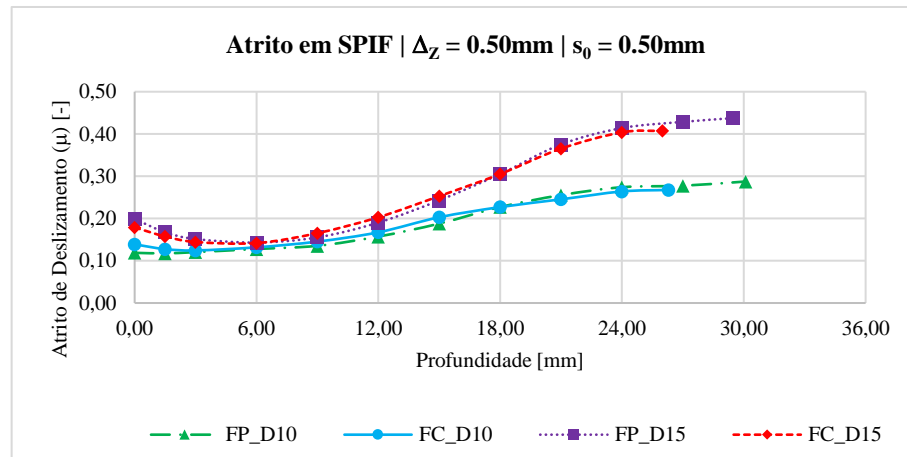


Figura 110: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.50\text{ mm}$ / $s_0: 0.50\text{ mm}$).

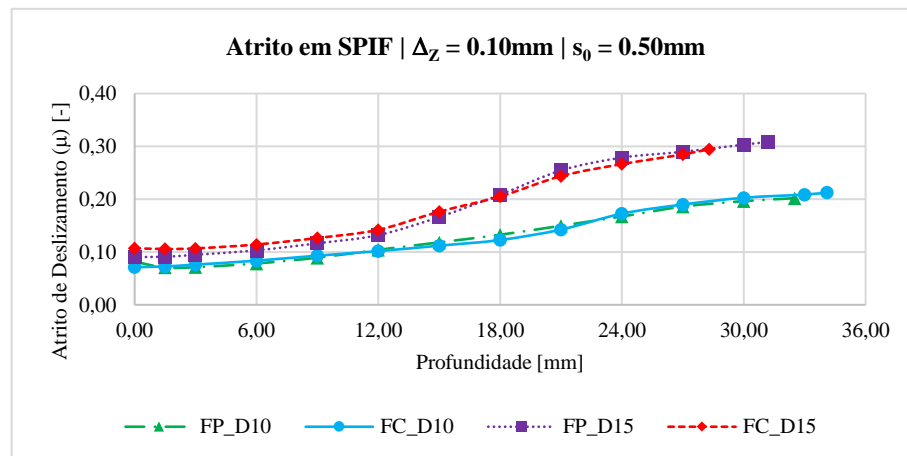


Figura 111: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF ($\Delta_z: 0.10\text{ mm}$ / $s_0: 0.50\text{ mm}$).

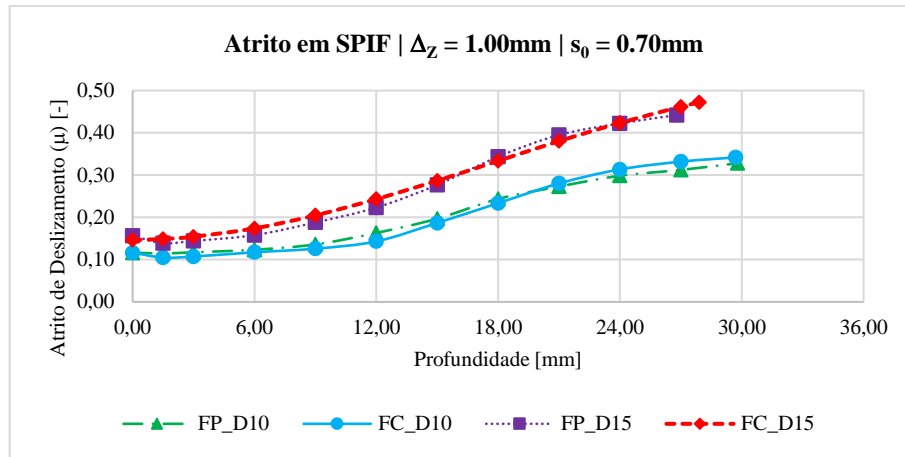


Figura 112: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF (Δ_z : 1.00 mm | s_0 : 0.70 mm).

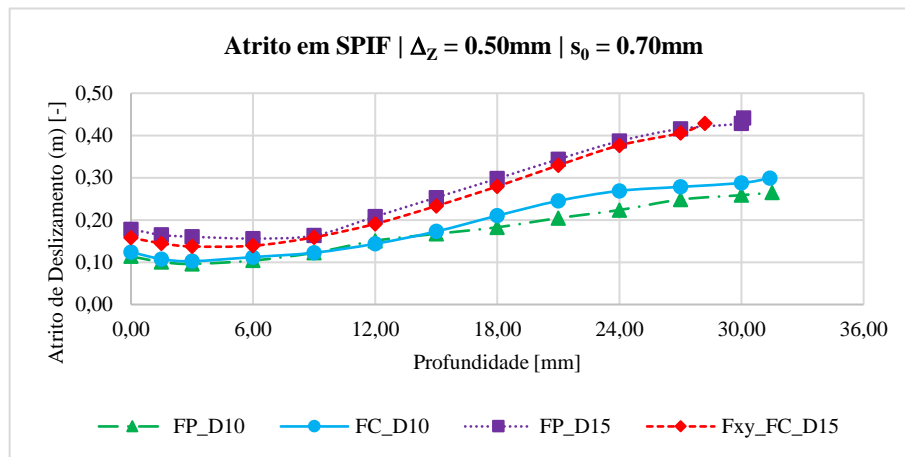


Figura 113: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF (Δ_z : 0.50 mm | s_0 : 0.70 mm).

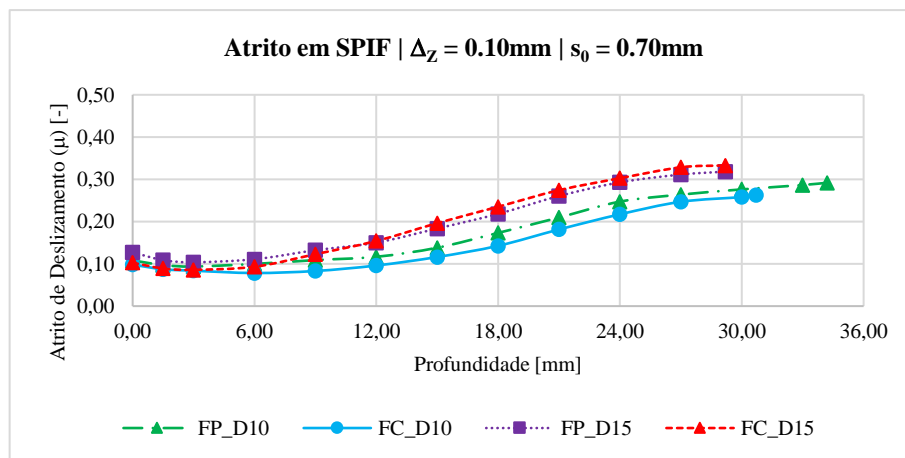


Figura 114: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF (Δ_z : 0.10 mm | s_0 : 0.70 mm).

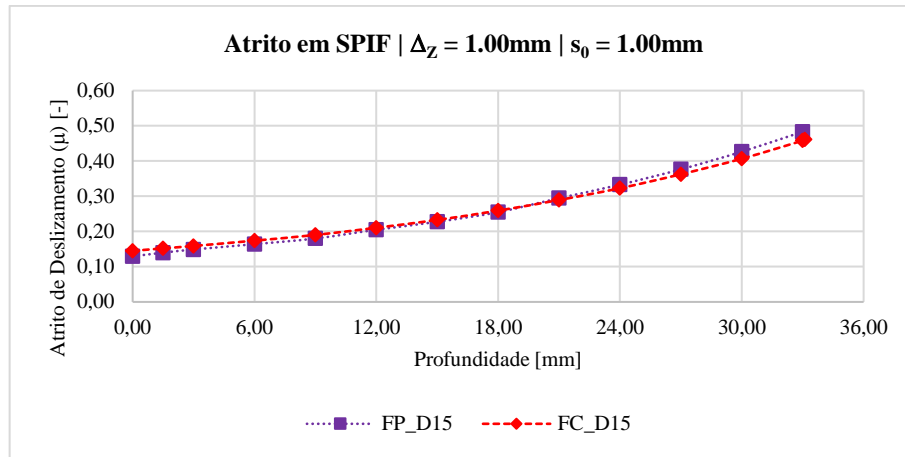


Figura 115: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF (Δ_z : 1.00 mm | s_0 : 1.00 mm).

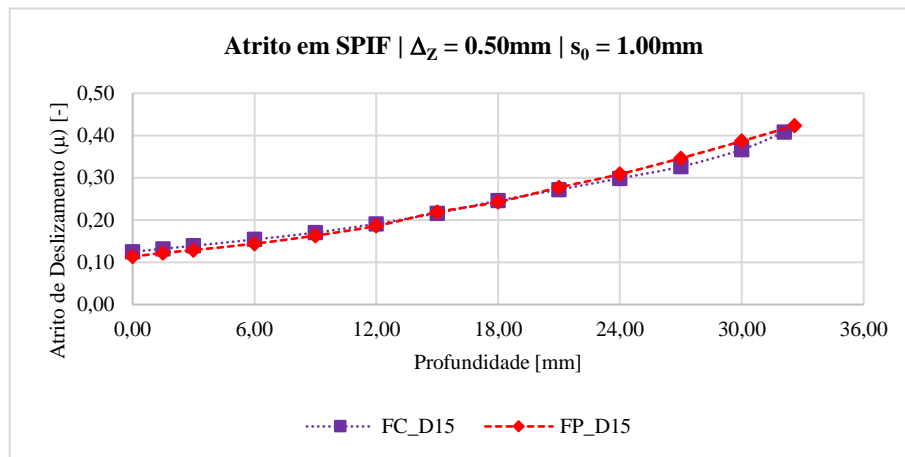


Figura 116: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF (Δ_z : 0.50 mm | s_0 : 1.00 mm).

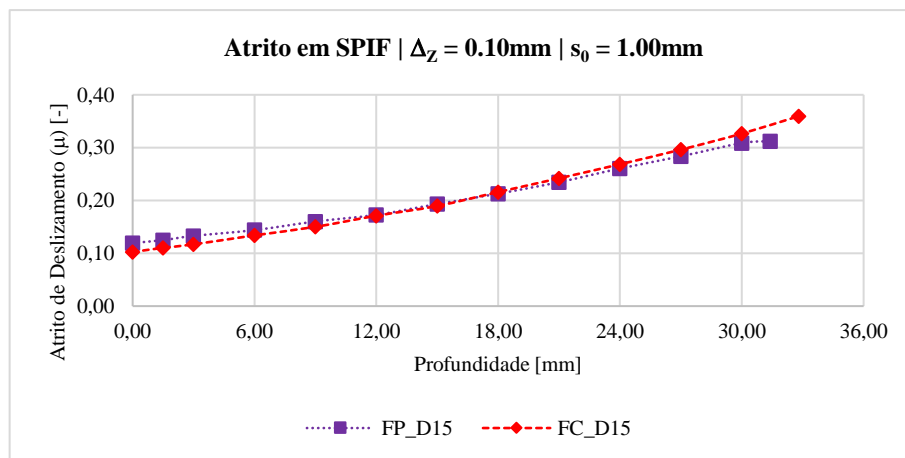


Figura 117: Atrito Deslizante (μ) no processo SPIF (Δ_z : 0.10 mm | s_0 : 1.00 mm).

APÊNDICE C

Comparativos dos perfis dos Experimentos SPIF

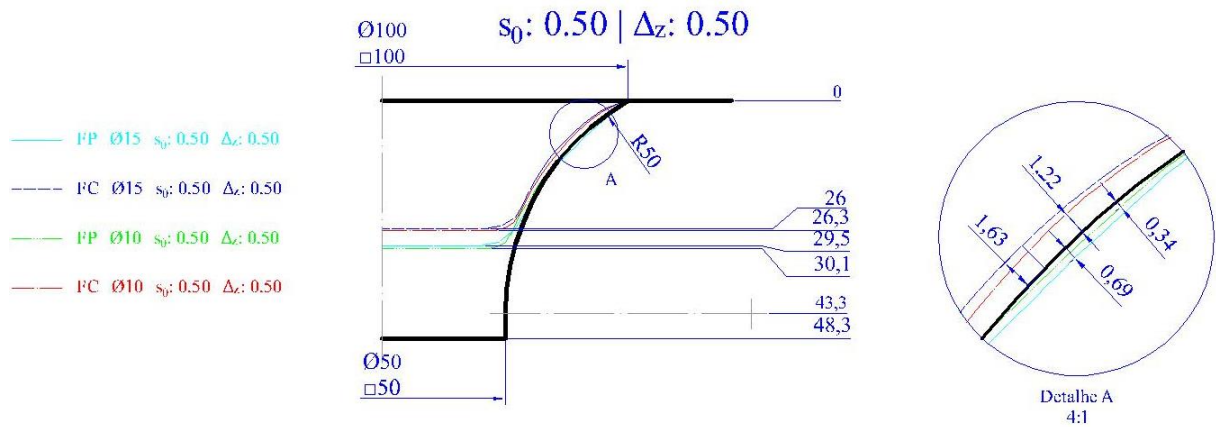


Figura 118: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,50 \text{ mm} \mid \Delta_z: 0,50 \text{ mm}$

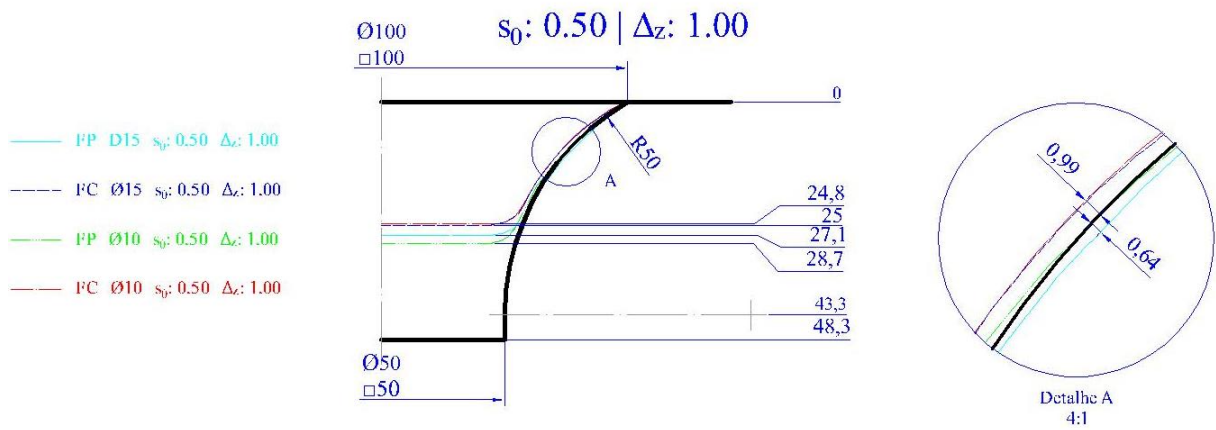


Figura 119: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,50 \text{ mm} \mid \Delta_z: 1,00 \text{ mm}$

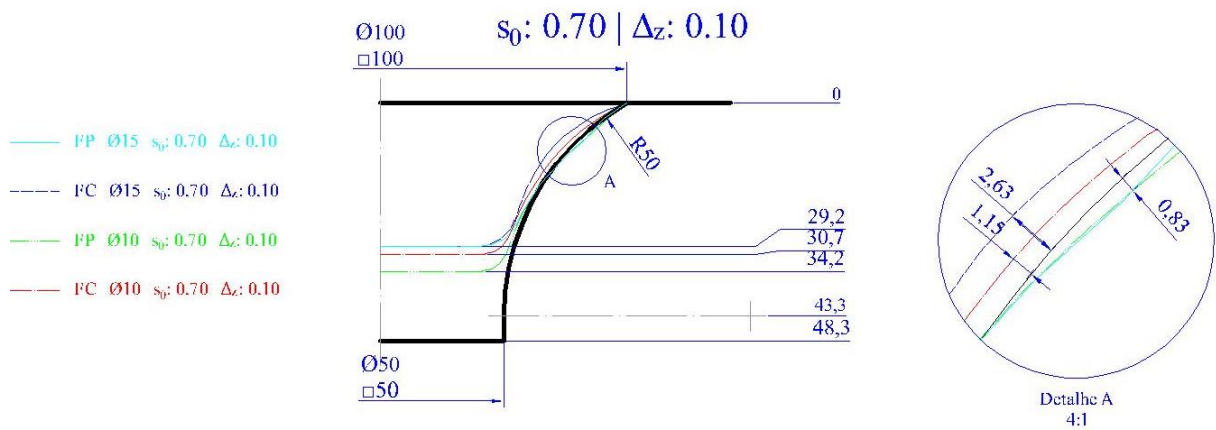


Figura 120: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,70 \text{ mm} \mid \Delta z: 0,10 \text{ mm}$

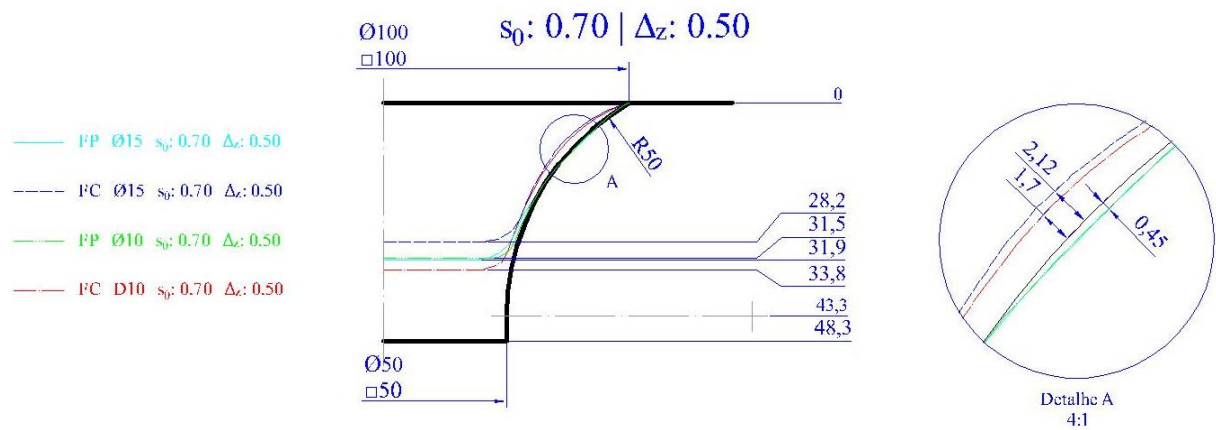


Figura 121: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,70 \text{ mm} \mid \Delta z: 0,50 \text{ mm}$

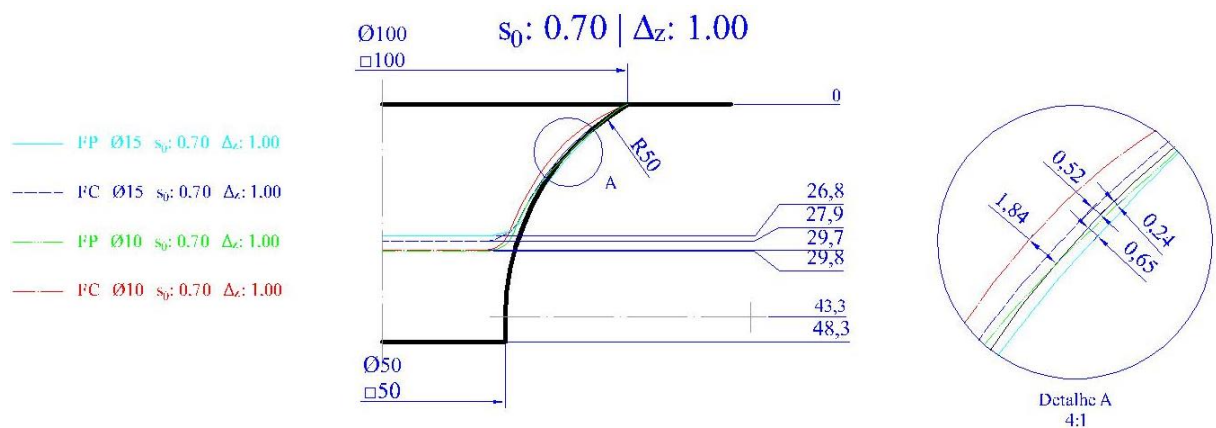


Figura 122: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 0,70 \text{ mm} \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$

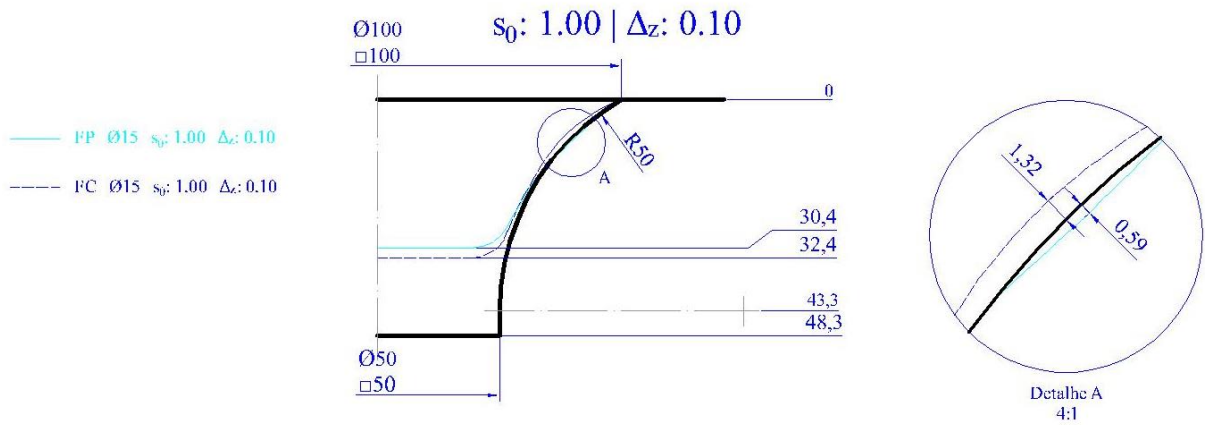


Figura 123: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 1,00 \text{ mm} \mid \Delta z: 0,10 \text{ mm}$

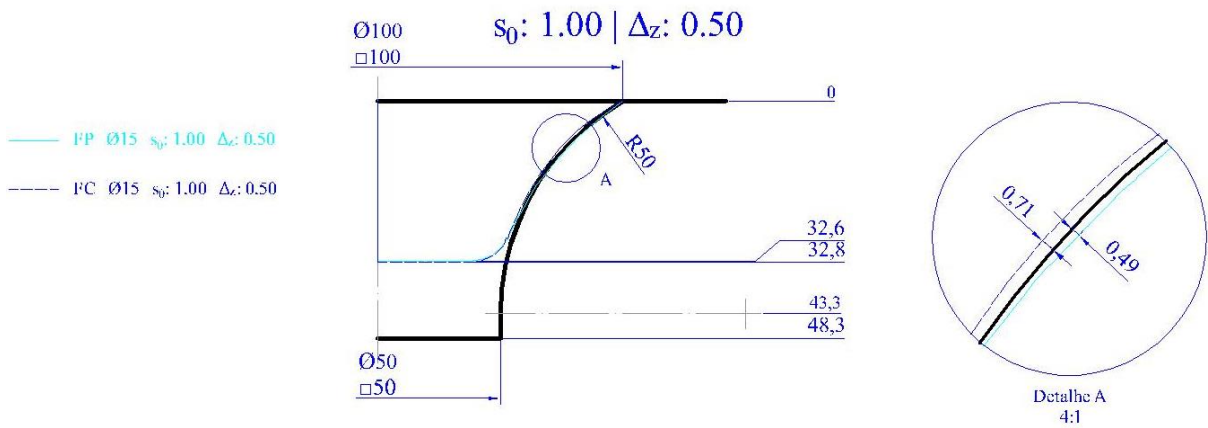


Figura 124: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 1,00 \text{ mm} \mid \Delta z: 0,50 \text{ mm}$

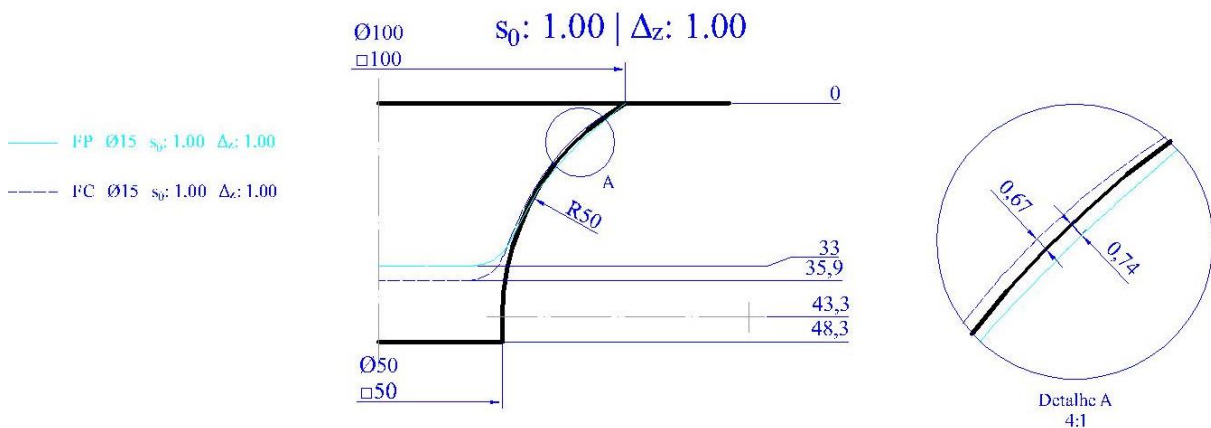


Figura 125: Perfis dos experimentos SPIF: $s_0: 1,00 \text{ mm} \mid \Delta z: 1,00 \text{ mm}$