

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULO SERGIO OLIVIO FILHO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA PREDIÇÃO DE FORÇAS NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO**

CURITIBA

2017

PAULO SERGIO OLIVIO FILHO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA PREDIÇÃO DE FORÇAS NO PROCESSO DE
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

CURITIBA

2017

O49a Olivio Filho, Paulo Sergio
Avaliação numérica da predição de forças no processo de estampagem incremental de ponto único / Paulo Sergio Olivio Filho. – Curitiba, 2017. 115f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes.
Bibliografia: p. 106-111.

1. Estampagem (Chapas de metal). 2. Elemento Finito. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor Prestes. III Título.

CDD: 671.334



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA
Código CAPES: 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de PAULO SERGIO OLIVIO FILHO, intitulada: "AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA PREDIÇÃO DE FORÇAS NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua

Aprovação

Curitiba, 25 de Maio de 2017.

PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

LIRIO SCHAEFER
Avaliador Externo (UFRGS)

RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES
Avaliador Interno (UFPR)

Dedico este trabalho primeiramente a
minha querida esposa e filha, que sempre
estiveram ao meu lado, me apoiando e me
ajudando, e também aos meus pais,
amigos e professores que sempre
estiveram comigo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha amiga e esposa Émillyn e a minha filha Ágata, por estarem sempre ao meu lado, sempre me apoiar e me acalmar nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes, pela ajuda e orientação no desenvolvimento deste trabalho e por acima de tudo ser meu amigo.

A minha mãe, meu pai, minha irmã, amigos e parentes que me apoiaram nas minhas escolhas, por sempre acreditarem nos meus sonhos e por serem parte de mim e me fazer feliz.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e proporcionaram momentos de distração e alegria.

Aos meus colegas e a todo o grupo do Laboratório de Conformação Mecânica da UFPR, que contribuíram e foram fundamentais nesta caminhada.

Ao professor Dr. Dalberto Dias da Costa e a todo grupo do Laboratório de Processos de Fabricação, que me ajudaram na realização dos trabalhos experimentais.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec), pela paciência, orientação e ajuda para a construção dos caminhos necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec), pela oportunidade e por propiciarem as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao PG-Mec e ao Marcio Brandani Tenório pelo apoio.

A CAPES pelo apoio financeiro nos estudos.

“Se você acredita que uma coisa é impossível, você a tornará impossível.

Seja como a água que abre caminhos nas pedras, não se oponha ao obstáculo, contorne-os.

Saber não é o bastante, é preciso aplicar. Querer não é o suficiente é preciso fazer.”

(Bruce Lee)

RESUMO

Dentre diversos processos de conformação de chapas aplicados a indústria metal mecânica, a estampagem incremental de chapas tem um grande potencial em aplicações industriais devido à sua simplicidade. Com interesse por esse processo, estudos científicos e aplicações práticas tem crescido constantemente nos últimos anos. Desta forma, estudando este tipo de processo de fabricação, neste trabalho avaliou-se a precisão da simulação computacional no processo de estampagem incremental de ponto único a fim de determinar os esforços requeridos aplicado ao conjunto máquina-ferramental e produto, com aplicação experimental de diferentes parâmetros de processos. Os ensaios experimentais foram realizados com um centro de usinagem CNC de três eixo, ferramentais e um dinamômetro Kistler modelo 9139 AA para obtenção dos dados de força. Neste estudo aplicaram-se parâmetros ao processo, analisando a mudança do ângulo de parede e o passo vertical na direção Z, aplicado em conjunto com outros parâmetros fixos para a conformação de peças em aço no formato de cone truncado. Partindo de uma metodologia experimental, foram retirados os dados de força normais na direção Z e forças cisalhantes na direção X e Y e posteriormente tratados para se comparar e avaliar a predição das forças com os resultados obtidos na modelagem por elementos finitos via “software” Abaqus®. Na simulação foram adotadas as propriedades mecânicas, leis constitutivas, critério de escoamento e um modelo de endurecimento isotrópico para alimentação dos dados do material ao modelo numérico. Para o modelo numérico foi utilizada modelagem explícita com o elemento tipo casca (S4R) com integração reduzida e refino definido em estudo. Os resultados mostraram que os comportamentos do material devido aos diferentes parâmetros do processo avaliado foram previstos pelo modelo numérico na análise das forças pico (Fz_p), forças normais médias (Fz_m) e forças cisalhantes médias (Fxy_m). Tanto os dados experimentais quanto numéricos mostraram que o aumento do ângulo de parede e do passo vertical na direção Z, contribuíram para o aumento da força de deformação necessária para se moldar a peça. Conforme estudos os erros entre o experimento e o simulado estão de acordo com as referências estudadas.

Palavras-chave: Estampagem Incremental de Ponto Único (SPIF). Predição de Forças. Análise por Elemento Finito.

ABSTRACT

Among several sheet metal forming processes applied to the mechanical industry, the incremental sheet forming has immense potential in industrial applications due to its simplicity. With interest in this process, scientific studies and practical applications have grown steadily in recent years. In this work, it analyzed the computational simulation in the single-point incremental forming process to determine the necessary efforts to the machine, tools and products, with experimental application of different parameters of processes. The experimental tests were performed with a three axis CNC machining center, tooling and a dynamometer Kistler model 9139 AA to obtain force data. In this study were applied to the process, analyzing the change of the vertical angle and the vertical pitch in the direction Z, applied in conjunction with other fixed parameters for the conformation of steel pieces in truncated cone shape. From an experimental methodology, the normal force data in the Z direction and shear forces in the X and Y direction were extracted and later treated to compare and evaluate the force prediction with the obtained results in finite element modeling using software Abaqus[®]. In the simulation, the mechanical properties, constitutive laws, flow criterion and an isotropic hardening model were adopted to feed the material data to the numerical model. For the numerical model, explicit modeling with the shell element (S4R) with reduced integration and refining defined in the study was used. (F_{z_m}), average normal forces (F_{z_m}) and average shear forces (F_{xy_m}). The results showed that the behavior of the different parameters of the evaluated process was predicted by the numerical model in the analysis of the peak forces. Both the experimental and numerical data showed the increase of the vertical angle and the vertical pitch in the Z direction contributed to the increase of the force deformation required to mold the part. According to studies the errors between the experiment and the simulation are in agreement with the studied references.

Keywords: Single Point Incremental Forming (SPIF). Prediction forces. Finite Element Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL CONVENCIONAL. (A) PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO (SPIF), (B) PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO DUPLO (TPIF).	26
FIGURA 2 – PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL HIBRIDA. (A) TPIF COM MATRIZ PARCIAL (TPIFPD); (B) TPIF COM MATRIZ COMPLETA (TPIFFD), (C) SPIF COM PRESSÃO DE FLUIDO (SPIHF).	27
FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS.	28
FIGURA 4 - PRINCÍPIOS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO.	29
FIGURA 5 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DO ALUMÍNIO 1100, IMPRESSO EM ESCALA LOGARÍTMICA.	35
FIGURA 6 - CRITÉRIO DE ESCOAMENTO DE HUBER–MISES–HENCKY PARA TENSÃO PLANA.	39
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.	46
FIGURA 8 - MICROSCÓPIO ÓTICO OLYMPUS BX51.	48
FIGURA 9 - MÁQUINA DE TRAÇÃO EMIC MODELO DL10000.	49
FIGURA 10 – CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.	50
FIGURA 11- DURÔMETRO ROCKWELL VERSITRON®.	50
FIGURA 12 - CENTRO DE USINAGEM ROMI DISCOVERY MODELO 4022.	52
FIGURA 13 - A) DINAMÔMETRO KISTLER TIPO 9139AA; B) AMPLIFICADOR DE CARGA KISTLER MODELO 5070A10100.	54
FIGURA 14 - DISPOSITIVO ISF E DINAMÔMETRO. (A) MODELO DESENHADO EM CAD; (B) MODELO REAL INSTALADO.	55
FIGURA 15 - FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO PRESA AO MANDRIL.	56
FIGURA 16 - CORPO DE PROVA.	57
FIGURA 17 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCESSO ISF.	58
FIGURA 18 - TELA DE AJUSTE E CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA.	58
FIGURA 19 - SEQUÊNCIA DE PREPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO EM MÁQUINA CNC. (A) ALINHAMENTO DA PLACA, (B) FIXAÇÃO DO DISPOSITIVO ISF E DINAMÔMETRO.	59

FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO DO ZERO PEÇA E ZERO FERRAMENTA. (A) ZERO MÁQUINA, (B) ZERO DA FERRAMENTA NA PEÇA, (C) PERCURSO DA FERRAMENTA.....	60
FIGURA 21 - ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS COM SOFTWARE ABAQUS®.....	61
FIGURA 22 - METALOGRAFIA DOS CORPOS DE PROVA.....	66
FIGURA 23 - CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO.....	67
FIGURA 24 – CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.....	68
FIGURA 25 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA MÉDIA DO AÇO CS-A.	70
FIGURA 26 - CORPOS DE PROVA ENSAIADOS DO AÇO CS-A AZM 150.....	74
FIGURA 27 - GRÁFICO DAS FORÇAS FX, FY E FZ OBTIDAS PELO DINAMÔMETRO.....	75
FIGURA 28 - REGIÃO ÚTIL DAS CARGAS FX, FY E FZ.....	77
FIGURA 29 - REGIÃO ÚTIL PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS MÁXIMOS.. ..	78
FIGURA 30 - GOMETRIA DO MODELO COMPUTACIONAL DO PROCESSO SPIF. .	80
FIGURA 31 - ELEMENTOS ANALÍTICOS RIGIDOS, DISCRETOS RIGIDOS E DEFORMÁVEL.....	81
FIGURA 32 - CAMINHO DA FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO VIA MATLAB®.(A) VISTA SUPERIOR; (B) VISTA EM PERSPECTIVA.....	82
FIGURA 33 - TAMANHO GLOBAL DE MALHA.....	85
FIGURA 34 - CÁLCULO DO REFINO DE MALHA COM BASE NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA.....	86
FIGURA 35 - CALCULO DO REFINO DE MALHA COM BASE NA FORÇA FZ MÉDIA.....	86
FIGURA 36 - MALHA USADA PARA ESTAMPAGEM DO CONE TRUNCADO.....	87
FIGURA 37 - FORÇA DESENVOLVIDA NA DIREÇÃO X COM VÁRIOS COEFICIENTES DE ATRITO.....	88
FIGURA 38 - FORÇA DESENVOLVIDA NA DIREÇÃO Y COM VÁRIOS COEFICIENTES DE ATRITO.....	89
FIGURA 39 - FORÇA DESENVOLVIDA NA DIREÇÃO Z COM VÁRIOS COEFICIENTES DE ATRITO.....	89

FIGURA 40 - FORÇAS PICO EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS. (A) FORÇAS EXPERIMENTAIS, (B) FORÇAS SIMULADAS	91
FIGURA 41 - ERRO NA PREDIÇÃO DE FORÇAS PICO SIMULADAS.	92
FIGURA 42 - FORÇAS PICO EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO. (A) FORÇAS PICO PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,4$; (B) FORÇAS PICO PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,8$	93
FIGURA 43 - FORÇAS NORMAIS MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS. (A) FORÇAS EXPERIMENTAIS, (B) FORÇAS SIMULADAS.....	94
FIGURA 44 - FORÇAS NORMAIS MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO. (A) FORÇAS NORMAIS MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,4$; (B) FORÇAS NORMAIS MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,8$	95
FIGURA 45 - ERRO NA PREDIÇÃO DAS FORÇAS NORMAIS MÉDIAS SIMULADAS.....	96
FIGURA 46 - FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS. (A) FORÇAS EXPERIMENTAIS, (B) FORÇAS SIMULADAS.....	98
FIGURA 47 - ERRO NA PREDIÇÃO DAS FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS SIMULADAS.....	99
FIGURA 48 - FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO. (A) FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,4$; (B) FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,8$	100
FIGURA 49 - FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES VALORES DE ATRITO.	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL DE BASE.....	47
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO	47
TABELA 3 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	51
TABELA 4 - ESPECIFICAÇÕES DO CENTRO DE USINAGEM ROMI DISCOVERY MODELO 4022.....	53
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO ASTM A792 CS-A AZM 150 VIA EDX.	65
TABELA 6 - DUREZA DA CHAPA ASTM A792M CS-A SEM REVESTIMENTO.....	66
TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO CS-A AZM 150.....	68
TABELA 8 - COEFICIENTES DE ENCRUAMENTO E COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA.	69
TABELA 9 - COEFICIENTE DE ANISOTROPIA DO MATERIAL.....	71
TABELA 10 – ANISOTROPIA NORMAL E PLANAR DO MATERIAL.....	72
TABELA 11 - PARÂMETROS DE ANISOTROPIA DE HILL'48.....	73
TABELA 12 - TAMANHO GLOBAL DE MALHA EM NÚMERO DE ELEMENTOS....	85
TABELA 13 - FUNÇÃO LINEAR PARA FORÇAS FXY_M.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CAD	- Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador)
CAE	- Computer Aided Engineering (Engenharia Auxiliada por Computador)
CAM	- Computer Aided Manufacturing (Manufatura Assistida por Computador)
CISF	- Conventional Incremental Sheet Forming (Estampagem Incremental Convencional)
CNC	- Computer Numeric Control (Comando Numérico Computadorizado)
CSN	- Companhia Siderúrgica Nacional
EDX	- Energy-dispersive X-ray (Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva)
FC	- Ferramenta de Conformação
FE	- Finite Element (Elemento Finito)
FEA	- Finite Element Analysis (Análise de Elemento Finito)
FEM	- Finite Element Method (Método de Elemento Finito)
HISF	- Hybrid Incremental Sheet Forming (Estampagem Incremental Híbrida)
HSLA	- High-Strength Low-Alloy Steel (Alta Resistência e Baixa Liga)
IF	- Interstitial Free (Livre de Intersticiais)
ISF	- Incremental Sheet Forming (Estampagem Incremental de Chapas)
LAMATS	- Laboratório de Materiais e Superfícies
NC	- Numeric Control (Comando Numérico)
pC	- Piezoelectric Coefficient (Coeficiente Piezoelétrico).
pg	- Página
SPIF	- Single-point Incremental Forming (Estampagem Incremental de Ponto Único)
SPIHF	- Single-point incremental hydro-forming (Estampagem Incremental de Ponto Único com Pressão de Fluido)
TPIF	- Two-point Incremental Forming (Estampagem Incremental de Ponto Duplo)
TPIFFD	- Two-point Incremental Forming with Full Die (Estampagem

Incremental de Ponto Duplo com Matriz Total)

TPIFPD - Two-point Incremental Forming with Partial Die (Estampagem
Incremental de Ponto Duplo com Matriz Parcial)

UFPR - Universidade Federal do Paraná

LISTA DE SIMBOLOS

Alfabeto Grego

α	-	Ângulo de parede
α_1	-	Ângulo de parede medido
Δr	-	Anisotropia planar
ε	-	Deformação verdadeira
ε_w	-	Deformação verdadeira ao longo da largura de um CP de tração
ε_h	-	Deformação verdadeira ao longo da espessura do mesmo CP
δ	-	Densidade
μ	-	Modulo de Rigidez
σ	-	Tensão verdadeira
σ_{es1}^2	-	Tensão de escoamento do material na direção 1
σ_{es2}^2	-	Tensão de escoamento do material na direção 2
σ_{es3}^2	-	Tensão de escoamento do material na direção 3
σ_{es23}^2	-	Tensão de escoamento do material na direção 23
σ_{es31}^2	-	Tensão de escoamento do material na direção 31
σ_{es12}^2	-	Tensão de escoamento do material na direção 12
σ_{11}	-	Tensão no material na direção 11
σ_{22}	-	Tensão no material na direção 22
σ_{33}	-	Tensão no material na direção 33
σ_{23}	-	Tensão no material na direção 23
σ_{31}	-	Tensão no material na direção 31
σ_{12}	-	Tensão no material na direção 12
σ_0	-	Tensão de escoamento do material
σ_1	-	Tensão principal 1
σ_2	-	Tensão principal 2
σ_3	-	Tensão principal 3
u	-	Coefficiente de Poisson

Alfabeto Latino

Al	-	Alongamento total
dt	-	Diâmetro da ferramenta

dz	-	Passe vertical ou Avanço incremental no eixo z
E	-	Modulo de Elasticidade
F	-	Constante de Hill'48 para escoamento anisotrópico
Fr	-	Força Resultante
Fx	-	Força no eixo X
Fy	-	Força no eixo Y
Fz	-	Força no eixo Z
Fxy	-	Força resultante XY
Fxy_m	-	Forças resultante média XY
Fz_m	-	Força média no eixo Z
Fz_p	-	Força máxima no eixo Z ou Força pico
G	-	Constante de Hill'48 para escoamento anisotrópico
H	-	Constante de Hill'48 para escoamento anisotrópico
K	-	Constante de resistência da lei de Hollomon
l_0	-	Comprimento inicial do CP
l_f	-	Comprimento final do CP
L	-	Constantes de Hill'48 para escoamento anisotrópico
LE	-	Limite de Escoamento
LR	-	Limite de Resistência
M	-	Constantes de Hill'48 para escoamento anisotrópico
n	-	Coefficiente de encruamento da lei de Hollomon
N	-	Constante de Hill'48 para escoamento anisotrópico
r_{0°	-	Anisotropia na direção de laminação 0°
r_{45°	-	Anisotropia na direção de laminação 45°
r_{90°	-	Anisotropia na direção de laminação 90°
R_{11}	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R_{22}	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R_{33}	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R_{12}	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R_{13}	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
R_{23}	-	Taxa de tensão para escoamento anisotrópico
t	-	Espessura da chapa
t_f	-	Espessura final da chapa ou corpo de prova

- t_0 - Espessura inicial da chapa ou corpo de prova
- w_0 - Largura inicial do CP
- w_f - Largura final do CP
- W_p - Energia Hidrostática
- W_v - Energia Volumétrica
- W_f - Energia Desviatória

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVAS	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Geral.....	22
1.2.2	Objetivo Específico	23
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS (ISF)	25
2.1.1	Estampagem incremental de Ponto Único (SPIF)	28
2.1.1.1	Vantagens do processo SPIF	30
2.1.1.2	Desvantagens do processo SPIF	31
2.2	AÇOS REVESTIDOS	31
2.2.1	Revestimento 55% Al-Zn	32
2.2.1.1	Aplicabilidade do aço Galvalume.....	32
2.3	PROPRIEDADES DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM	33
2.3.1	Coeficiente de Encruamento	33
2.3.2	Anisotropia plástica.....	36
2.3.2.1	Coeficiente de anisotropia planar	37
2.3.2.2	Coeficiente de anisotropia normal	38
2.4	CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO.....	38
2.4.1	Critério de escoamento de Huber–Mises–Hencky	39
2.5	CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO ANISOTRÓPICO	41
2.5.1	Critérios de escoamento Anisotrópico HILL	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	45
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	46
3.2.1	Material.....	47
3.2.2	Composição Química do Substrato e Revestimento	47
3.2.3	Caracterização Microestrutural do Material	48
3.2.4	Ensaio de Tração.....	49
3.2.5	Ensaio de Dureza das Chapas	50
3.3	ENSAIO EXPERIMENTAL	51

3.3.1	Centro de Usinagem CNC	52
3.3.1.1	Programação NC	53
3.3.2	Dinamômetro	54
3.3.3	Dispositivo ISF	55
3.3.4	Ferramenta de Conformação.....	56
3.3.5	Peça Conformada.....	56
3.3.6	Montagem e Calibração do Sistema.....	57
3.3.7	Montagem e Calibração do Equipamento.....	59
3.3.8	Preparação e Aquisição de dados	60
3.4	PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL	61
3.4.1	Esquema de Integração.....	62
3.4.1.1	Integração implícita.....	62
3.4.1.2	Integração explícita.....	63
4	RESULTADOS, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E DISCUÇÕES	65
4.1	RESULTADOS	65
4.1.1	Composição Química do Material.....	65
4.1.2	Resultado do Ensaio de Dureza	65
4.1.3	Caracterização Microestrutural.....	66
4.1.4	Resultados do Ensaio de Tração.....	67
4.1.4.1	Curva Tensão - Deformação Verdadeira	69
4.1.4.2	Anisotropia Normal e Planar.....	71
4.1.4.3	Critérios de Escoamento Anisotrópico HILL'48	72
4.1.5	Resultados dos Experimentos Práticos	73
4.1.6	Dados Experimentais de força.....	74
4.1.6.1	Tratamento dos Valores de Força	76
4.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	78
4.2.1	Modelamento Computacional do Processo Experimental	79
4.2.1.1	Geometria do Modelo	79
4.2.1.2	Condições de Contorno	81
4.2.1.3	Malha e Refino do Elemento Finito.....	82
4.3	DISCUSSÃO	87
4.3.1	Análise de sensibilidade do atrito	87
4.3.2	Predição das Forças Pico.....	90
4.3.3	Predição das Forças Normais Médias	94

4.3.4	Predição das Forças Cisalhantes Médias.....	97
5	CONCLUSÃO.....	103
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
	REFERÊNCIAS.....	106
	APÊNDICE A – METALOGRAFIAS	112
	APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO NC DO CAMINHO DA FERRAMENTA....	113
	APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO DO CAMINHO DA FERRAMENTA....	114

1 INTRODUÇÃO

A conformação mecânica tem um papel de grande importância na indústria sendo um processo para produção de peças com excelentes propriedades mecânicas e com baixas perdas de material (SCHAEFFER, 2004). É importante observar que dentre os muitos processos usados na indústria metal mecânica, a estampagem incremental de chapas (ISF) tem um grande potencial em aplicações industriais devido à sua simplicidade, a sua possibilidade de ser levada a cabo por instalações convencionais utilizando mesmo ferramental e equipamentos para a fabricação de perfis de formatos variados, excluindo a necessidade de matrizes, tornando viável a produção de pequenos lotes de peças e particularmente a produção de protótipos (FRITZEN, 2012; CASTELAN, 2010; AERENS, EYCKENS, *et al.*, 2010).

A estampagem incremental de chapas é um processo no qual um produto ou peça é obtido através da deformação plástica local e progressiva, produzida por uma ferramenta de cabeça esférica, pressionada contra uma chapa ao longo de uma trajetória conveniente, a qual define a geometria e forma final ao produto (FONTANARI, BENEDETTI, *et al.*, 2012). Esse processo feito por intermédio de uma ferramenta de cabeça esférica rotativa com ponto único foi patenteado por Leszak em 1967, muito antes do processo ser tecnologicamente viável (SÁ DE FARIAS, MARABUTO, *et al.*, 2014). No entanto, o desenvolvimento desse processo só teve início na década de 1990 no Japão, e seguidamente, a pesquisa de interesse mudou-se para a Europa, coincidindo com o surgimento das máquinas CNCs e o desenvolvimento de produtos e softwares CAD / CAM (GUZMÁNA, GUC, *et al.*, 2012).

O impacto potencial dessa tecnologia tem sido amplamente reconhecido e o interesse em suas aplicações práticas tem crescido constantemente nos últimos vinte anos. Vários estudos experimentais, numéricos e analíticos foram publicados para avaliar os pontos cruciais da tecnologia. Alguns aspectos do processo de conformação tradicional de chapas de metal ocorrem também no processo de ISF, tais como, por exemplo, o fenômeno de retorno elástico (springback), o que influencia diretamente na precisão dimensional da peça; as condições de deformação plástica locais, influenciando na espessura da chapa, podendo levar ao

aparecimento de fissuras (FILICE, MICARI e AMBROGIO, 2006). As análises desses aspectos são bastante complexas no processo ISF do que nos processos tradicionais de conformação de chapa, sendo uma tecnologia no qual se baseia uma sequência de deformações plásticas localizadas, dependentes de vários fatores, que não são facilmente implementados em uma formulação teórica e modelagem do problema (JACKSON e ALLWOOD, 2009; MARTINS, BAY, *et al.*, 2008; FANTINI, MICARI e FILICE, 2002).

Todavia, um grande esforço tem sido feito para melhorar a simulação do processo de ISF e se obter uma melhor compreensão dos mecanismos fundamentais envolvidos para prever o comportamento do material. Assim, a modelagem desse processo através do Método dos Elementos Finitos (FEM) continua sendo uma tarefa exigente. Devido ao tamanho pequeno da ferramenta de conformação e ao complexo mecanismo de deformação, um refinado elemento de malha é necessário a fim de alcançar a convergência e precisão (FONTANARI, BENEDETTI, *et al.*, 2012). Usando um esquema de modelagem implícita seria possível obter um alto tempo de processamento comparado com um esquema de modelagem explícita (BAMBACH, AMES, *et al.*, 2005), devido a contínua alternância de condições de contato. Em geral, para esquemas explícitos, graças a métodos numéricos como escala de massa e/ou escala de tempo, é possível reduzir significativamente o tempo de computação, sem uma notável deterioração da precisão FEM. Um estudo abrangente deste fenômeno requer a utilização de elementos sólidos, mas o tempo de simulação pode ser extremamente alta mesmo para geometrias bastante simples (EYCKENS, BELKASSEM, *et al.*, 2010).

De modo a ultrapassar esta barreira, a fim de prever de forma eficiente o resultado do processo, análises numéricas baseadas em elementos finitos (FE) e simulação computacional podem ser bastante eficazes (FONTANARI, BENEDETTI, *et al.*, 2012; YAMASHITA, GOTOH e ATSUMI, 2008).

1.1 JUSTIFICATIVAS

Dependendo do material e variáveis de processo, forças consideráveis podem ocorrer durante o processo de conformação de uma peça. Esse fenômeno é observado em diversos processos convencionais. Sendo assim, é necessário um bom conhecimento destas forças de conformação para contribuir com a preservação

das ferramentas e equipamentos utilizados no processo de estampagem incremental.

No processo de conformação de chapas por análise de elementos finitos (FEA) tem sido adotada com sucesso em diversas aplicações. Para a modelagem e simulação do processo ISF, alguns pontos cruciais precisam ser resolvidos, como por exemplo, os parâmetros de modelagem e leis de endurecimento utilizadas para se exprimir o comportamento do material durante a trajetória gerada pela ferramenta, a qual produz um histórico complexo de deformação plástica, levando a um acúmulo de tensão progressiva para construção da geometria final (HENRARD, BOUFFIOUX, *et al.*, 2010). Contudo, a simulação de elementos finitos (FE) se torna complexa e altamente não linear, exigindo modelos 3Ds de peças com geometrias simétricas para minimizar o custo computacional. Esse custo computacional, uma vez que, se comparado com processos de conformação convencionais, dispensa tempo, requerendo uma análise dinâmica difícil gerada pelo caminho da ferramenta. Para este efeito, a utilização de esquemas de integração explícita é descrita na literatura, como sendo o melhor, devido ao uso de eventos não lineares fortes durante o processo, o que muitas vezes, por métodos implícitos não conseguem convergir. (FONTANARI, BENEDETTI, *et al.*, 2012).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este projeto visa como objetivo geral, a análise e comparação de experimentos práticos do processo de estampagem incremental de ponto único (SPIF), realizados nos laboratórios da UFPR, utilizando-se de modelos computacionais com o uso do software de análise de elementos finitos Abaqus®, a fim de investigar a precisão da simulação computacional desenvolvida especificamente para se configurar um método de definição confiável dos parâmetros do processo, com o intuito de se determinar os esforços requeridos no processo de estampagem incremental, aplicados ao conjunto máquina/ferramental necessários a conformação.

1.2.2 Objetivo Específico

Visando atender o objetivo geral do projeto de pesquisa, faz se necessário as seguintes etapas de estudo:

- 1) Analisar e definir as propriedades físicas e mecânicas do material, necessárias para a modelagem e análise numérica do processo;
- 2) Realizar ensaios experimentais para obter valores reais de cargas aplicados ao conjunto maquina/ferramenta.
- 3) Construção do modelo em CAD
- 4) Geração do caminho da ferramenta conforme programação CAM em coordenadas cartesianas para utilização em software CAE;
- 5) Construção do modelo em software Abaqus[®]/CAE, para simulação do modelo em elementos finitos, definindo condições de contorno, propriedades físicas, parâmetros de contato, caminho da ferramenta, etc.;
- 6) Avaliação e definição do tipo de refino necessário da malha adaptativa para análise numérica do processo;
- 7) Análise dos parâmetros do modelo e comparação das cargas geradas pela ferramenta de conformação com os dados experimentais;
- 8) Verificação do erro relativos entre os dados extraídos do modelo computacional e os dados experimentais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividido em 6 tópicos, sendo no primeiro tópico a apresentação e descrição problema, relatando estudos e abordagens praticadas para a aquisição e predição dos dados, explicando sucintamente o processo de estampagem incremental, a aplicação dessa tecnologia, os conceitos e expondo os objetivos almejados e justificativas para a escolha do tema.

No tópico 2 é feita uma revisão bibliográfica apresentando o processo de estampagem incremental com ênfase no processo de estampagem incremental de ponto único (SPIF), e as propriedades do processo de estampagem necessários a simulação computacional.

No tópico 3 estão descritos os materiais e métodos utilizados na caracterização do material, procedimento experimental e na simulação computacional.

No tópico 4 são apresentados os resultados preliminares, da caracterização do material, os ensaios realizados para o experimento prático, procedimentos experimentais validados por VALLE (2016), o estudo do modelo, análise prévias do modelo simulado, simulação numérica computacional e a análise comparativa com os dados experimentais obtidos pelo dinamômetro.

No tópico 5, são feitas as considerações finais e a conclusão da pesquisa, buscando consolidar as respostas necessárias para os respectivos objetivos e, adicionalmente, as sugestões para trabalhos futuros são mostradas no tópico 6.

Ao final são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas nesse trabalho realizadas de documentos, artigos, monografias, dissertações e teses, e na sequência, os apêndices que trazem informações complementares e primordiais aplicadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS (ISF)

A estampagem incremental é uma tecnologia bastante recente no campo de chapas conformadas. Esta tecnologia permite que protótipos ou pequenos lotes sejam fabricados em aço ou polímeros diretamente a partir de um modelo CAD 3D e controlado numericamente por uma máquina CNC, sem o uso de ferramentas convencionais de conformação. No sistema de manufatura computadorizada a trajetória gerada é executada pela ferramenta de conformação (FC), na qual desloca-se nas três direções do plano cartesiano de forma incremental (TSCHAETSCH, 2006). Segundo Marabuto, et al. (2011) a estampagem incremental é um processo de conformação de chapas de baixo custo, com crescente aplicação na prototipagem rápida, biomecânica e produção de pequenos lotes de peças em chapas, sendo atualmente compreendida e implementada em estudos científicos nas áreas numéricas e experimentais.

As análises em termos numéricos, parte diretamente para uso do método de elementos finitos uso de softwares comerciais, como ANSYS®, LSDYNA®, ABAQUS® e SOLIDWORKS®, utilizando-se de modelagem implícita e explícita. (NARANJO, MIGUELA, *et al.*, 2015; GÓMEZ-LÓPEZ, MIGUEL, *et al.*, 2013; THIBAUD, BEN HMIDA, *et al.*, 2012). Em estudos comparativos entre forças de deformação experimental versus simuladas através de modelagem implícita, Aerens, Eyckens *et al.*, (2010) apresentou erros entre 1% a 26% com diferentes variáveis de processo escolhidas. Em outros trabalhos embora o erro predição não tenha sido calculado, os dados simulados apresentaram uma tendência similar aos dados experimentais prevendo as cargas aplicadas no processo (NARANJO, MIGUELA, *et al.*, 2015; FONTANARI, BENEDETTI, *et al.*, 2012). No entanto, modelos de previsão do comportamento do material, características térmicas do processo, coeficiente de atritos e refino de malha ainda fazem parte de estudos recentes para correções desses modelos de previsão.

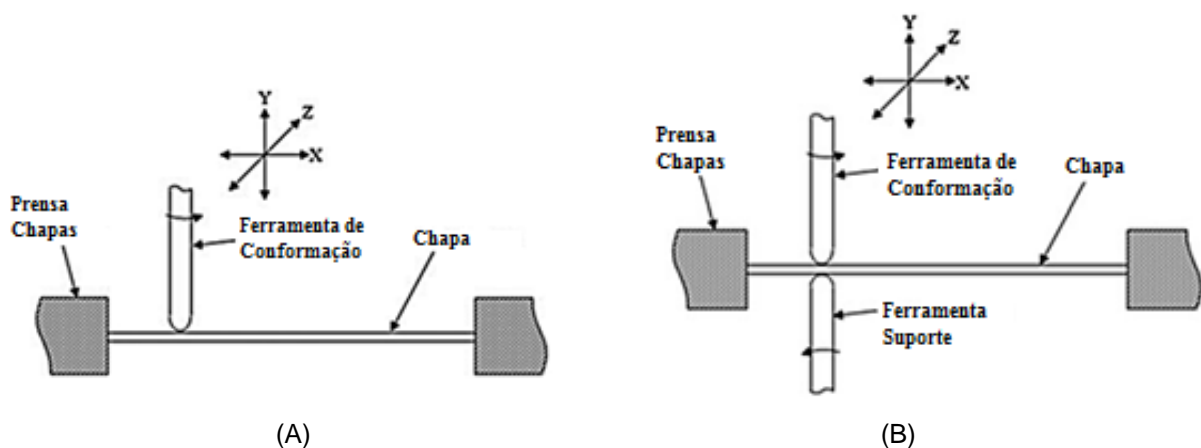
Em termos experimentais, na maioria dos equipamentos usados para a estampagem incremental resultam da adaptação de máquinas CNC que executam o processo com uma gama de aplicações em termos de materiais e geometrias

(JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005). No entanto, novas pesquisas sugeriram a partir de 2002, mostrando o uso de robôs no processo de estampagem incremental de ponto duplo (TPIF), os quais apresentaram grande vantagem em termos de área de trabalho e flexibilidade. (EMMENS, SEBASTIANI e BOOGAARD, 2010).

Embora exista uma gama de tipos e variedades de processos de estampagem incremental de chapas, os processos SPIF, TPIF e outras variações deles são amplamente relatadas por outros autores da área (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005; LIHUI, KANGNING, *et al.*, 2014; CAVALER, 2010). No entanto, em pesquisas recentes apresentadas por Kumar e Kumar (2015), começou-se a classificar os processos de estampagem incremental de chapas (ISF) em dois grupos principais, sendo eles, a estampagem incremental convencional (CISF) e estampagem incremental híbrida (HISF),

Nos processos CISF, geralmente uma chapa de metal é deformada pela progressiva deformação plástica localizada, usando uma ou duas ferramentas de cabeça hemisférica / esférica simples, onde o caminho da FC é controlado por uma máquina CNC ou braço robótico. A FC se move sobre a superfície da folha e resulta na forma final do produto. Neste tipo de processo não existe nenhuma outra ferramenta ou pressão externa aplicada para conformar a chapa na forma desejada. Os processos de estampagem incremental convencional são classificados em processo de estampagem incremental de ponto simples (SPIF) e processo de estampagem incremental de ponto duplo (TPIF), ilustrados nas FIGURAS 1(A) e 1(B) (KUMAR e KUMAR, 2015).

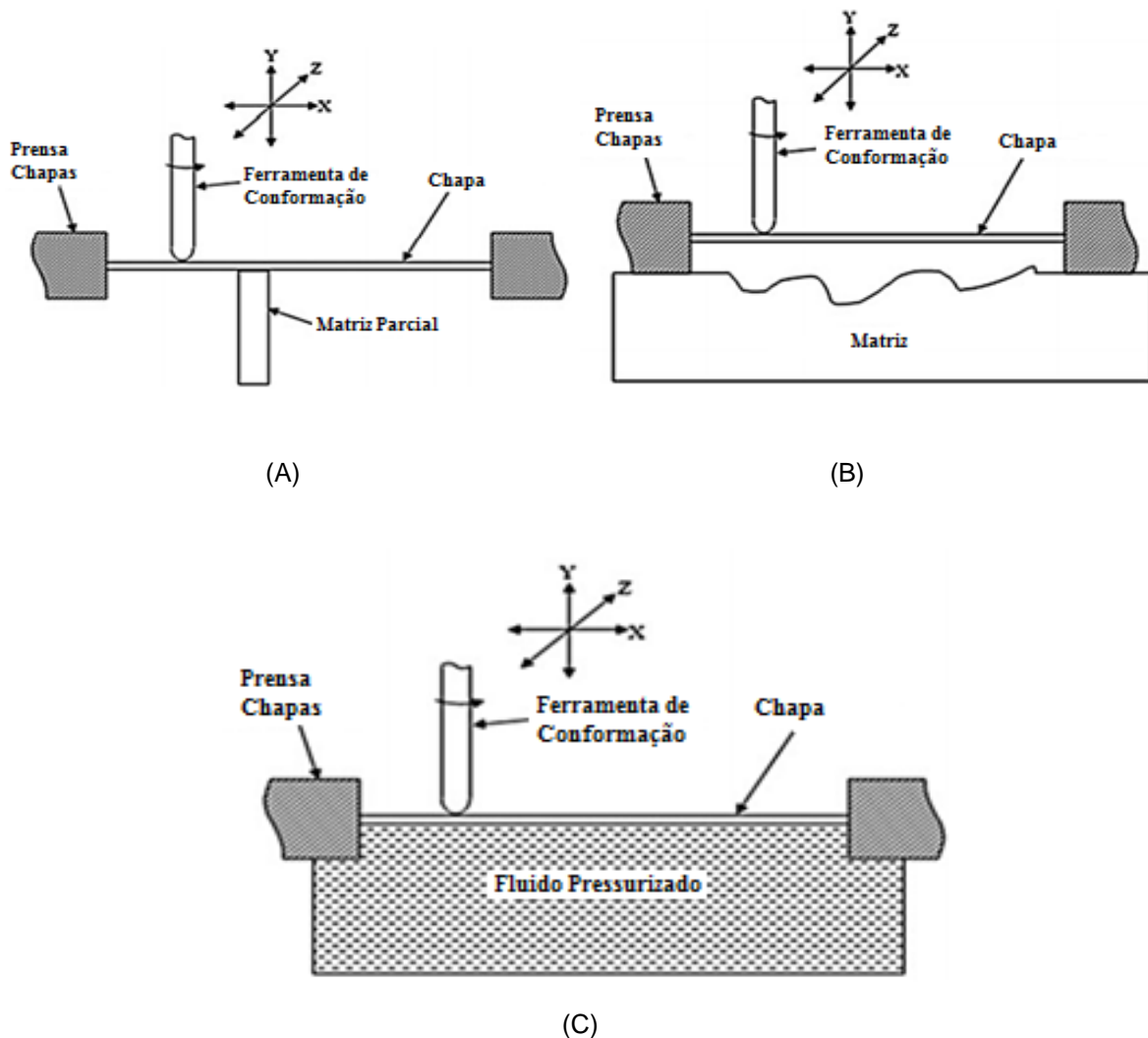
FIGURA 1 – PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL CONVENCIONAL. (A) PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO (SPIF), (B) PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO DUPLO (TPIF).



FONTE: Adaptado de (KUMAR e KUMAR, 2015).

Os processos HISF são formas modificadas dos processos de estampagem incremental convencional. Nestes processos, a FC se move sobre a superfície da chapa, enquanto o outro lado da superfície da chapa é suportado por um sistema hidráulico com fluido pressurizado, ou uma matriz parcial ou matriz completa com o intuito de se obter a forma e tamanho desejado no processo de estampagem incremental híbrida. Os processos híbridos podem ser classificados em processo de SPIF com pressão de fluido; TPIF com matriz parcial e TPIF com matriz completa, ilustrados nas FIGURAS 2(A), 2(B) E 2(C) (KUMAR e KUMAR, 2015).

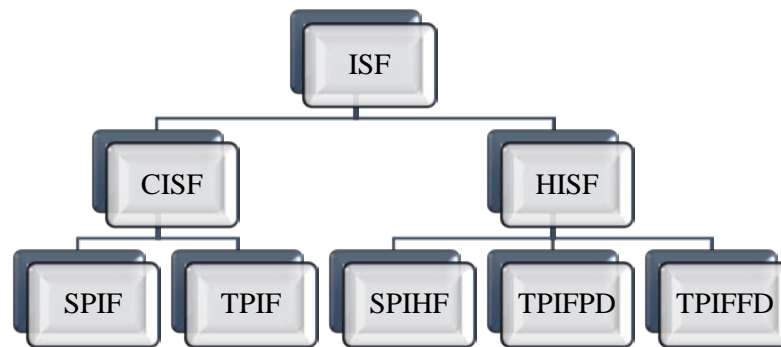
FIGURA 2 – PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL HIBRIDA. (A) TPIF COM MATRIZ PARCIAL (TPIFPD); (B) TPIF COM MATRIZ COMPLETA (TPIFFD), (C) SPIF COM PRESSÃO DE FLUIDO (SPIHF).



FONTE: Adaptado de KUMAR e KUMAR (2015).

A classificação do processo de estampagem incremental de chapas segundo Kumar e Kumar (2015) pode ser melhor observada no esquema apresentado na FIGURA 3.

FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS.



FONTE: Adaptado de KUMAR e KUMAR (2015).

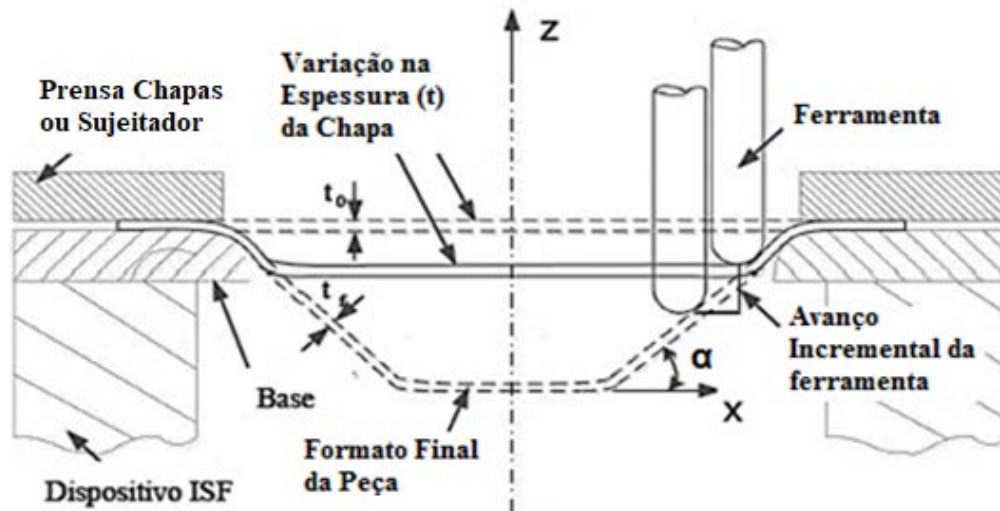
2.1.1 Estampagem incremental de Ponto Único (SPIF)

O processo estampagem incremental de ponto único (SPIF) é um processo de conformação como a capacidade de produzir peças simétricas e não-simétricas. Neste processo a chapa é fixada em um suporte universal estacionário, o qual por uma FC controlada por uma máquina CNC é dado a forma e o contorno da geometria desejada. Esse processo é utilizado para conformar chapas de metal ou polímero dentro de formas complicadas sem o uso de matrizes, usando uma fresadora CNC com três eixos junto com um software CAM para definir e controlar a ferramenta de estampagem (JESWIET, MICARI, *et al.*, 2005).

Nesse processo inicialmente fixa a chapa em um suporte na mesa da fresadora por um grampo ou prensa chapas, e fixa a ferramenta cilíndrica de estampagem de ponta semiesférica ou esférica na árvore da máquina. A partir do caminho pré-determinado e programado, a ferramenta movimenta-se de forma incremental nas direções X e Y e Z para dentro da chapa, gerando pequenas deformações plásticas progressivas. Durante o processo, a ferramenta descende em pequenos passes ou incrementos “dz” a cada volta, em direção ao do centro da peça através dos incrementos “dx” e “dy”, conforme observado na FIGURA 4. Dessa forma a chapa estirada reduz sua espessura inicial t_0 para t_f na superfície angular da

chapa, devido ao ângulo de parede alfa (α) definido em relação a horizontal (CAVALER, 2010).

FIGURA 4 - PRINCÍPIOS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO.



FONTE: Adaptado de YANLE, ZHAOBING, *et al.* (2014).

Nos métodos clássicos de estampagem de chapas, a zona de deformação é muito pequena e estritamente limitada a área de contato entre a ferramenta e a peça de trabalho. Contudo, durante a deformação a constância de volume conduz a uma relação direta entre a espessura da parede e o ângulo de parede, o qual tem sido comumente referenciado como “lei do seno” (EQUAÇÃO 1) e que leva a um afinamento da chapa, ou até falha no caso de uso de grandes ângulos em um único passe. A lei do seno, válida para a estampagem incremental de ponto único, é definida por (JACKSON e ALLWOOD, 2009):

$$t_f = t_0 * \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad (1)$$

Onde,

t_f - Espessura final da chapa [mm];

t_0 - Espessura inicial da chapa [mm];

α - Ângulo de parede [°];

Com relação a rotação da ferramenta, segundo Jackson e Allwood (2009), no processo SPIF a ferramenta pode se movimentar com ou sem rotação própria. No

caso da ferramenta sem rotação própria, a movimentação é imposta pelo deslocamento na mesa fazendo com a ferramenta se movimente de forma passiva, enquanto deforma a chapa. No caso da ferramenta com rotação própria, a ferramenta de estampagem gira sobre a superfície da chapa com rotação constante imposta pela máquina. Segundo Cavaler (2010) esta variável controla o aquecimento da chapa durante a deformação assim como a escolha de lubrificação.

A lubrificação é essencial na estampagem incremental de ponto único, a fim de reduzir o atrito na interface da ferramenta e da chapa, além de melhorar a qualidade da superfície da estampada. Em pesquisas realizadas com chapa de Al 3103-O, 0,85 milímetros de espessura, em peça tipo copo cônico com ângulo de parede 60° com FC rotativa, (DUFLOU, TUNCKOL, *et al.*, 2007) analisou várias condições com diferentes lubrificantes além de um teste sem lubrificante, e verificou que as forças pico encontradas mantiveram valores próximos de 350 e 365N e a força resultante cerca de 320N em todos os experimentos. No entanto para o caso sem lubrificação em altos tempos de processamento ocorreram a fratura da chapa devido ao aquecimento gerado pelo atrito entre a ferramenta e chapa.

2.1.1.1 Vantagens do processo SPIF

A estampagem incremental de ponto único tem aplicação na produção de lotes pequenos, e onde a forma dos produtos tende a variar em um curto espaço de tempo, podendo ter tanto geometrias simples como também complexas. Desta forma, segundo Kumar e Kumar 2015, as principais vantagens do processo SPIF são:

- Produção de peças diretamente do arquivo CAD;
- Inexistência de matriz positivo ou negativo;
- Alterações do projeto podem ser facilmente e rapidamente realizada;
- Aumento de conformabilidade do material;
- Pode ser realizada de uma máquina CNC convencional;
- Devido à natureza incremental do processo, as forças são pequenas;
- Dimensão das peças são limitadas apenas pela máquina-ferramenta;
- Boa qualidade de acabamento da superfície pode ser alcançada.

2.1.1.2 Desvantagens do processo SPIF

Assim como todo processo de fabricação o processo SPIF também apresenta algumas desvantagens os quais são cruciais para grandes lotes de produção. Dentre essas desvantagens, Kumar e Kumar (2015), citam:

- Maior tempo de conformação em comparação com processos de estampagem convencional
- Limitada a pequenos lotes de produção;
- A formação de ângulos retos deve ser alcançada por meio de estratégias em várias fases de conformação;
- O retorno elástico ocorre, embora possa ser minimizada usando algoritmos de correção;
- Menor precisão da geometria, particularmente em raios convexos, arestas e áreas de dobra

2.2 AÇOS REVESTIDOS

Quase todos os tipos de chapa de aço utilizados comumente nas indústrias automotiva, de eletrodomésticos e de construção estão disponíveis com revestimento anticorrosão, desde aços de alta resistência utilizados para elementos estruturais automotivos, coberturas e molduras arquitetônicas até aços acalmados e livres de intersticiais usados em aplicações que exigem maior conformabilidade. (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

Visando aumentar a resistência à corrosão, a indústria automobilística tem utilizado extensivamente, em sua linha de produção, aços com revestimentos metálicos. Esses materiais revestidos precisam ser fortemente resistentes à ação corrosiva do meio além de demonstrarem ser suficientemente impermeáveis, para dificultar a penetração de vapor de água e oxigênio e a chegada destes na superfície do metal (PARANHOS, 2010).

Os revestimentos de aço mais comuns incluem zinco, alumínio, estanho, chumbo, níquel e várias ligas destes metais, bem como uma variedade de revestimentos orgânicos como tintas e esmaltes, além de cobre ou cromo aplicados geralmente em peças de aço após a fabricação (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

2.2.1 Revestimento 55% Al-Zn

A chapa de aço revestida com a liga 55%Al-Zn comumente denominada “Galvalume”, é aplicada por meio de imersão à quente similar ao processo de zincagem convencional. Este tipo de revestimento combina a durabilidade do alumínio com a proteção galvânica do zinco, oferecendo excelente resistência a corrosão. O revestimento tem como composição média 55%Al, 43,5%Zn e 1,5% Si, consistindo de uma estrutura de fina camada intermetálica de Al, Zn, Fe e Si, entre o aço base e o revestimento; uma fase dendrítica rica em alumínio (80% do volume), e uma fase interdendrítica rica em zinco (CONI, 2004). Este revestimento proporciona ductilidade de revestimento melhorada em comparação com os revestimentos galvanizados a quente. As folhas revestidas com liga de alumínio e zinco também são boas para o embutimento profundo (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

Os aços com revestimento Galvalume, devido à sua excelente condição de superfície, incrementada por meio do processamento do material, apresentam alta qualidade de adesão da tinta no processo de pintura, sendo apropriado para pintura em linhas contínuas, podendo também ser pós-pintado ou pintado em campo (CSN, 2017).

Com relação as propriedades do aço revestido, embora o metal de base continue a ser os principais determinantes da conformabilidade de um produto revestido, os revestimentos têm um efeito no processo de conformação e devem ser levados em consideração ao se projetar peças, matrizes e estratégias de conformação. Os revestimentos têm efeitos no coeficiente de atrito e podem afetar a conformabilidade do material. Em alguns casos, o processo de revestimento pode afetar o substrato, as propriedades do material e a conformabilidade, levando a menor capacidade de conformabilidade em relação aos aços não revestidos. (ALTAN e TEKKAYA, 2012)

2.2.1.1 Aplicabilidade do aço Galvalume

Devido à elevada resistência mecânica e baixas espessuras do aço-base, aliada à resistência superior à corrosão, o aço galvalume permite significativa redução de custos em diversas aplicações. Isto faz com ele seja amplamente utilizado em diversos setores (CSN, 2017)

Na construção civil, o galvalume é amplamente utilizado, comandando grande parte do mercado de coberturas (telhas), apresentando melhor relação custo/benefício que coberturas de alumínio ou de materiais não-metálicos. Na agricultura, devido a sua alta refletividade de calor oferecida pelo revestimento ele é especialmente importante para a estocagem de grãos em silos, já que propicia uma temperatura interior mais baixa, protegendo os grãos e sementes contra a deterioração, aumentando seu rendimento e reduzindo significativamente os custos de estocagem. Na indústria automotiva o galvalume é aplicado em locais que necessitam de materiais com alta refletividade térmica, como, por exemplo, defletores de calor e tampas protetoras de freios. Outras aplicações necessitam de elevada resistência à corrosão, como bandejas de assoalho, suportes de assento e escapamentos. Na indústria de eletrodoméstico o Galvalume tem sido largamente utilizado no segmento de linha branca, principalmente em máquinas de lavar e refrigeradores, que exigem materiais com elevada resistência à corrosão, e em torradeiras e fornos, que necessitam de materiais com alta refletividade térmica (CSN, 2017).

2.3 PROPRIEDADES DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM

Os coeficientes de anisotropia e encruamento podem modificar a conformabilidade das chapas metálicas. Ao analisar ambas as propriedades, verificou que a anisotropia está fortemente relacionada aos esforços gerados no embutimento, enquanto que o encruamento tem uma forte correlação com o estiramento puro, limite de escoamento, limite de resistência e alongamento. (NAKAZIMA, KIKUMA, *et al.*, 1968).

2.3.1 Coeficiente de Encruamento

Na deformação elástica, as deformações são proporcionais a tensão aplicada, por isso cada nível de tensão provoca alguma deformação elástica. Por outro lado, a um determinado nível de tensão deve ser aplicado antes que ocorra qualquer deformação plástica. À medida que a tensão é adicionalmente aumentada, a quantidade de deformação aumenta, de forma não linear, em seguida a

deformação plástica é iniciada. A deformação total é a soma da deformação elástica e da tensão plástica, ainda que obedeça à lei de Hooke. (HOSFORD, 2010)

O termo endurecimento por deformação é usado para descrever o aumento do nível de tensão necessário para continuar a deformação plástica. O fluxo em termo de tensão é usado para descrever a tensão necessária para continuar a deformação em qualquer fase da plasticidade. Para isso, descrições matemáticas e curvas tensão-deformação verdadeiras são necessárias as análises de engenharia que envolve esse tipo de deformação. Várias aproximações são possíveis. Quanto melhor a aproximação das características do material, da natureza do problema e da necessidade de precisão, melhor serão os resultados. (HOSFORD, 2010; BANABIC, 2010)

Muitos metais quando deformados plasticamente mostram mecanismos de endurecimento, de modo a aumentar a sua força devido a deformações plásticas. Na simulação de conformação mecânica dos metais, presume-se que a superfície do material produzido evolui, expandindo em uma forma isotrópica (endurecimento isotrópico), devido ao trabalho plástico, sobrepondo-se para o efeito, às vezes, uma mudança na área de superfície após a tensão escoamento (endurecimento cinemático) (ALVES, 2003).

De acordo com Gronostajski (2000), para a simulação numérica do processo de conformação de metais, à temperatura ambiente e com baixas taxas de deformação, equações constitutivas são empregues, neste caso, o efeito da temperatura causada pelo trabalho plástica no fluxo de tensões pode ser negligenciado. A equação constitutiva mais simples que descreve o comportamento elasto-plástico dos materiais é a Lei de Hollomon (EQUAÇÃO 2), em que “K” é o coeficiente de resistência e “n” o expoente de encruamento de tensão.

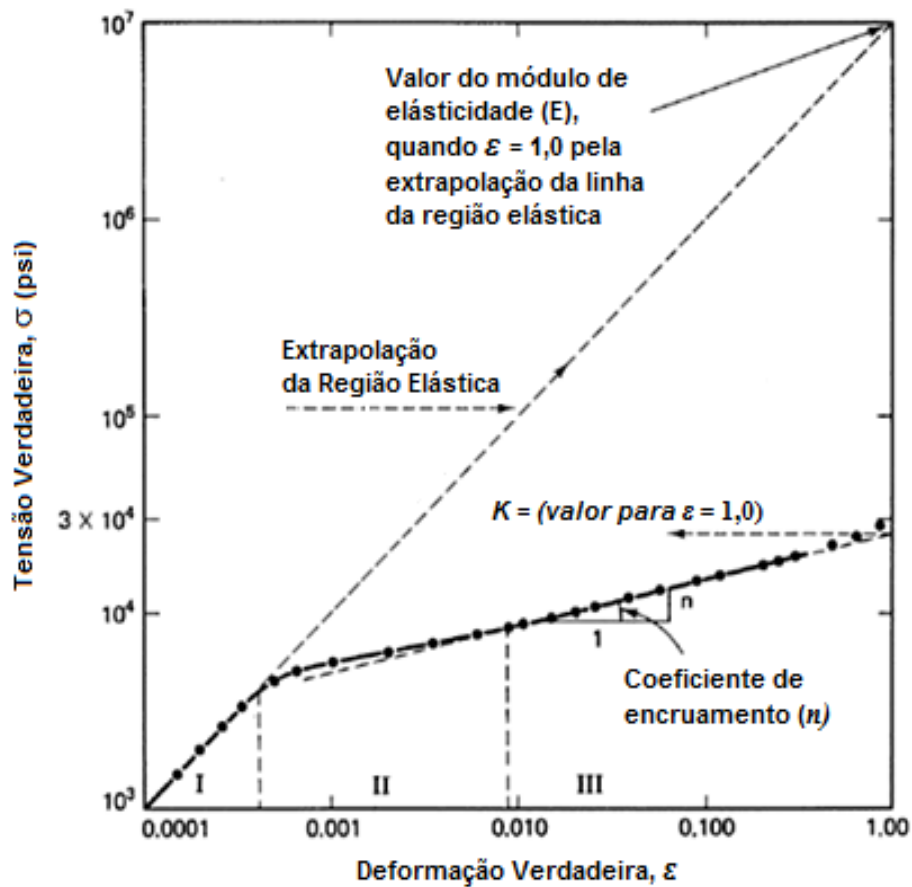
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2)$$

Para os aços baixo carbono utilizados na estampagem que obedecem a equação 2, é possível obter uma reta com inclinação constante sobre uma faixa de deformação plástica entre 10% e 20% em escala logarítmica, possibilitando o cálculo de n através da EQUAÇÃO 3 (HOSFORD e CADDELL, 2011):

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (3)$$

Os valores de K e n podem ser encontrados traçando a verdadeira curva de tensão-deformação em coordenada log-log. A FIGURA 5 mostra essa parcela para uma liga de alumínio. Nota-se que há três zonas no gráfico. A zona I representa a região elástica, a qual segue a lei de Hooke onde $\sigma = E\varepsilon$. A Zona II é a região de transição entre o comportamento elástico e inteiramente de plástico do material e a zona III é a região totalmente plástica. Na FIGURA 5, a inclinação é igual a n e K quando interceptam $\varepsilon = 1$. Estritamente a EQUAÇÃO 3 aplica-se apenas para a parte de deformação plástica, mas uma vez que a deformação elástica é pequena em relação da deformação plástica depois de uma pequena porcentagem, esta distinção pode ser ignorada (HOSFORD e CADDELL, 2011).

FIGURA 5 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA DO ALUMÍNIO 1100, IMPRESSO EM ESCALA LOGARÍTMICA.



FONTE: HOSFORD e CADDELL (2011).

Um material com grande coeficiente de encruamento (n), possui maior capacidade de conformabilidade, isto é, ele sustenta uma maior quantidade de deformação uniforme antes da estricção, do que um material com menor valor de “ n ” (ALTAN e TEKKAYA, 2012). Segundo Newby (1968), peças de chapas metálicas estampadas com valores de “ n ” elevados, demonstram suficiente resistência ao afinamento, desta forma, as áreas críticas transferem as deformações para áreas adjacentes, tornando-as mais uniformes, evitando a falha. Isto é devido ao fato, que para um mesmo nível de tensão a deformação no aço com menor coeficiente de encruamento apresenta ser mais localizada. No entanto, deve-se notar que esta afirmação não é correta para materiais e condições em que o fluxo de tensão que não podem ser expresso pela equação de Hollomon (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

Os aços utilizados em processo de estampagem, como aços de baixo carbono, IF (Interstitial free), HSLA (High-strength low-alloy steel), Dual fase e Bake hardening, possuem valores de ‘ n ’ que variam entre 0,15 a 0,25. Alguns aços de baixo-carbono que não são completamente processados para estampagem, especialmente os laminados a quente, podem apresentar baixos valores de “ n ”, próximos a 0,10 (NEWBY, 1988).

2.3.2 Anisotropia plástica

Devido à sua estrutura cristalográfica e as características do processo de laminação, as chapas geralmente exibem uma anisotropia significativa nas propriedades mecânicas. Esse fato induz uma anisotropia particular, caracterizado pela simetria das propriedades mecânicas em relação aos três planos ortogonais da rede cristalina. Tal comportamento mecânico é chamado ortotropia. No caso dos metais laminados, as propriedades plásticas deles podem ser diferentes nas direções longitudinais, transversais e normal da laminação. (BANABIC, 2010)

Uma maneira de medir esta anisotropia é através de um ensaio de tração uniaxial de um corpo de prova submetido a tensões próximas ao seu limite de resistência. A variação do seu comportamento plástico com relação a largura e a espessura é avaliada por um parâmetro chamado de coeficiente de anisotropia de Lankford (EQUAÇÃO 4) (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right)} \quad (4)$$

Onde,

ε_w – deformação verdadeira ao longo da largura de um CP de tração

ε_t – deformação verdadeira ao longo da espessura do mesmo CP

w_f – largura final do CP

w_0 – largura inicial do CP

t_f – espessura final do CP

t_0 – espessura inicial do CP

Em chapas finas é difícil medir a variação da espessura com precisão, sendo assim, para calcular a anisotropia plástica nestas chapas, pode-se utilizar uma expressão deduzida da EQUAÇÃO 4. Esta considera a conservação do volume quando o material atinge o regime plástico, e pode ser descrita como mostrado na EQUAÇÃO 5 (BANABIC, 2010).

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{l_0 w_0}{l_f w_f}\right)} \quad (5)$$

Onde,

l_f – comprimento final do CP

l_0 – comprimento inicial do CP

2.3.2.1 Coeficiente de anisotropia planar

O coeficiente de anisotropia planar (Δr) representado pela EQUAÇÃO 6, indica o comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa. Quando $\Delta r = 0$, o material apresenta características isotrópicas, no plano da chapa. Quando $\Delta r \neq 0$, o material apresenta características anisotrópicas com tendência a formação de defeitos (“orelha”), na operação de estampagem (KEELER, 1968). Portanto, são desejados valores de coeficiente de anisotropia planar próximos a zero (SUCHY, 2006).

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (6)$$

2.3.2.2 Coeficiente de anisotropia normal

O coeficiente de anisotropia normal (\bar{r}) representado pela EQUAÇÃO 7, mostra uma diferença entre o plano médio da chapa e as propriedades em meio a espessura de que é geralmente caracterizado pelas relações normais de anisotropia plástica, quando submetida a esforços de tração no plano (HOSFORD e CADDELL, 2011). Um coeficiente de anisotropia normal elevado significa que a resistência a deformação na espessura é maior do que nas outras dimensões. Por isso, operações de estampagem necessitam de materiais com coeficientes de anisotropia normal elevados (KEELER, 1968).

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (7)$$

2.4 CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO

A fim de descrever o comportamento de plástico de um material em estado de tensão em geral, é necessário definir um critério de escoamento, para expressar uma relação entre os componentes de tensão no momento da plasticidade (HOSFORD e CADDELL, 2011).

A transição entre o estado elástico até ao estado plástico ocorre quando a tensão atinge o limite de elasticidade do material (HOSFORD e CADDELL, 2011). O limite de elasticidade em tensão uniaxial é estabelecido utilizando a curva de tensão-deformação do material. No caso de um estado de tensão multiaxial que é mais difícil definir um critério para a transição do estado elástico para o estado plástico, a relação entre a tensão representada necessária é especificar as condições em que o fluxo plástico ocorre. Tal relação é geralmente definida sob a forma de uma função implícita, conhecida como critério ou função de escoamento (BANABIC, 2010). A forma geral é expressa na EQUAÇÃO 8.

$$f(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{12}) = \sigma_0 \quad (8)$$

Para materiais isotrópicos, esta expressão pode ser definida em termos das tensões principais, conforme apresentado na EQUAÇÃO 9 (HOSFORD e CADDELL, 2011).

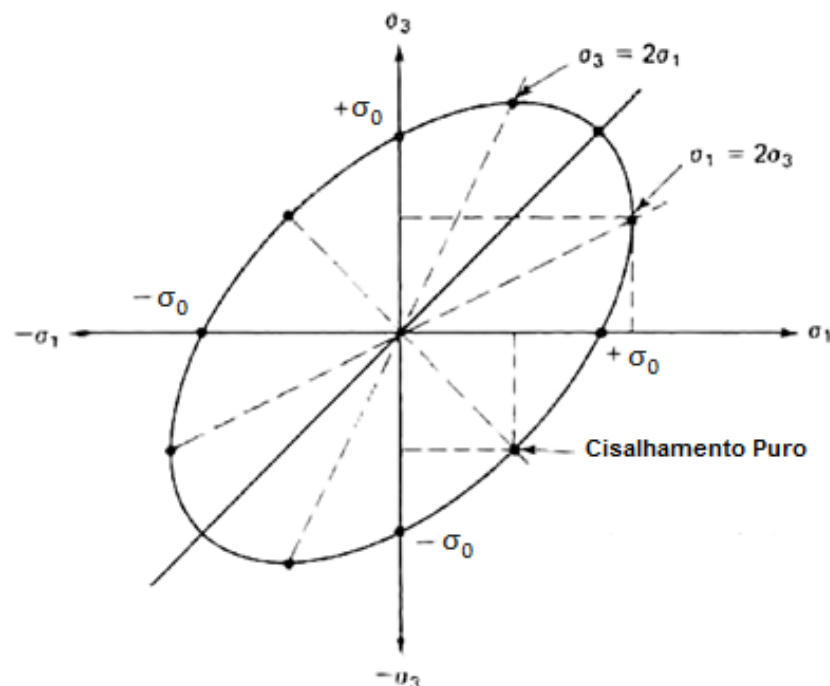
$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_0 \quad (9)$$

Onde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as tensões principais e σ_0 é o limite de elasticidade aparente obtido a partir de um teste tração ou compressão uniaxial (BANABIC, 2010)

2.4.1 Critério de Escoamento de Huber–Mises–Hencky

O critério de Huber–Mises–Hencky é utilizado para materiais isotrópicos que apresentam um coeficiente de anisotropia normal, $\bar{r} = 1$. Este critério indica que para qualquer estado de tensão (tração ou compressão) o seu valor limite será o mesmo (BANABIC, 2010). Este critério é representado no caso tridimensional, onde os eixos ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) são as direções principais de tensão, por uma superfície cilíndrica de raio R igual a tensão limite de escoamento. Porém, quando um plano perpendicular intercepta o eixo σ_3 no ponto zero, esta passa a ser representada por uma elipse (FIGURA 6) (ALTAN e TEKKAYA, 2012)

FIGURA 6 - CRITÉRIO DE ESCOAMENTO DE HUBER–MISES–HENCKY PARA TENSÃO PLANA.



FONTE: ALTAN e TEKKAYA (2012).

Inicialmente esse critério foi proposto por Huber e Von Mises e posteriormente foi desenvolvido por Hencky. Ele se baseia na observação de que uma pressão hidrostática não pode causar escoamento plástico do material. Assim, conclui-se que a única energia elástica de distorção influencia a transição de um estado elástico para um estado plástico naturalmente (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

O material passa de um estado elástico para um estado plástico quando a energia elástica de distorção atinge esse é um valor crítico que independe do tipo de estado de tensão. A energia hidrostática que gera esse comportamento, W_h , é composta por uma componente de energia volumétrica W_v e uma componente de energia de distorção W_f , podendo ser escrita conforme a EQUAÇÃO 10 (BANABIC, 2010).

$$W_h = W_v + W_f \quad (10)$$

Ao substituir as componentes de energia hidrostática e da energia volumétrica pela correspondente em tensão, chega-se a EQUAÇÃO 11.

$$W_f = \frac{1 + \mu}{6E} (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2\sigma_{23}^2 + 2\sigma_{31}^2 + 2\sigma_{12}^2 \quad (11)$$

No caso de tensão uniaxial ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$), onde o escoamento do material ocorrer somente em $\sigma_1 = \sigma_0$, onde σ_0 é a tensão uniaxial de escoamento. Assim, o valor crítico da energia elástica de deformação a que o material passa do estado elástico para o estado plástico é expresso conforme a EQUAÇÃO 12 (BANABIC, 2010).

$$W_f = \frac{1 + \mu}{6E} 2\sigma_0^2 \quad (12)$$

Substituindo a EQUAÇÃO 12 na EQUAÇÃO 11, o critério de Mises pode ser escrito na forma apresentada na EQUAÇÃO 13.

$$\frac{1 + \mu}{6E} 2\sigma_0^2 = \frac{1 + \mu}{6E} (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2\sigma_{23}^2 + 2\sigma_{31}^2 + 2\sigma_{12}^2 \quad (13)$$

Ou, como apresentado na EQUAÇÃO 14.

$$2\sigma_0^2 = (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2\sigma_{23}^2 + 2\sigma_{31}^2 + 2\sigma_{12}^2 \quad (14)$$

2.5 CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO ANISOTRÓPICO

O critério de escoamento anisotrópico, assim como outros critérios de escoamento assumem um estado de tensão geral, a fim de expressar a plasticidade do material. Ademais, esse critério assume um estado de anisotropia relacionado aos três planos de simetria ortogonal, pressupondo a variação da tensão de escoamento devido a direção e ao sentido de laminação que caracteriza a anisotropia (BANABIC, 2010).

2.5.1 Critérios de Escoamento Anisotrópico HILL

O modelo de Hill para materiais ortotrópicos elastoplásticos com endurecimento isotrópico é utilizado para caracterizar a deformação plástica. Como base em uma generalização do critério de Huber-Mises-Hencky. Em verdade, tem-se observado que as chapas de metal em processo de estampagem não se comportam mais de maneira isotrópica. A deformação plástica desses materiais através da espessura tende a ser menor, assim, Hill 1948 propôs uma função quadrática de rendimento associado ao potencial plástico, em um sistema de coordenadas local dado pelos eixos principais de ortotropia (EQUAÇÃO 15) (BANABIC, 2010).

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (15)$$

Onde,

f - função de escoamento anisotrópico;

F, G, H, L, M e N - são constantes específicas para o estado de anisotropia do material.

No caso de chapas de metal, o eixo 1 é geralmente paralelo à direção de laminação, o eixo 2 é paralelamente à direção transversal de laminação e o eixo 3 é colinear com o sentido normal de laminação. Se as tensões de tensão de produção em direções principais de anisotropia são denotados por σ_{es1} , σ_{es2} e σ_{es3} , então os coeficientes de anisotropia de Hill'48 podem ser facilmente representados pelas EQUAÇÕES 16, 17 e 18 (BANABIC, 2010):

$$\frac{1}{\sigma_{es1}^2} = G + H \quad (16)$$

$$\frac{1}{\sigma_{es2}^2} = H + F \quad (17)$$

$$\frac{1}{\sigma_{es3}^2} = F + G \quad (18)$$

A partir destas equações, os coeficientes F, G e H são obtidas como funções das tensões de escoamento uniaxiais, e representados pelas EQUAÇÕES 19, 20 e 21 (OTTOSEN e RISTINMAA, 2005).

$$2F = \frac{1}{\sigma_{es2}^2} + \frac{1}{\sigma_{es3}^2} - \frac{1}{\sigma_{es1}^2} \quad (19)$$

$$2G = \frac{1}{\sigma_{es3}^2} + \frac{1}{\sigma_{es1}^2} - \frac{1}{\sigma_{es2}^2} \quad (20)$$

$$2H = \frac{1}{\sigma_{es1}^2} + \frac{1}{\sigma_{es2}^2} - \frac{1}{\sigma_{es3}^2} \quad (21)$$

Similarmente, os coeficientes σ_{es23} , σ_{es31} e σ_{es12} que se referem as tensões de escoamento cisalhantes associadas as direções ortotrópicas, podem representar os coeficientes L, M e N pelas (EQUAÇÕES 22, 23 e 24) (OTTOSEN e RISTINMAA, 2005).

$$2L = \frac{1}{\sigma_{es23}^2} \quad (22)$$

$$2M = \frac{1}{\sigma_{es31}^2} \quad (23)$$

$$2N = \frac{1}{\sigma_{es12}^2} \quad (24)$$

Como consequência, a fim de fornecer uma descrição completa da anisotropia de o material, seis limites elásticos independentes (σ_{es1}^2 , σ_{es2}^2 , σ_{es3}^2 , σ_{es23}^2 , σ_{es31}^2 , σ_{es12}^2) devem ser conhecidos, bem como a orientação dos eixos principais de anisotropia (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

Todavia, nas chapas de metal de processo de conformados, os coeficientes de anisotropia são denotados (r_0 , r_{45} , r_{90}) e as tensões de escoamento nas direções principais aos eixos anisotrópicos são indicadas como σ_0 e σ_{90} . As relações entre os coeficientes de anisotropia e os coeficientes F, G, H, podem ser facilmente obtidas a partir da regra de fluxo associada à função de escoamento (EQUAÇÕES 25, 26, 27, 28, 29 e 30) (BANABIC, 2010).

$$r_0 = \frac{H}{G} \quad (25)$$

$$r_{90} = \frac{H}{F} \quad (26)$$

$$r_{45} = \frac{N}{F + G} - \frac{1}{2} \quad (27)$$

$$F = \frac{r_0}{\sigma_0^2 r_{90} (1 + r_0)} \quad (28)$$

$$G = \frac{1}{\sigma_0^2 (1 + r_0)} \quad (29)$$

$$H = \frac{r_0}{\sigma_0^2 (1 + r_0)} \quad (30)$$

Sob o estado plano de tensão, quatro parâmetros são suficientes, ou seja, r_0 , r_{45} , r_{90} e σ_0 ou r_0 , r_{45} , r_{90} e σ_{90} podem estarem relacionados. A EQUAÇÃO 31, mostra a seguinte relação entre as tensões de escoamento e os coeficientes de anisotropia (ALTAN e TEKKAYA, 2012).

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} = \sqrt{\frac{r_0(1 + r_{90})}{r_{90}(1 + r_0)}} \quad (31)$$

Além disso, as tensões de escoamento cisalhantes no plano da chapa estão relacionadas com o coeficiente N de Hill'48 e com os coeficientes de Lankford, conforme a EQUAÇÃO 32 (BANABIC, 2010).

$$N = \frac{1}{\sigma_{es3}^2} \left(r_{45} + \frac{1}{2} \right) = \frac{r_0 + r_{90}}{\sigma_0^2 r_{90} (1 + r_0)} \left(r_{45} + \frac{1}{2} \right) \quad (32)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico, são descritos os procedimentos experimentais utilizado para investigação científica. Aqui é apresentado o material de ensaio, as máquinas de ensaios; a ferramenta de conformação; a máquina CNC; o dinamômetro; e o dispositivo ISF (*Incremental Sheet Forming*) que compõem o conjunto de elementos para a conformação incremental das chapas. São apresentados ainda, os parâmetros de processo validados por Valle (2016) e aplicados a esse trabalho.

3.1 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Esse trabalho se trata de uma pesquisa aplicada à avaliação do processo SPIF através da aplicação de um modelo dinâmico computacional com o software de análise de elementos finitos Abaqus[®] 6.12.1, envolvendo estudo do processo com o objetivo de traduzir em números as informações e posteriormente classificá-las e analisá-las (GIL, 2010).

Para atender os objetivos gerais e específicos do projeto de pesquisa, a metodologia utilizada neste projeto de pesquisa pode ser dividida em quatro etapas distintas: análise e caracterização do material; separação e análise dos dados experimentais; modelagem computacional do processo experimental e a análises e avaliação da simulação computacional.

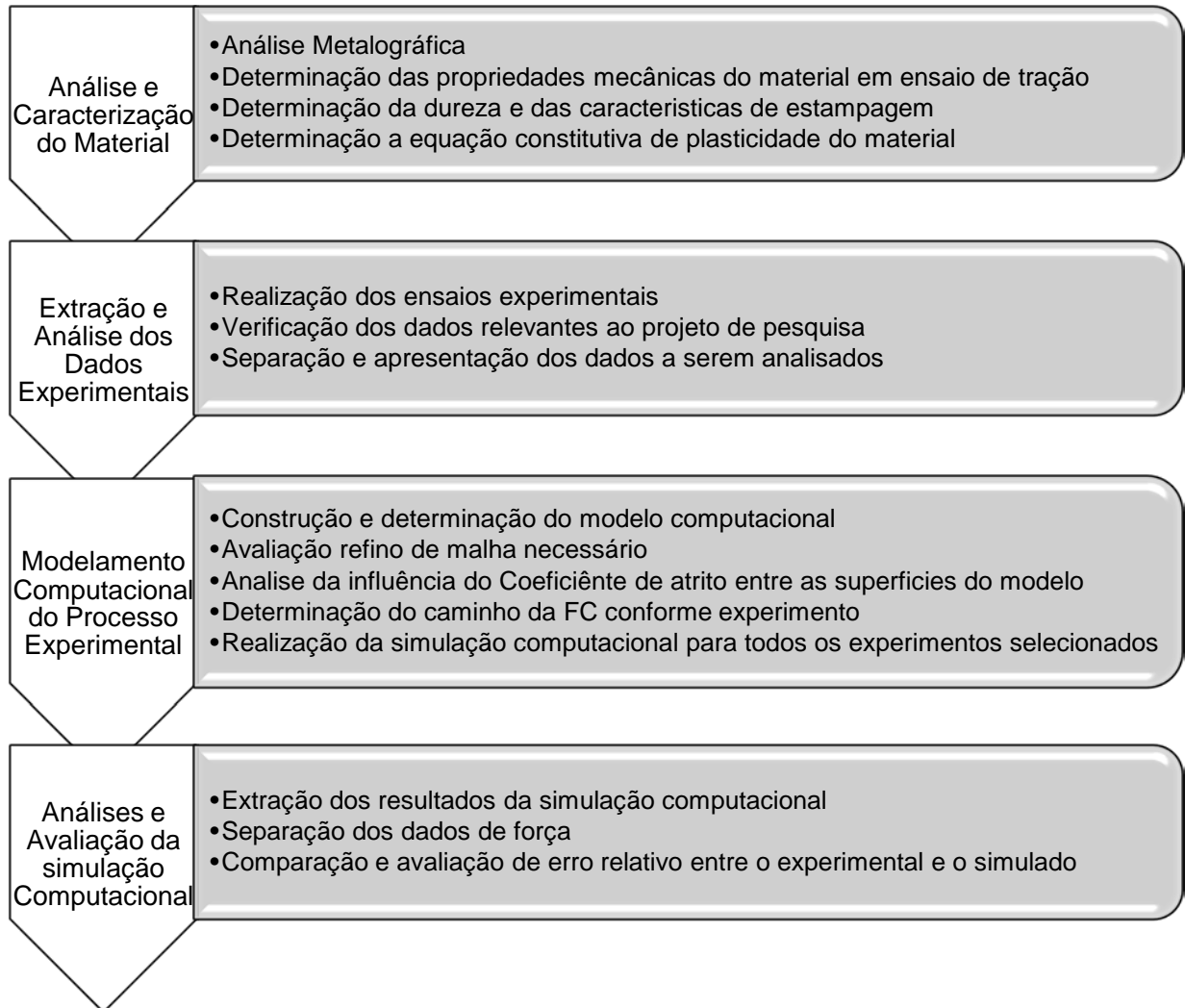
A análise e caracterização do material utilizado no experimento de pesquisa busca verificar o tipo e homogeneidade do material e as propriedades mecânicas necessárias para se avaliar o procedimental experimental. Esses dados foram utilizados na simulação computacional para caracterizar o material.

Na extração e separação dos dados experimentais relevantes na pesquisa, foram avaliados os dados que apresentam boa influência nas cargas aplicadas incidentes no processo, dos quais foram utilizados para fins de comparação com o modelo computacional.

Na modelagem computacional, foi construído e determinado o modelo que descreve o processo experimental, em seguida, determinado o refino de malhar necessário para o modelo, o coeficiente de atrito a ser usado na superfície de contato, os caminhos, propriedades e condições de contorno, por fim, a realização e simulação computacional para todos os experimentos selecionados

E finalmente na última etapa, foram extraídos e separados os resultados simulados, para que sejam comparados e avaliados os erros entre a simulação computacional e os dados do processo experimental. Na FIGURA 7 é possível visualizar o fluxograma do procedimento metodológico planejado.

FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.



FONTE: O autor (2017).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Para a caracterização dos materiais foram realizadas análises químicas do substrato e do revestimento, análises metalográficas para avaliar a morfologia e estrutura cristalina, medição de dureza e ensaio de tração para definir as propriedades mecânicas fundamentais do material processado.

3.2.1 Material

Os metais, bem como ligas podem ser utilizados para a execução do processo de estampagem incremental de chapas (ISF). Neste estudo científico, foram utilizados chapas de aços de baixo teor de carbono e fina espessura, com boa conformabilidade à temperatura ambiente. O material usado no processo de estampagem incremental de ponto único foi o aço ASTM A792 CS-A AZM 150 laminado a frio com revestimento Galvalume[®], na espessura 0,8mm com composição química do metal de base conforme apresentado na TABELA 1.

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL DE BASE.

Material	Composição Química (partes da massa em % máxima)			
	C	Mn	P	S
CS-A	0,10 máx.	0,6 máx.	0,03 máx.	0,035 máx.

FONTE: ADAPTADO DE CSN (2006).

A chapa com espessura 0,80 mm com revestimento aplicado pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), possui características especificadas conforme apresentado na TABELA 2.

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO

Revestimento	Norma Padrão	Designação CSN	Peso (g/m ²)	Espessura (µm)
Galvalume	ASTM A 792M (2003)	AZM 150	150	40,54

FONTE: Adaptado de CSN (2006).

3.2.2 Composição Química do Substrato e Revestimento

Na análise da composição química do substrato e do revestimento do aço ASTM A792 CS-A AZM 150, foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de Raios-X por energia dispersiva (EDX). O equipamento é um EDX 7000 da marca SHIMADZU capaz de quantificar a porcentagem dos metais presentes, localizado no Laboratório de Materiais e Superfícies da UFPR.

3.2.3 Caracterização Microestrutural do Material

As amostras utilizadas para análise metalográfica foram extraídas de recortes das chapas dos corpos de prova, seccionados por meio de uma guilhotina. Em seguida, foram embutidas a quente com baquelite preta, lixadas nas granulometrias 200, 400, 600, 800 e 1200, polidas com alumina 3 μ m e atacadas quimicamente. O ataque químico consistiu do seguinte procedimento: fez-se um ataque com Nital 5% (5ml de ácido nítrico para 100ml de álcool etílico) com a finalidade de delinear os contornos de grão para revelar a estrutura. As imagens microestruturais foram capturadas através de um microscópio ótico, marca Olympus BX5, localizado no Laboratório de Materiais e Superfícies da UFPR (FIGURA 8). Esse equipamento consegue capturar imagens com ampliação de 200x a 1000x e fazer a medição. A análise da amostra foi determinada de acordo com a norma ASTM E112 (1996).

FIGURA 8 - MICROSCÓPIO ÓTICO OLYMPUS BX51.



FONTE: O autor (2017).

3.2.4 Ensaio de Tração

Para a realização dos ensaios de tração, foi utilizado a máquina de tração EMIC modelo DL10000 capacidade 100 kN, localizado no Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR ((FIGURA 9).

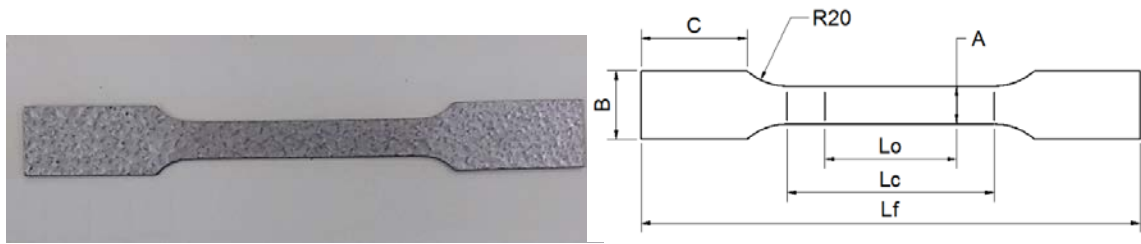
FIGURA 9 - MÁQUINA DE TRAÇÃO EMIC MODELO DL10000.



FONTE: O autor (2017).

Para a obtenção das propriedades mecânicas do material foram realizados ensaios de tração nos corpos de prova de chapa de espessuras 0,8 mm, nas direções de laminação 0°, 45° e 90° em tiras de chapa de 12,5 mm de largura por 200 mm de comprimento conforme padrão tipo 1 da NBR ISO 6892-1:2013, a uma taxa de deformação nominal de 0,001 / s. O formato do corpo de prova em chapa é do tipo “gravata” (FIGURA 10).

FIGURA 10 – CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.



A	B	C	L ₀	L _c	L _f
12,5 mm	24 mm	40 mm	50 mm	87,5 mm	200 mm

FONTE: O autor (2017).

3.2.5 Ensaio de Dureza das Chapas

Para analisar a dureza média das chapas, utilizou-se do medidor de dureza Rockwell digital da Versitron® (FIGURA 11) localizado no Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR, esse aparelho é capaz de medir durezas em todas as escalas Rockwell gerais e de superfície.

FIGURA 11- DURÔMETRO ROCKWELL VERSITRON®



FONTE: O autor (2017).

3.3 ENSAIO EXPERIMENTAL

Para investigar a influência do processo de estampagem incremental de chapas por ponto único a nível experimental, experimentos foram realizados com base nos estudos realizados por (DUFLOU, TUNCKOL, *et al.*, 2007) e de forma similar realizados por (VALLE, 2016). Esses trabalhos mostraram que a influência dos parâmetros de processo avaliados, passe vertical (avanço incremental dz), diâmetro da ferramenta, ângulo de parede e espessura da chapa são significativos, ou seja, as forças de estampagem irão aumentar em conformidade com os parâmetros de processo. No entanto, foi descoberto que o parâmetro de velocidade de avanço da ferramenta, dentro dos limites explorados, apresentou o menor impacto significativo e, portanto, pode ser aumentada sem grande penalidade ao processo, a favor da produção.

Neste trabalho, com o intuito de analisar a precisão computacional do processo de estampagem incremental de ponto único, fixou-se o diâmetro da ferramenta de conformação e a velocidade de estampagem de 150 mm/min, variando somente 2 parâmetros de processo na simulação computacional, sendo eles: o ângulo de parede (α) e o avanço incremental (dz). Esses diferentes parâmetros de processo correspondem a 4 ensaios e 3 repetições realizados na prática, dos quais foram analisados e comparados com dados realizados na modelagem por elementos finitos via Abaqus[®] conforme apresentado na TABELA 3.

TABELA 3 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS.

Ensaio	Diâmetro da Ferramenta dt (mm)	Espessura da Chapa t (mm)	Ângulo de Deslocamento α (°)	Avanço do Incremento dz (mm)
1	8	0,80	40	0,40
2	8	0,80	40	0,80
3	8	0,80	60	0,40
4	8	0,80	60	0,80

FONTE: O autor (2017).

Para os ensaios experimentais foram necessários 3 equipamentos principais: O centro de usinagem CNC, para a execução do programa de

conformação incremental da chapa; o dinamômetro piezoelétrico, para aquisição dos esforços mecânicos nas direções x, y e z; o dispositivo ISF (*Incremental Sheet Forming*) para fixação dos corpos de prova necessários para obtenção dos dados de carga. Para isso, procedimentos e equipamentos validados por Valle (2016) foram utilizados como base neste estudo.

3.3.1 Centro de Usinagem CNC

Para a realização do processo SPIF foi utilizado o centro de usinagem CNC ROMI Discovery Modelo 4022 (FIGURA 12). Essa máquina foi escolhida devido a sua disponibilidade, fácil programação, fácil manuseio, área de trabalho, forma construtiva e capacidade do comando. Essa máquina encontra-se disponível no laboratório de processos de fabricação do departamento de engenharia mecânica da UFPR.

FIGURA 12 - CENTRO DE USINAGEM ROMI DISCOVERY MODELO 4022.



FONTE: O autor (2017).

A programação da máquina foi manual, feita diretamente no painel da máquina, uma vez que a estratégia de movimentação da ferramenta é simples, basicamente círculos concêntricos, formando, ao final, um tronco de cone com passe constante e profundidade limitada. O passe da ferramenta na direção z é o incremento de deformação dz que a chapa sofre a cada giro completo da ferramenta de conformação.

As especificações técnicas do centro de usinagem CNC ROMI Discovery Modelo 4022 podem ser visualizadas na TABELA 4.

TABELA 4 - ESPECIFICAÇÕES DO CENTRO DE USINAGEM ROMI DISCOVERY MODELO 4022.

Característica Técnica	Dimensão
Curso Longitudinal eixo X	599 mm
Curso transversal eixo Y	406 mm
Curso vertical eixo Z	508 mm
Resolução de Posicionamento	0,001 mm
Cone da árvore	ISO 40
Potência do motor principal	7,5 CV
Faixa de rotação	60 a 6.000 rpm
Avanço rápido dos eixos X, Y e Z	15/15/15 m/mim
Dimensões da mesa	360 x 840 mm
Potência	15 kVA
Comando CNC	Mach – 9

FONTE: O autor (2017).

3.3.1.1 Programação NC

A determinação da trajetória que define o percurso da ferramenta, torna-se cada vez mais difícil dependendo fortemente da complexidade da geometria final das peças e da minimização do tamanho de passe incremental. No entanto, uma vez que o percurso é simples (circular, concêntrico e no formato de tronco de cone), foram desenvolvidos 4 programas NCs diretamente na máquina, de maneira que, nesse estágio do trabalho, não foi utilizado nenhum software comercial CAD/CAM para a geração da estratégia de movimentação da ferramenta, podendo sem

qualquer ônus à exatidão dos movimentos da ferramenta, aplicando aos programas o parâmetro modal G1 para interpolação circular no sentido anti-horário.

3.3.2 Dinamômetro

O dinamômetro Kistler modelo 9139AA (FIGURA 13(A)) é utilizado para a análise precisa dos processos dinâmicos. Medições de alta precisão de todas as forças fornecem uma base sólida para os usuários otimizarem os processos de corte e conformação, estratégias de usinagem, ferramentas de corte e equipamentos auxiliares. O tipo 9139AA é projetado especificamente para usinagem plana, com altas taxas de remoção de material, e com altas forças correspondente. Mas este dinamômetro pode também ser usado em aplicações de perfuração, e outras aplicações e medições de força em geral. As vantagens deste sistema em forma de plataforma são: a separação das três componentes (eixos X, Y e Z), a altíssima rigidez mecânica e a frequência natural elevada ($\gg 3,75$ kHz).

Os sinais de força obtidos nos canais Fx, Fy e Fz da plataforma correspondem respectivamente às componentes de avanço do processo. Os valores de sensibilidade de cada eixo, juntamente com os fatores de escala (amplificação), devem ser devidamente ajustados no amplificador de carga Kistler modelo 5070A10100 (FIGURA 13(B)). Este equipamento possui 4 canais e uma faixa de medição por canal de ± 200 a 200000 pC (Piezoelectric Coefficient).

FIGURA 13 - A) DINAMÔMETRO KISTLER TIPO 9139AA; B) AMPLIFICADOR DE CARGA KISTLER MODELO 5070A10100.



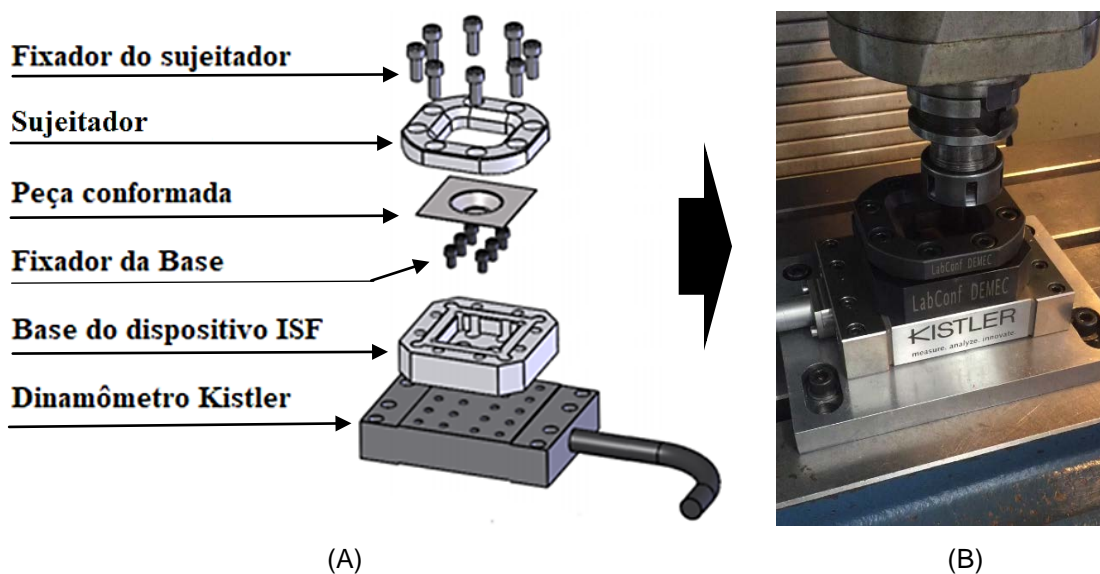
FONTE: O autor (2017).

Para extração dos dados de força do dinamômetro foi utilizado um software de aquisição de dados desenvolvido na própria universidade que configura remotamente o amplificador de carga e o posterior processamento de sinais para utilização do dinamômetro piezoelétrico Kistler em operações de usinagem. O software foi desenvolvido na linguagem de programação Visual Basic e tem como principal característica uma programação orientada a objeto para que seja facilmente programável e atualizado com novos modelos de processos (YASUMOTO, 2015). O programa é processado em um microcomputador PC (Pentium II 300MHz), pelo qual são gerados os dados no decorrer de cada ensaio e gravados numa pasta pré-definida no HD do computador.

3.3.3 Dispositivo ISF

O dispositivo utilizado para os ensaios experimentais do processo SPIF foi feito em aço SAE 4140 tratado termicamente. Esse dispositivo é composto por uma base e um grampo para a fixação do corpo de prova. A base é fixada ao dinamômetro por 6 parafusos allen M6 e o prensa chapas é fixado a base por 8 parafusos allen M8, conferindo ao dispositivo rigidez e confiabilidade, como ilustrado na FIGURA 14(A) e apresentado fixo a máquina CNC na FIGURA 14(B)

FIGURA 14 - DISPOSITIVO ISF E DINAMÔMETRO. (A) MODELO DESENHADO EM CAD; (B) MODELO REAL INSTALADO



3.3.4 Ferramenta de Conformação

A ferramenta de conformação utilizada no processo de conformação é feita de metal-duro P20 obtida por metalurgia do pó, com revestimento de TiAlCN, carbonitreto de titânio alumínio, por intermédio do processo de aspersão térmica, PVD (Physical Vapour Deposition). A dureza do revestimento está na ordem de 2600HV e temperatura de referência máxima para uso de 500°C. O comprimento da haste da ferramenta é de 70 mm com diâmetro de 8 mm. O formato da ferramenta pode ser observado na FIGURA 15.

FIGURA 15 - FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO PRESA AO MANDRIL.



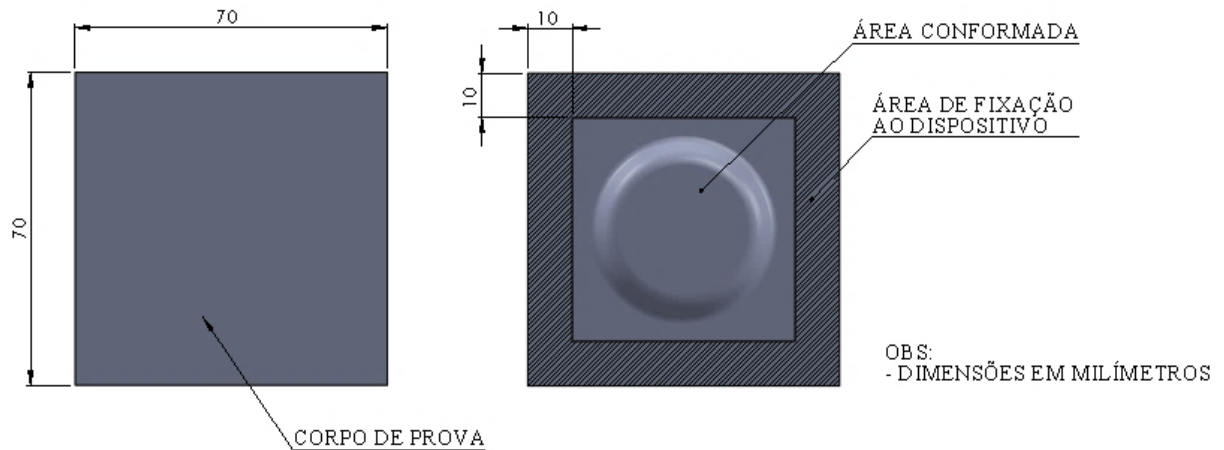
FONTE: O autor (2017).

3.3.5 Peça Conformada

Os corpos de prova utilizados foram cortados na forma plana e com 70x70mm, com área útil para a aplicação da deformação de 50x50mm, ou seja, a parte restante da chapa entre 50 mm e 70 mm foi usada para fixação ao dispositivo. A peça após conformada deverá obter o formato interno de um cone truncado com

diâmetro maior de aproximadamente 40 mm e diâmetro menor variado devido aos diferentes valores do incremento dz e do ângulo de parede α . A FIGURA 16 apresenta a imagem da peça antes e depois de conformada.

FIGURA 16 - CORPO DE PROVA.



FONTE: O autor (2017).

3.3.6 Montagem e Calibração do Sistema

O sistema de aquisição dos dados de carga ligada ao centro de usinagem permaneceu montado e seguro no decorrer de todo o experimento, visando eliminar qualquer perturbação ao sinal gerado pelo eventual procedimento de montagem e desmontagem do sistema de aquisição de forças composto por computador, amplificador, cabos, dinamômetro e máquina CNC (FIGURA 17, pg. 58). O amplificador de sinal e o computador ficaram posicionados ao lado da máquina estabelecendo, assim, uma conexão segura com o dinamômetro que estava localizado no interior daquela. Tal conexão foi estabelecida por meio de um cabo especial, com 3m de comprimento. Os cuidados com a carga eletroestática presente nos cabos, conectores limpos e secos e, em especial, no rigoroso cumprimento das orientações indicadas pelo fabricante, foram fielmente executados durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

FIGURA 17 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO PROCESSO ISF.



FONTE: O autor (2017).

Conforme realizado por Valle (2016) o sistema foi calibrado nos 3 canais de aquisição de acordo com a faixa de força esperada para o ensaio que foi de 2000N. A FIGURA 18 apresenta os respectivos valores de sensibilidade em pC/N (Piezoelectric Coefficient por Newtons) para cada cristal, no seu respectivo eixo, de acordo com as orientações de calibração do fabricante. Ressalta-se que os referidos parâmetros foram ajustados ao amplificador de sinal e também, que a taxa de amostragem foi estabelecida em 120Hz, ou seja, são 16 aquisições, em cada canal, a cada segundo, totalizando, assim 360 dados adquiridos por segundo de monitoramento.

FIGURA 18 - TELA DE AJUSTE E CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE FORÇA.

Canal	Label	Sensitivity	Unit	Measuring Range	Unit	Filter	Unit/V	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	Fx	-8.035	pc/N	2000	N	300 Hz	200
<input checked="" type="checkbox"/>	2	Fy	-4.131	pc/N	2000	N	300 Hz	200
<input checked="" type="checkbox"/>	3	Fz	-8.077	pc/N	2000	N	300 Hz	200
<input type="checkbox"/>	4	Ch4		pc/N		N	1 kHz	0

Taxa de Amostragem (Hz) -

Número de Leituras do ensaio -

Salvar em

Arquivo

Responsável

FONTE: O autor (2017).

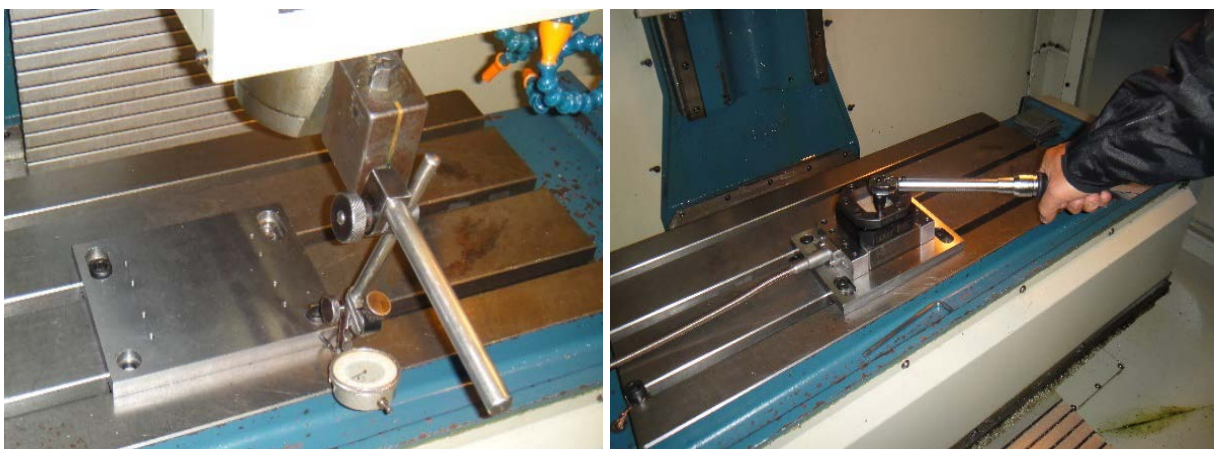
3.3.7 Montagem e Calibração do Equipamento

Os cuidados na montagem e preparação dos equipamentos mecânicos antes do primeiro ensaio são fundamentais para assegurar, sobretudo, a confiabilidade do sistema e, dessa forma, a integridade dos dados gerados ao longo do experimento, mitigando ruídos ao sinal. Na montagem do dispositivo ISF e dinamômetro, a atenção maior foi direcionada para a absoluta limpeza das superfícies de contato entre a mesa da máquina e a placa de base do dinamômetro Kistler (FIGURA 19(A)) e, posteriormente, com o dispositivo ISF. Para isso, foi realizada uma sequência de preparação e calibração do dispositivo segundo Valle (2016).

Foi feito o alinhamento da placa de base (FIGURA 19(A)), e por seguinte o alinhamento do dinamômetro Kistler e do dispositivo ISF utilizando com os eixos x e y da mesa da máquina CNC a fim de promover exata coincidência das direções de movimentação da ferramenta de conformação e com as direções de aquisição das cargas. A pressão de fixação dos parafusos estabelecida foi de 15 Nm para a placa de base e o dinamômetro Kistler, e de 12 Nm para os parafusos do dispositivo ISF com o uso de um torquímetro (FIGURA 19(B)).

O batimento do dispositivo ISF ao longo de seu comprimento permaneceu, no máximo, em 0,01 mm para os 2 eixos, x e y.

FIGURA 19 - SEQUÊNCIA DE PREPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO DISPOSITIVO EM MÁQUINA CNC. (A) ALINHAMENTO DA PLACA, (B) FIXAÇÃO DO DISPOSITIVO ISF E DINAMÔMETRO



(A)

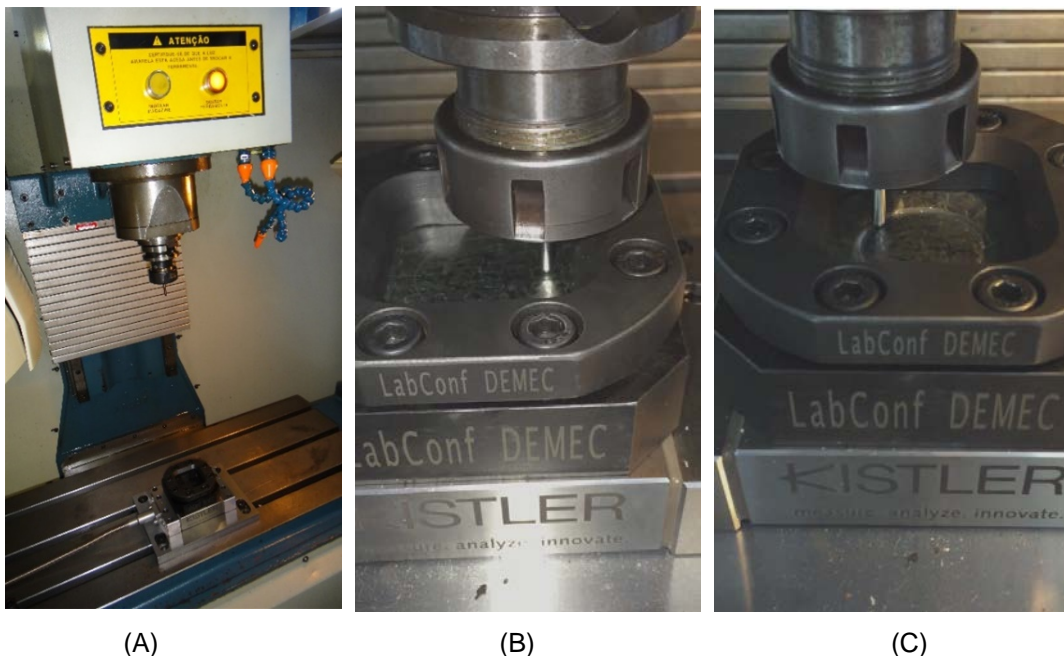
(B)

FONTE: VALLE (2016).

3.3.8 Preparação e Aquisição de dados

Conforme abordado anteriormente, o percurso de deformação do corpo de prova é circular, concêntrico e no formato de tronco de cone. Na FIGURA 20(A), tem-se a representação do ponto zero máquina fixado à distância de 300 mm acima da parte superior do dispositivo ISF. O zero peça – o ponto (0,0,0) – está localizado na parte superior da chapa e no centro da peça. O início da deformação ocorre sempre a partir do ponto (x,0,0), o qual foi zerado em contato com a chapa com o uso de um calibre (FIGURA 20(B)). Na FIGURA 20(C), observa-se a ferramenta iniciando o segundo passe de deformação na estratégia circular e, destaca-se aqui, que ao término do percurso circular, a ferramenta afasta-se para exatos 5 mm acima da parte superior do dispositivo ISF e pausa o processo por 30 segundos para que seja salvo a aquisição de dados de força. Em seguida, iniciou-se um novo ciclo de passe, pausando a cada termino do percurso circular.

FIGURA 20 - REPRESENTAÇÃO DO ZERO PEÇA E ZERO FERRAMENTA. (A) ZERO MÁQUINA, (B) ZERO DA FERRAMENTA NA PEÇA, (C) PERCURSO DA FERRAMENTA



FONTE: Valle (2016).

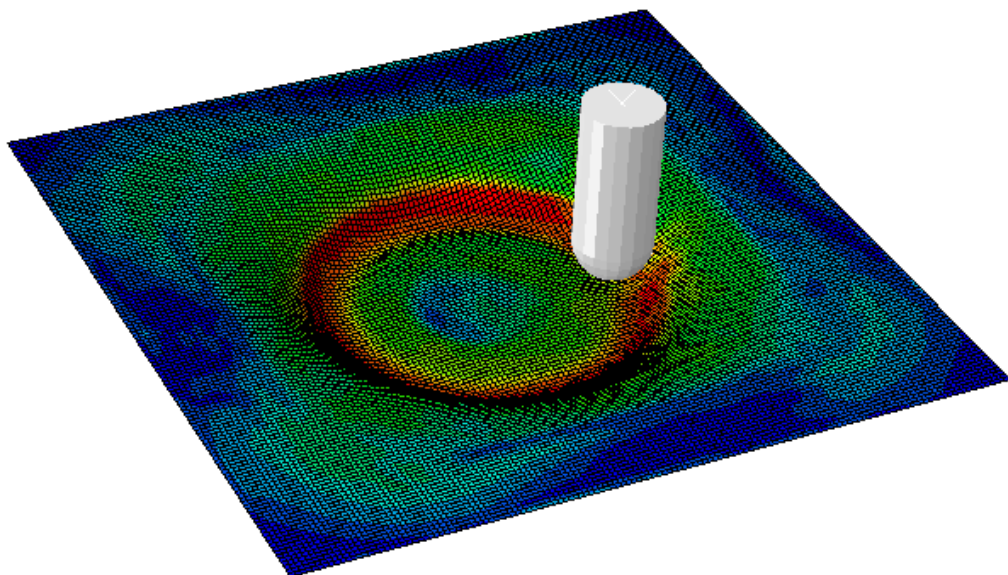
Os corpos de prova foram submetidos a 7 passes, pelo qual foi realizada a aquisição dos dados de força nos eixos x, y e z que ocorreram em cada passe da

ferramenta. Os dados produzidos são arquivados na extensão *txt* e estão em *Volts*, sendo exportados para um arquivo em *Excel* onde é feito o tratamento científico dos valores.

3.4 PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Para a simulação computacional do processo experimental, foi utilizado o software CAE Abaqus® 6.12.11, instalado nos computadores do Laboratório de Conformação Mecânica (LABCONF) da UFPR. O Abaqus® é um programa para resolver problemas em ciência e engenharia baseado no método dos elementos finitos. O programa pode resolver diversos tipos de problemas, desde a análise linear simples até simulações complexas não lineares. O software apresenta uma extensa biblioteca de elementos finitos que permite a modelagem praticamente qualquer geometria, bem como a sua extensa lista de modelos que simulam o comportamento da grande maioria dos materiais, permitindo a sua aplicabilidade em diferentes áreas da engenharia, seja para o setor automotivo, bens de consumo, indústria de eletrônicos ou estampagem progressiva, tanto para o dimensionamento de matrizes como no desenvolvimento de peças finais. A FIGURA 21, apresenta o uso do software na estampagem incremental de ponto único.

FIGURA 21 - ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS COM SOFTWARE ABAQUS®



FONTE: O autor (2017).

3.4.1 Esquema de Integração

O análise numérica pelo método de elemento finito (FEM) é uma ferramenta analítica que pode calcular a solução aplicada a mecânica do contínuo, reduzindo-se a um sistema de equações algébricas (BATHE e WILSON, 1976). Muitas vezes, a equação governante é uma equação de equilíbrio que pode ser, dependendo do tipo de problema, estática ou dinâmica.

A integração desta equação ao longo do tempo é calculada numericamente e a solução em tempos discretos pode ser realizada por dois esquemas de integração: Implícita ou explícita.

3.4.1.1 Integração implícita

Para o esquema de integração implícita, é feita uma suposição para valores das velocidades nodais no início do passo de tempo. As posições nodais no final do passo de tempo pode então ser extrapolada. Estas posições são relacionadas às deformações, que fornecem o valor de tensão usando as lei constitutivas. A integração das tensões sobre o volume dos elementos, isto é, as forças, devem satisfazer a equação de equilíbrio. Desta forma, a hipótese inicial sobre as velocidades nodais devem ser corrigidas, o que requer várias iterações a fim de convergir para o equilíbrio. A vantagem deste método é que ele é incondicionalmente estável, o que significa que pode fornecer a solução correta para a equação, independentemente do tempo que levar. A desvantagem é que ele requer várias iterações antes de convergir para a solução exata. Além disso, em cada iteração, um grande sistema linear deve ser resolvido. Cada passo de tempo requer uma quantidade considerável de esforço computacional sendo assim, demorado (HENRARD, 2008).

Bambach, Hirt e Ames (2005) usou Abaqus / Standard, que usa uma integração de tempo de regime implícito. Neste artigo publicado na conferência SheMet2005, mencionou que, em média, 44% das iterações realizadas durante um tempo resultou em uma iteração de descontinuidade severa a fim de alcançar um estado de contato. Isto indica que o tempo de computação das simulações SPIF usando uma estratégia implícita é ampliada em grande parte pelo contato

continuamente alternado, impedindo o código de usar grandes incrementos de tempo.

3.4.1.2 Integração explícita

Ao contrario do esquema de integração implícita, o esquema explícito de integração começa pela equação de equilíbrio no início do passo de tempo. Isso requer o cálculo das forças internas usando as tensões e as leis constitutivas como foi feito para o algoritmo implícito. O desequilíbrio entre forças internas e externas fornece as acelerações nodais iniciais, as posições nodais no final do passo de tempo é extrapolado usando as posições nodais iniciais e acelerações. Com o método explícito, a equação de equilíbrio nunca é completamente satisfeita. Este método é condicionalmente estável, o que garante que o desequilíbrio permanecerá insignificante desde que a amplitude do passo seja menor que um valor crítico. Esse valor depende do menor tamanho do elementos, das propriedades do material e sobre a massa específica do material. Isto significa que o tempo máximo é sempre minutos, levando a um grande número de passos de tempo antes de chegar ao final da simulação (HENRARD, 2008).

No entanto, o cálculo das acelerações nodais iniciais não requer qualquer solução do sistema. Cada passo de tempo é calculado relativamente rapidamente. Em geral, a massa do sistema pode ser artificialmente aumentada, maior tempo crítico, sem uma significativa perda de precisão, desde que a energia cinética do sistema permanece muito menor do que a energia interna, por exemplo, menos de 5 a 10% segundo Ambrogio, Filice *et al.* (2005).

Simular o aumento de velocidade da ferramenta artificialmente, também diminui o tempo total de computação. Ao contrário da escala de massa, a escala de tempo só pode ser utilizada com materiais que não são viscosos, isto é, para os quais as tensões são independentes da taxa de deformação. Na literatura, a maioria dos autores que utilizam códigos comerciais explícitos é por ele ser mais rápido do que o modo implícito.

Qin, Masuku *et al.*(2005) usou LS-Dyna com um esquema de integração de tempo explícito para simular a estampagem de um cone pelo processo SPIF e analisar a influência da massa e escala de tempo. Por um lado, utilizaram um factor máximo de escala de massa que multiplicou o intervalo de tempo por um factor de

dois (em comparação com o caso sem escala massa). Com um fator tão pequeno, o tempo de computação foi reduzido pela metade com uma influência desprezível na qualidade dos resultados, supondo que a simulação sem escala de massa é a referência. Por outro lado, eles usaram uma escala de tempo de até 5000. Mesmo com um fator tão grande, apenas um pequeno desvio de aproximadamente 0,2 mm foi observado na previsão da geometria além de uma redução significativa no tempo de computação. Contudo, para esta simulação, eles apenas simularam um pequeno recuo da ferramenta 4 mm dentro do material em vez de toda a simulação SPIF. Skjoedt, Bay *et al.* (2008) e (SKJOEDT, SILVA, *et al.*, (2008) também usaram LS-Dyna com uma integração de tempo explícita. Eles usaram um fator de escala de tempo entre 1000 e 1500 sem escala de massa adicional e foram capazes de reduzir o tempo de computação significativamente. Ambrogio, Costantino, *et al.*(2004) também usaram um esquema explícito de integração com escala de tempo para acelerar as simulações e aumentou a velocidade da ferramenta para 5 m/s. Em outro artigo, Ambrogio, Filice, *et al.* (2005), os autores multiplicaram a taxa de alimentação por um fator de 40 e usou uma velocidade de 40 m/s. Eles verificaram que a relação entre a energia cinética e a energia total sempre era menor que 10%. Robert, Santo, *et al.* (2008) usando Abaqus / Explicit sem escala de massa, mas usando uma velocidade de ferramenta aumentada de até 25 m/s foi verificado uma energia abaixo de 10%, reduzindo o tempo de processamento e gerando boa predição nos resultados de espessura das peças estampadas. Kim, Lee, *et al.* (2008) também usaram Abaqus / Explicit para simular a conformação incremental a uma temperatura elevada, esses autores não utilizaram a escala de tempo porque utilizaram uma lei material tendo em conta a taxa de deformação. Por outro lado, eles chegaram à conclusão de que um fator de escala de massa de 100 é a melhor aplicação entre velocidade de simulação e precisão.

Para a simulação, todos os autores que usam um código FE comercial alegaram que é possível reduzir o tempo de computação sem deteriorar significativamente a qualidade do resultados. Para isso, eles usaram um esquema explícito com um tempo de massa ou tempo escala apropriado em vez de um esquema implícito.

Neste trabalho foi aplicado um esquema de integração explícito, visto que esse método de integração segundo a literatura reproduziu com qualidade e em tempos menores os resultados obtidos no processo SPIF.

4 RESULTADOS, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E DISCUÇÕES

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Composição Química do Material

Em pré-ensaios realizados com EDX (espectrômetro de fluorência de raio X) mostraram que a chapa de aço ASTM A792 CS-A AZM 150 apresentou composição química semelhante à descrita na literatura tanto no metal de base como no revestimento (TABELA 5).

TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO ASTM A792 CS-A AZM 150 VIA EDX.

Material	Composição Química (%)				
	Fe	Mn	Si	Zn	Al
Metal de Base	99,366	0,382	-	-	0,251
Revestimento	12,093	-	0,932	35,013	51,963

FONTE: O autor (2017).

A presença do alumínio no metal de base e do ferro no revestimento está ligada a difusão do substrato e do revestimento Galvalume pelo processo de imersão a quente para produção desse tipo chapa. Esses elementos são característicos da fase intermetálica formada nesse tipo de revestimento.

4.1.2 Resultado do Ensaio de Dureza

Para realização das medições de dureza, foram feitas medições na escala B, conforme normas ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 e ASTM E18-15 em amostras de chapas não estampadas e sem revestimento. Essas escalas utilizam penetrador de esfera aço 1,5875 mm, com carga de 100Kg. Para estudos, foram coletados 6 dados de dureza, dos quais apresentaram pequenas variações na medida de dureza. A

partir dos dados de dureza coletados, obteve-se uma dureza média conforme apresentada na TABELA 6.

TABELA 6 - DUREZA DA CHAPA ASTM A792M CS-A SEM REVESTIMENTO.

ASTM A 792M CS-A AZM 150							
Dureza	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Média
HRB	59,4	59,3	58,6	58	59,7	56,8	58,63
HRF	90,7	90,65	90,3	90	90,85	89,4	90,32

FONTE: O autor (2017).

4.1.3 Caracterização Microestrutural

Como é possível ver na FIGURA 22 e no APÊNDICE A, a estrutura cristalina do metal de base do aço CS-A de espessura 0,8 mm apresentou boa homogeneidade estrutural aparente, semelhante a materiais recozidos, composta por grãos claros de ferrita envoltos por finos carbonetos de ferro (Fe_3C) nos contornos de grão. As partes escuras parecidas como manchas, são identificadas como oxidação da superfície após ataque químico.

FIGURA 22 - METALOGRAFIA DOS CORPOS DE PROVA.

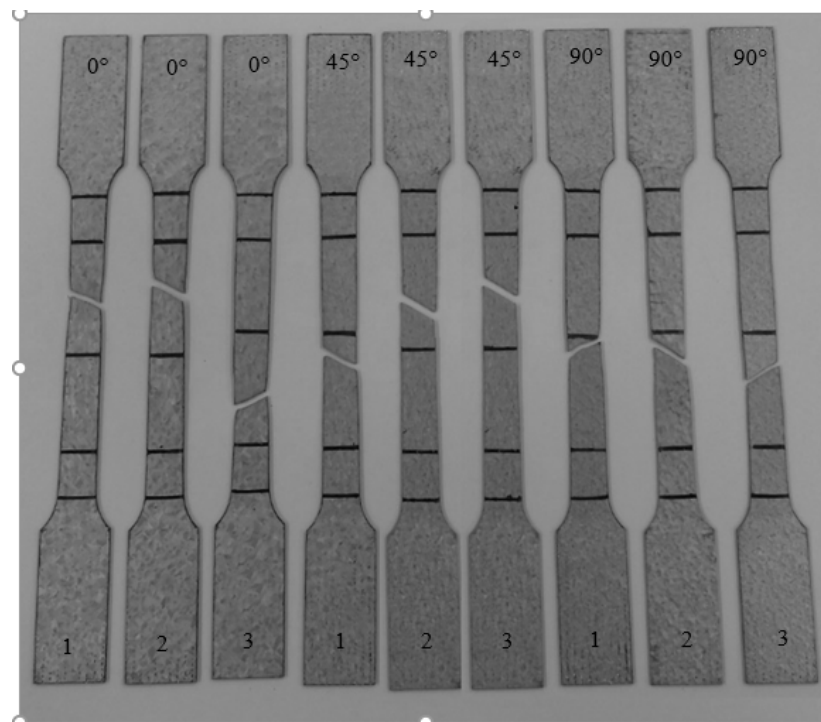


FONTE: O autor (2017).

4.1.4 Resultados do Ensaio de Tração

Os corpos de prova forneceram informações relativas às propriedades mecânicas do material, como o limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento. Estas propriedades caracterizam o material quanto aos seus limites elásticos e plástico (FIGURA 23).

FIGURA 23 - CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE TRAÇÃO.



FONTE: O autor (2017).

As médias das propriedades mecânicas do material são apresentadas na TABELA 7. É possível verificar que o aço apresentou boas propriedades no que diz respeito ao limite de escoamento, o limite de resistência e um grande alongamento devido a presença do alumínio em seu metal de base.

TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO CS-A AZM 150

Parâmetros	CS-A - #0,8
E - Modulo de Elasticidade (MPa)	210000
u - Coeficiente de Poisson	*0,31
μ - Modulo de Rigidez (MPa)	77500
δ - Densidade (g/cm ³)	*7,87
LR - Tensão de Resistência (MPa)	**250,250
LE - Tensão de Escoamento (MPa)	**232,166
Al - Alongamento A ₅₀ (%)	**47,227

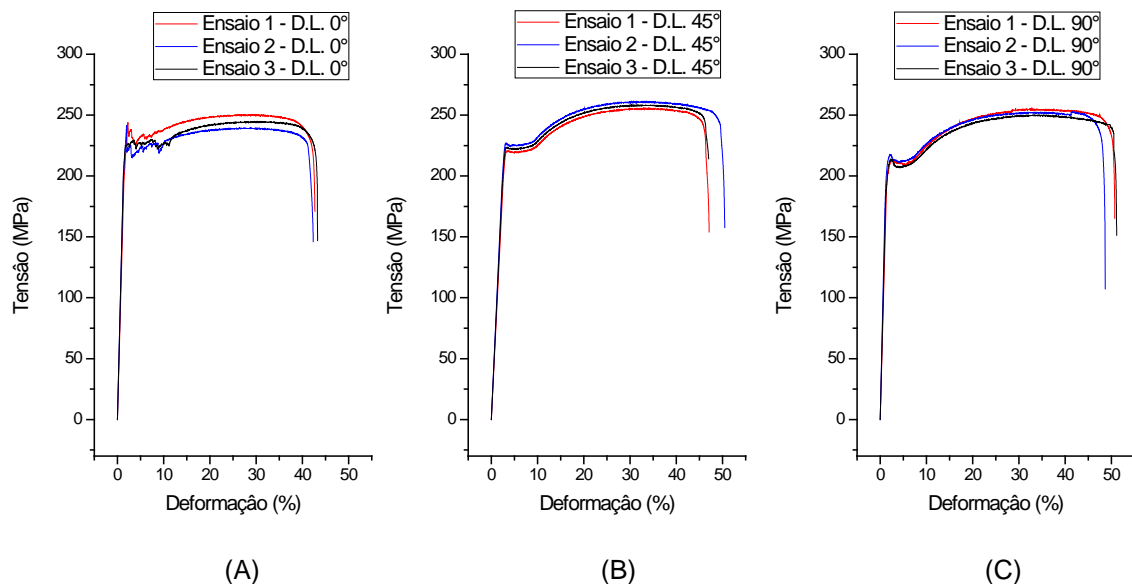
* Segundo Yu (1999)

** Média Calculada

FONTE: O autor (2017).

Nas FIGURAS 24(A), 24(B) e 24(C), são apresentados o comportamento da curva tensão-deformação para o aço ASTM A792M CS-A AZM150 ensaiado nas direções de laminação (D.L.) 0°, 45° e 90°.

FIGURA 24 – CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



FONTE: O autor (2017).

Os gráficos apresentam curvas bastante semelhantes nas três direções de laminação, sendo somente na direção de laminação 0°, pequenas diferenças. Em

todos os gráficos foram vistos um patamar de escoamento típico de aço recozido, característica típica de aços galvanizados, galvalumes e pintados, com limite de escoamento médio de 232,166 MPa e alongamento médio de aproximadamente 47%. Tal alongamento está ligado a presença do alumínio no metal de base.

4.1.4.1 Curva Tensão - Deformação Verdadeira

A partir do conjunto de pontos obtidos nos ensaios nas direções de laminação, as equações constitutivas foram então produzidas a partir desse conjunto de pontos com atenção especial à região próxima à transição elástico-plástica. Devido ao material estar em estado recozido e apresentar uma zona de descontinuidade, nesta zona de transição as leis plásticas foram modificadas, para isso utilizou-se uma função de aproximação polinomial (EQUAÇÃO 33), critério semelhante ao utilizado por Carden, Geng, et al. (2002) para descrever essa região. O intervalo de deformação analisado da região elastoplástica foi de $0,0028 < \varepsilon < 0,07$.

$$\sigma = A\varepsilon^3 + B\varepsilon^2 + C\varepsilon + D \quad (33)$$

Os valores médios obtidos para cada uma das constantes A; B; C e D, foram 233,563 MPa; -526,757 MPa; 10016,154 MPa e -34144,436 MPa, que descreve o comportamento médio do material neste período de deformação.

Para a região plástica da curva para $\varepsilon > 0,07$ de deformação, foi aplicada a lei de endurecimento de Hollomon (HOLLOMON, 1945). A partir dos pontos da curva tensão-deformação verdadeira foi encontrado o valor de K, coeficiente de resistência, e n, coeficiente de encruamento da EQUAÇÃO 2 e 3. Ambos os coeficientes K e n (TABELA 8) foram obtidos para as três direções de laminação.

TABELA 8 - COEFICIENTES DE ENCRUAMENTO E COEFICIENTES DE RESISTÊNCIA.

ASTM A 792M CS-A AZM 150							
n_0	n_{45}	n_{90}	$n_{\text{médio}}$	K_0	K_{45}	K_{90}	$K_{\text{médio}}$
0,223	0,259	0,276	0,255	432,914	469,951	447,558	450,141

Valores obtido para $\varepsilon > 0,07$

FONTE: O autor (2017).

Desta forma foram obtidas 2 equações que juntas descrevem a curva verdadeira de deformação do material, conforme apresentado na (EQUAÇÕES 34 E 35)

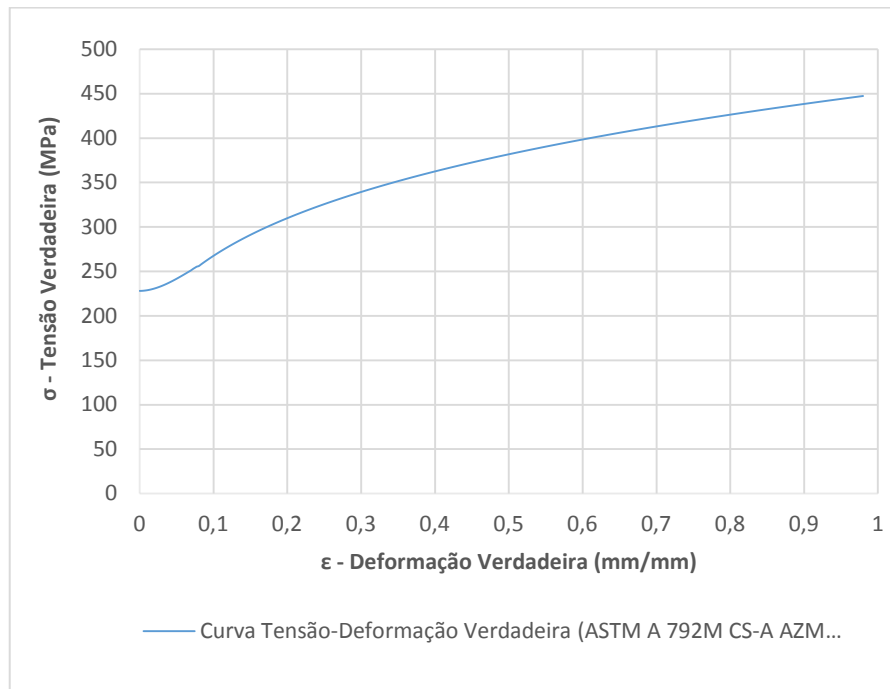
$$\sigma = 233,563 \varepsilon^3 - 526,757\varepsilon^2 + 10016,154\varepsilon - 34144,436 \quad (34)$$

$$\sigma = 450,141\varepsilon^{0,255} \quad (35)$$

Cada uma das equações para a curva experimental em toda a gama de deformação foi obtida pelo método de mínimos quadrados. Contudo a região de transição e as regiões plásticas de grande deformação foram combinadas sem degradação significativa, com coeficiente de correlação de Pearson maiores que 0,95.

Na FIGURA 25 é ilustrada a curva tensão - deformação verdadeira média do material, o qual descreve o comportamento plástico do material adaptada para uso nas simulações computacionais com o aplicativo Abaqus®.

FIGURA 25 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA MÉDIA DO AÇO CS-A.



FONTE: O AUTOR (2017).

4.1.4.2 Anisotropia Normal e Planar

Os procedimentos para determinação das propriedades anisotrópicas dos materiais foram executados de acordo com a norma ASTM E-517. O parâmetro de anisotropia normal r é definido como a razão entre a deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura, após o material ter sido deformado plasticamente (EQUAÇÃO 4, pg. 37).

Devido às dificuldades de se medir a variação na espessura com suficiente precisão, na prática, é adotada uma relação equivalente utilizando a largura ao invés da espessura, o qual, assume-se que durante a deformação, o volume do material permanece constante, e que, portanto, a variação da espessura pode ser calculada pela EQUAÇÃO 5 (pg. 37) com base na variação do comprimento e da largura.

A medição do comprimento foi feita por meio de um extensômetro que fica acoplado ao corpo de prova durante todo o ensaio, servindo também para controlar o limite de deformação a ser aplicado ao material. A medição de largura foi efetuada por meio de um paquímetro digital. As respostas do coeficiente de anisotropia para cada corpo de prova (r), o coeficiente médio de anisotropia para cada direção (r_0 , r_{45} , r_{90}).

A norma descreve que os aços ao carbono devem ser deformados em uma faixa de alongamento entre 15 e 20% de deformação plástica. Portanto, antes que o ensaio de anisotropia do material (TABELA 9) fosse executado, foi efetuado os ensaios de tração até romper para servir de base para ser arbitrar o valor de alongamento pretendido. Para esse material em estudo foi usado um alongamento de 18% ($e = 0,18$).

TABELA 9 - COEFICIENTE DE ANISOTROPIA DO MATERIAL.

Parâmetros	CS-A AZM 150
r_0 – Coeficiente de anisotropia na direção de laminação 0°	1,244
r_{45} – Coeficiente de anisotropia na direção de laminação 45°	0,931
r_{90} – Coeficiente de anisotropia na direção de laminação 90°	1,091

FONTE: O autor (2016).

O coeficiente médio de anisotropia \bar{r} , é definido como a média ponderada dos coeficientes determinados para cada direção (EQUAÇÃO 6, pg. 38), e o coeficiente de anisotropia planar (EQUAÇÃO 7, pg. 38), foram calculados afim de conhecer o comportamento do material. Esses parâmetros de estampagem são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 – ANISOTROPIA NORMAL E PLANAR DO MATERIAL.

Parâmetros	CS-A AZM 150
\bar{r} – Coeficiente de Anisotropia Normal	1,049
Δr – Coeficiente de Anisotropia Planar	0,236

FONTE: O autor (2017).

O aço ASTM A 792M CS-A AZM 150 apresentou um coeficiente de anisotropia normal (\bar{r}) de 1,049, esse parâmetro indica a habilidade de uma certa chapa metálica resistir ao afinamento, quando submetida a forças de tração e/ou compressão, no plano, como observado, esse aço tem pouca resistência ao afinamento, e características de um aço efervescente e isotrópico. Com relação ao coeficiente de anisotropia planar (Δr) de 0,236, pode-se concluir que esse material apresenta poucas tendências de orelhamento nas direções longitudinal e transversal à de laminação quando submetido a processo de embutimento.

4.1.4.3 Critérios de escoamento Anisotrópico HILL'48

Embora o material apresente características quase isotópicas, foi calculado o critério de escoamento anisotrópico de Hill'48 para uso no aplicativo Abaqus. No software são requeridos valores anisotrópicos em forma de relações de tensão que representam a relação entre a tensão de escoamento de referência especificada para a plasticidade do metal e o valor de tensão de escoamento medido. R11, R22, R33, R12, R13 e R23 são as relações anisotrópicas da tensão de escoamento nas direções de um elemento cúbico. Segundo Nihare et al. (2008) para representar a anisotropia plana, R11, R22 e R12 são importantes, enquanto que os outros valores podem ser definidos com o valor 1. As relações matemáticas usadas para converter

as relações de deformação em relações de tensão (stress ratios) foram as seguintes (EQUAÇÕES 36, 37, 38 e 39):

$$R_{11} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \quad (36)$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{(r_0 + r_{90})}} \quad (37)$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3(r_0 + 1)r_{90}}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \quad (38)$$

$$R_{13} = R_{23} = R_{33} = 1 \quad (39)$$

A partir dessas equações e dos coeficientes de anisotropia do aço CS-A foram calculados os parâmetros de anisotropia de Hill'48, apresentado na TABELA 11. Esses dados são necessários para a caracterização da anisotropia do material no aplicativo de simulação numérica.

TABELA 11 - PARÂMETROS DE ANISOTROPIA DE HILL'48.

Material	R11	R22	R33	R12	R13	R23
CS-A AZM 150	0,970	1,024	1	1,048	1	1

FONTE: O AUTOR (2017).

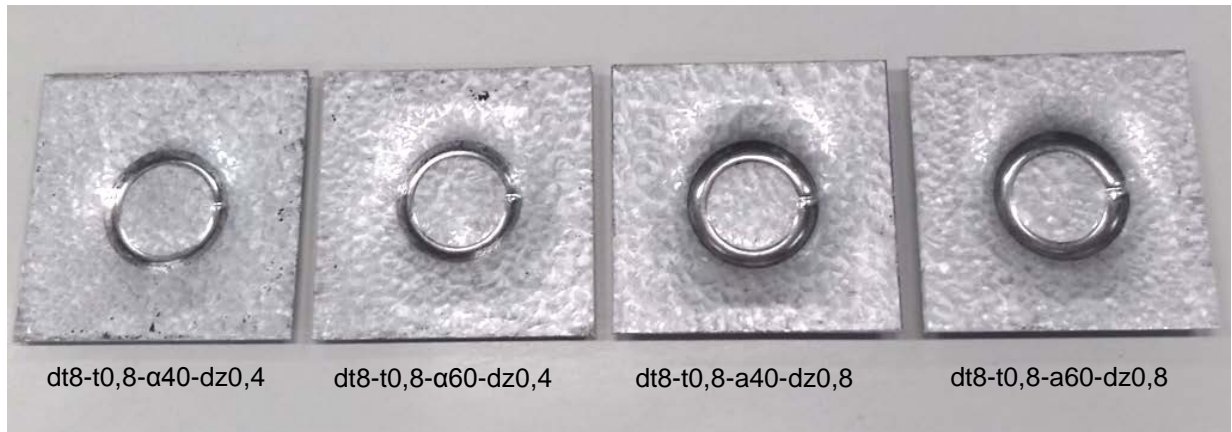
Os valores do coeficiente de Hill'48 são bastante próximos a 1, indicando que o material possui grande característica isotrópica, não sendo, portanto, relevante ao estudo. Embora os dados do coeficiente de Hill'48 não apresentem grande relevância, os dados foram aplicados a simulação numérica.

4.1.5 Resultados dos Experimentos Práticos

Após a realização dos experimentos práticos conforme descrito no tópico 3, foram obtidos os corpos de prova estampados e os dados de forças Fx, Fy e Fz para

cada ensaio e repetição. A FIGURA 26 mostra um dos corpos de prova ensaiados para cada ensaio.

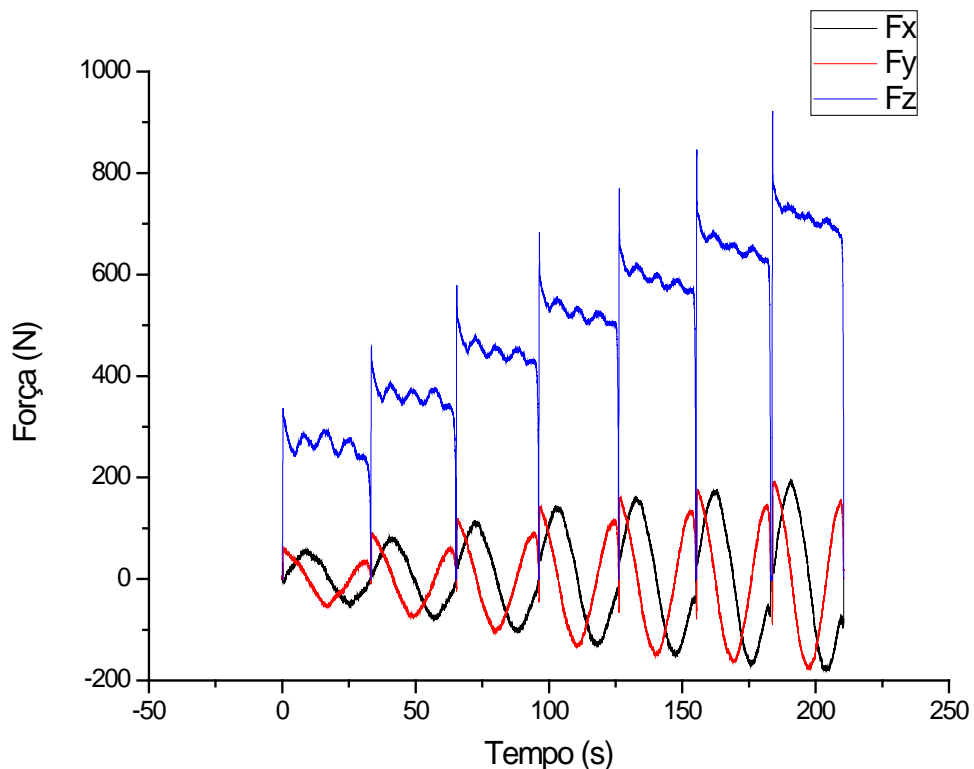
FIGURA 26 - CORPOS DE PROVA ENSAIADOS DO AÇO CS-A AZM 150.



FONTE: O autor (2017).

4.1.6 Dados Experimentais de força

Os dados gerados pelo dinamômetro durante o processo SPIF, para todos os experimentos demonstram curvas por ciclo para F_x , F_y e F_z semelhantes. Na curva F_x , F_y e F_z , para os 7 passes realizados, verificou-se que as forças tendem a crescer positivamente durante o processo de conformação devido a crescente deformação plástica gerada passe-a-passe. Isso pode ser observado no gráfico apresentado na FIGURA 27.

FIGURA 27 - GRÁFICO DAS FORÇAS F_x , F_y E F_z OBTIDAS PELO DINAMÔMETRO.

FONTE: O autor (2017).

Na curva F_z é possível ver a existência de forças máximas comumente chamadas de forças pico (F_{z_p}), em todo início do avanço incremental no eixo z. Essas forças maiores são necessárias para romper a barreira elástica do material e iniciar a deformação plástica na parede da chapa, após esse pico as forças decrescem tendendo a valores próximos da média.

Para comparação dos dados experimentais com o experimento computacional, separou-se as forças F_z pico (F_{z_p}), F_z média (F_{z_m}) e as forças F_{xy} médias (F_{xy_m}) para cada um dos passes dos 4 ensaios realizados, considerando-os de maior relevância para o projeto e preservação das ferramentas e equipamentos.

As F_{z_p} são relativas aos dados de força pico ou carga máxima aplicadas no início de cada passe. Essas forças são desenvolvidas devido ao avanço incremental dz necessária para a deformação plástica do material.

As Fz_m são relativas aos dados de força médias que acontecem ao longo do percurso da ferramenta a cada passe. Essas forças também são desenvolvidas devido ao incremento dz necessária para a deformação plástica do material.

As Fxy_m são as as resultantes dos dados de força cisalhantes media referente ao incremento dx e dy necessários para o caminho da ferramenta. Esse dado pode ser obtido pela soma vetorial das forças radiais F_x e F_y geradas pela ferramenta de conformação durante o processo de estampagem incremental, e calculado pela EQUAÇÃO 40.

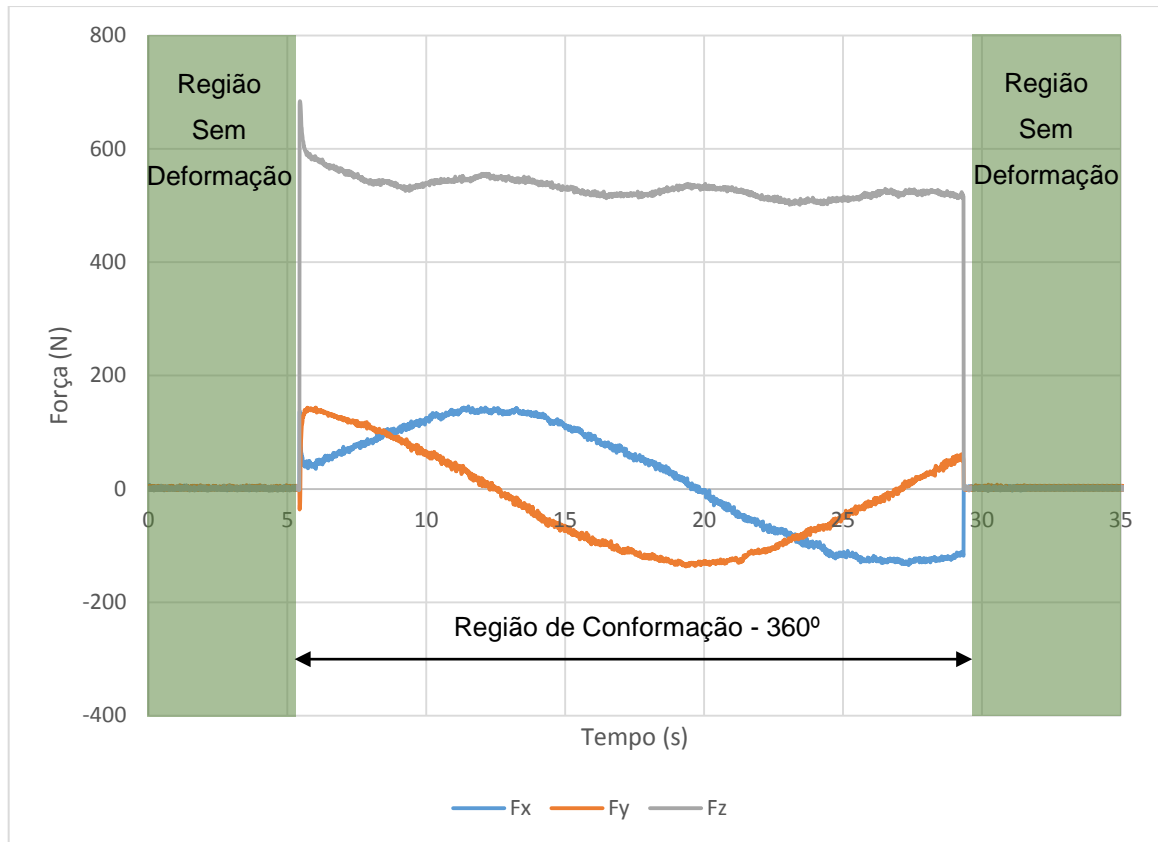
$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (40)$$

4.1.6.1 Tratamento dos Valores de Força

Seguindo uma metodologia simples e eficiente para o tratamento dos valores de forças produzidas a cada passe para cada experimento, com base nos estudos de Valle (2016) definiu-se, a estratégia para seleção do ponto inicial e do ponto final que limita a área de esforços útil à pesquisa, isto é, a área que efetivamente pode ser utilizada para o cálculo das cargas atuantes no processo que, evidentemente, está compreendida pela região de contato da ferramenta de conformação e a chapa (FIGURA 28, pg.77).

Com o intuito de refinar e depurar o momento de entrada e o momento de saída da ferramenta de conformação da chapa, onde ocorrem eventuais perturbações, decidiu-se utilizar os critérios pré-estabelecidos por Valle (2016), para os pontos iniciais e finais, a partir do comportamento das forças na direção z (Fz). Nesse critério, estabeleceu um padrão para determinação dos pontos inicial e final para todos os ensaios, em cada passe. Evidentemente, utilizou-se uma função matemática no próprio ambiente *Excel* para automatizar o cálculo desses pontos a partir dos dados das forças. Cabe destacar que esses mesmos limites para os pontos inicial e final na força em z (Fz), foram então extrapolados para o mesmo instante nas forças em x (F_x) e (F_y) proporcionado, dessa forma, uma linha de corte inicial e final. Neste procedimento, também foram verificados a presença de quaisquer *outliers* capazes de comprometer o estudo.

FIGURA 28 - REGIÃO ÚTIL DAS CARGAS FX, FY E FZ.

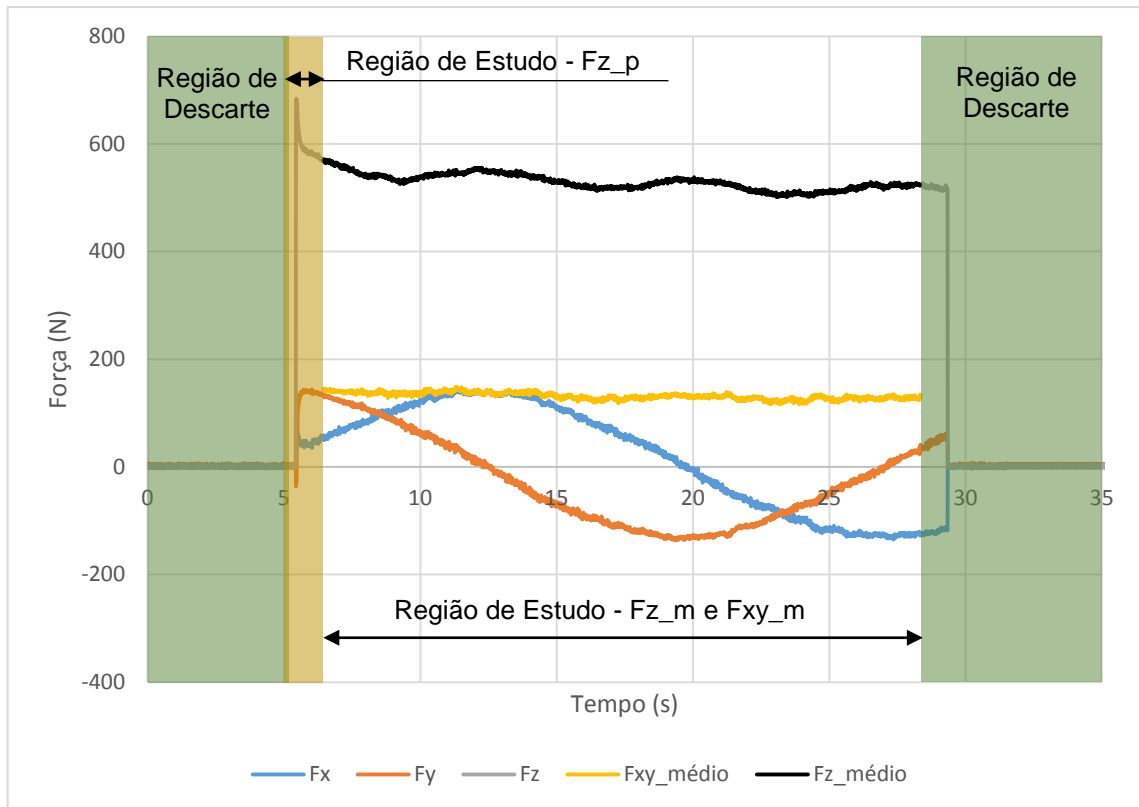


FONTE: O autor (2017).

Seguindo o procedimento, assumiu-se um perímetro equivalente à circunferência de 360° percorrida pela ferramenta ao longo do processo de conformação incremental em cada um dos ensaios. A primeira área de avaliação se dá em relação a força pico, gerada pela de entrada da ferramenta em z no início do processo incremental. Isto posto, padronizou-se um percurso equivalente de 15° no início do processo como sendo a área que contempla as forças máximas também identificada como forças pico Fz_p para todos os ensaios. A segunda área importante surge no final do processo ISF onde, claramente, percebe-se um alívio das cargas e esforços decorrente do final processo, com isso retirou o valor de 15° como sendo a área suficiente para eliminar a perturbação da saída da ferramenta ao final do processo, nesse sentido, estabeleceu o critério para a barreira entre as regiões de descarte, região de estudo das forças pico (Fz_p) e a região de estudos

das forças F_z médias (F_{z_m}) e F_{xy} médias (F_{xy_m}), como observado na FIGURA 29.

FIGURA 29 - REGIÃO ÚTIL PARA DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS MÁXIMOS E MÉDIOS F_{z_p} , F_{z_m} E F_{xy_m} .



FONTE: O autor (2017).

Assim sendo, pode-se definir a região efetivamente útil que compreende os 345° em regime estável de deformação, para a correta determinação das cargas máxima e médias (F_{z_p} , F_{z_m} e F_{xy_m}).

Os resultados obtidos com o tratamento científico dos valores de carga F_{z_p} , F_{z_m} e F_{xy_m} em cada passe para cada peça ensaiada foram então separados para análise em conjunto juntamente com os dados de força simulados.

4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A análise de elementos finito é estabelecida para simular o processo SPIF de um cone truncado, a fim de prever o comportamento mecânico durante o processo de conformação. A produção da simulação é dada em termos da evolução

dos esforços aplicados pela ferramenta determinada em uma referência local relacionado ao ponto de referência do punção, a espessura de distribuição do produto e a deformação plástica equivalente.

4.2.1 Modelamento Computacional do Processo Experimental

A fim de atender aos objetivos gerais e específicos desse trabalho foram realizados experimentos por meio de métodos de elementos finitos para analisar parâmetros computacionais e técnicas de caracterização de material no aplicativo comercial Abaqus®, de forma que os experimentos computacionais predigam as forças do processo de estampagem incremental de ponto único.

Devido à grande deformação plástica e a mudança contínua do local de contato da chapa e das ferramentas, inerente ao processo SPIF, constitui um desafio complexo para a simulação. Desta forma, não há nenhuma condição de simetria a ser assumida pela ferramenta de conformação e, portanto, sendo necessário um modelo de elemento finito completamente tridimensional para toda a geometria.

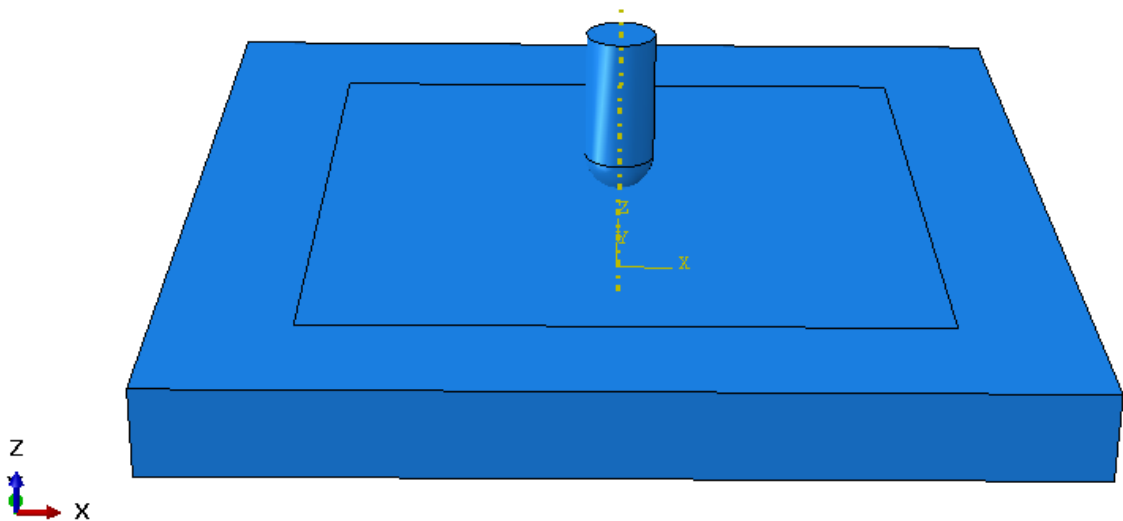
4.2.1.1 Geometria do Modelo

Para se aproximar dos ensaios experimentais realizados na conformação incremental, esta operação básica do processo SPIF consiste em deformar a chapa metálica fixada entre o sujeitador e o suporte da chapa. Por essa razão, não é possível que a chapa se mova para a região de deformação. Nesse caso, aspectos fundamentais para a modelagem foram necessários, substituindo o sujeitador e o aperto da borda da peça durante toda a operação, por condições iniciais de travamento da chapa. No trabalho realizado por Wang, Nair e Zhang (2016) analisando forças e deformações experimentais no metal Al 5052 em geometria em forma de cone e pirâmide. O material foi considerado isotrópico. O tamanho da chapa foi modelado conforme experimento prático e a ferramenta de conformação foi modelada como um corpo discreto rígido com cabeça hemisférica. No corpo rígido, um nó foi escolhido como um nó de referência e os valores de força foram obtidos neste nó durante a simulação.

A chapa quadrada de borda de 70 mm por 70 mm de espessura de 0,8 mm é usada para produzir um cone truncado com variações de processo distintas

(ângulo de parede e passo dz) com diâmetro maior 40 mm. O suporte da chapa modelados segundo o projeto da peça (FIGURA 16, pg. 57) é usado para restringir o deslocamento da peça. A ferramenta de conformação com diâmetro fixo 8 mm é utilizada para produzir a deformação localizada são desenhados no modelo. A configuração inicial é mostrada na FIGURA 30. Na simulação numérica, a ferramenta de conformação e o suporte da chapa são modeladas adotando o pressuposto de uma análise hipotética de corpo rígido, enquanto o material da chapa é considerado como objeto elástoplástico.

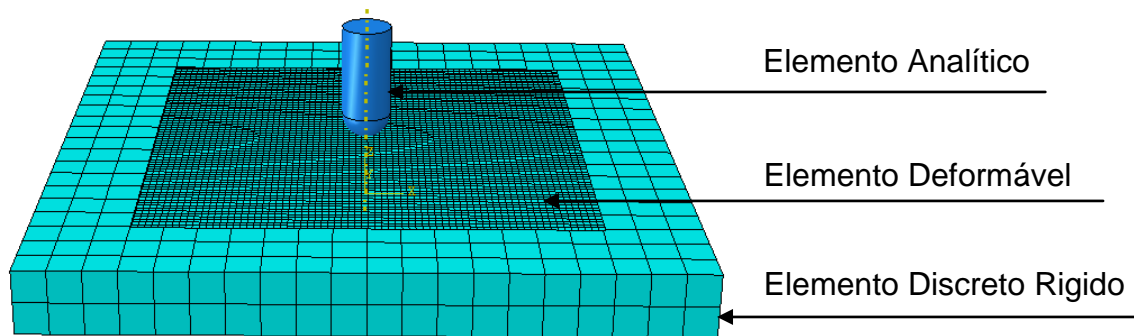
FIGURA 30 - GEMETRIA DO MODELO COMPUTACIONAL DO PROCESSO SPIF.



FONTE: O autor (2017).

Devido a necessidade de modelar o suporte da chapa no formato e medidas idênticas ao experimental, essa ferramenta foi modelada como discreto rígido. A FIGURA 31 (pg. 81), mostra a malha atribuída ao suporte modelado como discreto rígido com tamanho global de malha igual a 5, composto por 600 elementos. O tamanho do elemento no caso da ferramenta tinha que ser grande de modo que os elementos da ferramenta não atravessassem os elementos da chapa e causassem problemas de convergência.

FIGURA 31 - ELEMENTOS ANALÍTICOS RIGIDOS, DISCRETOS RIGIDOS E DEFORMÁVEL



FONTE: O autor (2017).

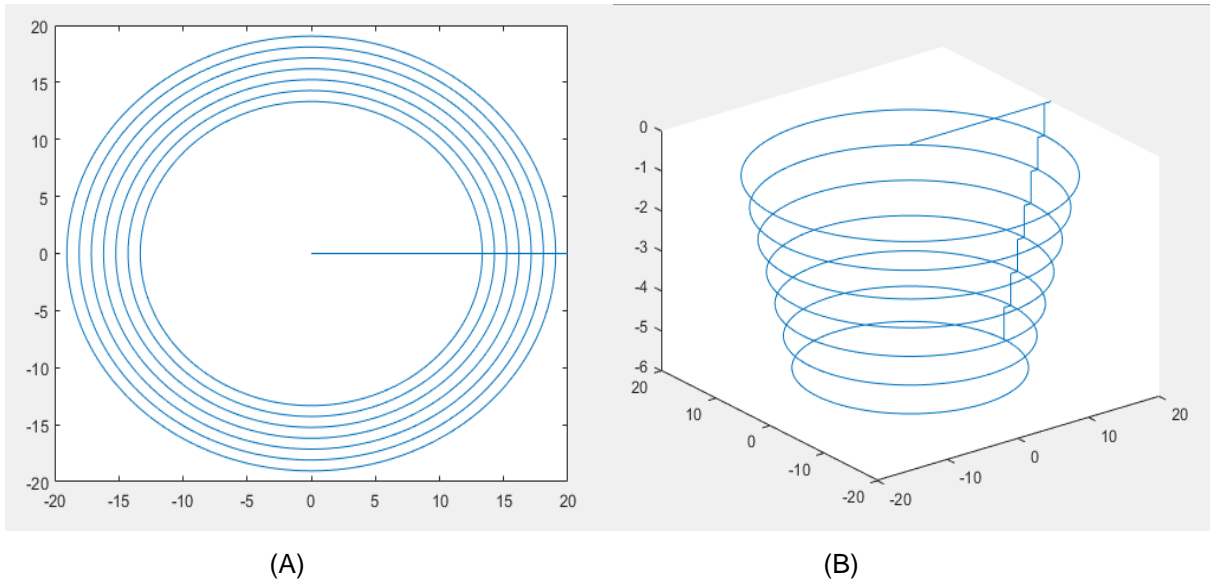
4.2.1.2 Condições de Contorno

Como condições de contorno iniciais do processo uma condição limite de travamento foi atribuída à região exterior da peça de chapa metálica para simular o efeito de fixação a partir do dispositivo, de forma que ela não teria movimento de translação ou de rotação. Para a ferramenta de conformação foi utilizado condição de limite do tipo deslocamento onde o deslocamento para cada etapa era atribuído ao ponto de referência (RP) da ferramenta. A condição de contato aplicado a chapa e ao ferramental foi "superfície a superfície" assumida para descrever a interação no modelo Abaqus / CAE. A superfície da chapa foi designada como superfície escrava e a superfície do ferramental como superfície mestra. A superfície escrava foi definida como sendo a superfície que pode se mover, mas não pode penetrar na superfície mestra. Devido ao atrito de contato entre a ferramenta e a chapa ser desconhecido, para os estudos utilizou-se o coeficiente de atrito conforme Lei de Coulomb com valor de 0; 0,1; e 0,2 na simulação e para o atrito de contato entre a chapa e o suporte foi admitido com o valor 1, de forma que a chapa não se desloque do suporte. O valor de atrito foi formulado utilizando o método de penalização assumindo-se uma direcionalidade isotrópica.

A partir da trajetória NC utilizada em experimentação prática, foi desenvolvida a trajetória da ferramenta com uma programação baseada em coordenadas cartesianas com o auxílio do software Matlab[®] (FIGURA 32), descrevendo o caminho gerado pela ferramenta de conformação. A programação

facilitou o desenvolvimento da trajetória para os diferentes parâmetros utilizados podendo ser facilmente modificada para aplicação “software” Abaqus®.

FIGURA 32 - CAMINHO DA FERRAMENTA DE CONFORMAÇÃO VIA MATLAB®.(A) VISTA SUPERIOR; (B) VISTA EM PERSPECTIVA



FONTE: O autor (2017).

A ferramenta de conformação que molda a peça é designada para se mover a 150 mm/min nos eixos cartesianos XYZ ao longo do percurso de ferramenta prescrito e não sendo livre para girar em torno de seu próprio eixo. O percurso da ferramenta é um percurso circular completo 360° seguido por uma translação descendente de acordo com o incremento de passo Δz . O raio da trajetória circular reduz cada vez que a ferramenta se move para baixo.

4.2.1.3 Malha e Refino do Elemento Finito.

A fiabilidade da simulação numérica depende de vários parâmetros, como já referenciados, onde o tipo de análise, tipo de endurecimento usado e o tipo elemento finito influenciam e proporcionam diferentes resultados na simulação. O tipo de elemento finito selecionado em combinação com o refinamento adequado da rede de elementos finitos pode ajudar a aproximar a simulação numérica do ensaio experimental.

Devido a análise estar diretamente relacionada com a predição de forças, neste estudo de malha, o FE utilizado foi o elemento tipo casca de 4 nós com integração reduzida (S4R). Esse elemento foi estudado por Essa (2011), aplicados ao software Abaqus® no estudo da liga de alumínio Al-5251-H22. Avaliando a espessura e geometria final da peça conformada em formato de cone. Com o elemento tipo casca S4R verificou um menor tempo de processamento e uma boa aproximação com os resultados experimentais em comparação com elementos sólidos. Em trabalhos realizados por Wang, Nair e Zhang (2016) analisando forças e deformações experimentais no metal Al 5052 em geometria em forma de cone e pirâmide. Com o uso do software Abaqus®, o processo utilizou o elemento S4R com cinco pontos de integração ao longo da espessura da chapa. Para a pirâmide e o cone truncado com uma profundidade pré-determinada, foram usados respectivamente 6505 e 9348 elementos. Segundo o autor, os resultados mostraram boa aproximação com dados apresentados nos primeiros passes e erros 5% na força pico (Fz_p) e de 1,3% nas forças normais médias (Fz_m) com erros máximos de 13,2% nas forças normais ao longo dos passes. Avaliando o refino de malha, Surresh e Regalla (2014) investigaram o efeito do tamanho do elemento e da técnica de remeshing adaptativo na simulação numérica do processo de estampagem incremental de ponto único (SPIF). Para as simulações necessárias para este estudo utilizaram o código explícito de elementos finitos LS-DYNA. Os resultados mostraram que em malhas de largura menores que 2 mm apresentaram ótima precisão geométrica em comparado com a teórica e que o refino adaptativo reduziu em 50% o tempo computacional aplicado a análise.

Com relação ao número de pontos de integração na simulação do processo SPIF, Henrard, Bouffieux, *et al.* (2011), Nair (2011), Wang, Nair e Zhang (2016), utilizaram 5 pontos de integração ao longo da espessura da chapa para o elemento tipo casca usando uma abordagem implícita, já Skjoedt, Bay, *et al.* (2008), Skjoedt, Silva, *et al.* (2008) utilizaram 5 pontos de integração e Robert, Santo, *et al.* (2008) utilizaram 9 pontos de integração ao longo da espessura da chapa para o elemento tipo casca usando uma abordagem explícita. Análises para diferentes números de pontos integração não foram realizadas por esses autores. O valor padrão definido nos aplicativos comerciais Abaqus® e Pam-Stamp® é 5 pontos de integração e para o LS-Dyna é o recomendado 9 pontos de integração. Li, Carden e Wagoner (2002) afirmam que em simulações convencionais de conformação são necessários de 5 a

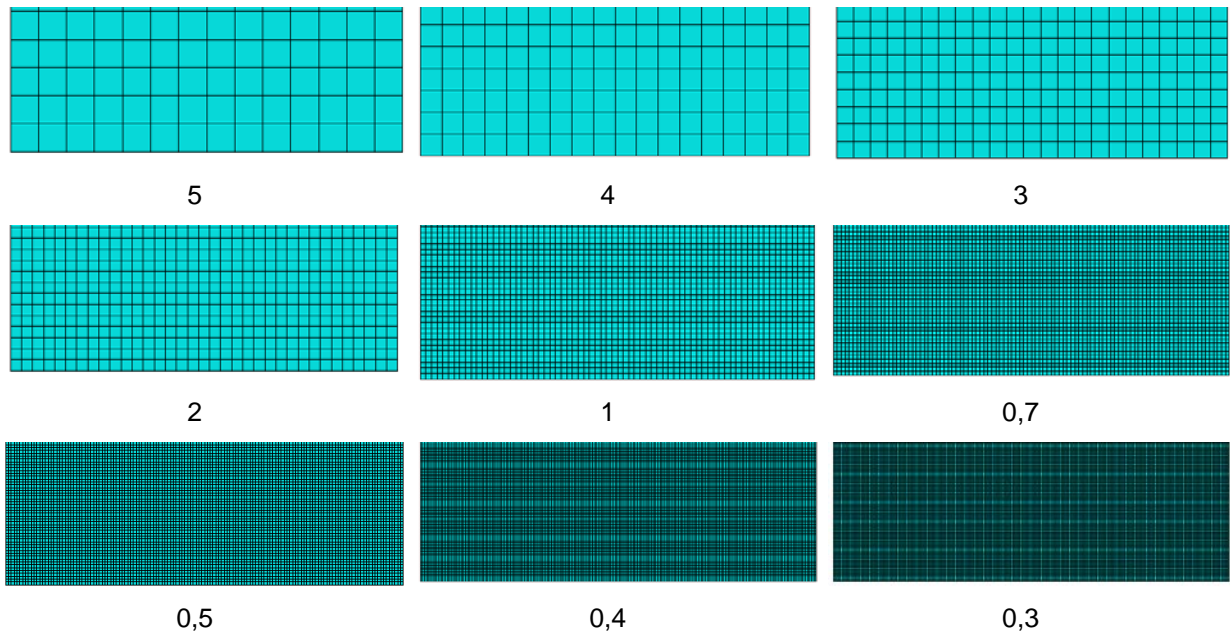
9 pontos de integração na espessura para elementos do tipo casca ou barra. Em trabalhos de simulação aplicados a embutimento e retorno elástico com elementos tipo casca. Yamamura, Kuwabara e Makinouchi (2002) afirmam que 7 e 15 pontos de integração são adequados. Lajarin (2012) estudou a influência do número de pontos de integração na simulação de retorno elástico verificando que após 5 pontos de integração na espessura os resultados tenderam a se estabilizar para o elemento tipo casca. Baseados nesses trabalhos, decidiu-se utilizar para as simulações 9 pontos de integração ao longo da espessura do elemento, considerando-o sendo excencial a precisão.

Para realização das simulações, programações e pré estudos do modelo foi utilizado um computador Intel Core 2 duo com processador de 2,4 GHz, com memória de 4096 Megabytes, localizado no laboratório de conformação mecânica da UFPR. Fatores de escala de massa ou de tempo não foram aplicados a simulação.

Uma boa malha deve ser refinada o suficiente para que todo o modelo possa convergir quando a ferramenta está deformando a chapa metálica. A malha do elemento deve garantir que os nós da superfície principal (ferramenta rígida) não entrem através da malha da superfície escrava (chapa) durante a simulação, uma vez que poderia gerar problemas de convergência.

Entretanto, o uso de uma malha muito densa pode significar um grande número de elementos e, portanto, um aumento no tempo computacional. Para analisar do elemento finito elemento tipo casca S4R e o refino necessário nas simulações utilizou-se 9 tamanhos diferentes de refino de malha. Foram analisadas as malhas de tamanho global 5; 4; 3; 2; 1; 0,7; 0,5; 0,4 e 0,3 utilizando as configurações e os dados experimentais para o Ensaio 1 (dt8_t0,8_α40_dz0,4). Esses refinamentos podem ser vistos na FIGURA 33.

FIGURA 33 - TAMANHO GLOBAL DE MALHA.



FONTE: O autor (2017).

Os tamanhos globais de malha utilizados para esse modelo apresentam um número distinto de elementos S4R conforme configuração padrão. Esse valor pode ser visto na TABELA 12.

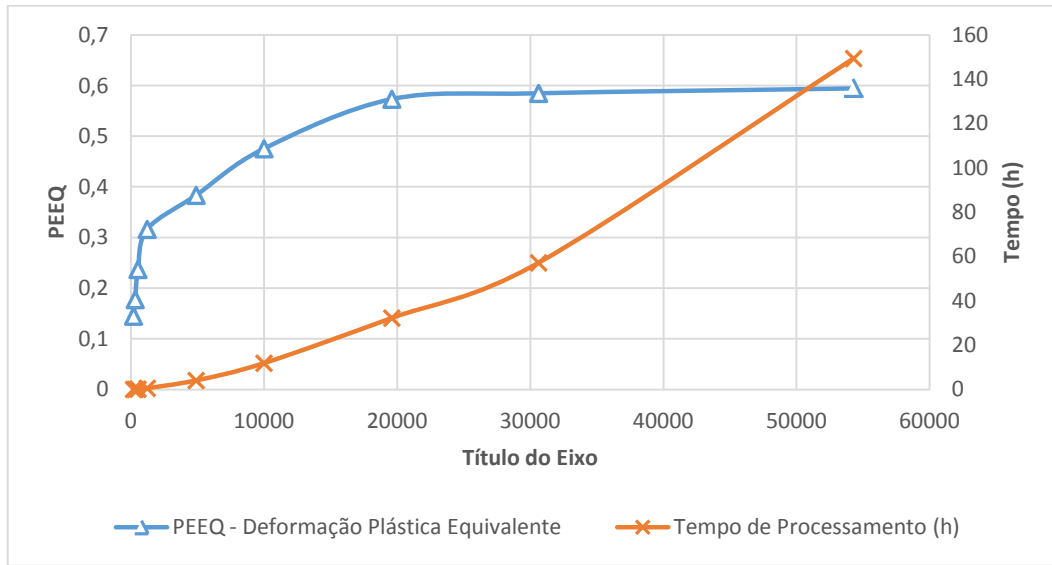
TABELA 12 - TAMANHO GLOBAL DE MALHA EM NÚMERO DE ELEMENTOS.

Tamanho Global da Malha	5	4	3	2	1	0,7	0,5	0,4	0,3
Número de Elementos	196	324	529	1225	4900	10000	19600	30625	54289

FONTE: O autor (2017).

O estudo de densidade de malha para determinar o refino de malha ótima a se utilizar nas simulações usou como base a deformação plástica equivalente (PEEQ), conforme estudos realizados por Nair (2011). Para diferentes densidades de malha, podendo ser vista no gráfico da FIGURA 34. Este gráfico também apresenta o tempo médio gasto necessário para cada simulação em cada nível de refino.

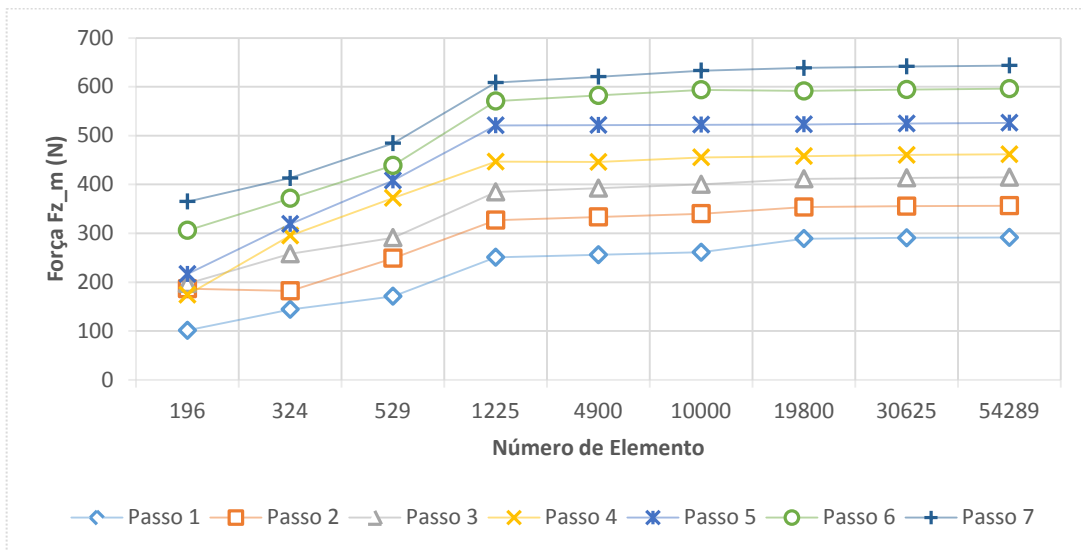
FIGURA 34 - CÁLCULO DO REFINO DE MALHA COM BASE NA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA.



FONTE: O autor (2017).

Da mesma forma, foram realizados estudo de densidade de malha com base na análise das forças médias na direção z (Fz_m). A FIGURA 35 apresenta o comparativo feito com base no refino e na média dos valores das forças Fz_m , mostrando que nos 3 últimos refinamentos não há grandes alterações nos valores médios das forças.

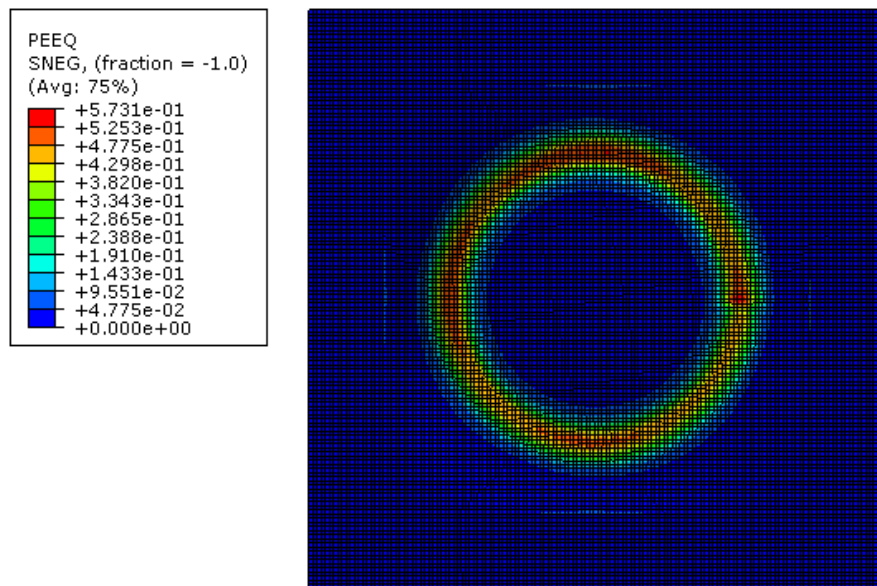
FIGURA 35 - CALCULO DO REFINO DE MALHA COM BASE NA FORÇA FZ MÉDIA.



FONTE: O autor (2017).

Com base nos dados apresentados de deformação plástica equivalente (PEEQ) e das forças médias na direção z (Fz_m), a densidade de malha selecionada foi a de tamanho global 0,5 correspondente a 19600 elementos para ser utilizada nas simulações. A FIGURA 36 mostra o refino na pré-análise de malha do ensaio 1.

FIGURA 36 - MALHA USADA PARA ESTAMPAGEM DO CONE TRUNCADO.



FONTE: O autor (2017).

4.3 DISCUSSÃO

4.3.1 Análise de sensibilidade do atrito

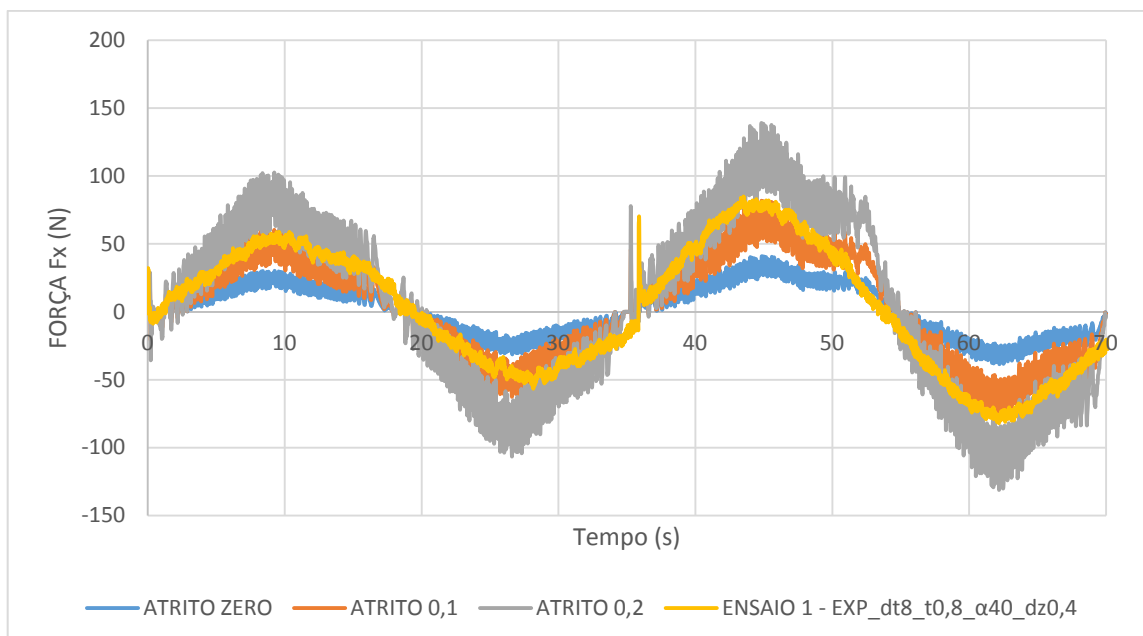
A sensibilidade do modelo numérico ao atrito foi analisada para a peça de cone truncado, utilizado o Ensaio 1 (dt8_t0,8_α40_dz0,4) como base para o estudo. Nesse ensaio foi necessária uma ferramenta de conformação de diâmetro 8 mm, corpo de prova padrão de chapa de aço CS-A AZM 150 em espessura 0,8 mm e parâmetros para determinação do caminho da ferramenta com ângulo de parede de 40 graus e um avanço vertical (dz) de 0,4 mm.

Na simulação numérica deste experimento utilizou-se o modelo de atrito de Coulomb aplicando os coeficientes em 0,0 (sem atrito); 0,1 e 0,2, mantendo os parâmetros de entrada fixos (propriedades do material, geometrias das ferramentas,

condições de contorno e refino de malha) como definidos anteriormente na seção 4. Nas FIGURAS 37 (pg. 88), 38 e 39 (pg. 89) são apresentados os 2 primeiros passes da ferramenta e os resultados do estudo de atrito para as forças desenvolvidas nas direções x, y e z respectivamente.

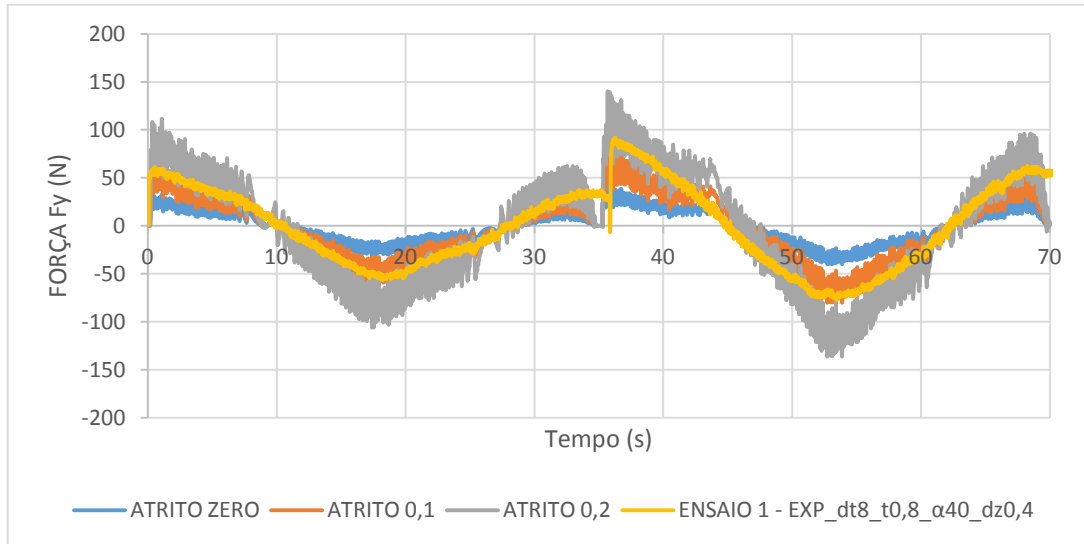
As forças desenvolvidas nas direções x e y com vários coeficientes de atrito. (FIGURA 37 e 38) mostram no primeiro passe da ferramenta para tempos $t < 35$ segundos, que em valores máximos para as forças de deformação na direção x, valores mínimos são vistos para a força na direção y, apresentando de forma senoidal. Em ambas figuras, verifica-se que as forças de deformação aumentam juntamente com o crescimento do coeficiente de atrito tanto para a direção x quanto para a direção y, repetindo esse comportamento no segundo passe da ferramenta para $t > 35$ segundos. Para os demais passos da ferramenta realizados nesse esse ensaio, totalizando 7 passos, o mesmo comportamento se desenvolve. A razão para este comportamento é devido à localização e a natureza da deformação da chapa durante o processo de estampagem incremental de ponto único (SPIF). Segundo Nair (2011, a deformação da chapa ocorre apenas numa área muito pequena que está em contato com a ferramenta e assim, o efeito do atrito sobre a força de deformação é apenas ao longo da direção de movimento da ferramenta no plano da chapa.

FIGURA 37 - FORÇA DESENVOLVIDA NA DIREÇÃO X COM VÁRIOS COEFICIENTES DE ATRITO.



FONTE: O autor (2017).

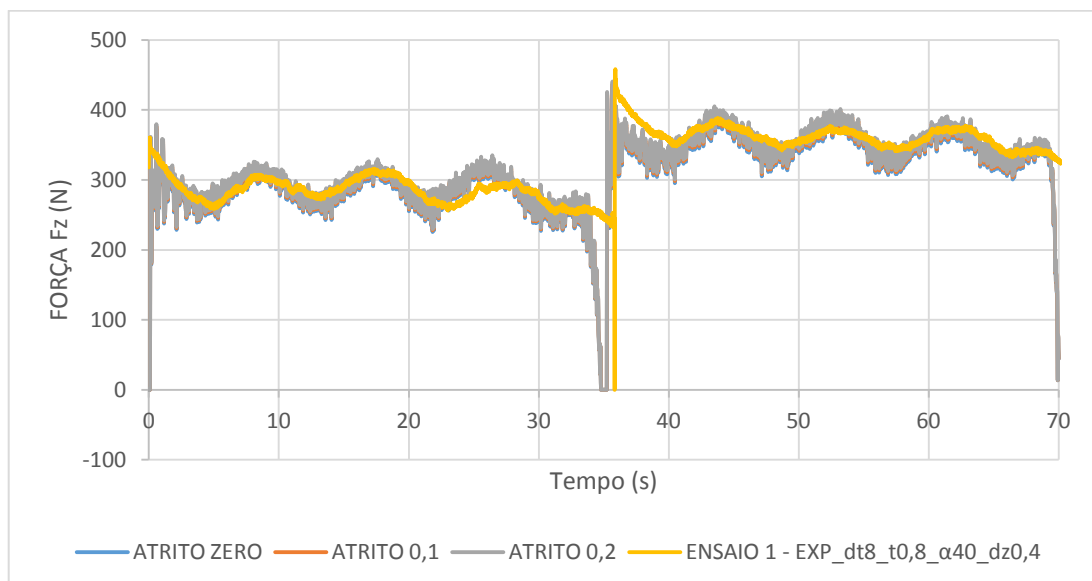
FIGURA 38 - FORÇA DESENVOLVIDA NA DIREÇÃO Y COM VÁRIOS COEFICIENTES DE ATRITO.



FONTE: O autor (2017).

Na FIGURA 39 são apresentadas as forças desenvolvidas nas direções z. Neste gráfico é visto que as forças necessárias para deformação permanecem as mesmas para os diferentes valores de atrito, coincidindo com o comportamento da curva experimental.

FIGURA 39 - FORÇA DESENVOLVIDA NA DIREÇÃO Z COM VÁRIOS COEFICIENTES DE ATRITO.



FONTE: O autor (2017).

Com relação ao atrito, observou-se que o aumento dele na simulação numérica acarretou em uma maior oscilação nos dados de força de forma crescente (FIGURA 37 e 38, pg 87 e 88), esse comportamento pode estar relacionado com o tamanho do tempo incremental e com o refino de malha.

Os estudos de sensibilidade ao atrito confirmaram que a força na direção z apenas depende da quantidade de metal que está sendo deformado e não sobre o atrito ou o percurso da ferramenta. Contudo, o atrito apresenta grande influência sobre as forças aplicadas no plano da chapa.

Devido aos valores de atrito correspondente as forças nas direções x e y estarem próximas de 0.1, e aos valores de atrito não terem influência direta nos dados de forças da direção z, utilizou-se coeficiente de atrito fixo em 0,1 para os demais ensaios.

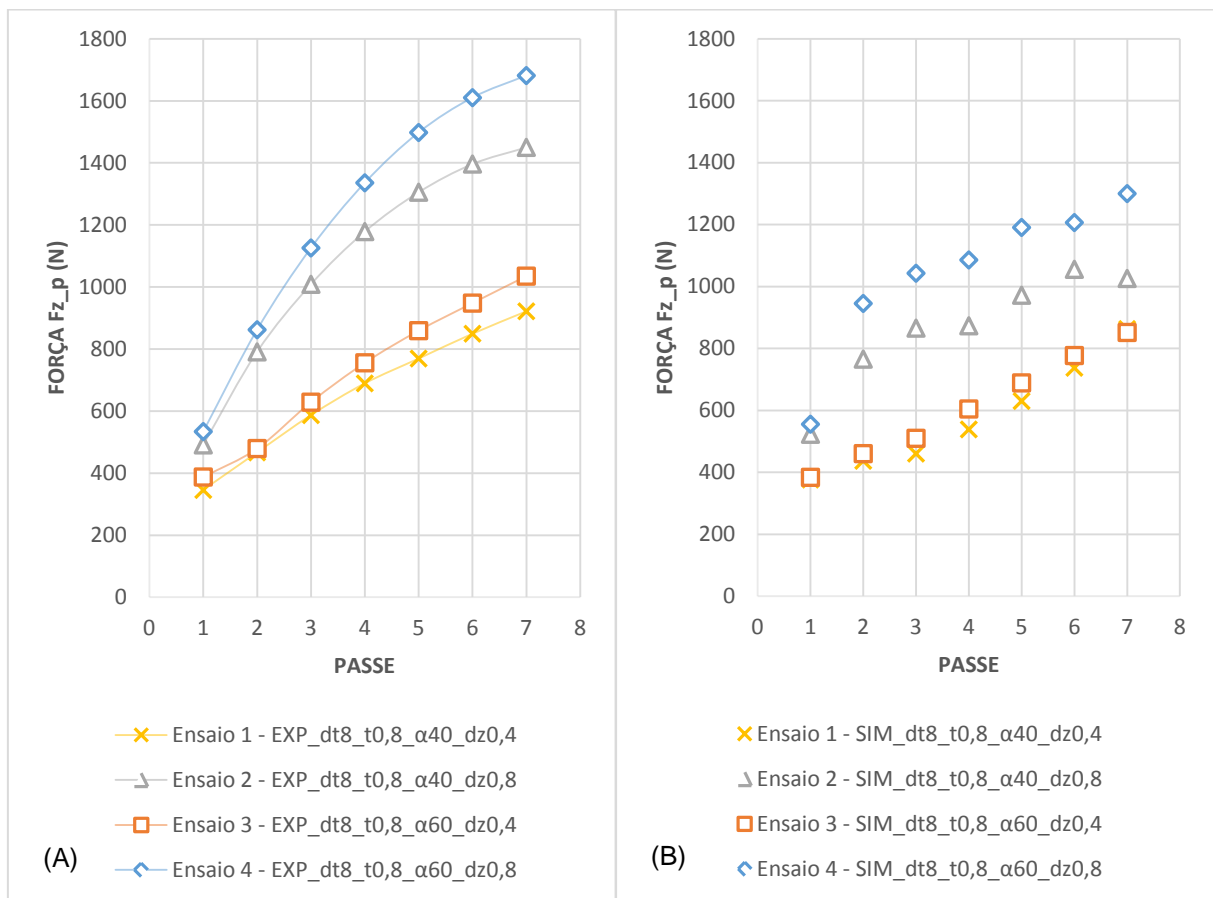
4.3.2 Predição das Forças Pico

As forças pico (Fz_p) são forças obtidas pelos ensaios experimentais as quais descrevem o comportamento do material durante a penetração inicial da ferramenta quando deslocada somente no eixo Z. Essas forças são críticas para o processo, assim como as forças cisalhantes Fxy . Segundo Duflou *et al.*(2007), em estudos do processo de estampagem incremental de chapas realizadas com alumínio Al3003-O e o Al3103-O, verificou para a peça de cone truncado variando ângulos de parede, que as forças pico geradas no início da conformação só apareciam para cones com ângulos de paredes maiores que 50 graus. Para ângulo de parede iguais ou menores essas forças não apareciam nos ensaios experimentais. Ao contrário, em estudo realizados por Valle (2016) com o aço CS-A galvanizado, relatou que em todos os experimentos e passes realizados, apareceram forças pico (Fz_p), para ângulos de parede 40, 50 e 60 graus estudados. Avaliando outros parâmetros de processo também relatou que com o aumento do diâmetro da ferramenta (dt), espessura da chapa (t) e incremento vertical (dz), favorecem ao crescimento das forças pico (Fz_p).

Nos experimentos realizados com o aço ASTM A 792M CS-A AZM 150, aço similar ao usado por Valle (2016) verificou-se também o aparecimento de forças pico em todos os ensaios e passos gerados pela ferramenta.

Na predição das forças pico (Fz_p) para os 4 ensaios estudados, utilizou-se de dados experimentais e simulados, tratados segundo metodologia abordada. Estudos prévios para análise das forças picos na simulação do processo de estampagem de chapas por ponto único, mostram que em tempos incrementais grandes, essas forças não parecem na simulação. Além disso, se fosse obtido poucos pontos de força calculados durante a simulação, esses valores também podem não aparecer, por estarem localizados somente no início de cada passe da ferramenta. Sendo assim, para essa análise utilizou-se um tempo incremental pequeno, com tamanho $t = 1,0 \times 10^{-04}$ (s) por ponto calculado, totalizando 10000 pontos para a simulação dos 7 passos da ferramenta em cada um dos ensaios. Os resultados são apresentados na FIGURA 40.

FIGURA 40 - FORÇAS PICO EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS. (A) FORÇAS EXPERIMENTAIS, (B) FORÇAS SIMULADAS

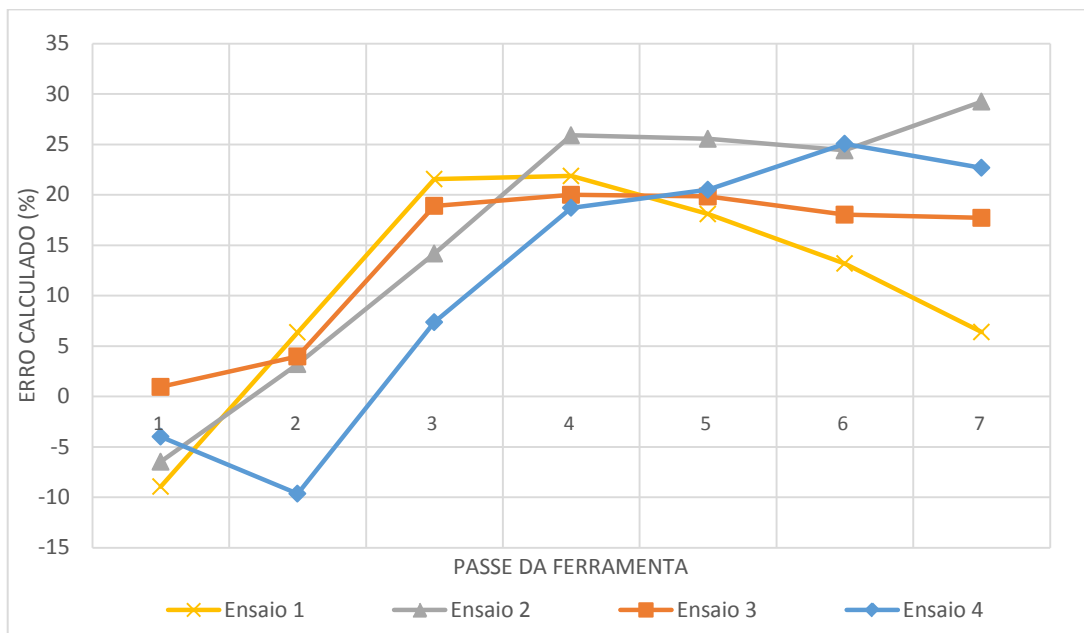


FONTE: O autor (2017).

Nas FIGURA 40(A) e 40(B) mostram o gráfico das forças pico obtidas para cada um dos ensaios. Pode-se observar que o crescimento das forças pico nessas simulações ao longo de cada passe, aparecem de forma semelhantes as obtidas nos experimentos realizados com o dinamômetro, mas não chegam a picos de forças bastante altos como dos experimentos práticos.

Comparando o erro obtido pela predição de forças simulada versus a experimental, apresentados na FIGURA 41, foi encontrado para todos os ensaios erros de até $\pm 10\%$ nos primeiros 2 passes e erros maiores nos demais passos gerados pela ferramenta, podendo chegar a até 29,24% neste estudo. Os dados referentes ao primeiro e segundo passe da ferramenta se mostraram bastante próximo, no entanto, com o passar da ferramenta aplicando os demais passes, os dados começaram a divergir, não predizendo as forças máximas.

FIGURA 41 - ERRO NA PREDIÇÃO DE FORÇAS PICO SIMULADAS.



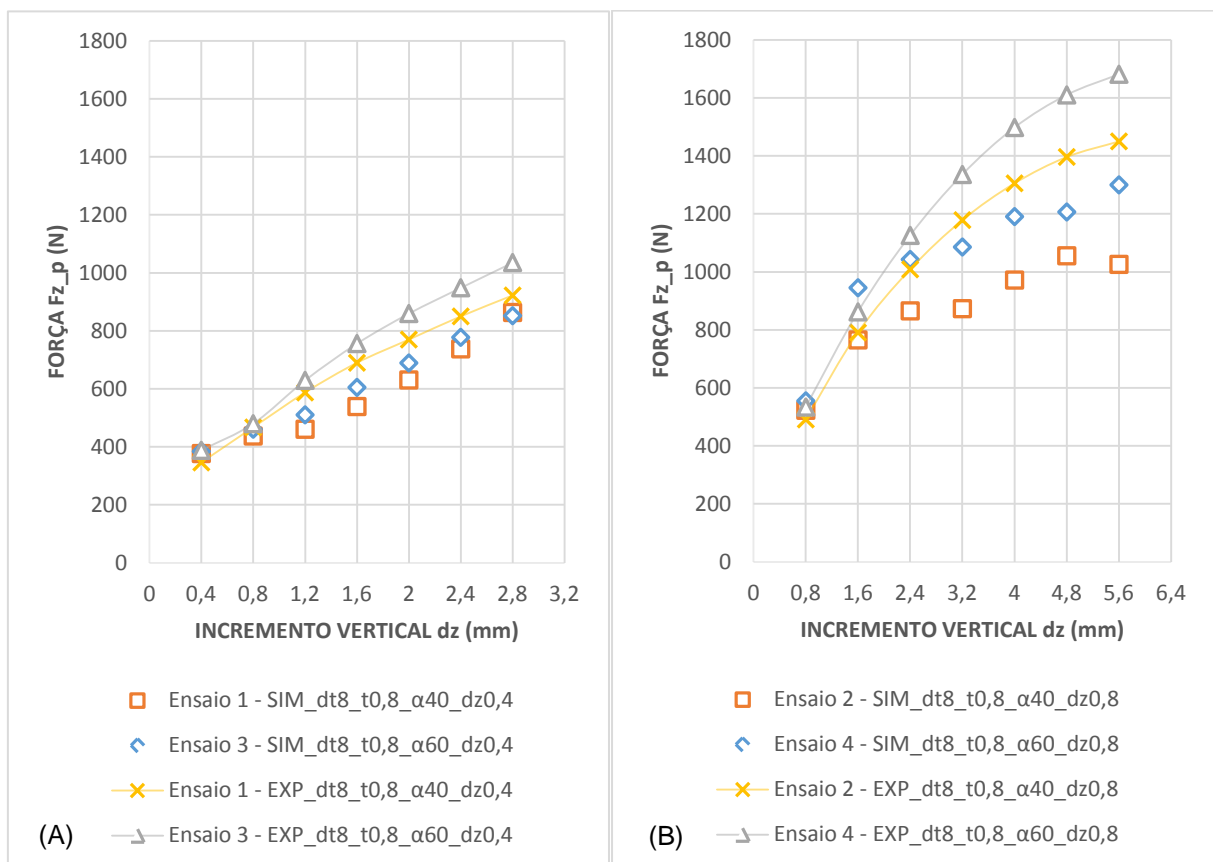
FONTE: O autor (2017).

Esse grande e crescente erro relacionado as forças pico (Fz_p) está ligado ao aumento das forças F_x e F_y que, ao passar dos passes da ferramenta, essas forças se tornam mais intensas. Isso pode ser observado nas (FIGURAS 37 e 38, pg.88 e 89 respectivamente) no início do processo. O mesmo comportamento pode

ser observado nos trabalhos de Nair (2011), estudando a estampagem incremental de ponto único em peças tipo pirâmide e tipo cone truncado.

Na FIGURA 42 (pg. 93) é apresentada uma comparação das forças pico obtidas nos experimentos e das obtidas na simulação numérica para diferentes ângulos de parede. É visto tanto na FIGURA 42(A) quanto na FIGURA 42(B) que o aumento do ângulo de parede e o aumento do incremento vertical ou passo vertical favorece no crescimento das forças de deformação. Desta forma é possível constatar que a simulação numérica está prevendo corretamente o comportamento do material quando analisados diferentes parâmetros de processo. Entretanto, como abordado anteriormente, somente nos primeiros passes da ferramenta os valores se apresentam próximos, divergindo com o aumento do incremento dz ao longo dos passes da ferramenta.

FIGURA 42 - FORÇAS PICO EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO. (A) FORÇAS PICO PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,4$; (B) FORÇAS PICO PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,8$.

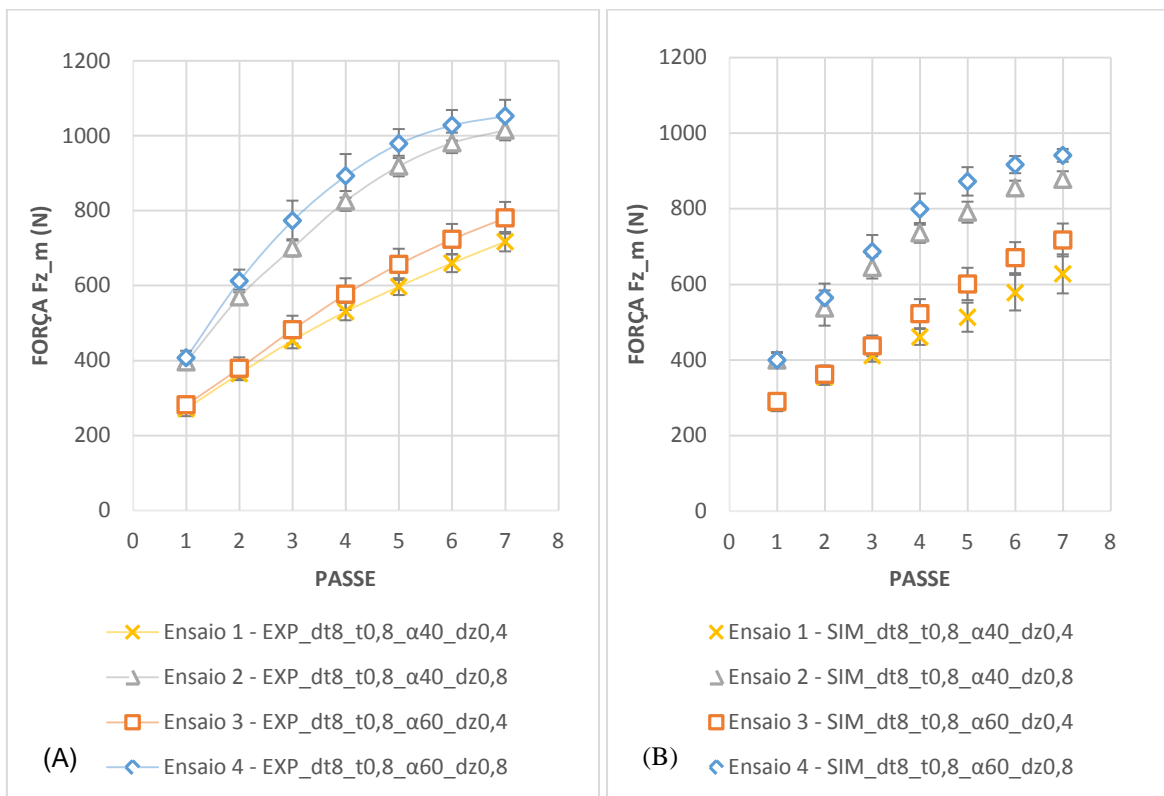


FONTE: O autor (2017).

4.3.3 Predição das Forças Normais Médias

Na predição das forças normais médias (Fz_m), realizadas para os 4 ensaios experimentais e simulados, seguindo metodologia abordada, foram retirados os dados de força média na direção-z assim como o desvio-padrão dessas cargas, excluindo os dados iniciais e finais do processo onde aparecem as forças picos e a redução de carga devido ao deslocamento da ferramenta de conformação. Pode-se observar que o comportamento das curvas dos ensaios experimentais e o desvio-padrão dos dados para cada valor de forças se apresentam bastante parecidos. Contudo, como ocorrido para as forças pico, e apresentado na FIGURA 43(A) e 43(B), os valores obtidos nos passes 1 e 2, aparentam estar bem próximos dos dados experimentais, começando a divergir nos passes subsequentes, não chegando a valores de força tão altos. Sendo assim, a curva simulada não consegue prevê com qualidade os dados ao longo dos passes. Esses comparativos podem ser melhor interpretados na FIGURA 44(A) e 44(B).

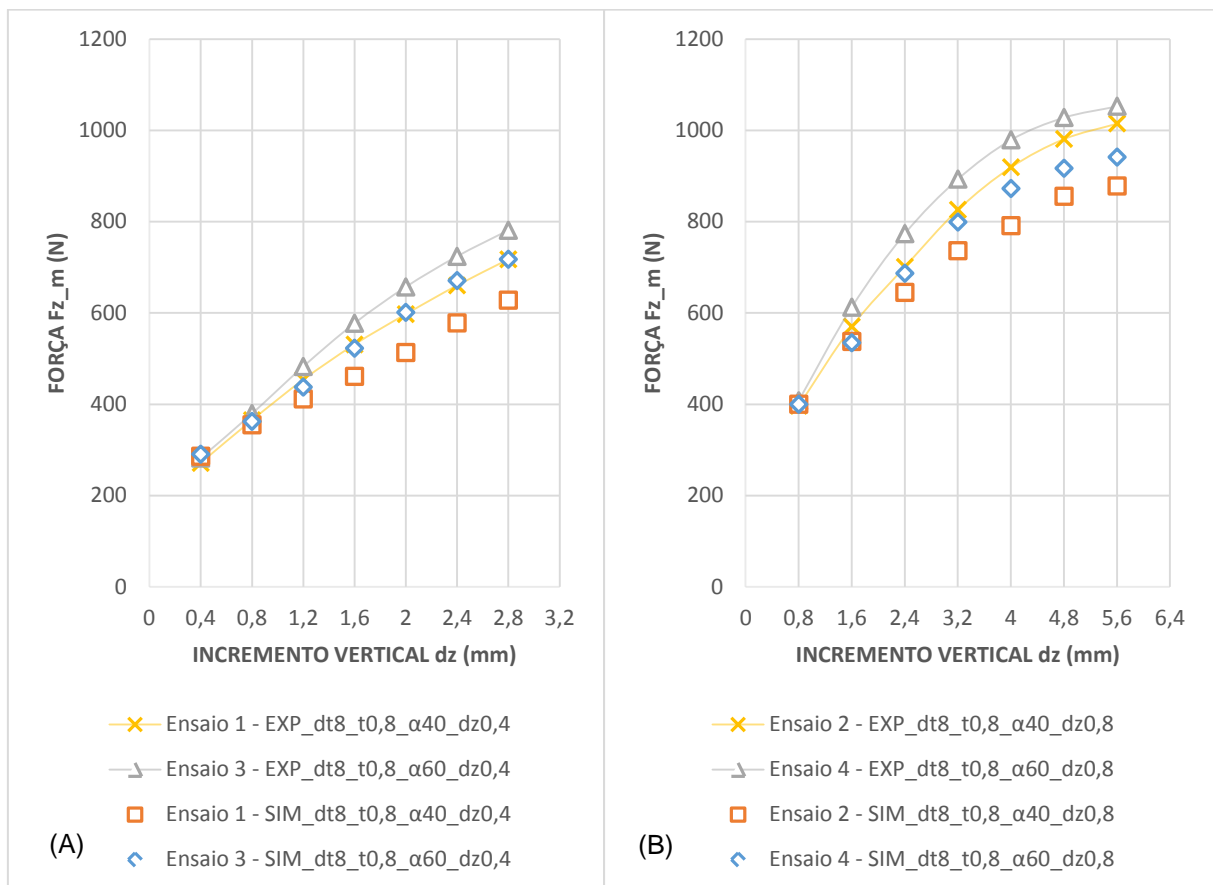
FIGURA 43 - FORÇAS NORMAIS MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS. (A) FORÇAS EXPERIMENTAIS, (B) FORÇAS SIMULADAS



FONTE: O autor (2017)

Nas FIGURA 44(A) e 44(B) (pg. 95) são feitas comparação das forças normais médias obtidas nos experimentos e na simulação numérica para diferentes parâmetros de processo. Assim como observado na avaliação das forças pico, é visto na FIGURA 44(A) e 44(B) que o aumento do ângulo de parede e o aumento do incremento vertical favorecem o crescimento das forças de deformação, sendo necessária uma especial atenção a esses parâmetros de processo. Esse comportamento das forças de deformação ao longo da mudança de parâmetro de processo pode ser previsto pela simulação computacional embora ainda necessite de ajustes para a previsão de forças.

FIGURA 44 - FORÇAS NORMAIS MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO. (A) FORÇAS NORMAIS MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,4$; (B) FORÇAS NORMAIS MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,8$.



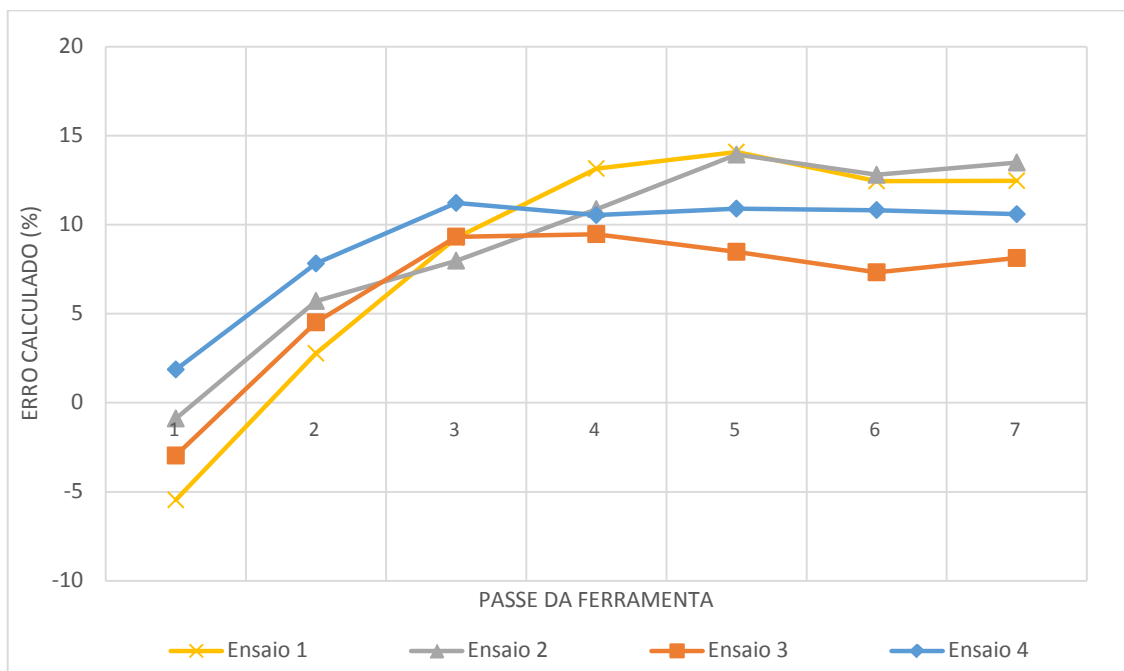
FONTE: O autor (2017).

Avaliando o erro obtido pela predição de forças normais médias simuladas versus a experimental (FIGURA 45, pg. 96), foi encontrado para todos os ensaios

erros de até $\pm 10\%$ nos primeiros 2 passes e erros maiores nos demais passos gerados pela ferramenta, chegando a erros máximos 14,1% neste estudo. Os dados referentes ao primeiro e segundo passe da ferramenta se mostraram bastante próximo, no entanto, com o passar da ferramenta aplicando os demais passes, os erros começaram a aumentar, estagnando no quinto, sexto e sétimo passe, apresentando erros aproximados entre 10% e 14%. Erros negativos apresentados neste gráfico, mostram que a simulação sobre previu os dados médios de força. Erros semelhantes podem ser observados nos trabalhos de Nair (2011); Wang, Nair e Zhang (2016) e Aerens, Eyckens, *et al.* (2010) aplicados a alumínio.

Avaliando a questão dos experimentos, os erros dos ensaios 1 e 2 deram erros maiores que os experimentos 3 e 4, a diferença desses ensaios está relacionada a mudança do parâmetro de processo “ângulo de parede” que por sua vez reduz o erro de predição (FIGURA 45).

FIGURA 45 - ERRO NA PREDIÇÃO DAS FORÇAS NORMAIS MÉDIAS SIMULADAS



FONTE: O autor (2017).

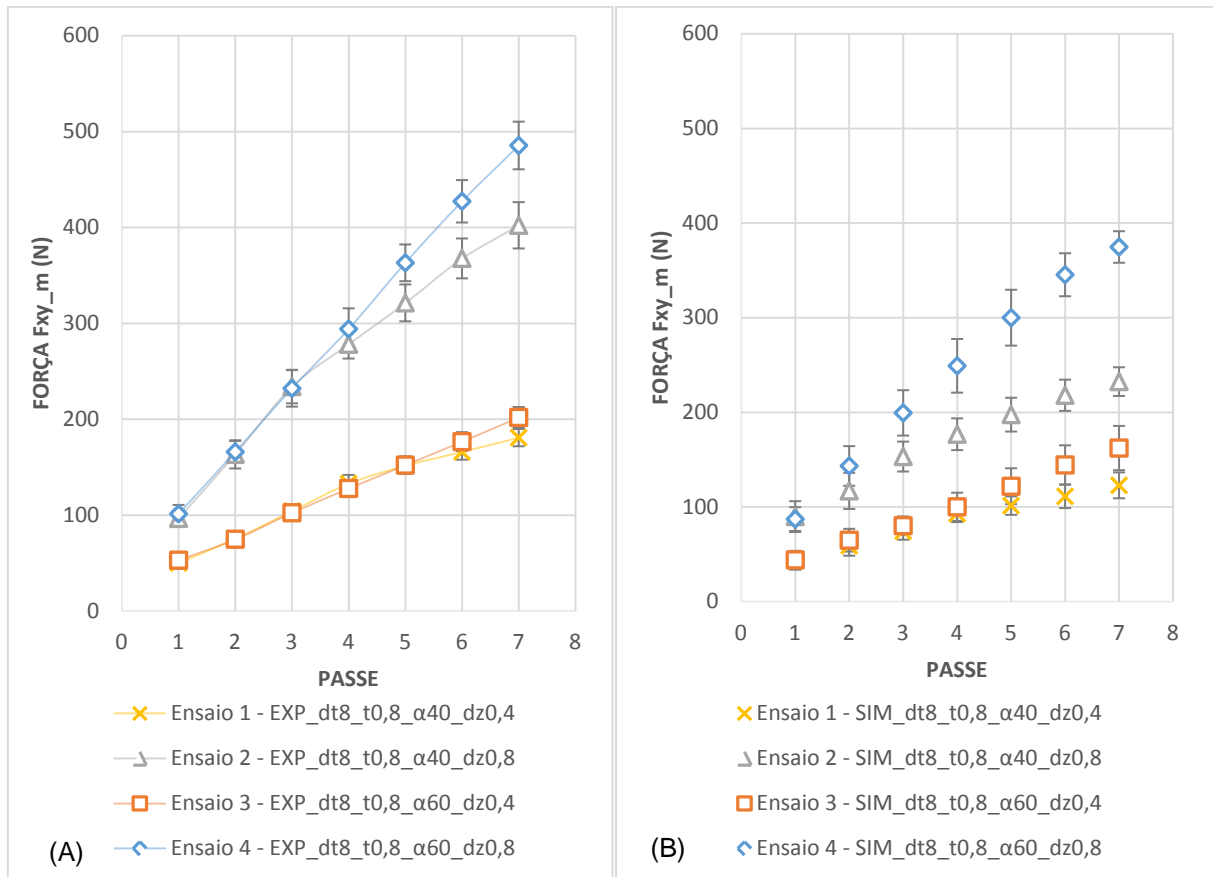
Na prática, a ferramenta pode passar várias vezes pelo mesmo ponto da chapa. Segundo Emmens e Boogaard (2008), a passagem da ferramenta provoca carga e descarga da chapa, proporcionando o efeito Bauschinger, que está sujeito a um ciclo de deformação que aumenta a sua capacidade de deformação. Desta

forma, o mecanismo de endurecimento isotrópico do material não consegue suprir as mudanças ocorridas ao longo dos passes, sendo necessário outro mecanismo de endurecimento cinemático ou misto. Nos trabalhos de Aerens, Eyckens, et al (2010) os dados mostram que o erro de predição entre 1% a 26%. Nos trabalhos de Henrard, Bouffioux, et al.(2011) mostraram que o modelo de escoamento isotrópico de Von Mises aliado a um mecanismo de endurecimento combinado isotrópico–cinemático de Voce–Ziegler melhorou a predição das forças em comparação aos outros modelos.

4.3.4 Predição das Forças Cisalhantes Médias

Na predição das forças cisalhantes médias (F_{xy_m}), realizadas para os 4 ensaios experimentais e simulados, seguindo a mesma metodologia abordada para as forças normais médias (F_z_m). Como realizado nas outras simulações foi utilizado o coeficiente de atrito de Coulomb igual a 0,1. Sendo assim, na FIGURA 46(A) observou-se que o comportamento das curvas dos ensaios experimentais e o desvio-padrão dos dados para cada valor de forças se apresentam semelhantes com os dados simulados na FIGURA 46(B).

FIGURA 46 - FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS. (A) FORÇAS EXPERIMENTAIS, (B) FORÇAS SIMULADAS

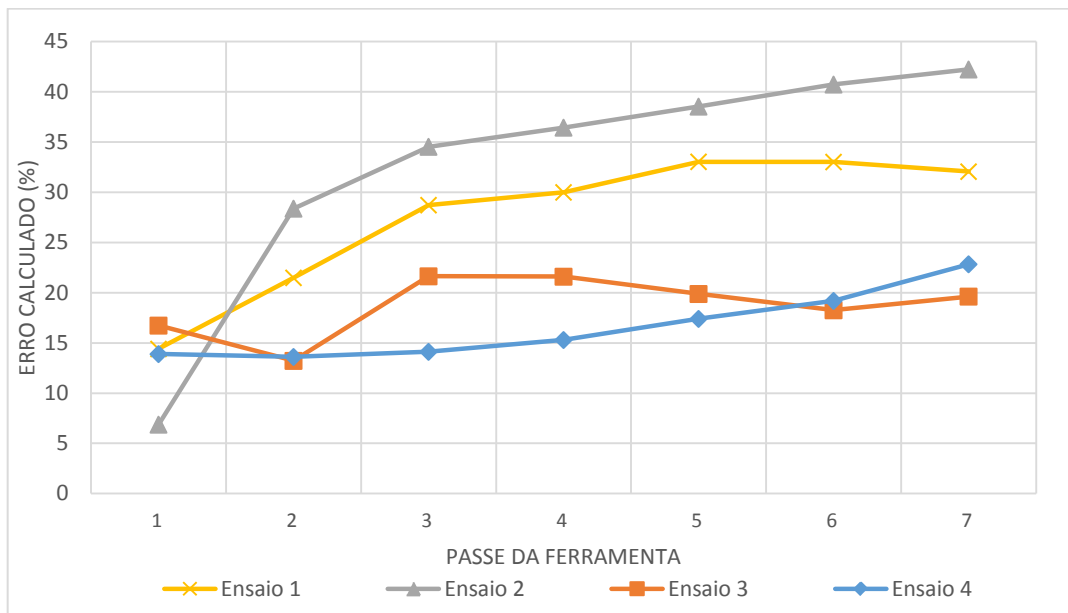


FONTE: O autor (2017).

Verificando os dados iniciais e finais das forças médias F_{xy} nas FIGURAS 46(A) e 46(B), observou para todos os passes grande divergência em relação à média, embora não seja possível ver claramente, no passe 1 do ensaio 1; 2; 3 e 4, os valores experimentais foram respectivamente de 49,93 N; 96,43 N; 52,91 N e 101,19N; enquanto que na simulação os valores médios foram 42.73 N; 89.80 N; 44.06N e 87.13 N, minimizados pelo desvio-padrão médio de aproximadamente 10N. Já para o último passe para o ensaio 1;2; 3 e 4, os valores experimentais foram de 180.73 N; 402,23 N; 201.80 N e 485,49 N e os simulados de 122.80 N; 232.38 N; 162.20 N e 374.62 N, com desvio padrão médio de aproximadamente 17N.

Como visto, em alguns casos, os valores experimentais versus o simulado chegam a quase o dobro do valor de força. Esse grande erro de predição pode ser observado no gráfico de erros para a forças cisalhantes F_{xy} (FIGURA 47).

FIGURA 47 - ERRO NA PREDIÇÃO DAS FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS SIMULADAS

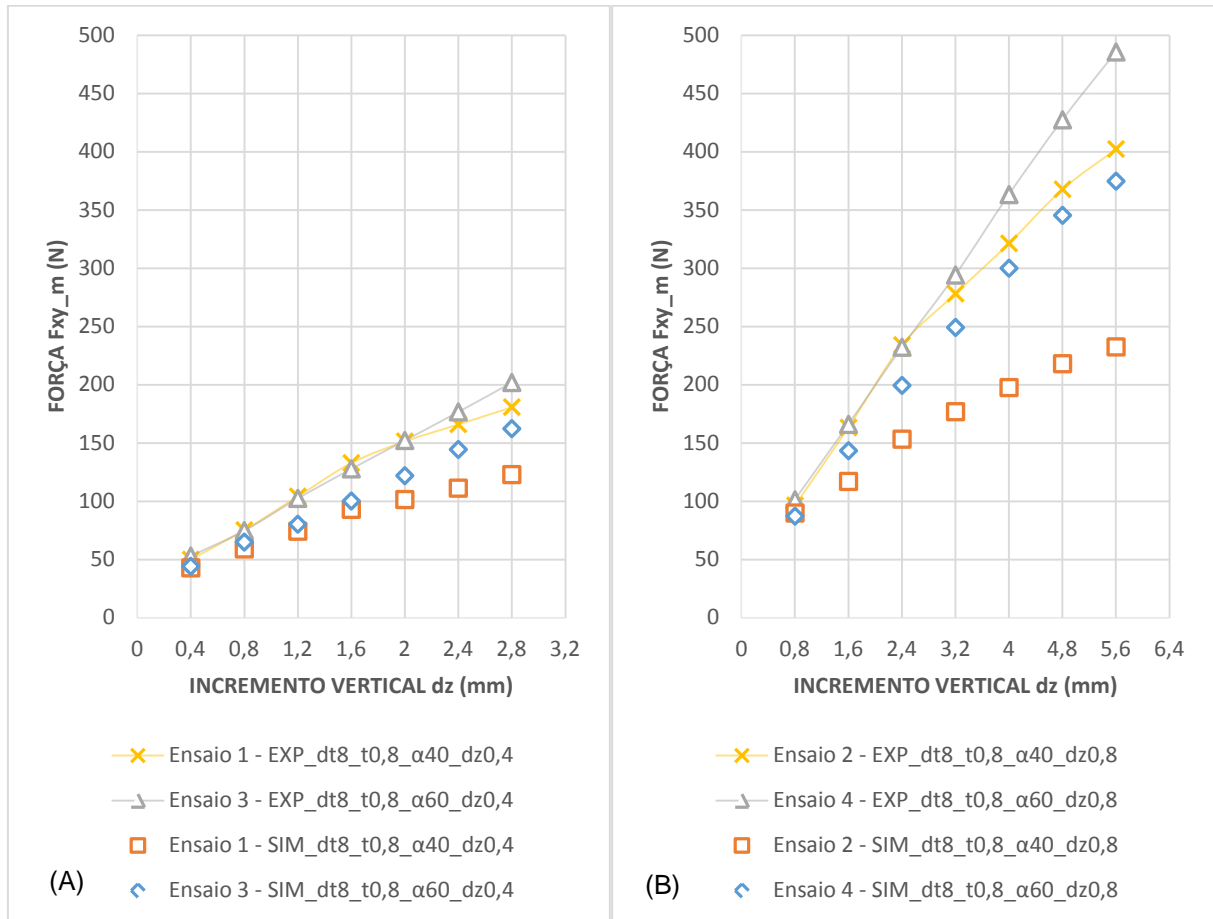


FONTE: O autor (2017)

Como referenciado pela literatura e observado neste trabalho, o atrito e as forças cisalhantes, na direção x e y, influenciam diretamente na predição das forças pico. Devido a não otimização do coeficiente de atrito, o qual é indispensável nos estudos futuros, a curva simulada não consegue prevê com qualidade os dados de força cisalhantes ao longo dos passes. Avaliando os ensaios, assim como constatados na avaliação de erro das forças F_z médias (FIGURA 45, pg. 96), os ensaios 1 e 2 deram erros maiores que os experimentos 3 e 4, ensaios que apresentam mudança do parâmetro de processo “ângulo de parede” que por sua vez reduz o erro de predição do modelo.

Na comparação das forças cisalhantes médias obtidas nos experimentos e na simulação numérica para diferentes parâmetros de processo. Assim como observado na avaliação das outras forças, na FIGURA 48(A) e 48(B) o aumento do ângulo de parede e o aumento do incremento vertical favorece no crescimento das forças de deformação. Esse comportamento das forças de deformação também pode ser previsto analisando as forças cisalhantes F_{xy} .

FIGURA 48 – FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES PARÂMETROS DE PROCESSO. (A) FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,4$; (B) FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS PARA INCREMENTO VERTICAL $DZ=0,8$.

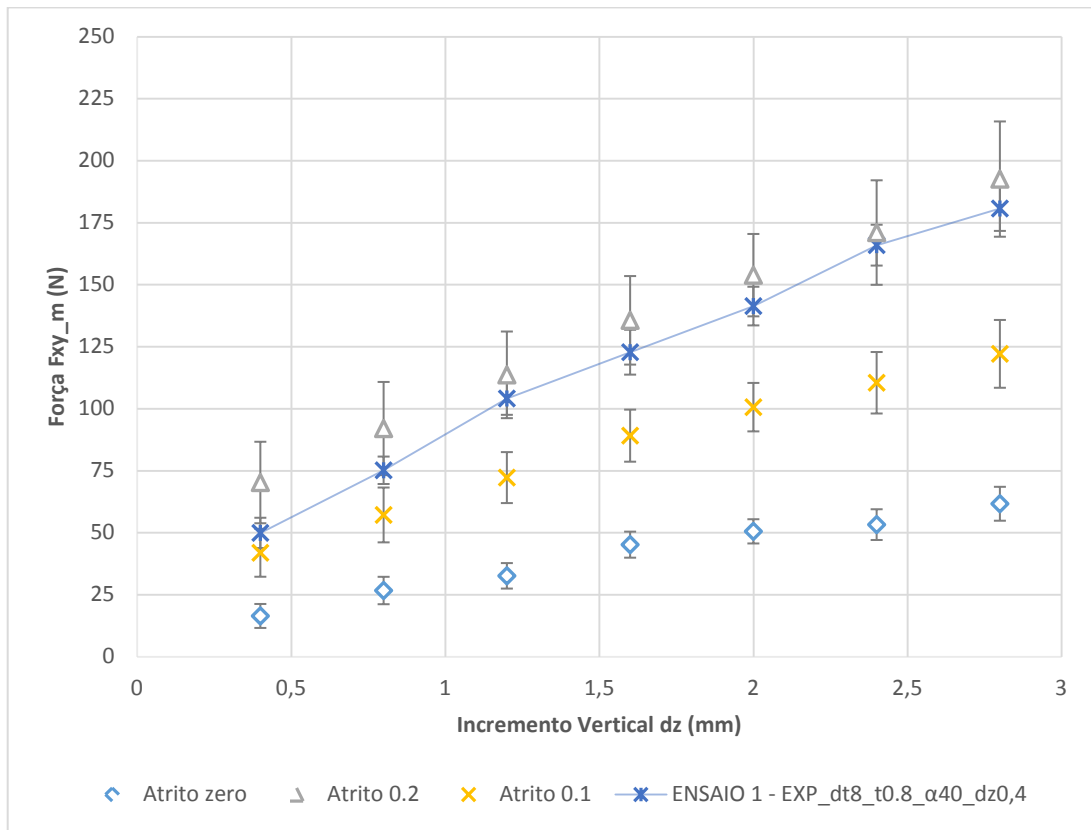


FONTE: O autor (2017)

Nos trabalhos realizados por Yanle, Zhaobing, et al. (2014) ao analisar as forças cisalhantes do processo, mostraram que um modelo combinado isotrópico e cinemático apresentou melhor acurácia com os resultados experimentais, obtendo erros médio entre de 6 e 11% e erros máximos próximos de 17% e 24% entre as forças tangências experimentais geradas a partir das forças F_x e F_y .

Na FIGURA 49 é apresentada uma análise da variação do coeficiente de atrito de Coulomb aplicado na simulação numérica via Abaqus®, aplicada para o ensaio 1. O gráfico mostra um crescimento linear das forças F_{xy} com o aumento da profundidade do incremento vertical (dz) ao longo dos passes.

FIGURA 49 - FORÇAS CISALHANTES MÉDIAS EXPERIMENTAIS VERSUS SIMULADAS PARA DIFERENTES VALORES DE ATRITO.



FONTE: O autor (2017).

Com o aumento do coeficiente de atrito, as forças F_{xy} também crescem, como já era esperado. Entretanto aumentar o atrito não resolverá o problema de predição das forças dependentes desse parâmetro como observado na (TABELA 13, pg. 101).

TABELA 13 - FUNÇÃO LINEAR PARA FORÇAS F_{XY_M} .

Dados	Função Linear $f(x)$	Coefficiente de Correlação de Pearson (R^2)
Experimental	$55.469x + 34.127$	0.9801
Simulado com atrito Zero	$18.464x + 11.38$	0.9759
Simulado com atrito 0.1	$33.539x + 31.152$	0.9916
Simulado com atrito 0.2	$50.474x + 51.967$	0.9983

FONTE: O autor (2017).

A predição das forças F_{xy} médias foram aproximadas por retas, para se observar o coeficiente angular de cada uma das funções. Em comparação dos dados experimentais com os simulados em diferentes valores de atrito, observa-se que o coeficiente angular da função experimental é maior, mesmo para simulações com coeficiente atrito 0,2. Isso demonstra que conhecer o atrito aplicado ao processo não resolverá na predição da força F_{xy_m} , sendo necessário corrigir outro parâmetro, como o tipo de endurecimento imposto pelo processo.

5 CONCLUSÃO

A modelação numérica de problemas mecânicos através do método dos elementos finitos permite a previsão aproximada do campo de tensões e deformações num processo de conformação de chapa. A correta utilização dos softwares de simulação nos processos de conformação é crucial para a fiabilidade dos resultados finais, que dependem não só das variáveis introduzidas pelo utilizador para modelação do material, como também de uma correta escolha do grau de refinamento da malha de elementos, correta modelação das condições de contorno e tipo de elemento finito a seleccionar.

No âmbito deste trabalho, para a simulação numérica de processos de estampagem incremental de ponto único, optou-se por avaliar um modelo que descrevesse o processo no âmbito experimental, utilizado uma abordagem explícita e um modelo de endurecimento isotrópico para o material. O modelo mecânico tridimensional modelado numericamente no Abaqus[®]/Explicit, possibilitou avaliar as variáveis de processo e a predição das forças na estampagem incremental de chapas por ponto único. Os principais progressos realizados durante este trabalho foram.

- Compreensão dos parâmetros de influência no processo e na simulação numérica;
- Com base nos estudos realizados com o aço CS-A de espessura 0,8 mm mensurado durante processo, observou que nos experimentos simulados via Abaqus[®]/Explicit com o modelo de endurecimento isotrópico conseguiu se aproximar dos dados experimentais nos primeiros passes. Entretanto, para maiores números de passes o modelo começou a se distanciar dos dados experimentais;
- Com base na avaliação do modelo explícito, o modelo se comportou como planejado, apresentando dados de qualidade para predição de forças nos primeiros passes da ferramenta para todos os ensaios no que diz respeito a Fz_p , Fz_m e Fxy_m ;

- Com base na observação da força de medição, verificou-se que a simulação identificou com qualidade o comportamento das forças segundo variáveis de processo;
- Os erros encontrados na predição das forças normais média e forças pico estão de acordo com a literatura estudada, não havendo melhora;
- A simulação e os dados experimentais mostraram que em ambas as análises os parâmetros de processo estudados (ângulo de parede e passo vertical) influenciam nos dados de força.
- Com relação as forças pico aplicada a tempos incrementais pequenos, os valores de carga crítica também podem ser aproximados nos primeiros passes da simulação.
- Sobre o uso do mecanismo de endurecimento isotrópico na simulação numérica, constatou que ele prever o comportamento do material durante as variações do processo de estampagem incremental de chapas, todavia, ele não ajuda a prever as forças de deformação ao longo de vários passes.
- Para melhor a predição das forças F_{xy} , além de um modelo aplicado com o mecanismo de endurecimento do material deve-se aproximar o coeficiente de atrito na simulação numérica.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Em suma, o trabalho apresentado consistiu na iniciação à investigação da predição numérica da estampagem incremental por único ponto, no entanto foram verificados aspectos importantes para a definição de perspectivas para trabalho futuros que incide essencialmente no domínio da simulação numérica do processo de estampagem incremental. As melhorias podem se inserir nos seguintes tópicos e deverão incluir a utilização de um software de simulação de elementos finitos para alteração de funções mais avançadas, tais como:

- Estudar e aplicar modelos de endurecimento cinemático para obter resultados mais precisos da deformação após a passagem da ferramenta;
- Desenvolvimento de algoritmos de refinamento local da malha para redução do tempo de processamento;
- Estudar a influência do contato entre a ferramenta e a chapa na simulação numérica, de forma a melhorar os resultados numéricos;
- Estudar a influência do comportamento anisotrópico de materiais na simulação numérica de estampagem incremental de ponto único;
- Desenvolver técnicas e modelos para a predição de forças pico aplicada nos inícios de ciclo da ferramenta;
- Desenvolver e aplicar modelos de falha e predição de falha no processo de estampagem incremental de ponto único;
- Alargar as simulações numéricas ao estudo de outros materiais na aplicação em estampagem incremental tais como materiais já pintados.

Os trabalhos futuros sugeridos nesta seção, para o avanço dos estudos em simulação numérica do processo de estampagem incremental de ponto único se faz necessário aplicada em conjunto com uma base experimental.

REFERÊNCIAS

ABAQUS. Inc, ABAQUS Theory Manual, version 6.9, 2009.

ABAQUS 6.12 Analysis User's Manual. **University of Cambridge**, 2015. Disponível em:

<https://things.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/books/usb/default.htm>. Acesso em: 08 fev. 2016.

AERENS, R. et al. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 46, n. 9, p. 969-982, 4 fev. 2010.

ALTAN, T.; TEKKAYA, A. E. **Sheet Metal Forming: Fundamentals**. Ohio - USA: ASM international, 2012.

ALVES, J. L. C. M. **Simulação Numérica do Processo de Estampagem de Chapas Metálicas**. Tese de Doutorado, Universidade do Minho. Guimarães / Portugal, p. 368. 2003.

AMBROGIO, G. et al. Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, p. 501-507, 2004.

AMBROGIO, G. et al. Sheet Thinning Prediction in Single Point Incremental Forming. **Advanced Materials Research**, v. 6-8, p. 479-486., 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112**. Standard for test methods for determining average grain size. ASTM International. Philadelphia, p. 24. 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E18-15**. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM International. West Conshohocken, PA, p. 38. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008**. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell. Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T). Rio de Janeiro, p. 18. 2008.

BAMBACH, M. et al. Initial experimental and numerical investigations into a class of new strategies for single point incremental forming simulations. **ESAFORM**, Bucharest, p. 671-674, 2005.

BAMBACH, M.; HIRT, G.; AMES, J. Quantitative Validation of FEM Simulations for Incremental Sheet Forming Using Optical Deformation Measurement. **Advanced Materials Research**, n. 6-8, p. 509-516., 2005.

BANABIC, D. **Sheet Metal Forming Processes - Constitutive Modelling and Numerical Simulation**. 1. ed. Berlin / Alemanha: Springer-Verlag, 2010.

BATHE, K. J.; WILSON, E. L. **Numerical Methods in Finite Element Analysis**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1976.

CARDEN, W. D. et al. Measurement of Springback. **International Journal of Mechanical Sciences**, n. 44, p. 79–101, 2002.

CASTELAN, J. **Estampagem incremental do titânio comercialmente puro para aplicação em implante craniano**. Porto Alegre, RS: Tese de Doutorado, 2010.

CAVALER, L. C. D. C. Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço. **Tese de Doutorado**, Porto Alegre, 2010.

CONI, N. H. D. S. **Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço Zincado por Imersão à Quente e Galvalume produzidos na CSN-PR**. Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba, p. 98. 2004.

CSN. Companhia Siderurgica Nacional. **Catalogo Galvalume**, 2017. Disponível em: <http://www.csn.com.br/irj/go/km/docs/csn_documentos/CSN/CATALOGO_ZINCAD O.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2017.

DUFLOU, J. et al. Experimental study on force measurements for single point incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 189, p. 65–72, jan. 2007.

EMMENS, W. C.; BOOGAARD, A. H. V. D. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 3688-3695, 2008.

EMMENS, W. C.; BOOGAARD, A. H. V. D. Incremental Forming Studied by Tensile Tests with Bending. **9th ICTP Conference**, Gyeongju, Korea, jul. 2008.

EMMENS, W. C.; SEBASTIANI, G.; BOOGAARD, A. H. V. D. The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 8, p. 981–997, jun. 2010.

ESSA, K. E. A. **Finite Element Prediction of Deformation Mechanics in Incremental Forming Processes**. University of Birmingham. UK, p. 255. 2011.

EYCKENS, P. et al. Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction. **International Journal of Material Forming**, p. 55–71, 2010.

FANTINI, L.; MICARI, L.; FILICE, F. Analysis of Material Formability in Incremental Forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 51, n. 1, p. 199-202, 2002.

FILICE, L.; MICARI, F.; AMBROGIO, G. A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1-3, p. 413-416, 2006.

FONTANARI, V. et al. Numerical and experimental analysis of the single point sheets incremental forming process. **15th International Conference on Experimental Mechanics**, Porto/Portugal, 22-27 jul. 2012. 12.

FRITZEN, D. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Latão 70/30**. Porto Alegre, RS: Dissertação de Mestrado, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: EDITORA ATLAS S.A., 2010.

GÓMEZ-LÓPEZ, L. M. et al. Simulation and Modeling of Single Point Incremental Forming Processes within a Solidworks Environment. **The Manufacturing Engineering Society International Conference, Elsevier**, n. 63, p. 632 – 641, 2013.

GRONOSTAJSKI, Z. The constitutive equations for fem analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 106, p. 40-44, 2000.

GUZMÁNA, C. F. et al. Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations. **International Journal of Solids and Structures**, v. 49, n. 25, p. 3594–3604, dez. 2012.

HENRARD, C. **Numerical Simulations of the Single Point Incremental Forming Process**. PhD Thesis. Université de Liège. Liège, Bélgica, p. 262. 2008.

HENRARD, C. et al. Initial experimental and numerical investigations into a class of new strategies for single point incremental forming simulations. **Springer-Verlag** , p. 576-590, dez. 2010.

HENRARD, C. et al. Forming forces in single point incremental forming: prediction by finite element simulations, validation and sensitivity. **Springer**, Verlag, p. 573–590, 2011. ISSN 10.1007/s00466-010-0563-4.

HILL, R. A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 193, p. 281–297, 1948.

HOLLOMON, J. H. **Tensile deformation**. AIME Transactions. v.162, p. 268-290. 1945.

HOSFORD, W. F. **Mechanical Behavior of Materials**. 2nd. ed. New York / USA: Cambridge University Press, 2010.

HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. **Metal Forming - Mechanics and Metallurgy**. 4th. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 2011.

JACKSON, K.; ALLWOOD, J. The mechanics of incremental sheet forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 3, p. 1158-1174, 2009.

JESWIET, J. et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. **Ann. CIRP 54**, p. 623–650, 2005.

KEELER, S. P. Understanding sheet metal formability; Part 3 - Properties related to forming. **Machinery**, p. 94-103, abr. 1968.

KIM, S. W. et al. Study on warm incremental formability of AZ31 alloy sheet. **Steel Research International.**, Kraków Poland, v. 1, p. 691-698, 2008.

KUMAR, Y.; KUMAR, S. Incremental Sheet Forming (ISF). In: R. GANESH NARAYANAN, U. S. D. **Advances in Material Forming and Joining.** India: Springer, 2015.

LAJARIN, S. F. **Influência da Variação do Módulo de Elasticidade na Previsão Computacional do Retorno Elástico em Aços de Alta Resistência.** Tese de Doutorado. UFPR. Curitiba, p. 197. 2012.

LI, K. P.; CARDEN, W. P.; WAGONER, R. W. Simulation of springback. **Int. J. of Mechanical Sciences**, v. 44, p. 103–122, 2002.

LIHUI, L. et al. A critical review on special forming processes and associated research for lightweight components based on sheet and tube materials. **Manufacturing Rev**, Beijing, China, p. 20, set. 2014.

MARABUTO, S. R. et al. Estampagem incremental: Estudo Numérico e Experimental. **Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia.**, Coimbra/Portugal, jul. 2011.

MARTINS, P. A. F. et al. Theory of single point incremental forming. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 247–252, 2008.

MICARI, F. et al. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 54, n. 2, p. 88-114 , 2005.

NAIR, M. An Experimental and Numerical Investigation of the Steady State Forces in Single Incremental Sheet Forming. **Birla Institute of Technology and Science**, Texas, p. 198, ago. 2011.

NAKAZIMA, K. et al. Study on the formability of steel sheets. **Yawata Technical Report;**, p. 111-141, jul. 1968.

NARANJO, J. et al. Analysis and simulation of Single Point Incremental Forming by ANSYS®. **The Manufacturing Engineering Society International Conference , Elsevier**, n. 132, p. 1104 – 1111, 2015.

NEWBY, J. R. **Formability of Steel Sheet: Metals Handbook Forming and forging.** 9. ed. v.14, p. 545-560. 1988.

NIKHARE, C. et al. **Experimental and numerical evaluation of forming and fracture behavior of high strength steel.** New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels (International conference). Buenos Aires - ARG.: 2008. p. 13.

OTTOSEN, N.; RISTINMAA, M. **The Mechanics of Constitutive Modeling.** Sweden: Elsevier Science, 2005.

PARANHOS, R. M. V. **Caracterização de Fase Intermetálica Presente em Aço Galvanizado por Imersão a Quente com Tratamento Térmico do Revestimento**

Metálico. Dissertação de doutorado. Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFMG. Belo Horizonte, p. 112. 2010.

QIN, Q. et al. **Incremental Sheet Forming - Simulation And Accuracy.** Proc. of the 8th ICTP conference, Advanced Technology of Plasticity.: In P. F. Bariani. 2005. p. 343.

ROBERT, C. et al. On some computational aspects for incremental sheet metal forming simulations. **International Journal of Material Forming**, 2008. ISSN 10.1007/s12289-008-0155-4.

SÁ DE FARIAS, J. B. et al. Towards Smart Manufacturing Techniques Using Incremental Sheet Forming. In: LUO, Z. **Smart Manufacturing Innovation and Transformation: Interconnection and Intelligence.** Hong Kong: IGI Global, 2014. Cap. 7, p. 159-189.

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

SENA, J. I. V. D. **Estampagem incremental: um novo conceito de Produção.** Universidade de Aveiro. Aveiro, p. 102. 2009.

SKJOEDT, M. et al. Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup. **International Journal of Material Forming**, 2008. ISSN 10.1007/s12289-008-0156-3.

SKJOEDT, M. et al. **Strain Paths and Fracture in Multi Stage Single Point Incremental Forming.** The Korean Society for Technology of Plasticity. Gyeongju, Korea: In Proc. of the 9th ICTP conference. 2008. p. 502-507.

SUCHY, I. **Handbook of Die Design.** 2. ed. New York / USA: McGraw-Hill, 2006.

SURESH, K.; REGALLA, S. P. Analysis of formability in single point incremental forming using finite element simulations. **Procedia Materials Science**, Hyderabad, Índia, p. 430 – 435, jun. 2014.

SURESH, K.; REGALLA, S. P. Effect of mesh parameters in finite element simulation of single point incremental sheet forming process. **Procedia Materials Science**, Hyderabad, Índia, p. 376 – 382, jun. 2014.

THIBAUD, S. et al. A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process: Numerical feasibility and experimental validation.. **Simulation Modelling Practice and Theory** , n. 29, 32–43 2012.

TSCHAETSCH, H. **Metal Forming Practise.** 7th. ed. Berlin / Germany: Springer-Verlag, 2006.

VALLE, P. D. **Investigação Téorico-Experimental dos Esforços de Conformação Mecânica na Estampagem Incremental Assimétrica.** Curitiba: Tese de Doutorado, 2016.

WANG, J.; NAIR, M.; ZHANG, Y. An Efficient Force Prediction Strategy in Single Point Incremental Sheet Forming. **Elsevier - Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 761–771, 2016.

YAMAMURA, N.; KUWABARA, T.; MAKINOUCI, A. **Springback simulations for stretchbending and drawbending processes using the static explicit FEM code, with an algorithm for canceling non-equilibrated forces, edited Y.** in Proc. 5th Int. Conf. NUMISHEET2002. Jeju Island, Korea: [s.n.]. 2002. p. 25-30.

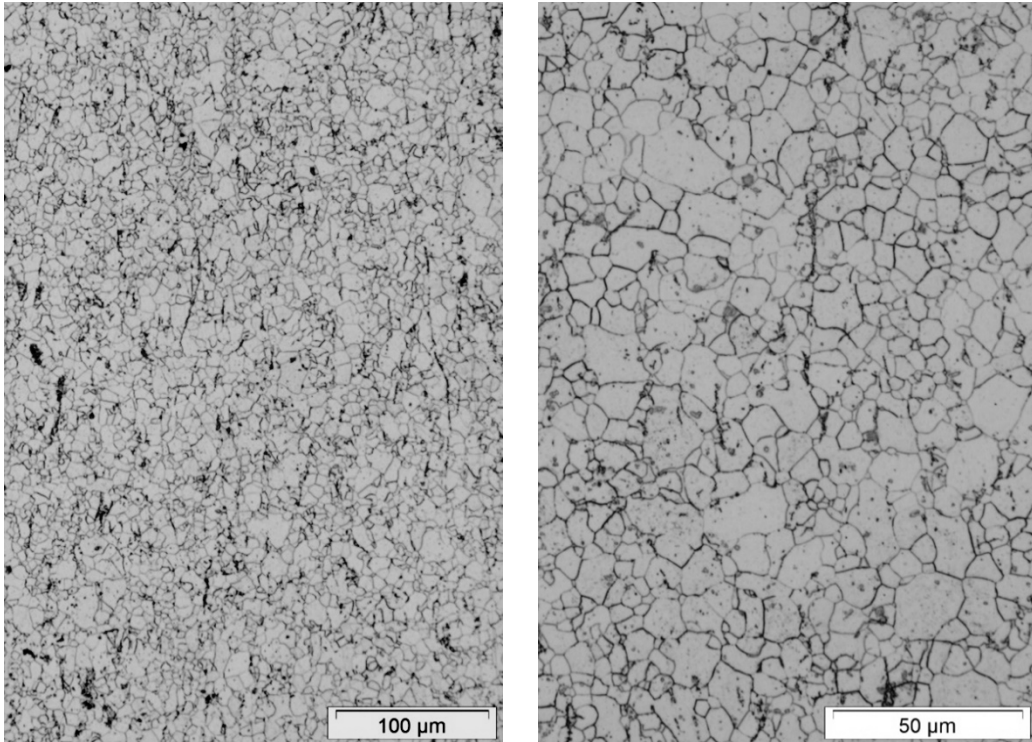
YAMASHITA, M.; GOTOH, M.; ATSUMI, S. Y. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. **J. Materials Processing Technology**, v. 199, n. 1-3, p. 163-172, abr. 2008.

YANLE, L. et al. Efficient Force Prediction for Incremental Sheet Forming and Experimental Validation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. Vol 73 Issue 1-4, 571-587, 2014.

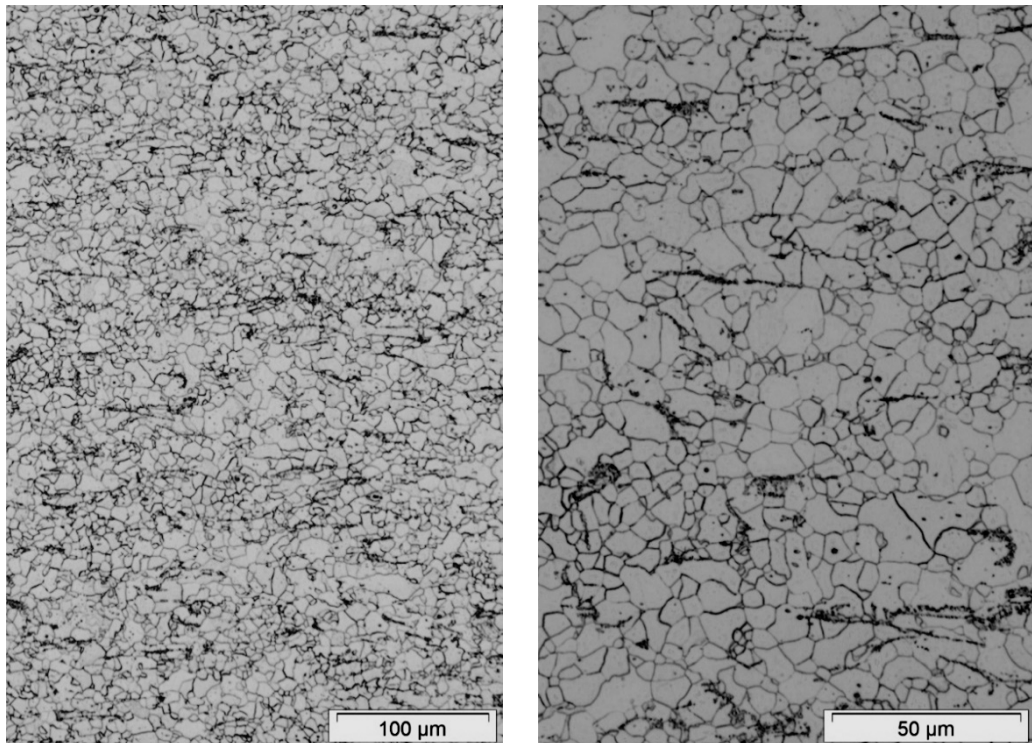
YANLE, L. et al. Deformation mechanics and efficient force prediction in single point incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**, St Lucia, Australia, p. 100–111, 2015.

YASUMOTO, F. **Projeto e Implementação de um Software para a Com ção do Amplificador de Carga**. Curitiba: UFPR, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso.

YU, W.-W. **Cold-Formed Steel Design**. 4th. ed. New Jersey: CRC Press LLC, 1999. 528 p.

APÊNDICE A – METALOGRAFIAS

A) ASTM A792 CS-A AZM 150 – Chapa #0,43



B) ASTM A792 CS-A AZM 150 – Chapa #0,8

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO NC DO CAMINHO DA FERRAMENTA

01 – G99 #
02 – G90 #
03 – G71 #
04 – G66 #
05 – G17 #
06 – GZ0 #
07 – T1 M6 #
08 – D1 S0 #
09 – G0 X16.0 Y.; FERRAMENTA_8 #
10 – Z5 #
11 – F150; AVANÇO_1#
12 – N10 G1 IJR_0.477 Z_0.4; INCR_1 # (ÂNGULO DA PAREDE 40°)
13 –; N10 G1 IJR_0.231 Z_0.4; INCR_1 # (ÂNGULO DA PAREDE 60°)
14 –; N10 G1 IJR_0.953 Z_0.8; INCR_1 # (ÂNGULO DA PAREDE 40°)
15 –; N10 G1 IJR_0.462 Z_0.8; INCR_1 # (ÂNGULO DA PAREDE 60°)
16 – G2 I0 J0 #
17 – G1 Z 0.4 #
18 – N20 H10 E20 L6 #
19 – GZ0 #
20 – M5 #
21 – M2 #

APÊNDICE C – PROGRAMAÇÃO DO CAMINHO DA FERRAMENTA

```

%%%%%%%%%%%%%% Caminho_Ferramenta_SPIF %%%%%%%%%%%%%%%
% Autor: Paulo Sergio Olivio Filho, 2016
%
% Descrição da Programa:
% O programa retorna coordenadas (x, y, z) para caminho da ferramenta a ser realizado em uma
% estampagem incremental para peça no formato tronco de cônico.
%
% Parâmetros Entrada:
% Raio_inicial: (Raio inicial do troco de cone em "mm")
% Altura: (Altura do tronco de cone em "mm")
% Número_de_ciclo: (Numero de passe para a conformação incremental "un")
% Ângulo_de_Parede: (ângulo da parede com relação ao eixo X "graus")
%
% Parâmetros de Saída:
% X: (Matriz com pontos de deslocamento da ferramenta no eixo x)
% Y: (Matriz com pontos de deslocamento da ferramenta no eixo Y)
% Z: (Matriz com pontos de deslocamento da ferramenta no eixo Z)
% N_Pontos: (Matriz com número de pontos por coordenada)
%
% Arquivo txt:
% Cam_Ferramenta_X.txt ; Cam_Ferramenta_Y.txt ; Cam_Ferramenta_Z.txt
%
%%%%%%%%%%%%%%

clc; clear all; close all;

% Parâmetros Entrada
Raio_inicial = 20;
Altura = 2.8; %5.6
Numero_de_ciclo = 7;
Angulo_de_Parede = 40; %60

% Cálculos
dz = [0:Altura/Numero_de_ciclo:Altura];
drr = 0;
cc = 2*pi()/360;
ccl = [0:cc:2*pi()];

```

```

for k = 1:Numero_de_ciclo+1
    R(k) = Raio_inicial-drr;
    dr = (Altura/Numero_de_ciclo)/tand(Angulo_de_Parede);
    drr = drr+dr;
end

for j = 1:Numero_de_ciclo+1
    for i = 1 : length(ccl)
        X(i,j) = R(j)*cos(ccl(i));
        Y(i,j) = R(j)*sin(ccl(i));
        Z(i,j) = -dz(j);
    end
end

XX=(X(:,1));
YY=(Y(:,1));
ZZ=(Z(:,1));
for j = 2 : Numero_de_ciclo+1
    xx=(X(:,j));
    yy=(Y(:,j));
    zz=(Z(:,j));
    XX= vertcat(XX,xx);
    YY= vertcat(YY,yy);
    ZZ= vertcat(ZZ,zz);
end

% Parâmetros de Saída:
N_Pontos = 0:length(XX)-1;
figure(1);plot(N_Pontos,XX,N_Pontos,YY,N_Pontos,ZZ);
figure(2);plot(XX,YY);
figure(3);plot3(XX,YY,ZZ);

% Salvando dados em txt
% C:\Windows\System32\Cam_Ferramenta.txt
save('Cam_Ferramenta_X.txt','XX','-ascii')
save('Cam_Ferramenta_Y.txt','YY','-ascii')
save('Cam_Ferramenta_Z.txt','ZZ','-ascii')

```