



TESE DE DOUTORADO

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES:  
UMA ANÁLISE DE CONFORMABILIDADE BASEADA EM  
MEDIÇÃO DE FORÇA, DESGASTE DE FERRAMENTA E  
AQUECIMENTO**

**PABLO JOSUÉ DA SILVA**

**Brasília, Dezembro de 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES: UMA  
ANÁLISE DE CONFORMABILIDADE BASEADA EM MEDIÇÃO DE  
FORÇA, DESGASTE DE FERRAMENTA E AQUECIMENTO**

**PABLO JOSUÉ DA SILVA**

**TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE  
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM SISTEMAS  
MECATRÔNICOS**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. Alberto J. Alvares, PPMEC/UnB**  
*Orientador*

---

**Prof. Dr. Edson Paulo da Silva, PPMEC/UnB**  
*Membro Interno*

---

**Prof. Dr. Rhander Viana, FGA/UnB**  
*Membro Externo*

---

**Prof. Dr. Flaminio Levy Neto**  
*Membro Externo*

**BRASÍLIA/DF, 21 Dezembro DE 2017**

Silva, Pablo Josué

Estampagem incremental de ponto simples: uma análise de conformabilidade baseada em medição de força, desgaste de ferramenta e aquecimento / PABLO JOSUÉ DA SILVA. –Brasil, 2017.

296p.

Orientador: Alberto José Alvares

Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília – UnB

Faculdade de Tecnologia – FT

Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos – PPMEC, 2016.

1. Estampagem incremental. 2. Desgaste de ferramenta. 3. Alumínio 1050. 4. CNC. 5. Força de estampagem . I. Alberto José Alvares, orientador. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Tecnologia.

## **Agradecimentos**

*Em primeiro lugar à Deus, por me permitir estar com vida e me dar a oportunidade de honrar Seu nome por meio de minhas ações e atitudes do cotidiano.*

*Agradeço a todos que me ajudaram direta ou indiretamente a concluir mais esta etapa da minha vida. Obrigado Nestor Luciano pelo auxílio técnico na execução dos ensaios e me suportar no dia a dia do laboratório.*

*Com o intuito de agradecer venho dizer muito obrigado ao meu orientador, Alberto José Alvares, pelo auxílio irrestrito a todos os quesitos técnicos necessários durante a realização desta tese.*

*Por fim, registro um agradecimento especial à minha família que durante toda a minha caminhada do processo de doutoramento estiveram ao meu lado e me apoiaram, aceitando minha dedicação maior aos estudos do que em casa. Meus filhos já sabem e falam, "o papai sai cedo para trabalhar". Deixo aqui meu muito obrigado pela dedicação e compreensão da minha esposa Arone de Paula e aos meus filhos, Miguel de Lucca e Bernardo Mateus, sem este apoio eu nada seria.*

*PABLO JOSUÉ DA SILVA*

# RESUMO

A estampagem incremental de ponto simples (SPIF) trata de um processo produtivo que permite uma alta flexibilidade com baixo custo para produção de médios e pequenos lotes. Enquanto apresenta amplo espectro de implicação, erros dimensional e fissuras que ocorrem na peça que está sendo produzida, prejudicam o resultado esperado e limitam a disseminação da técnica na indústria. Uma das dificuldades de melhoria do processo e motivadores desse estudo é a carência na literatura de análises sobre os esforços envolvidos na estampagem incremental, o desgaste de ferramenta e as técnicas de melhoria do processo, visando a redução dos erros dimensionais e a melhoria da qualidade do produto. Esta tese apresenta um estudo visando a produção de qualidade e otimização da SPIF, por meio de experimentos e análise estatística em três frentes: análise de força, análise do desgaste da ferramenta e efeitos da adição de calor ao processo. Para análise de força foi desenvolvido um dispositivo de fixação que, acoplado a um dispositivo piezoelétrico Kistler modelo 9265B, possibilitando a medição das forças XYZ envolvidas. Após 41 ensaios, realizando uma regressão múltipla com os resultados de medição de força, foi possível chegar em uma formulação matemática capaz de prever as forças de conformação em relação aos parâmetros de processamento. O desgaste da ferramenta foi avaliado por intermédio de 27 execuções de peças, para definição do tempo de vida da ferramenta em relação ao seu desgaste para o SPIF. Os ensaios utilizaram ferramentas fabricada em aço SAE 1045, conformando chapas de aço galvanizados com 0,95mm de espessura. Com a análise do desgaste da ferramenta após cada ensaio, foi possível a definição de um modelo matemático de predição de vida de ferramenta. A análise de desgaste de ferramenta é relevante para a melhoria do processo, para se evitar que o desgaste ocorrido na ferramenta venha a ser um fator de inserção erro na estampagem. Por fim, foi desenvolvido um dispositivo de adição de calor para realização de estampagem incremental com aquecimento, aumentando a conformabilidade do material e permitir também uma melhoria da qualidade superficial da peça final. Com a realização de 26 ensaios com aquecimento, foram analisados os efeitos da adição do calor ao processo de conformação de peças simples e complexas. Sendo demonstrado o potencial da estampagem a com aquecimento na conformação de peças complexas que não puderam ser conformadas a frio.

# ABSTRACT

Single Point Incremental Forming (SPIF) deals with a productive process that allows high flexibility with low cost for medium and small batches production. While presenting a wide spectrum of implication, dimensional errors and cracks occurring in the part being produced, they impair the expected result and limit the dissemination of the technique in the industry. One of the difficulties of process improvement and motivators of this study is the lack in the literature of the analysis of the efforts involved in incremental forming, tool wear and process improvement techniques, aiming at reducing dimensional errors and improving the quality of the product. This thesis presents a study aiming at the production of quality and optimization of SPIF, through experiments and statistical analysis on three fronts: force analysis, tool wear analysis and effects of the addition of heat to the process. For strength analysis has been developed a fastening device, a piezoelectric device coupled to Kistler 9265B model, enabling the measurement of XYZ forces involved. After 41 trials, performing a multiple regression with the force measuring results, it was possible to arrive at a mathematical formulation able to predict the conformation forces in relation to the processing parameters. The tool wear was evaluated through 27 configuration parameters for definition of tool life time in relation to its wear to the SPIF. The tests used tools made of SAE 1045 steel, forming galvanized steel sheets with 0.95mm thickness. With the analysis of tool wear after each test, it was possible to define a mathematical model of tool life prediction. The analysis of tool wear is relevant for the improvement of the process, in order to avoid that the wear occurring in the tool will be an error insertion factor in the conformation. Finally, a heat addition device was developed for performing incremental forming with heating, increasing the formability of the material and also allowing an improvement of the surface quality of the final part. With the accomplishment of 26 tests with heating, the effects of the addition of the heat to the process of forming of simple and complex pieces were analyzed. The potential of hot forming has been demonstrated in the conformation of complex parts that could not be cold formed.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E ACROGRAMAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Definição do Problema.....	5
1.3 Hipótese a comprovar .....	7
1.4 Objetivos da Tese.....	8
1.4.1 Objetivo Geral .....	8
1.4.2 Objetivos Específicos.....	9
1.5 Contribuições da Tese .....	9
1.6 Apresentação do Documento .....	10
<b>2 Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>12</b>
2.1 Introdução.....	12
2.2 Descrição do processo .....	12
2.3 Variações do processo .....	13
2.3.1 Estampagem incremental simétrica .....	14
2.3.2 Estampagem incremental.....	15
2.3.3 Estampagem incremental com ponto simples (SPIF).....	17
2.3.4 Estampagem incremental com ponto duplo (TPIF).....	18
2.4 Parâmetros de conformação .....	19
2.4.1 Rotação da ferramenta .....	21
2.4.2 Diâmetro da ferramenta.....	22
2.4.3 Trajetória da ferramenta .....	25

2.4.4	Velocidade de avanço em XY e Z .....	27
2.4.5	Limites do processo .....	28
2.5	Máquinas .....	31
2.5.1	Máquinas específicas para estampagem incremental .....	31
2.5.2	Robô para conformação .....	32
2.5.3	Máquinas CNC .....	34
2.5.4	Dispositivo de fixação .....	35
2.6	Múltiplos passes .....	38
2.7	Geração de caminho de ferramenta para ISF .....	40
2.8	Lubrificação do processo de estampagem incremental.....	41
2.9	Desgaste de ferramenta associada ao processo.....	42
2.9.1	Mecanismos de desgaste .....	42
2.10	Modelo de forças do processo SPIF .....	45
2.11	Modelo de Área de contato Peça-Ferramenta .....	50
2.12	Análise de variância .....	52
<b>3</b>	<b>Trabalhos correlatos .....</b>	<b>54</b>
3.1	Estampagem com aquecimento .....	54
3.1.1	Principais patentes ISF.....	55
3.1.2	Estampagem incremental com aquecimento.....	56
3.1.3	Estampagem incremental com aquecimento a laser .....	57
3.1.4	Estampagem incremental com aquecimento por corrente elétrica e por fricção ..	58
3.2	Medição das componentes de forças no ISF.....	65
3.3	Trabalhos correlatos a desgaste de ferramenta .....	75
<b>4</b>	<b>Planejamento dos ensaios do processo SPIF analisando o efeito do aquecimento, do desgaste da ferramenta e das componentes de força .....</b>	<b>77</b>
4.1	Fluxograma IDEF0: Proposta para realização de ensaio de conformabilidade ...	78
4.2	Organização do trabalho.....	87
4.3	Dispositivo de fixação - análise de força .....	89
4.4	Dispositivo de fixação com aquecimento .....	90
4.4.1	Desenvolvimento do dispositivo de aquecimento .....	92
4.4.2	Validação dispositivo de aquecimento .....	95
<b>5</b>	<b>Forças no Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples .....</b>	<b>98</b>
5.1	Modelo de área de contato entre ferramenta e peça.....	98
5.2	Projeto de experimento de força .....	100
5.3	Fixação .....	100
5.3.1	Parâmetros de conformação e chapa conformada .....	101
5.4	Equação de estimativa da força de estampagem SPIF.....	104

5.5	Predição de Força de Estampagem para SPIF .....	107
5.6	Passos dos experimentos .....	108
5.6.1	Perfil da curva de força para SPIF.....	108
5.6.2	Influência dos parâmetros em relação à força Z .....	111
5.6.3	Influência do Ap na força Z.....	112
5.6.4	Influência da rotação na força Z .....	114
5.6.5	Influência dos parâmetros em relação à força X e Y .....	115
5.6.6	Erro no processo e usinagem de material base .....	118
5.6.7	Análise Espectral.....	119
5.7	Análise de Variância e Regressão Múltipla .....	122
5.8	Síntese e Conclusão do Capítulo .....	128
<b>6</b>	<b>Desgaste de Ferramenta no Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples</b>	<b>129</b>
6.1	Modelo de Desgaste de Ferramenta .....	129
6.1.1	Análise teórica do desgaste de ferramenta .....	129
6.2	Estimativa de vida de ferramenta.....	134
6.2.1	Cálculo dos parâmetros do equacionamento matemático empírico .....	137
6.3	Parâmetros experimentais para ensaios de desgaste de ferramentas .....	138
6.3.1	Material utilizado .....	138
6.3.2	Projeto de experimentos .....	140
6.4	Análise de desgaste da ferramenta de SPIF .....	142
6.5	Execução dos testes e análises .....	145
6.5.1	Efeitos das variáveis de entrada .....	147
6.6	Equacionamento matemático empírico de predição de vida de ferramenta .....	155
6.6.1	Gráficos de resposta e efeitos de interação para Dtt e T .....	156
6.7	Confirmação de resultados experimentais.....	158
6.7.1	Confirmação: Experimental X Calculado .....	158
6.7.2	Análise de causas e efeitos.....	160
6.8	Resumo e conclusões do capítulo .....	161
<b>7</b>	<b>Estampagem de ponto simples com aquecimento.....</b>	<b>162</b>
7.1	Parâmetros experimentais para ensaios com aquecimento .....	162
7.1.1	Chapa conformada e parâmetros de conformação .....	162
7.2	Análise de melhoria de processo no SPIF com aquecimento.....	165
7.2.1	Ensaio de SPIF com aquecimento peça simples .....	165
7.2.2	Resultados dos ensaios.....	166
7.2.3	Análise da geometria das peças conformadas .....	169
7.2.4	Ensaio de SPIF com aquecimento peça complexa .....	174
7.2.5	Ensaio de SPIF com aquecimento e variação da chapa .....	178
7.3	Síntese e conclusão do capítulo.....	183

<b>8</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>184</b>
8.0.1	Modelo Predição Força .....	184
8.0.2	Modelo Predição Desgaste.....	185
8.0.3	SPIF com Aquecimento .....	186
8.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	187
8.1.1	Modelo Predição Força .....	188
8.1.2	Modelo Predição Desgaste.....	188
8.1.3	Uso Aquecimento .....	188
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....		<b>189</b>
<b>APÊNDICES</b> .....		<b>201</b>
<b>A</b>	<b>Fluxograma IDEF</b> .....	<b>202</b>
<b>B</b>	<b>Forças de conformação</b> .....	<b>204</b>
<b>C</b>	<b>Dispositivo de medição de forças para o piezoelétrico</b> .....	<b>221</b>
<b>D</b>	<b>Projeto dispositivo para teste com aquecimento e para os ensaio de desgaste de ferramenta</b> .....	<b>229</b>
<b>E</b>	<b>Publicações durante o doutorado</b> .....	<b>235</b>
<b>F</b>	<b>Detalhes da programação CAM</b> .....	<b>236</b>
<b>G</b>	<b>Ferramentas de conformação com desgaste</b> .....	<b>241</b>
<b>H</b>	<b>Análise total do tempo de vida de ferramenta SPSS</b> .....	<b>253</b>
<b>I</b>	<b>Análise desgaste da ferramenta SPSS</b> .....	<b>264</b>
<b>J</b>	<b>DOE para ensaios de desgaste de ferramenta</b> .....	<b>271</b>
<b>K</b>	<b>DOE para ensaios de força</b> .....	<b>273</b>

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Eixos X, Y e Z.....	6
2.1	Convencional <i>Spinning</i> e força atuante no processo .....	14
2.2	<i>Repuxo e exemplo de peças que podem ser obtidas por este processo</i> .....	15
2.3	Diferentes configurações de ISF.(a)Ponto simples–sem apoio inferior; (b) ponto duplo –com apoio; (c) ferramenta inferior com cavidade; (d) ferramenta inferior com saliência. ....	17
2.4	Estampagem incremental de ponto simples .....	18
2.5	TPIF com matriz estacionária .....	19
2.6	Conformação Positiva .....	19
2.7	Conformação Positiva .....	20
2.8	Variação da temperatura com a rotação em sentido horário (CW) e em sentido anti-horário (ACW) .....	22
2.9	Ferramentas de conformação do processo SPIF .....	23
2.10	A influência do raio da ferramenta e do passo vertical na força ferramenta (FSS) no ISF de 40° pirâmide: (a) MS–PP–MS e (b) de alumínio .....	24
2.11	Esquema de texturas da superfície a laser: (a) padrão de distribuição de texturas de superfície ( $\beta=10.56$ graus), (b) forma desejada do fundo da textura [comprimento (L) largura (W) profundidade (D) = 200 x 25 x25 $\mu\text{m}$ ] e (c) perfil final da ferramenta. ....	25
2.12	Parâmetro do <i>scallop</i> .....	26
2.13	Diferença entre o passo em Z constante (a) e o (b) passo com limitação de scallop .	27
2.14	Parâmetro do <i>Caminho da ferramenta 3D em espiral</i> .....	28
2.15	Representação esquemática da variação de espessura na formação incremental de peças de ângulo de parede constante.....	29
2.16	Diagrama gráfico do retorno elástico .....	30
2.17	Parâmetro do <i>Diagrama Causa-Efeito do Processo - Erros Associados</i> .....	31
2.18	Máquina projetada para estampagem incremental da Universidade de Aveiro .....	32
2.19	Parâmetro do <i>O robô híbrido Tricept HP1</i> .....	33

2.20	Parâmetro do (a) a configuração Robô , (b) duplo ponto incremental formado com suporte periférico (DPIF-P), (c) duplo ponto incremental formado com apoio local (DPIF-L), (d) complexo de peças automotivas e (e) cilindro com undercut (97° de ângulo de parede).....	34
2.21	Máquina CNC utilizada para SPIF ROMI D600.....	35
2.22	Máquina CNC utilizada para SPIF Haas mini mill.....	36
2.23	Eixo Z máquina ROMI D600 .....	37
2.26	Detalhes do dispositivo de fixação ajustável.....	37
2.24	Conceito inicial do dispositivo prensa-chapas.....	38
2.25	Dispositivo de fixação ajustável.....	38
2.27	Relação entre a profundidade e a espessura da chapa(figura da esquerda). Comparação geometria espessura (figura da direita). .....	39
2.28	Caminhos de ferramenta (a) caminho em partes e (b) caminho padrão. ....	40
2.29	Divisão conceitual em regiões de conformação: (a) Características da pirâmide (b) Vista isométrica da pirâmide (c) Gráfico (abreviaturas - PGSVR: Dominado Positivo Geral Semi-Vertical, NGHE: Negativo Geral Horizontal edge, ON HP: Ordinary Non-Horizontal Planar, PGCE: General positivo Semi-Vertical edge, PBHE: Positivo borda Horizontal Bottom, HBP: inferior Horizontal Planar). ....	41
2.30	A superfície dos materiais quando conformada utilizando $M_oS_2$ como um lubrificante, x1000 ampliado. (a) SUS 304, (b) SUS 316L e (c) $T_iGr_2$ . ....	43
2.31	Aderência de partículas de alumínio na ponta ferramenta.....	44
2.32	Espectroscopia de dispersão de energia (EDS) da ponta da ferramenta (500 ×): (a) Ferramenta de aço Cr12MoV e (b) Ferramenta HSS. ....	45
2.33	Elementos básicos do processo de estampagem incremental .....	46
2.34	Esboço da plataforma montado no dinamômetro e a relação entre $F_x$ , $F_y$ e $F_t$ , $F_r$ ..	47
2.35	Forças de atuação durante o processo SPIF. (a) Direções de força $F_a$ e $F_v$ durante SPIF, (b) SPIF durante a conformação .....	48
2.36	Caminho espiral esférico de nó à nó do centro da ferramenta no caso de 10 voltas, com uma ferramenta de 15 mm de raio e 2 mm de espessura da chapa .....	49
2.37	Geometria de contato da ferramenta chapa.(JESWIET et al., 2005) .....	51
2.38	Modelos de contato desenvolvidos por Szekeres (esquerda) e Hamilton (direita) (BRANKER, 2011) .....	51
2.39	Contato da ferramenta(a) Representação esquemática de forças que atuam durante a conformação incremental de ponto único e geometria de contato aproximada e (b) ângulo de ranhura na endentação (ASGHAR et al., 2014). ....	52
3.1	Aquecimento por lâmpada de halogênio.....	56
3.2	Dispositivo de aquecimento com cinta de aquecimento.....	56
3.3	Variações de tamanho médio de grãos em diferentes temperaturas com/sem deformação	57
3.4	Aquecimento a laser com auxílio de robô. ....	57

3.5	Princípio de eletroconformação .....	58
3.6	Comparação de ferramentas de conformação de SPIF: (a) Rotação Natural –NTR e (b) Rotação não Natural –UTR. ....	59
3.7	Ferramentas de conformação com canal interno de refrigeração .....	61
3.8	Dispositivo de aquecimento com ar quente na parte superior da peça .....	62
3.9	Dispositivo de aquecimento com óleo .....	62
3.10	a) Fresadora CNC "Dynamod", usada para o processo SPIF b) Configuração do teste para aquecimento global. ....	63
3.11	Forças axiais máximas e médias, em função da temperatura de aquecimento. ....	66
3.12	Gráfico da medição de força em função do tempo A legenda do gráfico mostra as diferentes espessuras de chapas utilizadas no ensaio. ....	68
3.13	Força em relação a temperatura de processamento.....	69
3.14	Trajetória da ferramenta para aquisição de força .....	70
3.15	Trajetória da ferramenta para aquisição de força .....	71
3.16	Distribuição das forças verticais e horizontais, em função da profundidade de conformação (em valor percentual) da Liga de alumínio 1050.....	72
3.17	Distribuição das forças verticais e horizontais, em função da profundidade de conformação (em valor percentual) do aço DP 780 .....	72
3.18	Variação de força para chapa de alumínio com caminho de ferramenta diferente ....	73
3.19	Força axial média junto com profundidade na direção z.....	73
3.20	Ferramenta oblíqua.....	76
4.1	Atividades do IDEF0 –A0.....	78
4.2	Atividades do IDEF0 com sub-atividades A1, A2, A3, A4, A5 e A6. ....	84
4.3	Atividade A1 subdividida em A11 e A12.....	85
4.4	Atividade A2 subdividida em A21 e A22.....	85
4.5	Atividade A3 subdividida em A31 e A32.....	86
4.6	Subnível da A311 da atividade A31.....	86
4.7	Subnível A321 da atividade A321.....	87
4.8	Os subníveis A41 e A42 da atividade A4.....	87
4.9	Subnível A51 da atividade A5.....	88
4.10	Subnível da A61 e A62 da atividade A6. ....	88
4.11	Montagem do dispositivo piezoelétrico .....	90
4.12	Dispositivo de fixação vista explodida .....	90
4.13	Projeto do dispositivo de fixação com aquecimento .....	91
4.14	Projeto do dispositivo de fixação .....	91
4.15	Posicionamento do sensor de temperatura no conjunto .....	92
4.16	Dispositivo de aquecimento (a) vista superior (b) vista em corte (c) vista isométrica. ....	93
4.17	Dispositivo de aquecimento na máquina.....	93
4.18	Perfil de temperatura no início do processo .....	94

4.19	Perfil de temperatura no final do processo.....	94
4.20	Curva de aquecimento para validação do dispositivo .....	96
4.21	Perfil inicial de temperatura (a) Perfil final de temperatura (b).....	96
5.1	Calota esférica (INFOESCOLA, 2018) .....	99
5.2	Comparação do parâmetro principal em SPIF e Fresamento (BRANKER, 2011) ...	100
5.3	Dispositivo de força montado na máquina CNC .....	101
5.4	Peça usinada para dados iniciais de força .....	102
5.5	Perfil da peça conformada no ensaio de força, medida em mm. ....	103
5.6	Curva padrão do processo para o eixo Z .....	109
5.7	Deformação indesejada .....	110
5.8	Dispositivo com chapa de apoio .....	110
5.9	Força em Z em relação aos parâmetros de processo (a) $A_p$ , (b) avanço e (c) rotação	112
5.10	Gráfico de interação nas forças em Z com $A_p$ e rotação.....	113
5.11	Gráfico de interação das forças em Z com $A_p$ e avanço .....	113
5.12	Gráfico de interação nas forças em Z com rotação e avanço.....	114
5.13	Gráfico de interação nas forças em Z com rotação e $A_p$ .....	115
5.14	Força em X em relação a (a) $A_p$ (b) Rotação (c) Avanço.....	116
5.15	Força em Y em relação a (a) $A_p$ (b) Rotação (c) Avanço.....	117
5.16	Erro de processamento com parâmetros $A_p$ 0.6 mm, S6000 RPM e F3600 mm/- min .....	118
5.17	Erro de processamento com parâmetros $A_p$ 1.4 mm, S3000 RPM e F1200 mm/- min .....	118
5.18	Frequência do eixo X $A_p$ 1.8mm S3000RPM F3600mm/min .....	120
5.19	Frequência do eixo X $A_p$ 2.2mm S6000RPM F3600mm/min .....	120
5.20	Ferramenta com desgaste.....	121
6.1	Tipo de desgaste, (a) desgaste de topo ( $D_t$ ), (b) desgaste de topo angulado ( $D_{ta}$ ) e (c) desgaste total.....	130
6.2	Início da conformação.....	130
6.3	Conformação com 5mm de profundidade. ....	131
6.4	Foto de desgaste de topo. ....	131
6.5	Projeto de ferramenta com esfera.....	132
6.6	Desgaste da ferramenta.....	133
6.7	Projeto do perfil –ferramenta. ....	133
6.8	Ferramenta com desgaste. ....	134
6.9	Resultado da conformação da peça utilizando 2ml de óleo lubrificante.....	141
6.10	Perfil da peça a ser conformada (unidades em milímetros) .....	142
6.11	Trajectoria da ferramenta .....	142
6.12	Dispositivo de fixação .....	143

6.13	Desgaste de topo (Dtt) (a) aplicação de teorema de Pitágoras no desgaste de topo (b) .....	143
6.14	Imagem de projetor de perfil do teste (6) .....	145
6.15	Aspecto visual da parte interna do teste 2 com Ra de 0,338 $\mu\text{m}$ (a) e teste 22 com Ra de 1,085 $\mu\text{m}$ (b).....	147
6.16	Análise do desgaste de ferramenta em relação ao parâmetros de entrada .....	147
6.17	Análise da rugosidade da peça final em relação ao parâmetros de entrada .....	149
6.18	Análise do desgaste de ferramenta de conformada em relação aos dados de entrada	150
6.19	Análise da rugosidade da peça final em relação as parâmetros de entrada .....	151
6.20	Análise da rugosidade da peça final em relação aos dados de entrada, com um Ap=0,2mm .....	152
6.21	Análise da rugosidade da peça final em relação aos dados de entrada, com um Ap=0,4mm .....	152
6.22	Análise da rugosidade da peça final em relação aos dados de entrada, com um Ap=0,6mm .....	153
6.23	Análise do desgaste da ferramenta em relação ao Ap 0,2mm .....	154
6.24	Análise do desgaste da ferramenta em relação ao Ap 0,4mm .....	154
6.25	Análise do desgaste da ferramenta em relação ao Ap 0,6mm .....	155
6.26	Probabilidade residual para o desgaste da ferramenta .....	157
6.27	Probabilidade residual para o tempo de vida de ferramenta.....	157
6.28	Gráfico valores experimentais e calculados de resposta para o desgaste de ferramenta	159
6.29	Gráfico de valores experimentais e calculados em resposta ao tempo de conformação	159
7.1	Peça de geometria complexa (a) desenho técnico em 2D (b) Vista em 3d .....	163
7.2	Peça resultante da conformação do teste 2 .....	166
7.3	Peça resultante da conformação do teste 5 .....	167
7.4	Peça resultante da conformação do teste 7 .....	167
7.5	Dissipação de calor no processo SPIF.....	168
7.6	Perfil de aquecimento com alta rotação e lâmpadas de halogêneo .....	169
7.7	Imagem da câmera térmica: (a) Início do processo de conformação, (b) Processo de conformação com 30 de profundidade.....	170
7.8	Scanner: Digitalização da peça conformada .....	171
7.9	Malha criada pela digitalização .....	171
7.10	Comparação entre os modelos.....	172
7.11	Peças conformadas com Ap de 0,4mm .....	173
7.12	peças conformadas com Ap de 0,6mm .....	173
7.13	Teste 1 (a) peça final (b) detalhe da fratura .....	175
7.14	Imagem da câmera térmica do conformação do rosto .....	176
7.15	Teste 2 (a) peça final (b) detalhe do nariz (c) detalhe do queixo .....	176
7.16	Curva de aquecimento com 50min .....	177

7.17 Sequência de conformação .....	177
7.18 Teste 3 .....	178
7.19 Deformação indesejada em Z causa pelo dispositivo de aquecimento.....	178
7.20 Teste 1 .....	179
7.21 Teste 1 (a) Perfil da peça (b) Ferramenta depois de conformação .....	179
7.22 Ferramenta (a) antes da conformação (b) depois do polimento .....	180
7.23 Teste 02 - liga de alumínio 1050.....	180
7.24 Teste 03 (a) peça final (b) detalhe da fratura externa (c) detalhe da fratura interna ..	181
7.25 Teste 04 (a) Peça (b) Detalhe da fratura.....	182
7.26 Teste 01 segunda peça (a) peça final (b) Detalhe da fratura externa (c) Detalhe da fratura interna .....	182
A.1 Caixa de atividade IDEF0 .....	202
A.2 Caixa de subatividades do IDEF0 .....	203
B.1 Teste 14 - $A_p=0,6$ mm, $S=3000$ RPM e $f=1200$ mm/min .....	205
B.2 Teste 15 executado com os parâmetros, $A_p=0,6$ mm, $S=3000$ RPM e $f=2400$ mm/min	206
B.3 Teste 16 executado com os parâmetros, $A_p=0,6$ mm, $S=3000$ RPM e $f=3600$ mm/min	207
B.4 Teste 17 executado com os parâmetros, $A_p=0,6$ mm, $S=6000$ RPM e $f=3600$ mm/min	208
B.5 Teste 19 executado com os parâmetros, $A_p=1,0$ mm, $S=3000$ RPM e $f=1200$ mm/min	209
B.6 Teste 20 executado com os parâmetros, $A_p=1,0$ mm, $S=3000$ RPM e $f=3600$ mm/min	210
B.7 Teste 21 executado com os parâmetros, $A_p=1,0$ mm, $S=6000$ RPM e $f=3600$ mm/min	211
B.8 Teste 23 executado com os parâmetros, $A_p=1,4$ mm, $S=3000$ RPM e $f=1200$ mm/min	212
B.9 Teste 24 executado com os parâmetros, $A_p=1,4$ mm, $S=3000$ RPM e $f=3600$ mm/min	213
B.10 Teste 25 executado com os parâmetros, $A_p=1,4$ mm, $S=6000$ RPM e $f=3600$ mm/min	214
B.11 Teste 27 executado com os parâmetros, $A_p=1,8$ mm, $S=3000$ RPM e $f=1200$ mm/min	215
B.12 Teste 28 executado com os parâmetros, $A_p=1,8$ mm, $S=3000$ RPM e $f=3600$ mm/min	216
B.13 Teste 29 executado com os parâmetros, $A_p=1,8$ mm, $S=6000$ RPM e $f=3600$ mm/min	217
B.14 Teste 30 executado com os parâmetros, $A_p=2,2$ mm, $S=3000$ RPM e $f=1200$ mm/min	218
B.15 Teste 31 executado com os parâmetros, $A_p=2,2$ mm, $S=3000$ RPM e $f=3600$ mm/min	219
B.16 Teste 32 executado com os parâmetros, $A_p=2,2$ mm, $S=6000$ RPM e $f=3600$ mm/min	220
C.1 Dispositivo de medição de força e piezoelétrico. ....	222
C.2 Dispositivo de medição de força .....	223
C.3 Chapa de aperto .....	224
C.4 Chapa de perfil .....	225
C.5 Chapa de apoio .....	226
C.6 Espaçador .....	227
C.7 Chapa de fixação.....	228
D.1 Dispositivo de aquecimento junto com o dispositivo de fixação .....	230

D.2	Projeto do dispositivo de aquecimento .....	231
D.3	Projeto do sistema de fixação.....	232
D.4	Chapa de aperto do dispositivo de aquecimento .....	233
D.5	Chapa de apoio do dispositivo de aquecimento .....	234
F.1	Visão geral do CAM peça complexa.....	236
F.2	Visão geral do CAM peça simple.....	237
F.3	Configuração aba "General" .....	238
F.4	Caminho da ferramenta .....	239
F.5	Limites do caminho da ferramenta .....	240
G.1	Ferramenta utilizada teste 01, análises de desgaste .....	241
G.2	Ferramenta utilizada teste 02, análises de desgaste .....	242
G.3	Ferramenta utilizada teste 03, análises de desgaste .....	242
G.4	Ferramenta utilizada teste 04, análises de desgaste .....	242
G.5	Ferramenta utilizada teste 05, análises de desgaste .....	243
G.6	Ferramenta utilizada teste 06, análises de desgaste .....	243
G.7	Ferramenta utilizada teste 07, análises de desgaste .....	244
G.8	Ferramenta utilizada teste 08, análises de desgaste .....	244
G.9	Ferramenta utilizada teste 09, análises de desgaste .....	245
G.10	Ferramenta utilizada teste 10, análises de desgaste .....	245
G.11	Ferramenta utilizada teste 11, análises de desgaste .....	246
G.12	Ferramenta utilizada teste 12, análises de desgaste .....	246
G.13	Ferramenta utilizada teste 13, análises de desgaste .....	246
G.14	Ferramenta utilizada teste 14, análises de desgaste .....	247
G.15	Ferramenta utilizada teste 15, análises de desgaste .....	247
G.16	Ferramenta utilizada teste 16, análises de desgaste .....	247
G.17	Ferramenta utilizada teste 17, análises de desgaste .....	248
G.18	Ferramenta utilizada teste 18, análises de desgaste .....	248
G.19	Ferramenta utilizada teste 19, análises de desgaste .....	249
G.20	Ferramenta utilizada teste 20, análises de desgaste .....	249
G.21	Ferramenta utilizada teste 21, análises de desgaste .....	249
G.22	Ferramenta utilizada teste 22, análises de desgaste .....	250
G.23	Ferramenta utilizada teste 23, análises de desgaste .....	250
G.24	Ferramenta utilizada teste 24, análises de desgaste .....	250
G.25	Ferramenta utilizada teste 25, análises de desgaste .....	251
G.26	Ferramenta utilizada teste 26, análises de desgaste .....	251
G.27	Ferramenta utilizada teste 27, análises de desgaste .....	252
J.1	Fatorial utilizada para desgaste de ferramenta.....	271
J.2	Resumo geral de dados de entrada para desgaste de ferramenta .....	272

J.3	Tabela geral de variáveis de entrada e saída para desgaste de ferramenta .....	272
K.1	Fatorial utilizada .....	273
K.2	Resumo geral de dados de entrada .....	274
K.3	Tabela geral de variáveis de entrada e saída .....	274

# LISTA DE TABELAS

1.1	Condições de contorno do processo.....	7
3.1	Tipos de aquecimento .....	64
3.2	Estado da arte do processo de aquecimento para ISF.....	65
3.3	Relação de parâmetros utilizados e força gerada (BAGUDANCH et al., 2013) .....	67
3.4	Estado da arte do processo de medição de forças no SPIF .....	74
5.1	Dados de entrada e suas variações.....	102
5.2	Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos de força.....	103
5.3	Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos de força utilizando ferramentas com desgaste.....	104
5.4	Ensaio com ferramenta com desgaste .....	122
5.5	Ensaio com ferramenta sem desgaste .....	122
5.6	ANOVA equações força.....	123
5.7	Componente de força na direção X: valores Experimentais x Valores calculados....	125
5.8	Componente de força na direção Y: valores Experimentais x Valores calculado .....	126
5.9	Componente de força na direção Z: valores Experimentais x Valores calculado .....	127
6.1	Composição química do Aço Galvanizado.....	139
6.2	Composição química do alumínio 1050, Alcoa .....	139
6.3	Composição química do SAE 1045, ArcelorMittal. ....	140
6.4	Parâmetros do processo - ensaios preliminares .....	140
6.5	Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos .....	141
6.6	Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos .....	144
6.7	Valores de entrada e saída do processo de SPIF .....	146
6.8	Experimental X Calculado .....	158
6.9	Condições de entrada e resultado de saída .....	160
7.1	Ensaio para validação de melhora na geometria .....	163
7.2	Ensaio para validação de melhora de rugosidade.....	164
7.3	Ensaio para validação de melhora de rugosidade.....	164
7.4	Parâmetros de processo .....	164
7.5	Condições de entrada e resultado de saída .....	166

E.1	Congressos internacionais .....	235
E.2	Congressos internacionais .....	235
E.3	Artigos submetidos a revista .....	235

# LISTA DE ABREVIATURAS E ACROGRAMAS

ANOVA	Análise de variância
Ap	Profundidade de corte em Z
AISF	Asymmetric incremental sheet forming – Assimétrica estampagem incremental de chapas
AISI	American Iron and Steel Institute – Sistema Americano para a Classificação dos Aços
CAD	Computer Aided Design – Projeto Auxiliado por Computador
CAM	Computer Aided Manufacturing – Manufatura Auxiliada por Computador
CFD	Computational fluid dynamics – Dinâmica de Fluidos Computacional
CNC	Computer Numeric Control – Controle Numérico Computadorizado
DOE	Design of Experiments – Planejamento de Experimentos
DOF	Degrees of Freedom – Graus de Liberdade
EDS	Energy dispersive spectroscopy – Espectroscopia de dispersão de energia
F	Feed rate – Avanço
FEM	Finit elements method – Métodos de Elementos Finitos
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada Rápida de Fourier
F <sub>y</sub>	Força no eixo X
F <sub>x</sub>	Força no eixo Y
F <sub>z</sub>	Força no eixo X
HSS	High Speed Steel – Aço rápido
IDEF	Integration Definition for Function Modeling – Definição de Integração para Modelagem de Função

ISF	Incremental Sheet Forming - Estampagem Incremental de Chapas
ISO	International Organization for Standardization – Organização Internacional de Normalização
LST	Laser Surface Texturings – Textura Marcada a Laser
NBR	Norma Brasileira
NC	Numerical Controls – Controle Numérico
NURBS	Non Uniform Rational Basis Spline
S	Rotação da ferramenta em RPM
RPM	Rotação por minuto
SAE	Society of Automotive Engineers - Sociedade de Engenheiros Automotivos - EUA
SEM-EDS	Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray - Microscopia Eletrônica de Varredura com Raios-X Dispersivos
SPIF	Single Point Incremental Sheet Forming – Estampagem Incremental de Ponto Simples
SPIFWs	Single Point Incremental Sheet Forming with Warm and Stir – Estampagem Incremental de Ponto Simples com Aquecimento e Rotação
TPIF	Two Points Incremental Sheet Forming – Estampagem Incremental de Ponto Duplo

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

A estampagem é conhecida popularmente por um processo de fabricação mecânica em que por meio do corte ou prensagem de chapas um material é deformado para se chegar ao modelo final desejado. Tecnicamente, o termo estampagem generaliza várias operações de manufatura realizadas em chapas de metal, com a ocorrência de alterações na sua forma geométrica, produzindo dobras, cavidades, saliências, cunhas e furos (FRITZEN, 2012). Todas essas deformações são realizadas no estado sólido, quando o material é escoado em regime plástico.

No contexto da manufatura mecânica, os processos de deformação plástica são definidos e classificados conforme suas características técnicas e aplicações. São exemplos desses processos: forjamento, extrusão, perfilagem, estampagem, trefilação, laminação e calandragem. No caso da estampagem, as duas maiores e mais importantes aplicações encontram-se na indústria automobilística e na indústria aeronáutica, mas vários outros tipos de produtos também são obtidos através desse processo. A indústria de eletroeletrônicos, de utensílios domésticos e hospitalares também têm na estampagem seu principal processo de fabricação (CALLEGARI et al., 2006b).

Tem-se como vantagem na estampagem o aproveitamento da matéria-prima, com reduzido desperdício e geração de sobras de materiais, diferentemente de outros processos como, por exemplo, a usinagem (RODRIGUES; MARTINS, 2005). Como principal desvantagem deste processo, podemos destacar o alto custo do ferramental, que só pode ser amortizado se a quantidade de peças a produzir for elevada.

Embora grande parte dos processos de estampagem mecânica seja desenvolvida para a produção de médios e grandes lotes, em algumas situações existe a necessidade de fabricação de pequenos lotes de peças. Por exemplo, quando trata de protótipo, peças sob encomenda ou peças sob medida ou outro, em que a quantidade a ser produzida não justifica a fabricação de um ferramental completo, por tornar o custo final do produto economicamente inviável (PARK; KIM, 2003).

Sendo assim a estampagem convencional tem um *tryout* complexo e oneroso para a produção de pequenos lotes ou peças fora de linha de produção. A fabricação de um ferramental, matrizes e punções dedicados só se justifica quando se produzem grandes lotes.

Em contrapartida, o mercado de produtos personalizados é tendência de mercado, tanto nas pequenas empresas, como nas grandes fábricas, e está dentro das técnicas de administração de estoque zero, just in time, MRP - Planejamento de Necessidades de Materiais (do inglês Manufacturing Resource Planning), dentre outras técnicas de gestão, em que os custos da cadeia produtiva são minimizados quando se trabalha baixos níveis de estoque, e se realiza o rápido giro das mercadorias. Observa-se assim que a produção por encomenda ou em pequena escala ampliam seus mercados.

Para atendimento dessa demanda, um novo método de estampagem de chapas que vem se consolidando é conhecido como estampagem incremental, em inglês *Incremental Sheet Forming* (ISF). Trata-se de um processo de fabricação mecânica em que se aplica uma carga pontual por uma ferramenta sobre uma chapa metálica, realizando deformações incrementais. E essa ferramenta percorre um caminho previamente definido por código CNC (Comando Numérico Computadorizado) até que a chapa esteja no formato desejado da peça final (GIANPAULO et al., 2012).

Durante o processo de estampagem incremental ocorre a compressão de material por uma ponta de ferramenta que gira livremente, submetendo portanto o material a esforço de compressão, cisalhamento, flexão, torção e, quando se trata ainda de compressão a quente, há o incremento do fator do calor para interferir nos esforços que a peça seria capaz de suportar (PRADILLA, 2017).

A principal vantagem da estampagem incremental (ISF), em relação à estampagem convencional, é a troca dos sistemas de ferramentas dedicadas por ferramentas simples e de baixo custo. Essas ferramentas de conformação são bastões com extremidade semiesférica que se movem controladas por um sistema de comando numérico e realizam deformações plásticas sucessivas e localizadas a fim de moldar a chapa (SILVA; MARTINS, 2013). O que a torna um processo financeiramente atrativo quando se trata de conformação de materiais para fabricação de peças em pequenas quantidades.

Além disso, na estampagem incremental há uma redução no tempo de preparação da máquina, pois a prensa utiliza somente um punção como ferramenta, o que reduz ainda mais os custos de produção de pequenos lotes, que seriam economicamente inviáveis pela processo de estampagem convencional.

Pode-se classificar a estampagem incremental em dois grandes grupos: ISF com dois pontos de apoio (*Two Points Incremental Sheet Forming* –TPIF) e ISF de ponto simples (*Single Point Incremental Sheet Forming* –SPIF).

A conformação por TPIF utiliza dois ou mais pontos de apoio para auxiliar na conformação,

sendo um a extremidade da ferramenta de conformação e o segundo ponto de apoio um suporte simples ou uma matriz de suporte. Já a conformação por SPIF, que será utilizada no presente tese, não emprega nenhum tipo de apoio ou matriz, apenas um ponto de conformação que é a ferramenta de conformação, sendo portanto mais econômica e simples, (ALLWOOD et al., 2006).

O SPIF pode ser utilizado para produzir peças metálicas funcionais adequadas para uso como protótipos ou peças sob medida, frequentes na biomedicina, e ainda em peças da linha de produção e de serviços. Uma ampla variedade de materiais pode ser conformada, tendo os aços doces, ligas de alumínio e de titânio e, ainda, malha de aço perfurada, com espessura variando de 0,1 mm a 4,0 mm, tendo sido objetos de pesquisa aplicada (Amino, 2017) em estampagem incremental.

Enquanto por um lado apresenta amplo espectro de aplicação e baixo custo, por outro lado a ISF tem longo tempo de processamento de uma única peça, elevado erro dimensional decorrente do retorno elástico ocorrido após a conformação da chapa, e ainda as rotineiras fissuras que ocorrem na peça que está sendo conformada, prejudicando todo o resultado esperado. Sendo esses os principais obstáculos para disseminação da técnica na indústria.

Uma das dificuldades de melhoria do processo e motivadores desse estudo é que, enquanto a literatura é extensa quando se trata de análise de limites de resistência do material quando submetido a tração, torção, flexão, esforço cisalhante e até após submetidos a tratamento térmico, há carência de informações sobre análise dos esforços envolvidas no processo de estampagem incremental e de técnicas de desenvolvimento desse processo, reduzindo erros dimensionais de fabricação, permitindo a predição de deformação e definindo formulações matemáticas para a estampagem incremental.

Alguns trabalhos tentam explicar e correlacionar as forças de conformação do processo SPIF com alguns parâmetros de processo ou por análise de elementos finitos (BENEDETTI et al., 2017); variação do ângulo de parede (LI et al., 2014c); material a ser conformado e lubrificante utilizado (AZEVEDO et al., 2015); força baseada em critério de fratura (FIORENTINO, 2013); tamanho da ferramenta (LI et al., 2014a), entre outras análises (LI et al., 2016).

Existem estudos sobre ferramentas e suas reações no processo de conformação: influência do diâmetro no processo (JACKSON et al., 2008); com o aumento do diâmetro da ferramenta, a conformabilidade <sup>1</sup> diminui (HUSSAIN et al., 2008b); realização de gravações a laser na face da ferramenta para a redução de atrito (XU et al., 2013); a melhor escolha de lubrificante para o processo de ISF, para se reduzir o desgaste da ferramenta (ZHANG et al., 2010); estudo do contato entre a ferramenta e chapa que pode gerar deformações indesejadas (MARTINS et al., 2008); o aquecimento da peça que pode ser realizado durante a conformação através da alta rotação da ferramenta (OTSU et al., 2014); a influência da qualidade do acabamento da ferramenta e a dureza na qualidade final da peça de trabalho (SURIYAPRAKAN, 2013).

---

<sup>1</sup>Conformabilidade - Propriedade do material que se deforma com facilidade, podendo tomar diversas formas segundo as cargas submetidas

Visando o aperfeiçoamento do processo por meio da melhoria na conformabilidade dos materiais, foram realizados alguns estudos para minimizar o erro dimensional, tais como: ISF com múltiplos passes (HIRT et al., 2004); ISF com aquecimento a laser (GÖTTMANN et al., 2011); ISF com aquecimento por corrente elétrica (FAN; GAO, 2014), entre outros. No entanto, esses métodos ainda apresentam algumas limitações e faz-se necessário o aprimoramento dessas técnicas para que permitam uma maior precisão na manufatura das peças. (GUPTA; JESWIET, 2017) sugere o aumento de temperatura de processamento para que a conformação continue e seja minimizada a ocorrência de fissuras do material .

A investigação do SPIF, em termos de produção de qualidade e otimização de processos, sempre é um desafio para os pesquisadores. (MULAY et al., 2017).

Para uma produção de qualidade e se conseguir uma resposta mais satisfatória no SPIF, é importante estudar a ferramenta utilizada, que se desgasta durante o processo. Esse desgaste pode ser mais um dos indutores de erros dimensionais na peça final conformada. Portanto é relevante identificar, quantificar e remediar os efeitos do desgaste da ferramenta para um melhor desempenho do processo.

Segundo Branker et al. (2013), na literatura há uma lacuna em estudos sobre a resposta ao desgaste da ferramenta e a predição de sua vida útil no processo de estampagem incremental.

Em 2002 GIL ao orientar a realização de pesquisa experimental que consista em determinar o objeto de estudo com um foco específico no problema, recomenda selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Essa estratégia pode ser utilizada na predição do desgaste de ferramenta (bastões cilíndricos com extremidade semiesférica) e de sua vida útil.

Visando reduzir os erros dimensionais que comumente ocorrem nas peças produzidas por estampagem incremental, esta pesquisa irá contribuir na melhoria do processo de SPIF e demonstrar seu potencial na indústria através de uma análise de conformabilidade baseada em três frentes: medição de força, análise do desgaste de ferramenta e influência do aquecimento, abordando peças pouco exploradas pela literatura.

Com a medição, por meio de um dinamômetro, e a avaliação das forças envolvidas durante o processo de estampagem, pretende-se analisar o comportamento das forças durante a conformação e criar uma formulação matemática que permita realizar uma estimativa dessa força de conformação, antes mesmo do início do processo.

Visando a melhoria do acabamento superficial da peça, é avaliado o nível de interferência do desgaste da ferramenta ao processo e ainda a predição de seu tempo de vida, possibilitando estimar melhor o custo do processo e reduzir mais uma fonte de erro.

No aquecimento, pretende-se desenvolver parâmetros e técnicas para o processo de estampagem incremental de ponto simples, com adição de calor de forma controlada e gradativa para se obter uma temperatura específica durante a conformação, aumentando a conformabilidade das

peças e melhorando sua qualidade superficial.

## 1.2 Definição do Problema

Acompanhando o desenvolvimento tecnológico, a utilização de sistemas CAD/CAM e equipamentos CNC tem fomentado a automatização aos processos de produção industrial. O uso das máquinas antes desenvolvidas principalmente para usinagem, tem-se propagado para outros tipos de processos, cada vez mais automatizados, e vem sendo adaptadas para uso no processo de estampagem incremental, tornando as máquinas CNC as principais máquinas desse processo de fabricação.

Uma das máquinas CNC mais utilizadas no mercado industrial atual é a ROMI D600. Ela utiliza em sua estrutura do eixo árvore um conjunto de dois rolamentos NSK 25TAC 62B. Cada rolamento sustentado em duas carreiras pode ser submetido a uma carga axial de até 81,5 kN, sem que seu funcionamento pleno seja comprometido, conforme NSK,(NSK, 2017).

Para permitir a ampliação do uso da estampagem incremental, seja para chapas mais espessas ou materiais mais duros, sem que se ultrapasse os limites de esforço da máquina, é de suma importância conhecer, controlar e monitorar os esforços de conformação do processo de estampagem incremental.

Na parte de processamento, o estudo de forças pode auxiliar no desenvolvimento das ferramentas utilizadas, permitindo um ótimo dimensionando das ferramentas de conformação para cada processo, otimizando o processo produtivo, evitando o super ou sub dimensionamento das ferramentas. Com o super dimensionamento decorre o desperdício de recursos financeiros, como sub dimensionamento a ferramenta pode vir a falhar no processo, gerando maiores custos e tempos de processamento (SILVEIRA; SCHAEFFER, 2008).

Além disso, os parâmetros de processamento, como avanço da ferramenta,  $A_p$ <sup>1</sup> e rotação, influenciam muito os esforços de conformação. Correlacionar estes principais parâmetros em relação à força necessária para conformação em cada eixo, X, Y e Z, forças radiais em  $F_x$  e  $F_y$ , força axial  $F_z$  com um foco principal para o eixo Z, traz ao processo uma maior confiabilidade, conforme figura 1.1.

Na presente tese, será realizada a caracterização dos esforços de conformação, utilizando o mesmo modelo de força da bibliografia, (DIABB et al., 2017). Após realização de ensaios de estampagem com medição dos esforços envolvidos mantendo-se os parâmetros de processamento,  $A_p$ , avanço e rotação, material e espessura da chapa, será realizado um modelamento matemático experimental, para cada eixo de trabalho, que consiga explicar as forças de processamento em função dos parâmetros utilizados.

---

<sup>1</sup> $A_p$  - Profundidade de conformação no eixo Z

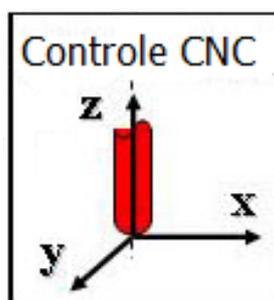


Figura 1.1: Eixos X, Y e Z.  
Fonte:(JESWIET et al., 2005)

Superada as questões de viabilidade técnica, um dos pontos mais relevantes em qualquer processo produtivo é a sua viabilidade financeira. Neste caso, para a estimativa de custo de fabricação é necessário levar em conta todos os fatores associados ao processo produtivo. Contudo, a bibliografia não possui formulação de desgaste de ferramenta que possibilite estimar o custo da ferramenta envolvida no processo segundo Branker, (BRANKER et al., 2013).

Nesse contexto, esta tese através de uma sequência de ensaios práticos, com mais de 186 horas efetivas de conformação, gera dados que norteiam o comportamento de desgaste de ferramenta em relação aos parâmetros de processamento utilizados e propõe um modelo matemático experimental para estimativa do tempo de vida de ferramenta em função do avanço em X e Y, avanço em Z ( $A_p$ ), rotação da ferramenta e desgaste da ferramenta de conformação. O estudo para o desgaste de ferramenta foi realizado em relação ao conjunto ferramenta-chapa, sendo a ferramenta fabricada em SAE 1045 e chapa de conformação em aço galvanizado, NBR 7008 ZC, com espessura de 0,95mm.

Com os dados de desgaste de ferramenta obtidos nos ensaios de conformação, utilizou-se técnicas de regressão múltipla, idealizando um modelo matemático capaz de estimar o tempo de vida de ferramenta. Sendo possível estimar o desgaste que a ferramenta vai sofrer e, além disso, verificar se o desgaste da ferramenta irá interferir nas características dimensionais e geométricas da peça, gerando assim uma estimativa de quantas ferramentas serão necessárias para conformar um determinado lote de peças e o seu custo associado.

Por fim, a terceira etapa dessa tese é realizar a estampagem a quente. Com o intuito de reduzir a limitação do processo de estampagem de ponto simples, se introduziu aquecimento para o aumento da maleabilidade da chapa e conseqüente obtenção de melhores resultados na estampagem de geometrias complexas, cujas ocorrências de fraturas e trincas são mais corriqueiras. A conformação com incremento de temperatura aumenta a capacidade de formabilidade dos materiais e melhora a precisão das peças trabalhadas, reduzindo os efeitos do retorno elástico do material,(FRANCESCO et al., 2017).

A adição de temperatura ao processo poderá auxiliar na produção de peças simples e complexas por SPIF, reduzindo os erros dimensionais e o tempo de conformação na produção de

pequenos e médios lotes.

Apresenta-se ainda nesse trabalho um comparativo da conformação por SPIF com aquecimento entre as chapas de ligas de alumínio 1050 e 6063, com 1,0 mm e 1,2 mm de espessura respectivamente, com o propósito de verificar os parâmetros de processamento para ligas e espessura de chapas diferentes, assim validando o processo de SPIF com aquecimento.

A conformação à quente foi utilizada por se tratar de produção de peça de geometria complexa e para isso foi utilizado o aquecimento combinado da alta rotação da ferramenta e das lâmpadas de halogêneo que permaneceram acesas durante o processo, permitindo que a temperatura ultrapasse os 220° C. Foram realizados também testes com baixa rotação para verificar a influência da rotação no processo de conformação com aquecimento.

A tabela 1.1 apresenta as condições de contorno do processo de cada um dos três tipos de experimentos analisados: força, desgaste de ferramenta e aquecimento.

Tabela 1.1: Condições de contorno do processo

Condições de contorno do processo						
Experimento	Material da peça	Maquina CNC	Dispositivo Fixação	Sistema Medição	Parâmetros Entrada	Parâmetros Saída
Força	Alumínio Liga 1050	Haas MINI	Sem aquecimento	Piezoelétrico Câmera Térmica	Avanço XeY Rotação Ap	Forças e Frequência em X, Y e Z
Desgaste da ferramenta	Aço Galvanizado NBR7008ZC	ROMI D600	Sem aquecimento	Projetor de perfil Câmera Térmica Termômetro laser	Avanço XeY Rotação Ap	Desgaste da ferramenta
Aquecimento	Alumínio Liga 1050 Liga 6063	ROMI D600	Com aquecimento	Câmera Térmica Termômetro laser Scaneer 3D	Avanço XeY Rotação Ap Temperatura	Peça final para análise

### 1.3 Hipótese a comprovar

O processo de estampagem incremental de ponto simples tem como uma de suas maiores dificuldades a obtenção de peças não simétricas de alta complexidade. Para a produção de peças dessa natureza, geralmente recorre-se a outros tipos de ISF como a estampagem incremental com dois pontos de apoio. É possível, porém, aperfeiçoar essa produção pelo processo de SPIF com a inserção de calor no dispositivo de fixação, obtendo-se assim um equipamento com maiores recursos e tecnologia atendendo a uma grande variedade de peças, já que se trata de um dispositivo genérico. Propõe-se, então, o desenvolvimento desse dispositivo de aquecimento seguido de controle do calor empregado durante o processo e uma sequência de testes de conformação em peças de variadas formas e diferentes graus de dificuldade de conformação, possibilitando, assim, a definição de parâmetros e a identificação das limitações da estampagem incremental com

aquecimento, pela análise dos erros dimensionais comparados ao processo de adição de calor.

O aquecimento gera a dilatação dos materiais, cujo valor será em função da temperatura de processamento e do material utilizado na peça de conformação durante o processamento. Para verificar a influência da dilatação na produção de peças e dos erros dimensionais associados, durante a produção da peça será inserida uma compensação da dilatação por meio de uma escala na programação no código G, através de uma função própria da máquina CNC.

A estampagem incremental de ponto simples, como recurso para produção de peças complexas, pode ser aperfeiçoada com a utilização de dispositivos especificamente fabricados para permitir a adição e o controle gradativo de calor no processo, possibilitando a redução significativa dos erros dimensionais das peças processadas e a definição de parâmetros e limitações da operação. Além disso, o estudo das forças de conformação e a análise do desgaste sofrido pela ferramenta também podem oferecer avanços no aperfeiçoamento do processo de SPIF, permitindo identificar a melhor trajetória da ferramenta e reduzir os esforços de conformação.

## **1.4 Objetivos da Tese**

### **1.4.1 Objetivo Geral**

Tendo como requisitos-chave a redução de erros dimensionais e do tempo de processamento da estampagem incremental de ponto simples (SIPIF), o objetivo desta tese é estudar esse processo por meio de pesquisa experimental aplicada mediante a realização de testes práticos, tendo como foco pesquisar em três abordagens baseadas em: força de processamento, desgaste de ferramenta e aquecimento.

A análise do comportamento da força de conformação durante o processo será feita para que se consiga entender os defeitos de quebra e o surgimento de trincas nas peças, bem como entender os limites dos parâmetros de processamento. O desgaste da ferramenta está ligado a critérios de fim de vida da ferramenta, visa-se portanto analisar a vida útil da ferramenta de conformação correlacionando-a aos parâmetros de entrada no processo.

O terceiro ponto a ser analisado é a inserção de calor no SPIF. Esse aquecimento será gerado por dois métodos, em conjunto e/ou separadamente. O primeiro é aquecimento pontual gerado diretamente pela extremidade semi-esférica da ferramenta de conformação que gira em alta rotação durante o processo e o segundo é o aquecimento da área de trabalho obtida por meio de um dispositivo que utiliza lâmpadas halógenas. Com isso, pretende-se analisar os efeitos do aquecimento no aumento da maleabilidade do material e os benefícios inerentes, tais como a ampliação da gama de materiais e de espessura de chapa que passam a poder se utilizar do SIPF quando se trata de conformação à quente.

## 1.4.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral da presente tese, foram estabelecidos os objetivos específicos a seguir:

- Criar um modelo de análise de forças para o processo de SPIF, capaz de realizar a predição das forças de conformação em relação aos parâmetros de processamento.
- Criar um modelo de desgaste de ferramenta para o processo de SPIF, capaz de realizar a predição de vida da ferramenta de conformação em relação aos parâmetros de processamento, pretendendo também a estimativa de custos do processo.
- Aplicar aquecimento para obter peças de geometria complexa pelo processo de SPIF.

## 1.5 Contribuições da Tese

O processo de estampagem incremental de ponto simples é o processo com o menor custo e mais simples de ser aplicado quando comparado com os outros processos de estampagem incremental. As contribuições que esta tese gera para o processo de SPIF estão associadas ao, desgaste de ferramenta, à força de processamento e a inserção de aquecimento no processo.

No desgaste de ferramenta a contribuição mais importante é a criação de um modelo matemático experimental capaz de prever o desgaste da ferramenta de conformação e assim estimar o seu tempo de vida, que foi validado para a conformação de chapas de aço galvanizados NBR 7008 ZC. Com este modelo pode-se estimar os custos do processo de forma semelhante ao processo de fresamento.

Para as forças de conformação foi criado um modelo matemático experimental de predição de forças onde pode-se prever as forças de conformação em função dos parâmetros utilizados no processamento, validado para o processo de conformação de alumínio liga 1050, afim de evitar grandes esforços de conformação no fuso da máquina CNC.

O processo de SPIF com aquecimento se apresenta como uma solução para ampliar os limites de uso da estampagem incremental e mostrar seu potencial de aplicação na indústria. Por meio da estampagem com aquecimento foi possível a obtenção de peças de geometria complexa e com ângulos íngremes, maiores que 80 graus, e ainda em peças simples se provou que com o auxílio de aquecimento pode-se reduzir as deformações indesejadas nas áreas planas do início da conformação.

## 1.6 Apresentação do Documento

Este documento de tese é composto de 8 capítulos e 7 apêndices, que cobrem todos os aspectos técnico-científicos necessários para a formulação do problema e sua proposta de solução.

Inicialmente é apresentada uma revisão de literatura em dois capítulos. O Capítulo 2 trata da produção bibliográfica genérica relativa ao processo de estampagem incremental de ponto simples e o capítulo três apresenta os trabalhos associados à força, desgaste de ferramenta e aquecimento, todos baseados em modificação do processo de ponto simples, detalhando novos parâmetros para auxiliar na conformação.

O capítulo quatro apresenta as atividades necessárias para o planejamento e execução da conformação de peças com o processo de SPIF, considerando todas as etapas do processo. As etapas do processo serão compostas basicamente de desenvolvimento e validação de dispositivos para conformação com aquecimento e aquisição de força de processamento e planejamento dos experimentos em DOE++.

No quinto capítulo apresenta-se um estudo do desgaste de ferramenta no processo de estampagem incremental de ponto simples, onde descreve a realização de ensaios práticos, parâmetros de processamento, dispositivos utilizados para a obtenção dos dados e uma sequência de análises voltada para a correlação entre o desgaste da ferramenta e os parâmetros de entrada.

É realizado no capítulo seis o desenvolvimento do estudo das forças de conformação do processo SPIF, onde é apresentada as premissas e a obtenção do modelo matemático experimental de predição de força, planejamento de experimentos, resultados e análises das forças envolvidas no processo.

O capítulo sete trata da melhoria de processo SPIF através da inserção do aquecimento no processo, trabalhando na determinação de parâmetros para obtenção de melhor qualidade superficial com um baixo tempo de conformação e ainda se obter peças de geometria complexa no processo de estampagem incremental de ponto simples.

No capítulo oito são apresentadas as conclusões de cada etapa da pesquisa, além da conclusão geral e sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A é apresentado o planejamento do fluxograma IDEF que é utilizado para mapeamento do processo.

No apêndice B há os principais gráficos de força gerados pelo dispositivo piezoelétrico durante a conformação do perfil simples em chapa de liga alumínio 1050.

No apêndice C apresenta-se o detalhamento do dispositivo de fixação para análise de força, onde este dispositivo juntamente com o dispositivo de medição de forças piezoelétrico. Todas as peças e conjuntos são detalhadas.

No apêndice D contém o projeto detalhado do dispositivo de fixação juntamente com o sis-

tema de aquecimento, onde todas as peças são detalhadas em todos os detalhes do dispositivo de aquecimento.

No apêndice E são apresentadas as tabelas que mostra as publicações em congressos internacionais e nacionais, realizadas durante o tempo de doutoramento.

No apêndice F contém as telas de programação do CAM para a geração do código G, tanto para a peça de geometria complexa e como para simples se utiliza a mesma codificação de programa para geração do código G mudando apenas o parâmetros processamento.

O apêndice G apresentada as análises das ferramentas de conformação, que foram analisadas no projetor de perfil e em seguidas foram enviadas para um arquivo de CAD para verificação e confirmação de resultados.

O relatório geral de análise do Software SPSS para o tempo de vida de ferramenta constam no Apêndice H.

No apêndice I apresenta o relatório geral de análise do Software SPSS onde a variável dependente é o desgaste de ferramenta de conformação.

No apêndice J apresenta a configuração do Software DOE++ para os ensaios de desgaste da ferramenta, onde define-se qual o fatorial utilizar, no caso de desgaste de ferramenta utilizou-se o fatorial Taguchi.

No apêndice K apresenta a configuração do Software DOE++ para os ensaios de força onde se define-se qual o fatorial utilizar, no caso da força, por não possuir o mesmo número de incógnitas para todos os parâmetros de entrada, utilizou-se o fatorial total.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura sobre o processo de estampagem incremental com foco na estampagem incremental de ponto simples. São apresentados a descrição do processo, variáveis envolvidas, parâmetros de conformação, máquinas utilizadas, dispositivos de fixação, técnica dos múltiplos passes, análise de força de conformação, geração do caminho de ferramenta e desgaste da ferramenta associado ao processo.

### 2.1 Introdução

Na busca pela melhoria contínua, maior competitividade e respostas rápidas exigidos no atual mercado global, é necessário o desenvolvimento de novos processos e técnicas de fabricação com maior eficiência financeira, reduzido prazo de fabricação e aumento da qualidade produtiva (LENDEL et al., 2014).

### 2.2 Descrição do processo

A estampagem incremental (*Incremental Sheet Forming –ISF*) é um processo de conformação que tem demonstrado grande potencial para a produção de peças complexas, sem exigir o uso de matrizes ou ferramentas dedicadas, (KUMAR; KUMAR, 2015). Utilizando-se de uma máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado), o processo consiste na deformação local (passo a passo) do material por meio de uma ferramenta simples de conformação, com ponta semi-esférica, que percorre um caminho definido por um código de programação (código G), até a obtenção da geometria final desejada para a peça.

Para que a peça seja conformada, a ferramenta executa vários passes até chegar na profundidade e forma programada e é por esse motivo que o processo é chamado de estampagem incremental.

Na estampagem incremental, a conformação propriamente dita é obtida de maneira lenta se comparada à estampagem convencional, mas é uma opção economicamente viável por não utilizar um ferramental dedicado, construído geralmente com material resistente, como aços P20, H13 ou V131, ainda com elevado número de componentes móveis, os quais exigem processos de fabricação de elevado valor agregado (TUOMI; LAMMINEN, 2004).

Paunoiu et al. (2006), a estampagem incremental tem um custo da ordem de 5 a 10% do total do custo da estampagem convencional. A composição do custo permite a definição do mínimo e máximo a serem fabricados para viabilizar economicamente a utilização do ISF de cada processo específico. O processo de conformação incremental é lento. Assim, este processo é adequado para produção de baixo volume na magnitude de 1-500 peças por mês.

Assim, a estampagem incremental apresenta-se no mercado como uma solução à demanda de pequenos e médios lotes, que é ainda limitada pelo alto custo do processamento, já que o processo de estampagem convencional requer, antes do início da fabricação da peça, o desenvolvimento de um ferramental, matrizes e punções, o que torna a operação dispendiosa e demorada. O processo, dada sua configuração a partir de um comando numérico computadorizado, permite, ainda, realizar correções no design da peça de maneira prática e rápida.

Como em qualquer processo de fabricação, a estampagem incremental possui variáveis que afetam os resultados obtidos e que devem ser controladas. Algumas das variáveis foram descritas por Hirt e Ames (2003):

- Tamanho e formato da ferramenta de conformação;
- Material da ferramenta;
- Velocidade de deslocamento da ferramenta;
- Estratégia de conformação;
- Incremento vertical;
- Força de fixação do prensa-chapas;
- Temperatura de estampagem.

## **2.3 Variações do processo**

A estampagem incremental pode ser classificada em simétrica de revolução ou assimétrica, (MUSIC et al., 2010). A estampagem simétrica de revolução é o que se chama popularmente de repuxo, que é executado geralmente em um torno específico e tem uma grande importância na indústria para a produção de peças de revolução, tendo aplicação clássica na fabricação de

panelas. O processo incremental assimétrico está associado à produção de peças específicas de pequenos lotes e à prototipagem rápida e trabalha em conjunto com a tecnologia de comando numérico computadorizado (CNC), que controla o caminho da ferramenta de conformação. O processo chamado de repuxo, que é executado no torno convencional, é conhecido em inglês como *Conventional Spinning e Shear Forming* (JESWIET et al., 2005).

O processo de estampagem incremental assimétrica de chapas está focado principalmente em três variações: não assistido por matriz (*dieless forming*), semi-assistido por matriz (*semi-supported*) e assistido por matriz (*supported*). Embora sejam realizados de forma similar com uma ferramenta de ponta normalmente semiesférica, cada um dos processos apresenta as suas particularidades em algumas das etapas de execução (ALLWOOD et al., 2006).

### 2.3.1 Estampagem incremental simétrica

Em *Conventional Spinning*, uma chapa plana é conformada no formato desejado praticamente sem mudança na espessura da parede e com uma deliberada redução no diâmetro ou ao longo de todo o comprimento ou, ainda, em áreas específicas. É realizado em uma única etapa ou em etapas múltiplas, deformando-se progressivamente a folha. À medida que a folha é deformada pelo rolo, as tensões internas serão nela geradas. A Figura 2.1 mostra uma estimativa dessas tensões de acordo com Lange (1985) e Runge (1994), que são amplamente citados na literatura.

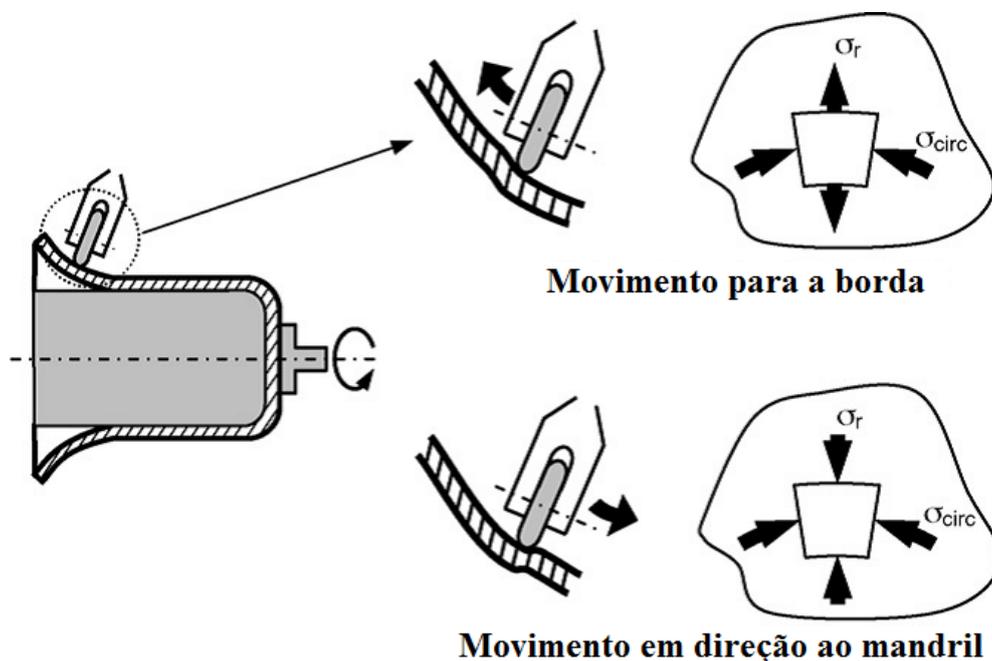


Figura 2.1: *Conventional Spinning* e força atuante no processo  
 Fonte: (MUSIC et al., 2010)

Em *Shear Spinning*, a espessura da peça é deliberadamente reduzida, enquanto o diâmetro da

parte permanece constante, igual ao diâmetro da peça em bruto. À medida que o rolo segue a forma do mandril, a uma distância fixa, uma peça em bruto tem a sua espessura inicial  $t_0$  reduzida a uma espessura  $t_1$ , estando essa espessura final relacionada ao ângulo de parede pela lei dos senos (Figura 2.2).

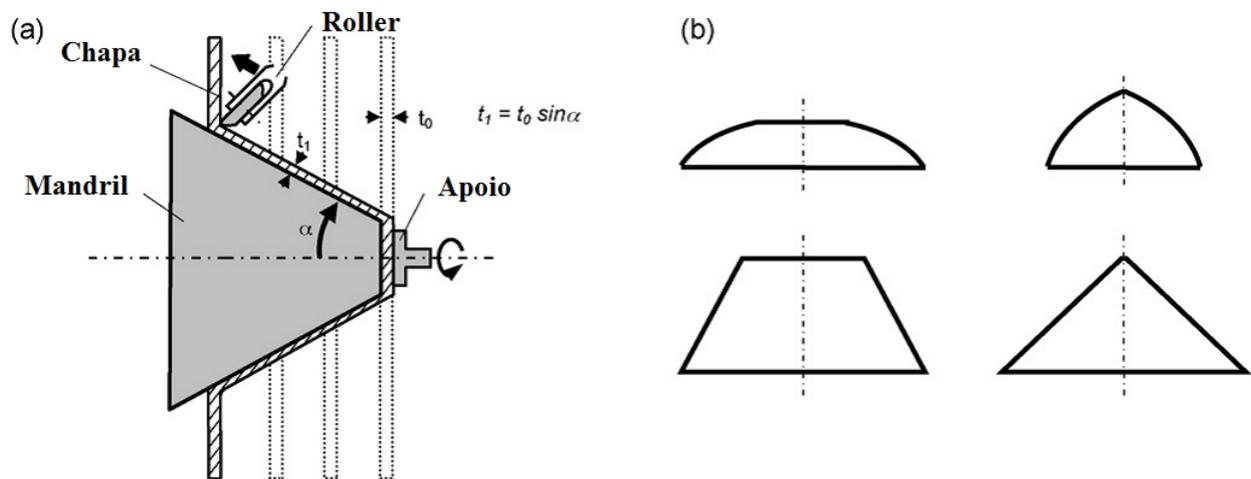


Figura 2.2: Repuxo e exmple de peças que podem ser obtidas por este processo  
 Fonte: (MUSIC et al., 2010)

### 2.3.2 Estampagem incremental

A estampagem incremental de chapas é um processo de conformação inovador, capaz de produzir chapas de geometria complexa, utilizando a tecnologia CNC já amplamente difundida nos meios de manufatura dos metais. Apresenta como principais vantagens os baixos custos de preparação de máquina, a utilização de maquinário CNC de três eixos e grande flexibilidade, já que novos produtos são obtidos alterando-se apenas o seu modelo de Desenho Assistido por Computador (CAD), permitindo assim a produção de pequenos lotes (MICARI et al., 2007).

Um dos grandes entraves à aplicação industrial da ISF está relacionado ao erro dimensional entre o modelo proposto e a peça real, devido às deformações elásticas que ocorrem no processo, (MICARI et al., 2007). Para compensar esses efeitos, existem alguns recursos que podem variar muito de acordo com a complexidade geométrica do produto, o que demanda eventual correção e ajuste. Em sistemas de ISF que utilizam ferramenta inferior (com cavidade ou saliência), o formato desta já está corrigido, levando em consideração as deformações elásticas que ocorrem durante a estampagem (*spring back*). Contudo, a utilização de ferramentas-suporte onera o processo, o que se opõe a uma das principais promessas da ISF que é o baixo custo do ferramental (KOPAC; KAMPUS, 2005a).

Em razão da grande flexibilidade da ISF, torna-se viável sua aplicação em pequenos lotes de produção e até mesmo em lotes de peças individuais, já que o custo do ferramental utilizado

na estampagem incremental é bem menor do que o normalmente requerido nos processos de estampagem tradicionais. Considerando que a estampagem pode ser realizada com matriz bastante simplificada ou mesmo sem matriz, com apenas uma ferramenta de conformação (*Single Point Incremental Forming* –SPIF –estampagem incremental de ponto simples), o processo também apresenta viabilidade para prototipagem rápida e também para trabalhos artísticos, compostos geralmente por peças unitárias (KOPAC; KAMPUS, 2005a).

Além da flexibilidade e da utilização de ferramental de baixo custo, pode-se verificar ainda outras vantagens. A estampagem incremental de ponto simples proporciona economia de energia em relação ao consumo das máquinas tradicionais de estampagem. Além disso, como as máquinas para ISF (tanto para equipamentos originais quanto para centros de usinagem adaptados) têm dimensões bem menores que os equipamentos tipicamente utilizados para estampagem, alterações no *layout fabril* são mais fáceis de serem realizadas, assim como é possível o transporte desses equipamentos para pontos mais distantes, como, por exemplo, até uma unidade fabril da empresa.

A estampagem incremental de chapas (*Asymmetric Incremental Sheet Forming* –AISF) pode ser realizada de diferentes maneiras, por isso, a definição com figuras deve ser incluída na descrição do processo (Figura 2.3), de modo que ele não seja confundido com outras operações de conformação incremental. A técnica de conformação incremental assimétrica (AISF) é um processo que (JESWIET et al., 2005):

- É utilizado para conformação de chapas;
- Faz uso de uma ferramenta de conformação de pequeno porte;
- Não utiliza obrigatoriamente matriz dedicada;
- Tem a conformação executada pelo contato permanente da ferramenta com a chapa;
- Tem o caminho da ferramenta controlado em 3 dimensões espaciais.

A estampagem incremental pode ser classificada, ainda, segundo a quantidade de pontos de apoio ou as ferramentas utilizadas. Além da estampagem de ponto simples, que utiliza uma ferramenta que executa movimentos de translação e rotação, existe a estampagem com uma ferramenta de forma geométrica simples e estacionária, posicionada sob a chapa. Há, ainda, os processos que fazem uso de matrizes positivas ou negativas, posicionadas também sob a chapa, que irão dar forma ao produto final, como mostrado na Figura 2.3(ALLWOOD et al., 2006).

No que se refere aos tipos de configuração do processo de estampagem incremental que se baseiam em pontos de apoios, tem-se:

- Estampagem incremental de ponto simples (SPIF);
- Estampagem incremental com dois pontos, com matriz não dedicada (TPIF);
- Estampagem incremental com dois pontos, com matriz dedicada.

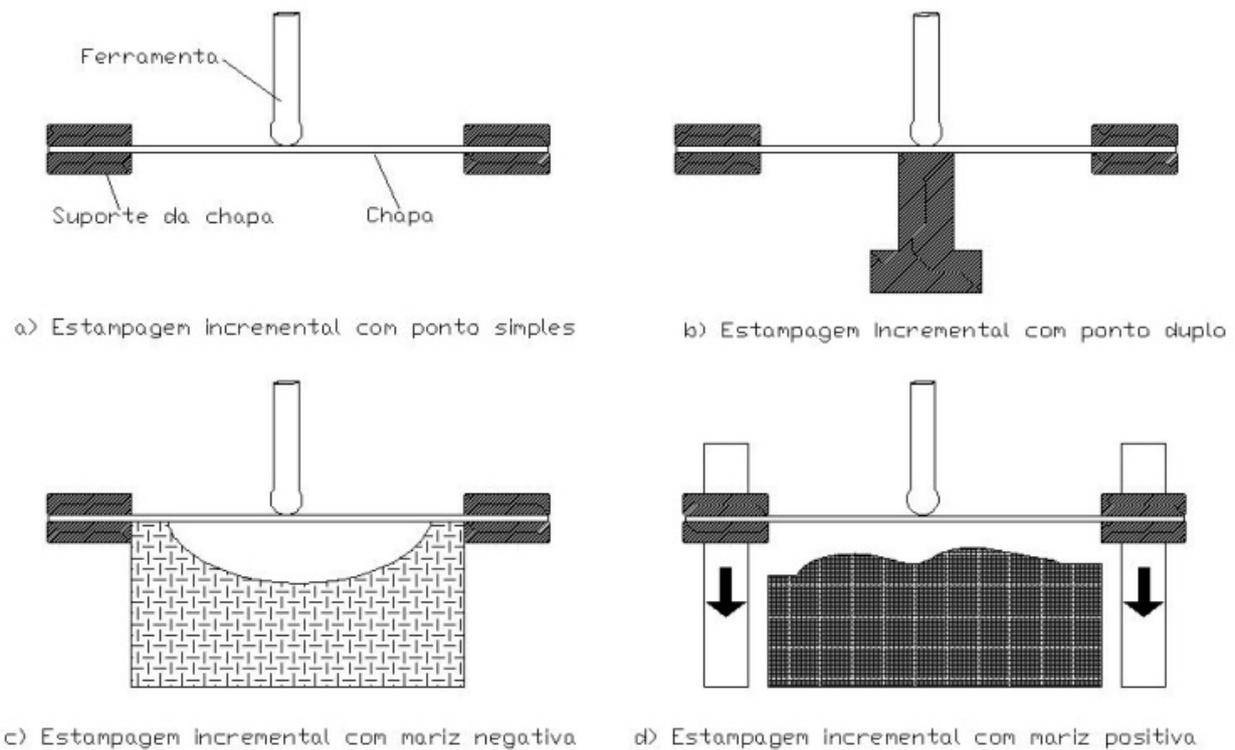


Figura 2.3: Diferentes configurações de ISF.(a)Ponto simples–sem apoio inferior; (b) ponto duplo –com apoio; (c) ferramenta inferior com cavidade; (d) ferramenta inferior com saliência.

### 2.3.3 Estampagem incremental com ponto simples (SPIF)

A estampagem incremental de ponto simples (SPIF) tem sido o tipo de processo ISF mais amplamente utilizado e investigado, Daleffe et al. (2013). O estado da arte, aplicações e fundamentos potenciais são amplamente descritos por Jeswiet et al. (2005), Jackson et al. (2008), Jackson e Allwood (2009), Bagudanch et al. (2013) Martins et al. (2008), Wang et al. (2016) (KURRA et al., 2015), Salem et al. (2016), McAnulty et al. (2017) e por muito mais autores. Os componentes básicos da operação estão representados esquematicamente na Figura 2.4.

O processo apresenta uma chapa (*blank*) a ser conformada a partir de um formato retangular (independente da forma da chapa final), com espessura variando entre 0,7 e 1,5 mm, dependendo do tipo de material a ser utilizado e de suas características mecânicas. Essa chapa é presa em um dispositivo móvel, deslizando paralelamente ao eixo Z de um sistema CNC (eixo vertical). Elementos de fixação evitam que a chapa se movimente enquanto a estampagem estiver ocorrendo e a deformação plástica da chapa se definindo. Essa deformação plástica é gerada por uma ferramenta rotativa acoplada ao eixo árvore do dispositivo CNC. A ferramenta tem uma ponta esférica ou semiesférica, a qual, após o início do processo de ISF, desliza sobre a superfície da chapa e realiza, gradativamente, através de incrementos verticais negativos, a conformação. Esse processo é chamado de –ponto simples –referindo-se ao ponto determinado pela ferramenta rotativa

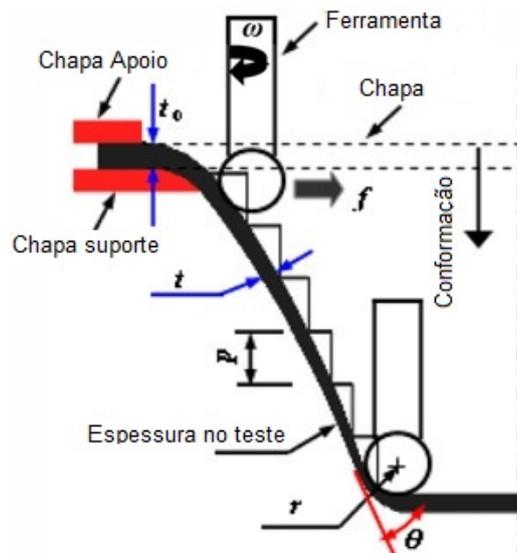


Figura 2.4: Estampagem incremental de ponto simples  
 Fonte: (HUSSAIN G.AND MAHNA; IQBAL, 2016)

de conformação (HIRT et al., 2005).

Dessa maneira, no processo SPIF, a ferramenta base, disposta na parte inferior do conjunto de estampagem, é eliminada e somente a ferramenta presa ao eixo-árvore entra em contato com a chapa. O único ponto de contato para a conformação é a ferramenta, sendo essa a principal característica que define a estampagem incremental com ponto simples (BAHLOUL et al., 2013).

Com a estampagem incremental de ponto simples é possível obter peças com simetria axial utilizando ferramentas de perfil simples e dispositivo prensa-chapa fixado na mesa do centro de usinagem CNC. Para a fabricação de peças mais complexas, esse processo ainda não fornece a precisão necessária (KOPAC; KAMPUS, 2005a)

### 2.3.4 Estampagem incremental com ponto duplo (TPIF)

A estampagem incremental de dois pontos de apoio, também designada pela sigla inglesa TPIF – *Two Points Incremental Forming*, utiliza, além da ferramenta de conformação, um suporte inferior rígido localizado sob a chapa. Esse suporte é utilizado para expandir as possibilidades geométricas e também melhorar a acuidade das peças, ou seja, a correspondência entre peça virtual e peça real (Figura 2.5). A utilização do suporte inferior é particularmente importante para geometrias assimétricas (ARAGHI et al., 2009).

Uma variação da estampagem incremental de dois pontos de apoio é a conformação com matriz estacionária positiva que utiliza matriz dedicada com o formato da peça final, indicada para obtenção de superfícies complexas. Essa matriz, por sua vez, pode ser positiva (protuberância) –Figura 2.6 –ou negativa (cavidade) –Figura 2.7 (XU et al., 2013).

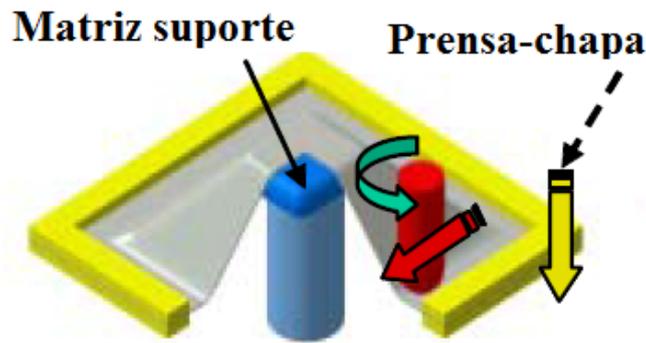


Figura 2.5: TPIF com matriz estacionária  
 Fonte: (BAMBACH et al., 2003)

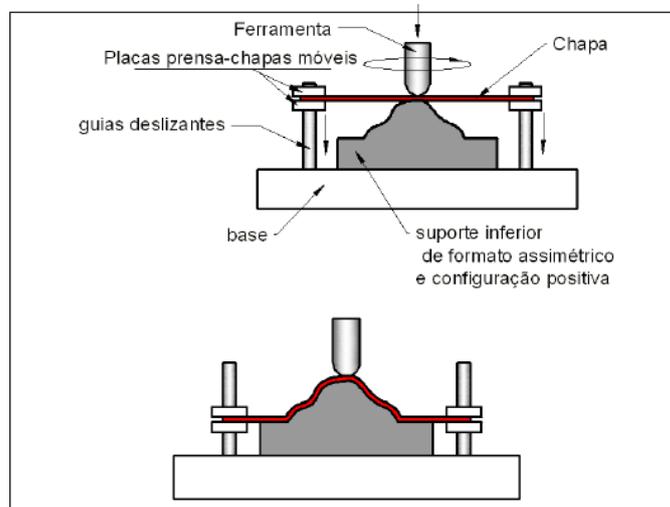


Figura 2.6: Conformação Positiva  
 Fonte: (ALLWOOD et al., 2006)

O suporte negativo tem a vantagem de tornar o dispositivo mais simples de ser fabricado e utilizado e de não possuir partes móveis, colunas-guias e talas deslizantes. Já a conformação positiva apresenta maior retorno elástico do material (ALLWOOD et al., 2006).

## 2.4 Parâmetros de conformação

No processo de estampagem incremental, existem muitos parâmetros a serem controlados. Alguns deles se assemelham aos de usinagem, como rotação, avanço em XY, avanço em Z, diâmetro, trajetória e rugosidade da ferramenta; outros são distintos do processo de usinagem, como retorno elástico da chapa, maleabilidade da chapa, entre outros. Aqui vamos tratar dos principais e mais relevantes para se iniciar o processo de conformação. Alguns desses parâmetros estão relaciona-

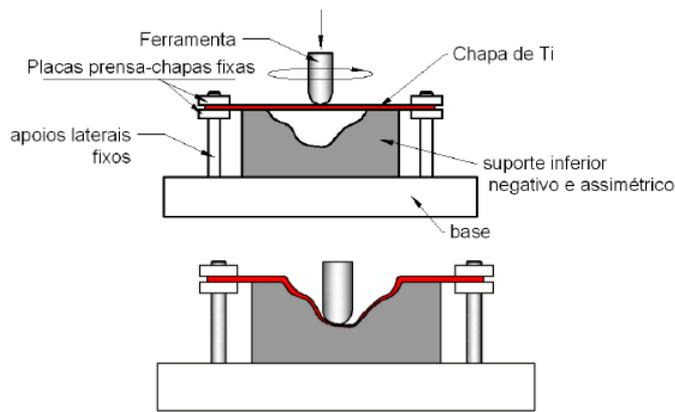


Figura 2.7: Conformação Positiva  
 Fonte: (ALLWOOD et al., 2006)

dos à ferramenta de estampagem, à chapa utilizada na conformação, às características técnicas do equipamento CNC, aos valores de translação dos eixos X, Y e Z (e rotação no caso do eixo Z), às configurações do software de Manufatura Assistida por Computador (CAM) e ao tipo de lubrificante utilizado (MICARI et al., 2007).

Com relação à ferramenta de estampagem, é necessário definir o seu tamanho (diâmetro), formato e material. O tamanho da ferramenta está relacionado ao menor raio existente na peça a ser conformada. A combinação desses dados interfere no tempo de manufatura, no acabamento superficial e nas limitações geométricas do produto final. O material da chapa e sua espessura também definem as limitações do processo de estampagem, de acordo com suas características mecânicas de conformabilidade. A espessura determina principalmente o maior ângulo de conformação e a profundidade. Além disso, a quantidade de força aplicada pelo conjunto –cabeçote-cone-ferramenta –na deformação incremental da chapa é outro fator de interferência e deve ser controlada e medida para que não cause danos ao equipamento.

Pode-se definir como conformabilidade a facilidade com que o material pode ser dobrado, prensado, estampado ou forjado sem prejuízos a sua integridade física sob vários aspectos: metalúrgicos, mecânicos, visuais e dimensionais.

Kopac e Kampus (2005a), durante experimentos práticos de estampagem incremental, analisaram os seguintes parâmetros :

- Tamanho, forma, material e velocidade da ferramenta: o raio e o formato da ferramenta limitam a geometria da peça, afetando seus raios de arredondamento de cantos e inclinação da parede. A resistência mecânica da ferramenta, aliada à velocidade com que o processo acontece, pode determinar o rompimento da chapa;
- Estratégia da geração da trajetória: as estratégias configuradas no software de CAM, Esprit, Edge cam e Solidcam, determinam o acabamento superficial, os parâmetros de rugosidade,

o tempo gasto no processo, os ângulos de parede de chapa e influenciam também na resistência mecânica da chapa à deformação;

- Força da prensa-chapas: é determinada pelo número de parafusos colocados na realização da fixação da prensa-chapa para evitar que a chapa a ser conformada deslize entre as chapas do dispositivo de fixação.
- Lubrificação: permite a diminuição do coeficiente de atrito, mantendo a temperatura estável e melhorando o acabamento superficial

### **2.4.1 Rotação da ferramenta**

A rotação da ferramenta durante o processamento é alvo de muita discussão, muitos autores relatam a melhoria no processo de conformação com a ferramenta livre, pela rotação realizada pelo contato da ferramenta com a peça. Alguns estudiosos tentam demonstrar que a rotação gera um atrito e esse atrito produz calor, que, por sua vez, torna a peça mais maleável e, portanto, mais fácil de ser conformada. Xu et al. (2013) descrevem uma série de experimentos nos quais a rotação da ferramenta aumenta numa faixa de 0 a 7000 rpm, concluindo que, de modo geral, a conformabilidade do material melhora com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta (XU et al., 2013).

A conformabilidade do material é determinada tanto por atrito quanto por efeito térmico. Numa baixa velocidade de rotação da ferramenta (0-1000 rpm), o atrito é considerado como o principal fator para a mudança de conformabilidade. A deformabilidade aumenta significativamente por uma redução de atrito positiva quando a ferramenta de conformação gira de 0 a 500rpm. Com altas rotações da ferramenta (2000 - 7000 rpm), o efeito térmico se torna a razão dominante para a melhoria da conformabilidade. A 2000 rpm, observa-se a melhora da ductilidade do material pelo seu amolecimento. Quando a velocidade de rotação da ferramenta atinge valores acima de 3000 rpm, as temperaturas máximas atingidas são altas o suficiente para ativar a recristalização dinâmica. Portanto, o novo reforço da maleabilidade não é apenas causado pelo amolecimento do material, mas também atribuído ao refinamento de suas microestruturas (XU et al., 2013).

A Figura 2.8 mostra as variações de temperatura em razão da rotação da ferramenta. Na passagem de ferramenta não rotativa para ferramenta rotativa, um aumento nas variações de temperatura é registrado à medida que a velocidade de rotação aumenta. Isso está associado a um maior atrito entre a ferramenta e a chapa. A rotação da ferramenta se sobressai se comparada com a influência da redução do coeficiente de atrito.

Assim, a variação de temperatura associada ao mais elevado coeficiente de atrito de teste, que é de ferramenta não rotativa, é inferior a 2 °C, enquanto se torna três vezes maior com a passa-

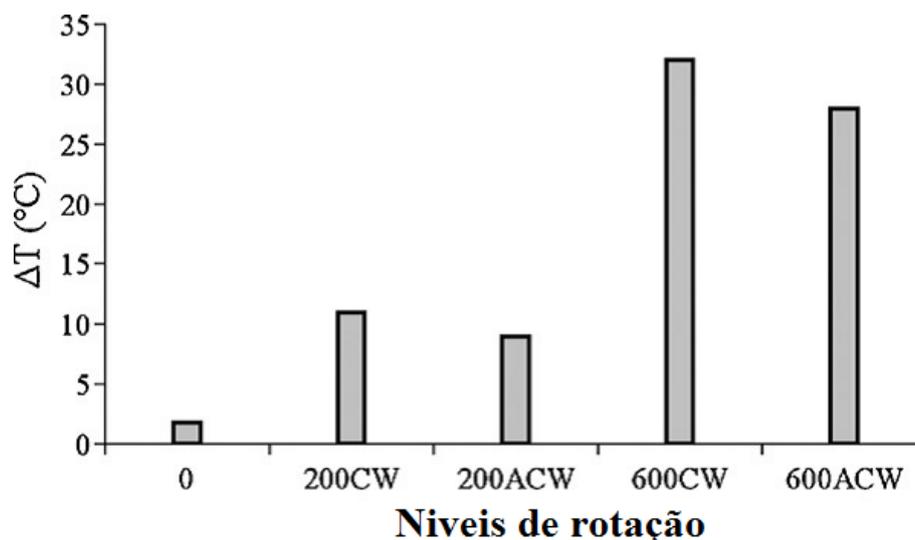


Figura 2.8: Variação da temperatura com a rotação em sentido horário (CW) e em sentido anti-horário (ACW)

Fonte: (DURANTE et al., 2009)

gem da rotação de 200 a 600 rpm. Destaca-se, então, uma relação estreita entre as variações de temperatura e a velocidade de rotação. Entretanto, o nível mais alto de temperatura, registrado para a rotação no sentido horário a 600 rpm, não chega a 60 °C, que representa uma geração de calor insignificante, uma vez que esses valores não são capazes de afetar significativamente o desempenho do óleo lubrificante ou as propriedades da chapa, nem variar a direção ou a velocidade de rotação (DURANTE et al., 2009).

## 2.4.2 Diâmetro da ferramenta

O diâmetro da ferramenta está diretamente relacionado à geometria da peça. Conforme a dimensão da peça a ser conformada, é necessária uma ferramenta diferente, embora na estampagem incremental seja possível a utilização de uma mesma ferramenta para várias operações. A maior ferramenta possível de ser utilizada está relacionada ao menor diâmetro côncavo existente na peça.

A ferramenta de cabeça hemisférica é geralmente utilizada para conformação com o processo em SPIF, para garantir um ponto de contato contínuo entre folha e ferramenta de modelagem, conforme modelos apresentados na Figura 2.9.

Na conformação de peças com ângulos de parede muito íngremes, pode tornar-se necessária a utilização de uma haste de ferramenta menor do que o diâmetro da esfera, evitando-se, dessa forma, o contato entre essa haste e a chapa de metal. Esse aspecto deve ser levado em consideração ao se gerar o caminho de ferramenta. Uma vez estabelecida a forma da ferramenta, normalmente um raio específico com uma bola de cabeça hemisférica, deve-se escolher os materiais para sua



Figura 2.9: Ferramentas de conformação do processo SPIF  
Fonte: (LE, 2009)

confeção. Na maioria dos casos, as ferramentas de cabeça semiesférica são feitas de aço, que é adequado para a maioria das aplicações. Para reduzir a fricção e aumentar a vida útil da ferramenta, ela pode ser revestida, ou mesmo fabricada, de carboneto cementado. Para algumas tarefas, o material da ferramenta é diferenciado para evitar reações químicas com o material da chapa e, assim, aumentar a qualidade da superfície e reduzir o desgaste da ferramenta, que pode então tornar-se um aspecto importante. Além disso, a escolha de um lubrificante adequado ajuda a reduzir esse desgaste (NIMBALKAR; NANDEDKAR, 2013).

Diferentes dimensões da ferramenta são utilizadas, desde diâmetros de 6 mm até 100 mm, para a fabricação de peças grandes. Os diâmetros maiores exigem mais força de conformação por causa do ângulo de contato envolvido. O diâmetro utilizado depende do menor raio côncavo necessário na peça a ser conformada e tem influência também sobre a qualidade da superfície e/ou tempo de fabricação. As ferramentas pequenas podem alcançar seu limite de carga, com a fratura prematura dessa ferramenta durante a conformação de materiais como aço inoxidável, aço ou titânio. Os diâmetros mais utilizados têm em média de 10 a 15 milímetros (JESWIET et al., 2005).

Um pertinente estudo de caso acerca da interferência do diâmetro da ferramenta no processo de conformação foi o realizado por Jackson et al. (2008), que se basearam na análise da influência do raio da ferramenta e do passo vertical para verificação da força vertical da ferramenta em ISF no Arcelor e no Alumínio. Ambos os materiais foram comparados para formar pirâmides, usando nove combinações de três raios da ferramenta (5, 10 e 15 mm) com três localizações verticais (0,1, 0,5 e 2 mm). As pirâmides tinham um ângulo de parede constante de 40 graus e uma superfície de base de  $100 \times 100$  mm centrada numa área sem suporte de  $140 \times 140$  mm, uma folha de tamanho total de  $175 \times 175$  mm (JACKSON et al., 2008)

A Figura 2.10 mostra que a Força ( $F_s$ ) aumenta quase linearmente com o aumento do raio

de ferramenta para ambos os materiais. Isso é consistente com resultados anteriores para a conformação por SPIF de folha de metal. Os gráficos também mostram o aumento de  $F_s$  com o aumento do passo vertical, que foi previamente relatado para chapas por Duflou et al. (2005a), (DUFLOU et al., 2005). Embora as tendências em  $F_s$  sejam semelhantes para os dois materiais, a magnitude de  $F_s$  para MS/PP/MS foi em média de 50% da observada para o alumínio (1.03kN para MS-PP-MS vs 2.01kN para o alumínio ) (JACKSON et al., 2008).

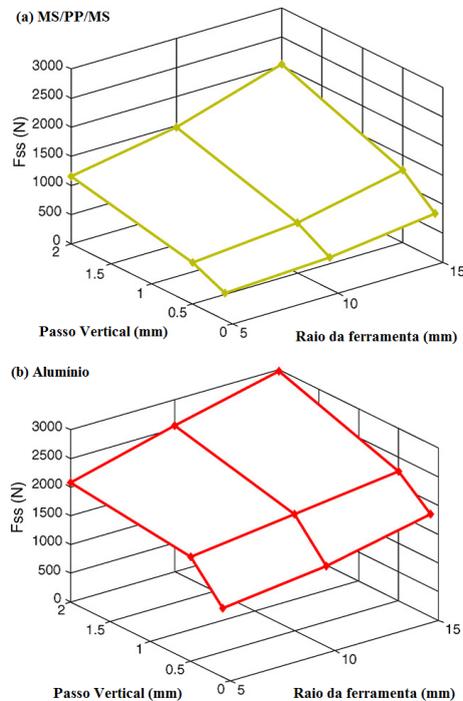


Figura 2.10: A influência do raio da ferramenta e do passo vertical na força ferramenta (FSS) no ISF de 40° pirâmide: (a) MS-PP-MS e (b) de alumínio

Fonte: (JACKSON et al., 2008)

Xu et al. (2013) desenvolveram uma ferramenta de conformação, cuja ponta onde ocorre o contato com a chapa a ser conformada possui uma textura marcada a laser (LST), como mostrado na Figura 2.11 Esse desenho é capaz de reduzir o atrito na interface da peça com a ferramenta de trabalho. A redução de atrito é obtida por microcanais que servem como reservatórios de lubrificante no processo de conformação. Além disso, a pressão gerada pela dinâmica hidrotêxturas de superfície também é útil para diminuir o atrito (JACKSON et al., 2008).

Em comparação com a ferramenta de modelagem normal SPIF, observa-se que a conformabilidade do material diminui quando a superfície de textura de laser e o formato da ferramenta são utilizados em velocidade de rotação alta. Isso ocorre porque a redução de atrito realizada pela LST irá reduzir diretamente a geração de calor (XU et al., 2013).

Outro experimento utilizado para investigar a influência do tamanho da ferramenta sobre a formabilidade foi realizado por, (HUSSAIN et al., 2008b). No referido trabalho, essa dimensão foi variada ao longo de três níveis: 8 mm, 12 mm e 16 mm. Enquanto a velocidade de deslo-

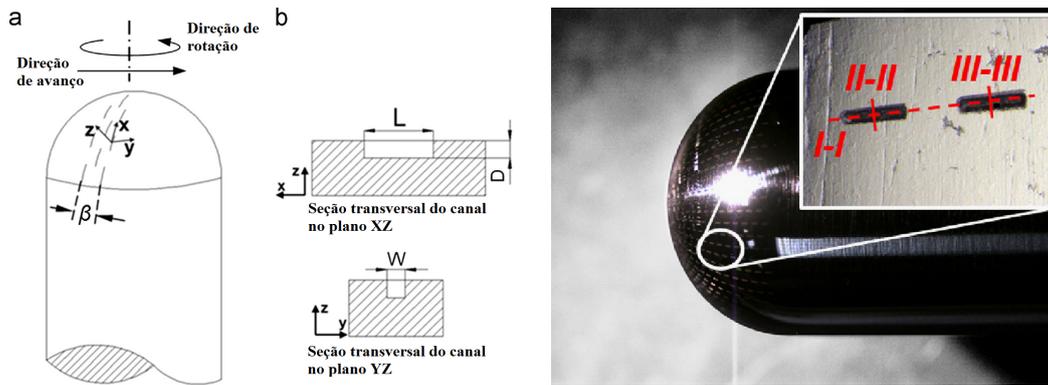


Figura 2.11: Esquema de texturas da superfície a laser: (a) padrão de distribuição de texturas de superfície ( $\beta=10.56$  graus), (b) forma desejada do fundo da textura [comprimento (L) largura (W) profundidade (D) =  $200 \times 25 \times 25 \mu\text{m}$ ] e (c) perfil final da ferramenta.

Fonte: (XU et al., 2013)

camento em XY e o passo em Z foram mantidos, nos três casos, a 2600 mm/min e 0,75 mm, respectivamente, os valores máximos e mínimos de conformabilidade observados foram de  $65,6^\circ$  para 8mm e  $63,1^\circ$  para 16 mm de diâmetro. De fato, um aumento no tamanho da ferramenta aumenta a área de contato, de modo que a deformação não permanece localizada como ocorre naquela causada por uma ferramenta de pequeno porte. Por essa razão, a conformabilidade diminui à medida que o diâmetro da ferramenta aumenta. A queda na conformabilidade que se percebe pela variação do tamanho da ferramenta de 8 mm para 12 mm é significativamente grande, mas é muito menor quando se varia de 12 mm para 16 mm seu diâmetro (HUSSAIN et al., 2008b).

### 2.4.3 Trajetória da ferramenta

No processo de SPIF, o caminho da ferramenta desempenha um papel significativo para a qualidade e precisão do produto final. Jeswiet et al. (2005) listam e revisam os aspectos mais importantes da estampagem incremental, incluindo as estratégias de geração de caminho da ferramenta. Também, Kopac e Kampus (2005a) se ocuparam da análise desse aspecto, comparando o caminho iniciando-se do centro da área a ser conformada para a borda mais externa com a trajetória partindo da borda mais externa para a área central, o que resultou na conformação de uma forma mais fina e mais próxima à forma desejada. Duflou et al. (2008) estenderam a janela de processo de SPIF usando caminhos de ferramenta em multipasso. Skjødt et al. (2008), utilizaram uma estratégia de cinco estágios para formar um copo cilíndrico com um ângulo de parede de 90 graus. Attanasio et al. (2008) otimizaram o caminho da ferramenta no processo TPIF com base na altura de crista e melhor precisão dimensional, melhor qualidade da superfície, precisão geométrica e uma melhor distribuição da espessura. Allwood et al. (2009) introduziram uma estratégia on line de controle de feedback baseado na trajetória predefinida para melhorar a geometria da peça. O referido trabalho sugeriu que com a utilização de diferentes estratégias de

caminho da ferramenta, a precisão geométrica e o limite de conformação podem ser aperfeiçoados

Em particular, uma profundidade de passo máximo (em Z) é definida para o caminho da ferramenta toda, juntamente com um valor limite do scallop. Se a altura máxima atingida pelo scallop do material gerado entre duas etapas sucessivas supera o limite scallop aplicado, a profundidade de passo real para a conformação é reduzida. Isso significa que, quando o parâmetro scallop é ativado, a profundidade de passo é recalculada a cada passo para baixo, verificando a compatibilidade de seu valor com o valor do scallop limite imposto. A Figura 2.12 mostra o que esse parâmetro representa.

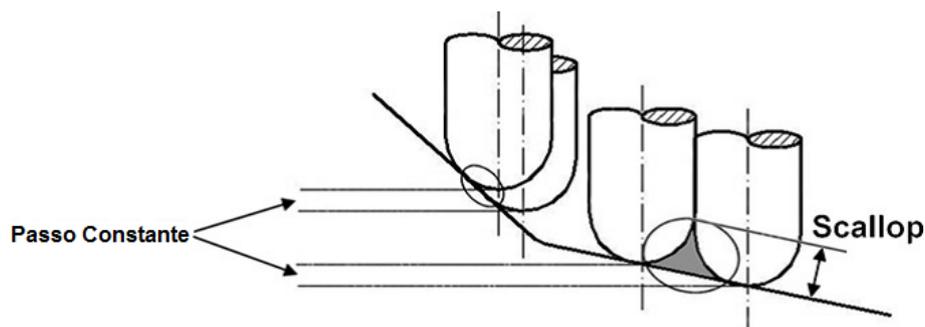


Figura 2.12: Parâmetro do *scallop*  
Fonte: (ATTANASIO et al., 2008)

A Figura 2.13 (a e b) relata a influência desse parâmetro no caminho da ferramenta. Quando essa função estiver ativada, a qualidade de superfícies planas ou quase planas melhora muito (isso, é claro, aumenta o tempo total de trabalho). Para a parte considerada, zonas melhoradas correspondem à área inferior da própria peça. Não é possível eliminar completamente as marcas deixadas pela ferramenta em cada passo sem mudar radicalmente o tipo de caminho da ferramenta, (ATTANASIO et al., 2008).

Quanto à geração do caminho da ferramenta, Kim e Yang (2000), (KIM; YANG, 2000) desenvolveram um algoritmo de equações derivado para um copo elipsoidal e um copo trevo. Essas equações estão numa forma fechada, que não podem ser estendidas para as peças com outros formatos. Malhotra et al. (2011), (MALHOTRA et al., 2010) desenvolveram um algoritmo de geração de caminho automático da ferramenta helicoidal para um único ponto incremental (SPIF), formado com base em um algoritmo de fatiamento adaptativo modificado. No algoritmo, a altura de passo é controlada por um erro volumétrico entre o modelo loft e as partes reais. Recentemente, Zhu et al. (2011), (ZHU et al., 2011) discutiram o método de cálculo de espiral e o passo da ferramenta para alcançar uma altura scallop constante para uma geometria arbitrária.

A estratégia do caminho da ferramenta e seu passo vertical (profundidade de estampagem) definidos no software de CAM interferem no tempo, no acabamento e na qualidade geométrica do produto final, podendo utilizar uma estratégia de conformação com uma trajetória em espiral. A

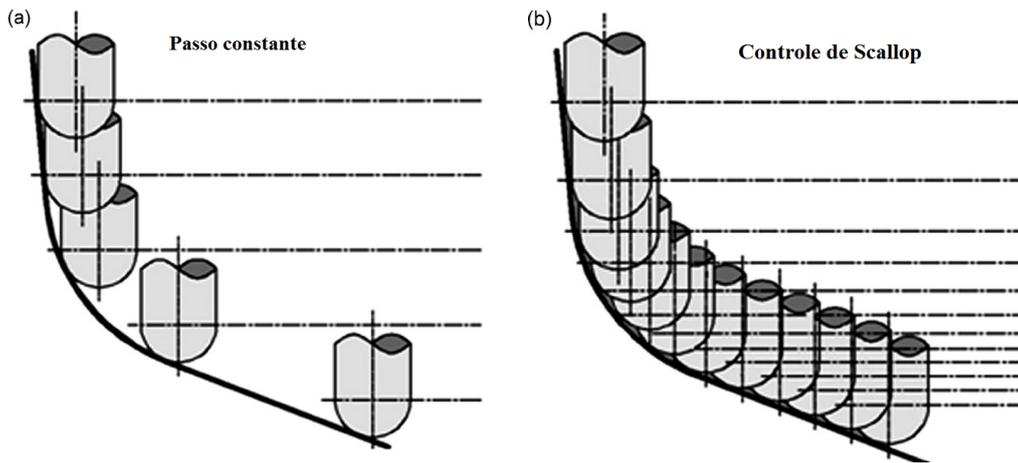


Figura 2.13: Diferença entre o passo em Z constante (a) e o (b) passo com limitação de scallop  
 Fonte: (ATTANASIO et al., 2008)

existência ou não de lubrificação e o tipo de lubrificante utilizado produzem alterações na temperatura da chapa e da ferramenta, na rugosidade superficial da chapa e no desgaste da ferramenta, tendo em vista que a lubrificação aumenta a vida útil da ferramenta (KOPAC; KAMPUS, 2005a).

A Figura 2.14 mostra o caminho da ferramenta em espiral. Muitos estudiosos o utilizam em seus experimentos, pois reduz o tempo de processamento, tendo em vista que a velocidade de descida em Z utiliza a mesma de deslocamento em XY. Com este caminho de ferramenta, consegue-se melhorar o acabamento superficial, reduzindo-se as marcas deixadas na peça.

Com relação ao acabamento superficial da chapa, o objetivo é gerar superfícies com uma rugosidade aparente que não influencie no aspecto estético do produto final. Para tanto, utilizam-se ferramentas esféricas com o maior diâmetro possível, dependendo dos raios mínimos existentes no produto final e do deslocamento em Z ( $A_p$ ) baixo. A escolha do  $A_p$  vai definir a rugosidade aparente da peça. O uso de  $A_p$  baixo aumenta consideravelmente o tempo de estampagem, mas isso garante a qualidade do produto final. Por outro lado, pode haver o endurecimento da chapa pelo acúmulo de tensões residuais, o que pode provocar a sua ruptura durante o processo (HIRT et al., 2005).

#### 2.4.4 Velocidade de avanço em XY e Z

A velocidade do avanço, avanço da máquina ou avanço da mesa em mm/min representa o movimento da ferramenta com relação à peça (SANDVIK, 2017). Os valores de translação dos eixos X, Y e Z provocam alterações no tempo de produção e no acabamento superficial. A velocidade radial (rpm) do eixo Z e a velocidade linear (mm/min) dos três eixos também exercem influência no acabamento superficial e no tempo de manufatura.

Um aumento na velocidade de avanço em XY diminui a conformabilidade. Dentro da gama

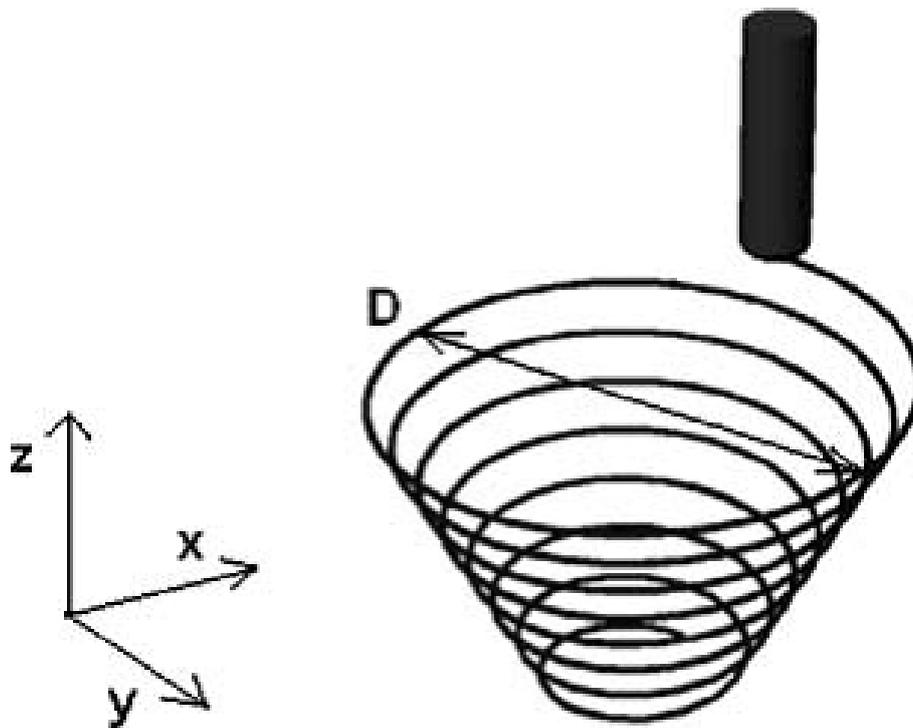


Figura 2.14: Parâmetro do *Caminho da ferramenta 3D em espiral*  
 Fonte: (FILICE et al., 2002)

investigada, a queda de conformabilidade é mais elevada quando a velocidade em XY é superior a 2500 mm/min e ocorrem mudanças menores com velocidade abaixo de 2500 mm/min. Isso significa que uma chapa de Titânio mostra alta de encruamento em altas taxas de avanço (HUSSAIN et al., 2008b).

### 2.4.5 Limites do processo

O processo SPIF tem algumas limitações, incluindo o longo tempo de processamento, a baixa precisão geométrica e o acabamento superficial grosseiro. Vários trabalhos e pesquisas vêm estudando uma maneira de minimizar os problemas e tornar o processo mais competitivo (LU et al., 2013).

Assim como em outros processos de conformação (forjamento e estampagem convencional), existem valores máximos de ângulos que definem certas regiões da peça, a fim de que seja possível a sua manufatura. No caso da ISF com um único passe, estudos recentes apontam para um ângulo máximo de parede de chapa de 65 graus. Ultrapassado esse valor, torna-se muito frequente a ruptura ou, no mínimo, uma diminuição drástica da espessura da chapa, causando uma baixa resistência mecânica localizada (HUSSAIN et al., 2008b).

A constância de volume conduz a uma relação direta entre a espessura da parede e o ângulo de parede (Figura 2.15), a qual tem sido comumente referenciada como –lei dos senos– e que leva

a um afinamento extremo da chapa ou falha, no caso de se aplicar grandes ângulos em um único passe (HIRT et al., 2005).

O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, que é dada pela equação matemática da lei dos senos, Equação 2.1, (KURRA; REGALLA, 2014).

$$t_f = t_i * \text{Cos}\alpha \quad (2.1)$$

Onde  $t_i$  é a espessura original da chapa,  $t_f$  a espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação e  $\alpha$  o ângulo de inclinação da chapa nesse mesmo ponto. Entretanto, a lei de senos não prevê como ocorre a variação de espessura ao longo de processo de estampagem.

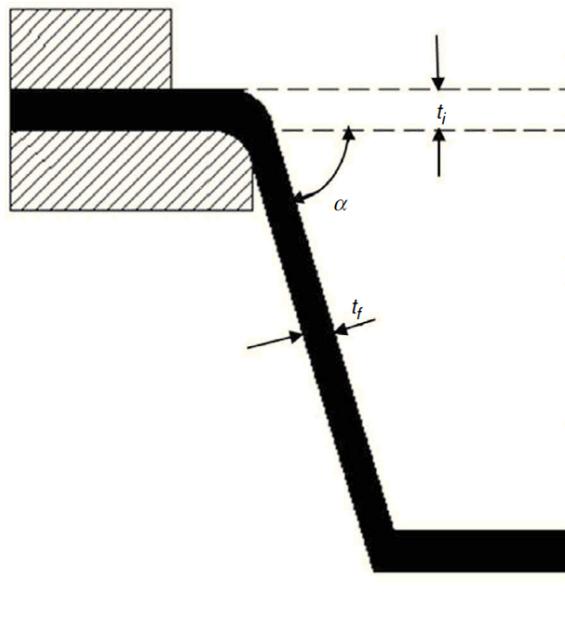


Figura 2.15: Representação esquemática da variação de espessura na formação incremental de peças de ângulo de parede constante

Fonte: (KURRA; REGALLA, 2014)

Em pesquisas realizadas por Junk et al. (2013) sobre o limite de conformação das chapas de alumínio utilizadas na indústria automobilística, foram avaliados dois parâmetros: limite de espessura (*thinning limit*) e o ângulo limite de estampagem (*forming angle limit*). Pela análise dos resultados, constatou-se que variando-se a inclinação da chapa ao longo da profundidade, consegue-se uma maior capacidade de estampagem do que se utilizando uma inclinação constante (HIRT et al., 2005).

Testes de estampagem onde o ângulo de parede aumentou gradativamente à medida que a pro-

fundidade de estampagem também aumentava. Assim, foi observada a profundidade de ruptura, a profundidade atingida e a profundidade projetada de acordo com o modelo CAD da peça. A partir do menor diâmetro, o ângulo de parede ficou próximo de  $90^\circ$ , o que causou o rompimento da chapa. A diferença entre a profundidade atingida e a projetada foi ocasionada pelo retorno elástico do material, comum em operações de estampagem,(HUSSAIN et al., 2007).

Uma característica presente nos processos de estampagem em geral e que também ocorre na ISF e determina limites de qualidade geométrica é o retorno elástico. Além da deformação plástica programada, a deformação elástica produz discrepâncias geométricas entre o produto final e seu modelo correspondente em CAD, (HAN et al., 2013).

A Figura 2.16 apresenta um diagrama gráfico do retorno elástico na estampagem incremental em uma peça, mostrando o perfil desejado e o perfil final da peça com o efeito do retorno elástico. Onde  $\alpha$  apresenta o ângulo de parede da peça e o  $\alpha'$  apresenta o angulo da peça com o retorno elástico e por fim o  $\Delta\alpha$  mostra a diferença entre os ângulos.

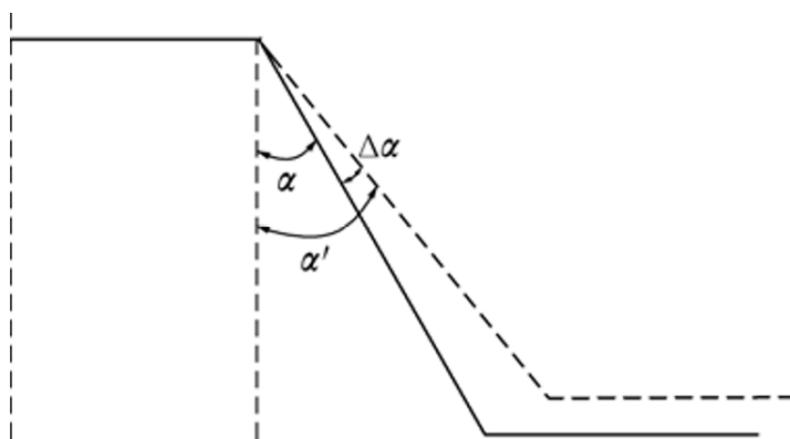


Figura 2.16: Diagrama gráfico do retorno elástico  
Fonte: (HAN et al., 2013)

A utilização do método de elementos finitos (*Finit Elements Method* –FEM) auxilia no desenvolvimento de um algoritmo de correção da malha que venha a diminuir ou excluir totalmente o desvio que é gerado pelo retorno elástico da peça, entre o teórico e o real. Esse algoritmo de correção recebe dados de uma máquina de medição por coordenadas, utilizada para medir a primeira peça produzida do lote. Esses dados são comparados com os dados geométricos do modelo em CAD 3D e então é feito o ajuste de coordenadas, gerando uma nova malha (superfície) corrigida. Estando em um ambiente paramétrico, o software de CAM atualiza automaticamente os dados de trajetória das ferramentas. Um novo arquivo NC (*Numerical Control*) é gerado e uma peça subsequente é produzida, já com as devidas atualizações (DUFLOU et al., 2005). Para se obter uma visão macro dos erros associados à produção da peça por SPIF com aquecimento, foi construído um diagrama de causa e efeito, conforme apresentado na Figura 2.17, utilizando-se a

regra dos 6M: Máquina (trocada por ferramenta), Matéria-prima, Mão de obra, Método, Medição e Meio ambiente.

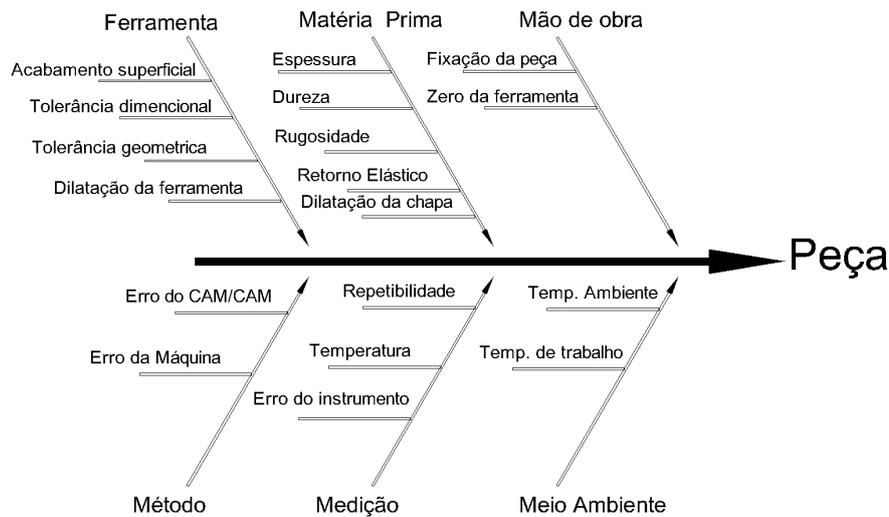


Figura 2.17: Parâmetro do *Diagrama Causa-Efeito do Processo - Erros Associados*

## 2.5 Máquinas

A planta de produção para o processo de estampagem incremental é basicamente idêntica à do processo de usinagem CNC, com diferenças básicas em ferramentas e fixação da chapa a ser conformada. O processo de ISF pode utilizar as máquinas CNC dedicadas para usinagem, o software CAD e também o CAM.

Existem basicamente três tipos de máquinas para se trabalhar com SPIF: máquinas CNC convencionais para usinagem, robôs para soldagem adaptados e algumas poucas máquinas projetadas especificamente para trabalhar com esse processo.

O dispositivo de fixação chamado de prensa-chapa tem uma configuração padrão para o processo com pequenas variações e adaptação para atender uma gama grande de peças.

### 2.5.1 Máquinas específicas para estampagem incremental

A estampagem incremental, como uma tecnologia promissora, demonstrou o seu elevado potencial para conformar peças complexas tridimensionais, utilizando ferramentas não específicas. Ainda assim, alguns equipamentos específicos/próprios já tem sido empregados. A AMINO® DLNC-PC, máquina de formação incremental, é utilizada em muitos projetos da Universidade de Queensland, na Austrália. Trata-se de uma máquina CNC de 3 eixos com um espaço de trabalho máximo de 2100 × 1450 × 500 mm e que pode exercer forças máximas de 3,0 kN no eixo vertical

e 1,5 kN nos eixos X e Y. A velocidade de alimentação máxima do eixo X e Y é de 6000 mm / min e de 1000 mm / min no eixo Z (QUEENSLAND, 2017).

Em Portugal, na Universidade de Aveiro, foi desenvolvida uma máquina com 6 graus de liberdade específica para trabalhar com o processo de estampagem incremental, controlada em tempo real via Matlab, conforme observado na Figura 2.18 (FARIAS et al., 2013).

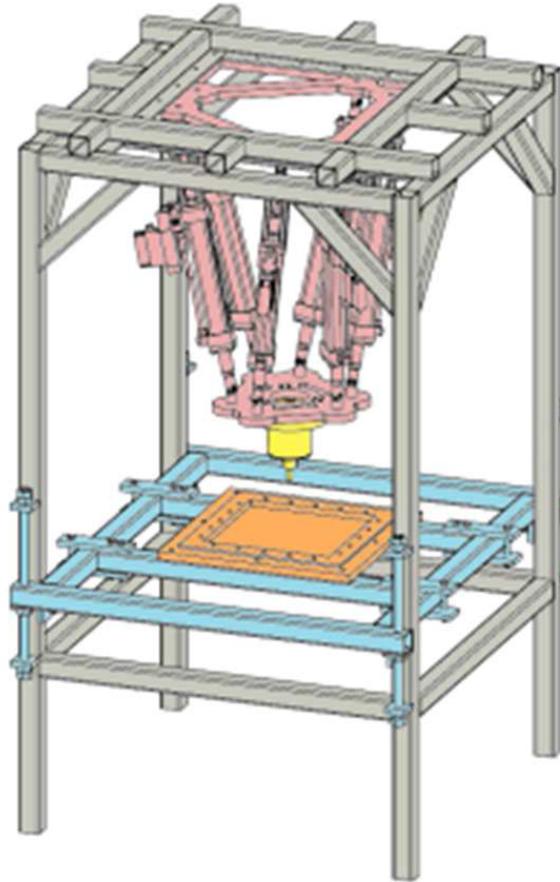


Figura 2.18: Máquina projetada para estampagem incremental da Universidade de Aveiro  
Fonte: (FARIAS et al., 2013)

## 2.5.2 Robô para conformação

Robôs industriais convencionais não têm a rigidez nem a precisão geralmente necessárias para as operações de conformação incremental (PUZIK, 2008), mas as novas máquinas paralelas podem ser projetadas de modo a demonstrar boas características para realizar esse tipo de operação.

Callegari et al. (2006a) utilizaram em seus experimentos o robô COMAU Tricept HP1, uma máquina com seis eixos e estrutura híbrida (um pulso de série é montado em cima de um ressalto paralelo), mostrado na Figura 2.19 (CALLEGARI et al., 2006a). Ele é capaz de aplicar um impulso máximo de 15 kN a uma área de trabalho de 2000 mm x 600 mm, com uma repetibilidade

melhor que 0,03 mm. As desvantagens da máquina encontram-se geralmente na grande anisotropia da sua área de trabalho, que é também caracterizada por uma forma complexa e uma destreza limitada, devendo, portanto, ser implementada uma ferramenta de simulação capaz de analisar posteriormente a cinemática da máquina e avaliar previamente a viabilidade de uma determinada tarefa.

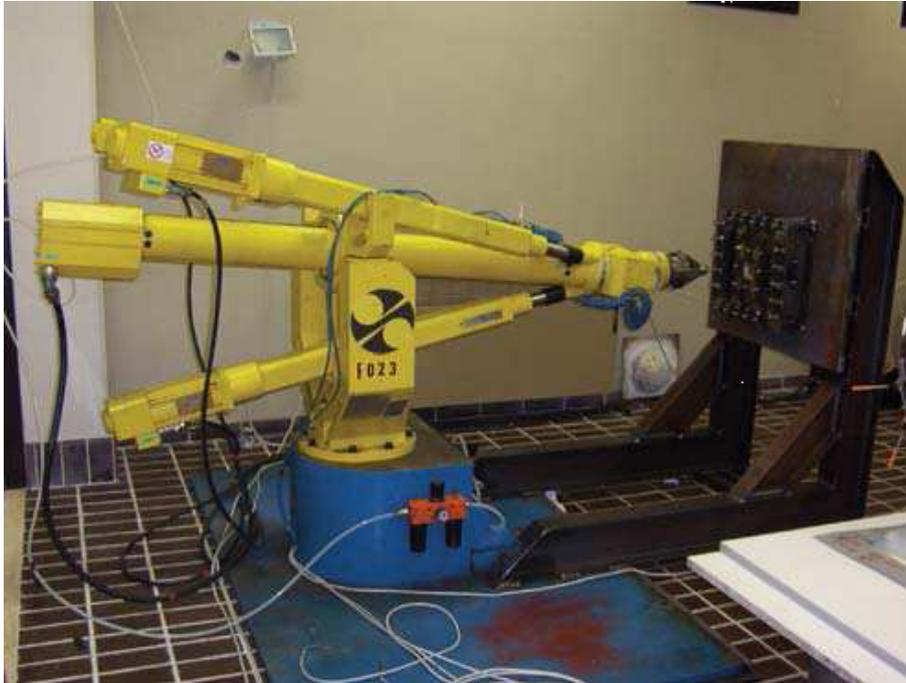


Figura 2.19: Parâmetro do O robô híbrido Tricept HP1  
Fonte: (CALLEGARI et al., 2006a)

No trabalho de Belchior et al. (2013) foi utilizado um robô industrial da série Fanuc S420iF para conformar peças por estampagem incremental. Comparando-se a utilização de um robô com a conformação realizada por máquinas CNC de três eixos, testes práticos mostram que a estrutura do robô é bem mais flexível, porém tem uma menor rigidez do que uma máquina de CNC, o que traz imperfeições à geometria da peça.

Meier et al. (2011) utilizaram dois robôs simultaneamente para realizar conformações de duplo ponto de apoio. A Figura 2.20 mostra a configuração da máquina, que é composta por dois robôs KUKA KR360 e um quadro com um suporte de estampagem. A forma final é produzida pelo movimento incremental para dentro da ferramenta de conformação na direção da profundidade e o seu movimento ao longo do contorno no sentido lateral. A ferramenta de apoio também possui uma geometria simples, segurando a chapa na parte de trás, movendo-se de forma síncrona ao longo do contorno externo, sempre no mesmo nível (duplo ponto incremental formado com suporte para periféricos - DPIF, Figura 2.20-B), ou diretamente em oposição à ferramenta de conformação (duplo parcial formado com o apoio local - DPIF - L). Desse modo, um intervalo predefinido entre as duas ferramentas hemisféricas está a ser gerado (c).

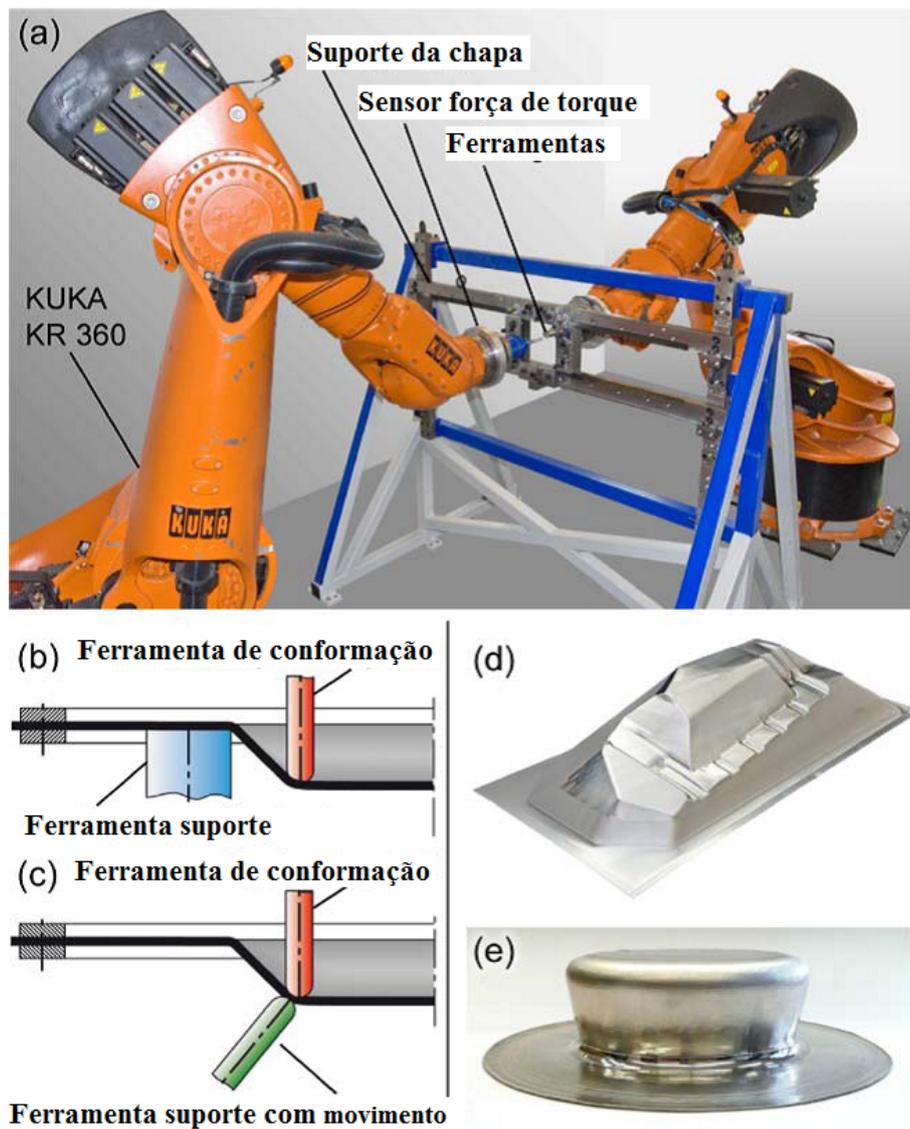


Figura 2.20: Parâmetro do (a) a configuração Robô , (b) duplo ponto incremental formado com suporte periférico (DPIF-P), (c) duplo ponto incremental formado com apoio local (DPIF-L), (d) complexo de peças automotivas e (e) cilindro com undercut (97° de ângulo de parede).

Fonte: (MEIER et al., 2011)

### 2.5.3 Máquinas CNC

Para aplicação geral do processo de estampagem incremental são utilizadas máquinas de comando CNC de três eixos, as quais conseguem produzir uma grande variedade de peças e, limitando-se o tamanho da mesa da máquina, são adequadas para realizar SPIF (Figura 2.21) outra máquina que pode ser Haas mini mill apresentada na Figura 2.22.

Altas velocidades, grande capacidade de volume de trabalho e rigidez suficiente são favoráveis ao processo. As Máquinas de Fresadoras estão disponíveis em diversos modelos, que diferem em volume de trabalho, taxa de alimentação máxima, carga máxima, rigidez e preços de custo.



Figura 2.21: Máquina CNC utilizada para SPIF ROMI D600

A máquina ROMI D600 utiliza na estrutura do eixo árvore um conjunto de dois rolamentos NSK 25TAC 62B e, segundo o catálogo da máquina, esse rolamento sustentado em duas carreiras tem um limite de carga axial de 81,5 kN, como pode ser observado na Figura 2.23 (NSK, 2017).

Uma das grandes preocupações no processo de estampagem incremental com máquinas CNC é o esforço causado na direção do eixo Z. Conforme estudo de Jackson, (JACKSON et al., 2008) em alumínio obtém-se uma força máxima no eixo Z de 3kN, força que oferece riscos para a máquina.

#### **2.5.4 Dispositivo de fixação**

Para a realização dos experimentos relacionados a esta pesquisa foram desenvolvidos dispositivos de fixação com características que permitissem a análise dos aspectos propostos: adição de calor, forças de conformação e desgaste de ferramenta.

O dispositivo de fixação da chapa, também conhecido como prensa-chapas, desempenha função extremamente importante, impedindo que a chapa a ser conformada deslize por entre as chapas de aperto. Existem vários modelos de presa-chapas, porém todos desempenham a mesma função e são similares em sua concepção.

O projeto do dispositivo prensa-chapas foi idealizado de acordo por Duflou et al. (2005), com ajuste e fixação da chapa realizados de forma manual, por meio de parafusos, conforme pode ser



Figura 2.22: Máquina CNC utilizada para SPIF Haas mini mill

observado na Figura 2.24.

A desvantagem desse dispositivo é o tempo necessário para a troca das chapas, pois o aperto se dá por meio de parafusos M12. Ainda que se utilize parafusadeira, leva-se muito tempo para a preparação de um novo processo.

A fixação da chapa no dispositivo é responsável pelo maior tempo do setup do processo de estampagem incremental, a redução desse tempo, conseqüentemente, diminui o custo de manufatura de peças. Para reduzir o tempo e melhorar a utilização do dispositivo de fixação, foi desenvolvida uma prensa de placas, que permite uma variação do encaixe de acordo com o tamanho da peça a ser conformada.

Um estudo levou ao desenvolvimento de um dispositivo com tamanho ajustável. A Figura 2.25 (esquerda) apresenta a montagem de um dispositivo em seu tamanho máximo de fixação (440 x 440 mm). A Figura 2.25 (direita) apresenta a montagem do dispositivo no seu menor tamanho possível para fixação de uma chapa (80 x 80 mm).

O dispositivo ajustável possui fixação e movimentação com rasgos com o perfil "T" e para uma rápida fixação da chapa são utilizados grampos de fixação, como pode ser observado na Figura 2.26.

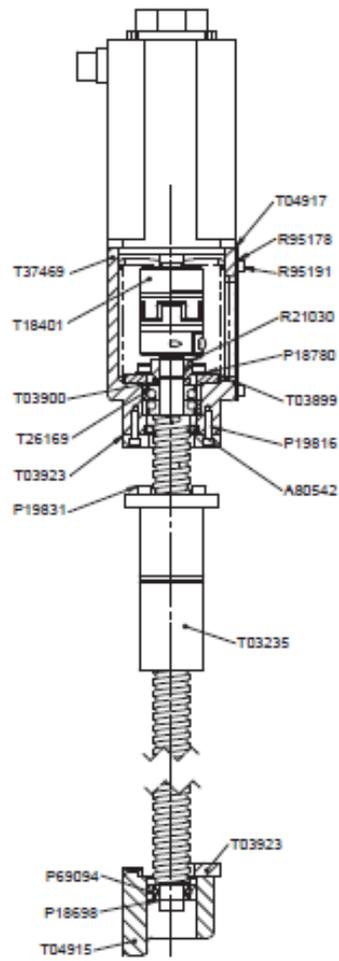


Figura 2.23: Eixo Z máquina ROMI D600

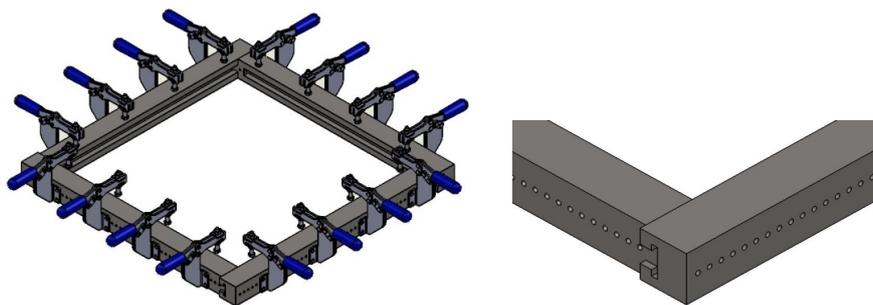


Figura 2.26: Detalhes do dispositivo de fixação ajustável

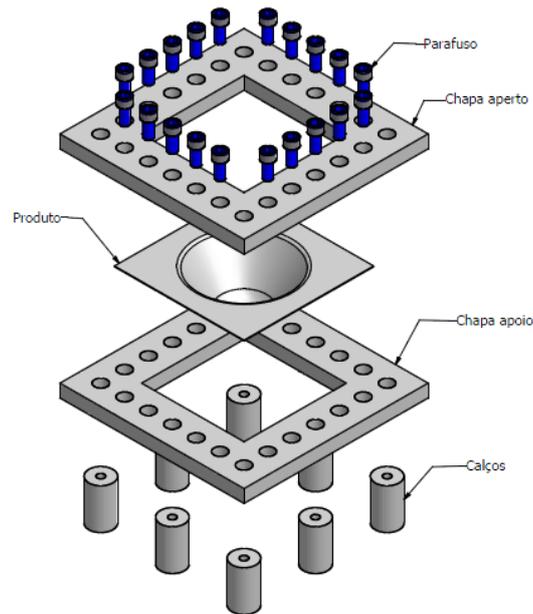


Figura 2.24: Conceito inicial do dispositivo prensa-chapas  
 Fonte: (SILVA et al., 2008)

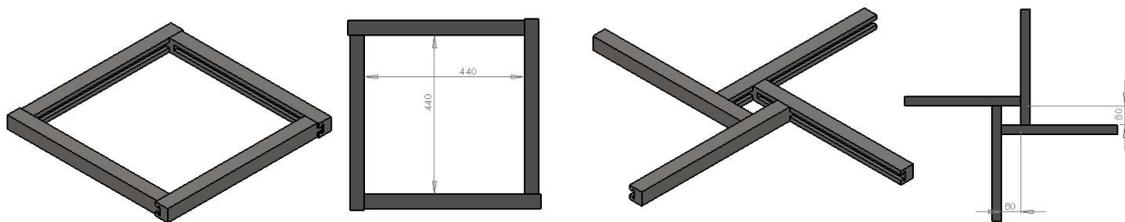


Figura 2.25: Dispositivo de fixação ajustável.

## 2.6 Múltiplos passes

Vários estudos que buscam a melhoria do processo de estampagem incremental têm sido realizados, surgindo, a partir deles, variações na forma de conformação, visando o aperfeiçoamento da qualidade final peça, a redução do tempo de processamento e uma maior aplicação do processo na indústria. Entre esses estudos, pode-se mencionar as pesquisas com aquecimento, com múltiplos passes e o desenvolvimento de uma programação específica para ISF.

Ponto Único Incremental de Conformação (SPIF) é um processo de conformação sem matriz flexível. No entanto, o SPIF convencional tem limitações no que diz respeito ao ângulo máximo de parede que pode ser conformado, à espessura máxima da chapa, às propriedades mecânicas da chapa, à precisão geométrica e ao acabamento superficial (HIRT et al., 2004). Algumas tentativas para aumentar a maleabilidade do processo incremental de conformação usando vários passes foram realizadas (HIRT et al., 2004). Uma das primeiras pesquisas nesse sentido, (GÖTTMANN

et al., 2011), foi empreendida utilizando-se dois pontos conformação: a ferramenta e um ponto de apoio sobre a chapa. Para aumentar o ângulo de parede, (HIRT et al., 2004) empregaram de 7 a 12 passes de conformação, chegando a conformar com um ângulo de parede de 81 graus. O processo inicia-se com um ângulo de 45 graus e, gradativamente, vai-se incrementando de 3 a 5 graus por passes.

Duflou et al. (2008) redistribuíram o material normalmente não deformado da região horizontal da placa, geralmente no fundo na área plana, para formar paredes verticais sem falha, com percurso da ferramenta sempre se movimentando a partir da periferia para o centro da chapa. Na Figura 3.7 à esquerda, pode-se observar os perfis de espessura da estampagem incremental de etapa única (linha vermelha), de multi-passo (linha preta) e o perfil da peça (tracejado em azul), ambos os cones são plotados em função da profundidade. A espessura da lei de senos para um cone de  $70^\circ$  é representada na linha verde. Como pode ser visto, a espessura da parede do cone de multi-passo é significativamente maior do que a espessura obtida com o percurso da ferramenta de etapa única. No entanto, a espessura da parte inferior resultante do processo de multi-passo é menor do que a observada na parte inferior decorrente de um único passo. Isso pode ser percebido mais claramente na Figura 2.27 à direita. A utilização da abordagem de múltiplos passos conduziu claramente a um deslocamento de material a partir do fundo, que de outra forma teria permanecido não transformado com a parede da peça. O efeito colateral é que a parte inferior da peça deixa de ser plana, apresentando-se ligeiramente curvada e mais profunda do que o programado no modelo de CAD (Figura 2.27, à esquerda) (DUFLOU et al., 2008).

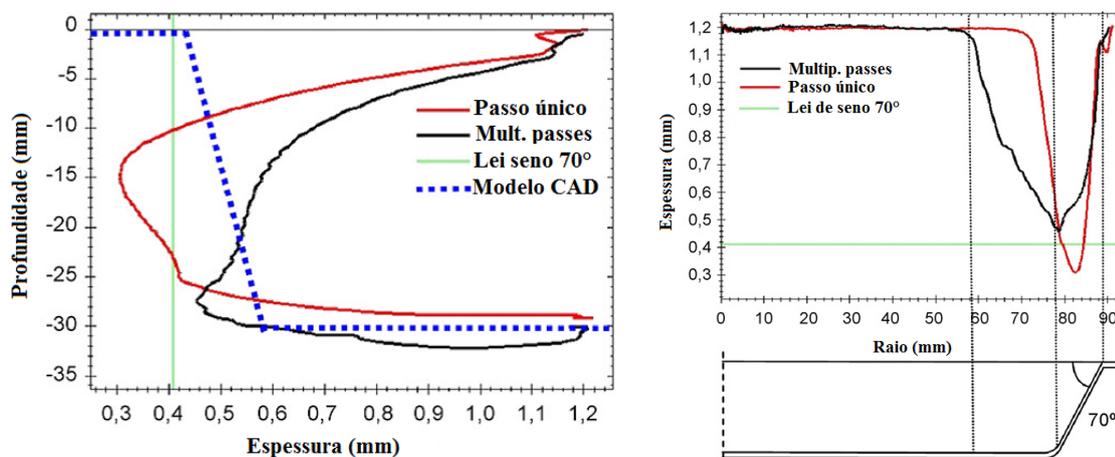


Figura 2.27: Relação entre a profundidade e a espessura da chapa(figura da esquerda). Comparação geometria espessura (figura da direita).

Fonte: (DUFLOU et al., 2008)

Duflou et al. (2005) propõem re-conformar o componente depois de conformá-lo uma vez, com base em desvios geométricos medidos. Verbert, (VERBERT et al., 2007), propõem um componente diferente de processamento, apresentado separadamente, para gerar o percurso da ferramenta.

Allwood et al. (2009), propõem uma estratégia de controle de circuito fechado utilizando respostas espaciais de impulso para controlar a precisão do produto em SPIF. Para tanto, adaptaram uma curva de distribuição de Weibull para impulsionar as respostas a partir de um conjunto de experiências para um cone, formando-se, em seguida, cones semelhantes com 0,2 mm de precisão.

## 2.7 Geração de caminho de ferramenta para ISF

Nos processos de ISF o caminho da ferramenta tem muita importância para a conformação da peça. Tendo em vista que as diferentes opções de escolha desse caminho podem definir o sucesso da conformação de uma peça, alguns estudos procuram entender melhor essa relação entre caminho da ferramenta e conformação da peça.

Estudos recentes apresentam modificações no caminho da ferramenta para melhorar a conformabilidade de peças complexas e reduzir marcas de entrada e saída da ferramenta. Um desses estudos é o de Lu et al. (2013), que divide a peça de modo a conformar as áreas mais complexas de forma especial. O recurso aumenta um pouco o tempo de processamento, mas, por outro lado, aumenta muito a qualidade final da peça.

A Figura 2.28a apresenta um caminho de ferramenta no qual a peça está dividida em duas partes: o fundo, que possui uma complexidade maior, e as laterais ou corpo da peça, com uma geometria mais simples. A Figura 2.28b mostra como seria um caminho de ferramenta padrão.

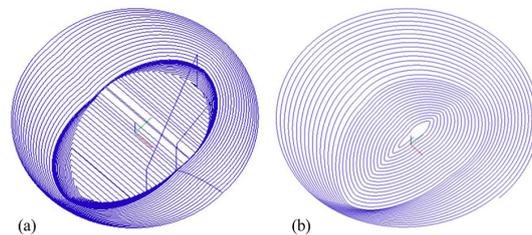


Figura 2.28: Caminhos de ferramenta (a) caminho em partes e (b) caminho padrão.

Fonte: (LU et al., 2013)

O desenvolvimento de um algoritmo capaz de dividir as peças em regiões conforme a complexidade e realizar uma programação para cada região, permitindo a obtenção de peças com uma tolerância dimensional de  $\pm 0.5\text{mm}$ , foi objeto do estudo de Behara, (BEHERA et al., 2014). A Figura 2.29 mostra uma peça e as suas divisões para o posterior cálculo do caminho da ferramenta: a Figura 2.29a apresenta as diferentes divisões da peça, a Figura 2.29b esboça a peça simétrica e a Figura 2.29c apresenta o gráfico dos tipos de divisões realizadas.

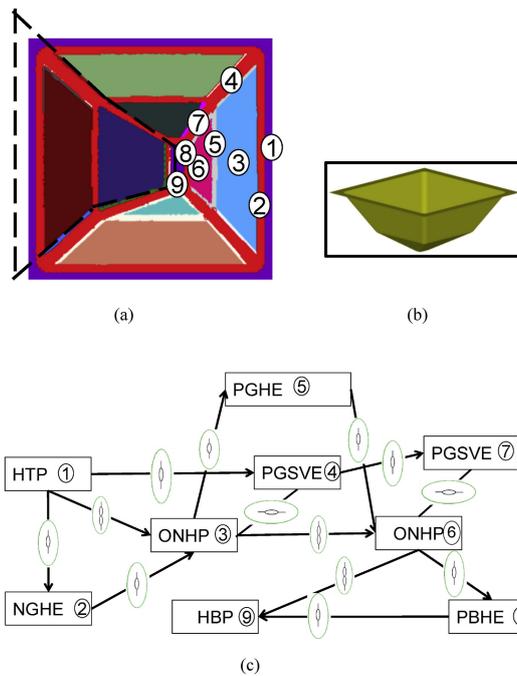


Figura 2.29: Divisão conceitual em regiões de conformação: (a) Características da pirâmide (b) Vista isométrica da pirâmide (c) Gráfico (abreviaturas - PGSVR: Dominado Positivo Geral Semi-Vertical, NGHE: Negativo Geral Horizontal edge, ON HP: Ordinary Non-Horizontal Planar, PGCE: General positivo Semi-Vertical edge, PBHE: Positivo borda Horizontal Bottom, HBP: inferior Horizontal Planar).

Fonte: (BEHERA et al., 2014)

## 2.8 Lubrificação do processo de estampagem incremental

Na estampagem incremental, a lubrificação da superfície da peça é um ponto muito importante, pois diminui significativamente a fricção entre a ferramenta e a chapa, absorvendo o calor causado pela deformação. A quantidade de lubrificante a ser usado dependerá da espessura da chapa e do material em questão, (CAVALER, 2010). A lubrificação do processo pode na conformabilidade do processo, (LOPES et al., 2013).

Os lubrificantes utilizados em ISF têm como função, (DALEFFE, 2008):

- Redução do atrito entre a ferramenta e chapa a conformar;
- Absorção do calor causado pela deformação da chapa na zona de contacto;
- Redução do desgaste da ferramenta de estampagem;
- Melhoria do acabamento superficial da peça;
- Minimização da força de trabalho exercida pela ferramenta.

A existência ou não de lubrificação e qual o tipo de lubrificante utilizado produzem alterações na temperatura da chapa e da ferramenta, na rugosidade superficial da chapa e no desgaste da ferramenta, (KOPAC; KAMPUS, 2005a).

A lubrificação é de suma importância no processo de conformação podendo modificar a rugosidade de peça de acordo com a lubrificante utilizado ou mesmo conseguir obter um conformação com maior profundidade. Sornsuwit e Sittisakuljaroen (2014), realizaram uma pesquisa variando a lubrificação e o material assim obtendo resultados de conformação diferente para os materiais.

A chapa de aço inoxidável SUS 304 conseguiu se conformada em uma profundidade de 15 mm e sem ruptura usando  $M_oS_2$  e sopro de ar como lubrificante, a melhor rugosidade superficial foi alcançada em  $Ra\ 0,35\ \mu m$  por sopro de ar. A chapa de aço inoxidável SUS 316L foi conformada com uma profundidade de 15 mm sem lubrificante,  $M_oS_2$  e sopro de ar sem ruptura, com uma rugosidade superficial em  $Ra\ 0,5\ \mu m$  com lubrificante a ar. No entanto, a chapa de titânio Ti Gr2 foi conformada com no máximo 13 mm de profundidade utilizando  $M_oS_2$  sem ruptura, enquanto a rugosidade da superfície era  $Ra\ 1,12\ \mu m$ . Portanto, o  $M_oS_2$  era adequado para a chapa de titânio, bem como a chapa de aço inoxidável pode ser conformada adequadamente pelo lubrificante de ar, (SORNSUWIT; SITTISAKULJAROEN, 2014).

A figura 2.30 apresenta as características das peças conformadas mantendo o lubrificante e trocando a chapa de conformação, afirmando assim que cada material tem uma lubrificante mais adequado para ser utilizado durante a conformação.

A maioria das pesquisas não variam o tipo de lubrificação, deixa a variável lubrificação fixada assim reduzindo uma variável do processo para conseguir observar o comportamento das outras variáveis, (JIMÉNEZ et al., 2017).

## **2.9 Desgaste de ferramenta associada ao processo**

O processo de conformação por estampagem incremental ocorre pelo contato contínuo da ferramenta de conformação com a chapa a ser conformada, desse modo o atrito é constante no processo, gerando assim um desgaste na ferramenta.

O desgaste da ferramenta pode ser acentuado por muito motivos, sobretudo pelo aumento de parâmetros de conformação para se reduzir o tempo de conformação, sendo os principais desses parâmetros a velocidade de avanço, o passo de incremento em Z e a rotação.

### **2.9.1 Mecanismos de desgaste**

Pode ocorrer um desgaste excessivo quando o processo de conformação utiliza altas rotações para gerar aquecimento na peça, a fricção da ferramenta com a chapa produz calor para facilitar

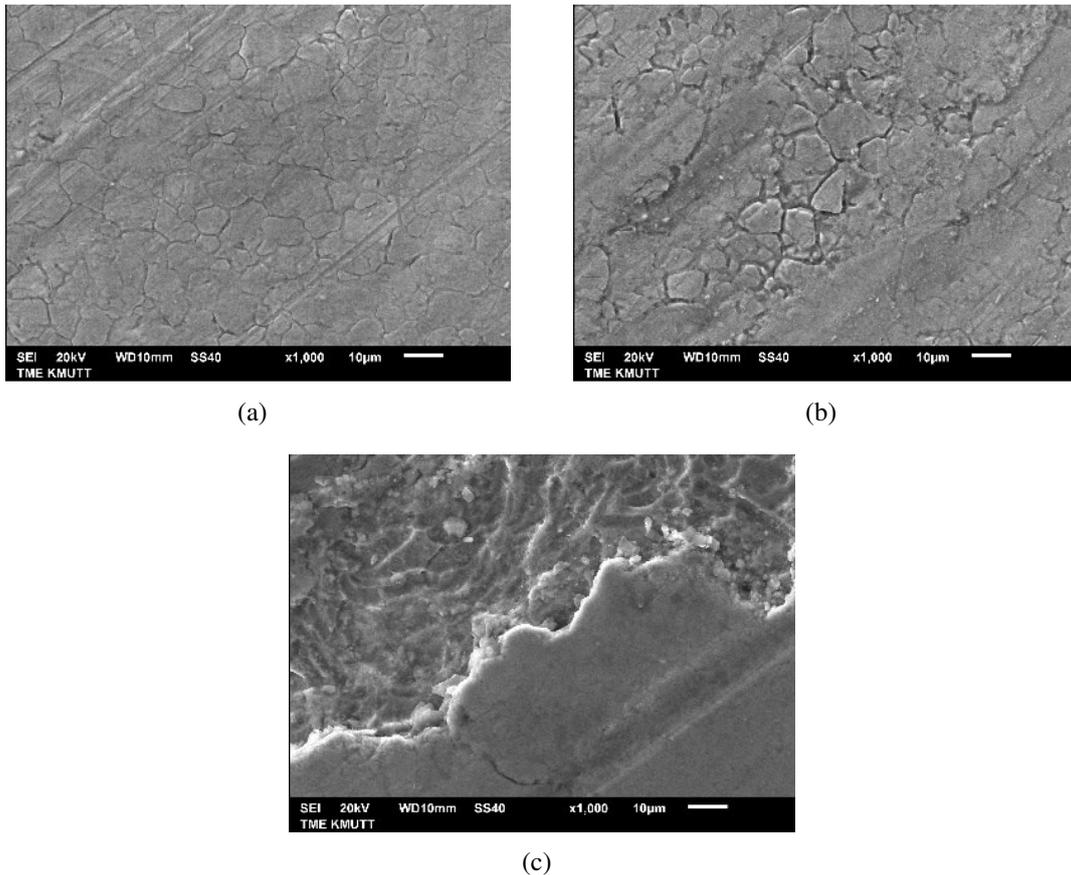


Figura 2.30: A superfície dos materiais quando conformada utilizando  $MoS_2$  como um lubrificante, x1000 ampliado. (a) SUS 304, (b) SUS 316L e (c)  $TiGr_2$ .

Fonte: (SORNSUWIT; SITTISAKULJAROEN, 2014)

a conformação, mas também gera um desgaste grande pelo atrito.

Para compreender os mecanismos de desgaste, as partículas de detritos foram coletadas após cada teste. Estas partículas de detritos foram separadas dos óleos vegetais reforçados pelo método de filtração sob vácuo usando frasco Büchner e filtros de 0,45 mm. Pode se ter uma confirmação através de imagens SEM-EDS (*Scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray SEM-EDS*), o desprendimento de alguns traços de alumínio compostos por nanopartículas  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  que ocorrem durante o processo SPIF das amostras de chapa metálica. Além disso, a figura 2.31 vestígios de adesão de alumínio na ponta ferramenta / punção. Esta imagem confirma que o mecanismo de desgaste adesivo era predominante durante o processo SPIF, (DIABB et al., 2017). Sabe-se que a aderência domina o desgaste deslizando para as ligas de alumínio convencionais, (QU et al., 2011).

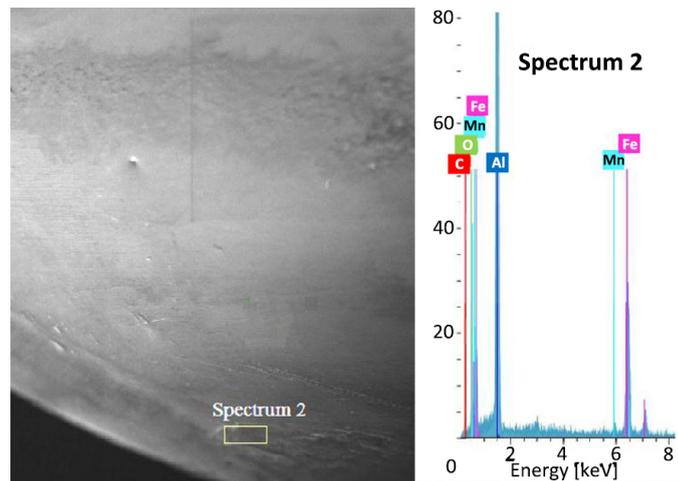


Figura 2.31: Aderência de partículas de alumínio na ponta ferramenta  
 Fonte: (DIABB et al., 2017)

Diabb et al. (2017) mostra que o mecanismo de desgaste adesivo é predominante durante o processo SPIF. Este mecanismo adesivo ocorre quando as partículas não são limitadas e deslizam ficando entre a ferramenta e chapa a ser conformada.

Quando se incrementa a temperatura do processo de SPIF com o aumento da rotação da ferramenta, esta rotação excessiva aumenta a temperatura localmente, uma vez que a temperatura ultrapassa, até certo ponto que depende dos materiais envolvidos no processo, o desgaste iniciará resultando em danos na chapa e na ferramenta de conformação, (GUPTA; JESWIET, 2017) .

O mecanismo de desgaste adesivo e abrasivo também afetam diretamente o acabamento da ponta da ferramenta, onde o desgaste da ferramenta vai estar associado a dureza que a ponta de ferramenta, utilizando duas ferramentas uma de aço Cr12MoV e outra ferramenta de HSS, utilizando os mesmos parâmetros de conformação, pode-se observar na figura 2.32 que o desgaste eh mais acentuado na ferramenta de aço Cr12MoV, (HUSSAIN et al., 2008a).

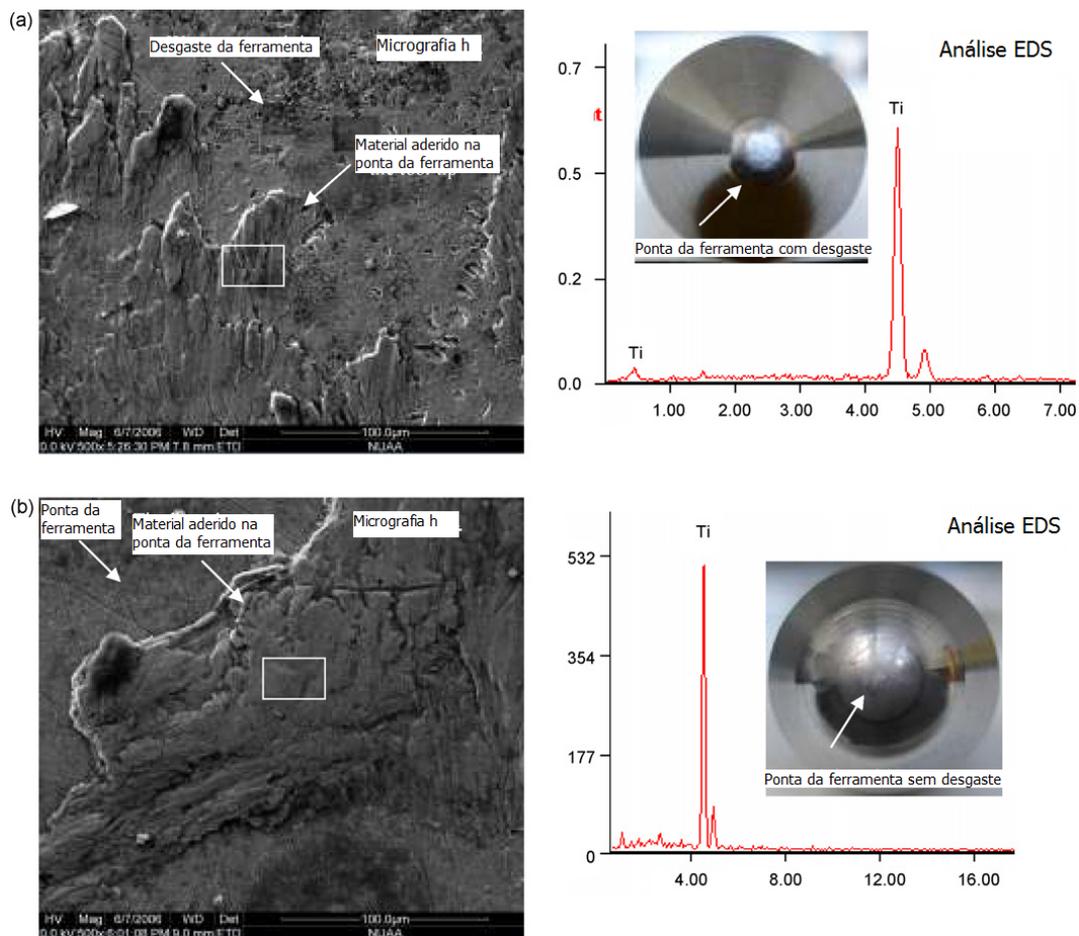


Figura 2.32: Espectroscopia de dispersão de energia (EDS) da ponta da ferramenta (500 ×): (a) Ferramenta de aço Cr12MoV e (b) Ferramenta HSS.

Fonte: (HUSSAIN et al., 2008a)

## 2.10 Modelo de forças do processo SPIF

Alguns estudos tentam descrever o comportamento da força através de outros meios, tais como: geometria da peça, avanço, rotação, área de contato da ferramenta dentre outros, podemos citar como exemplo um estudo realizado por, Petek et al, (PETEK et al., 2009).

Durante o processo de conformação a ferramenta permanece em contínuo contato com a chapa que está sendo conformada, os elementos básicos da conformação são ilustrados na figura 2.33, onde  $F$  é a força de conformação da chapa,  $\nu$  é o avanço da ferramenta e  $\omega$  é representada a rotação da ferramenta. A ferramenta de conformação cujo movimento é normalmente descrito em termos de coordenadas cartesianas, com o movimento da ferramenta no plano horizontal da chapa como o eixo X, eixo Y e o eixo Z vertical sendo a direção na qual ocorre as deformações.

Durante a formação, são executados caminhos de ferramentas circulares que produzem um

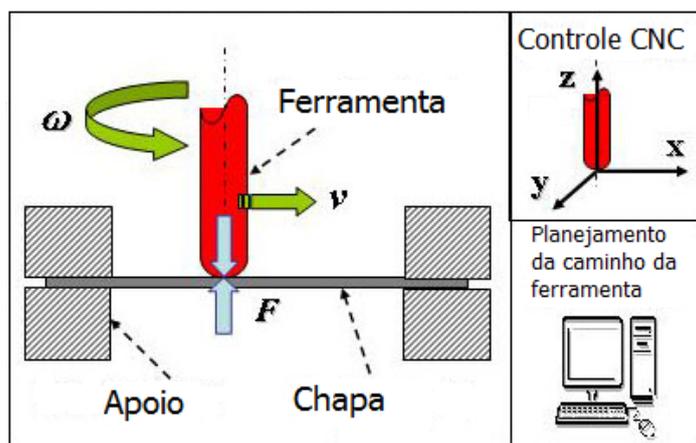


Figura 2.33: Elementos básicos do processo de estampagem incremental

Fonte:(JESWIET et al., 2005)

sinal estável para  $F_z$  e dois sinais sinusoidais para  $F_x$  e  $F_y$ . Estes são os dois componentes da força no plano  $F_{xy}$ , que é resultante dos componentes tangenciais e radiais  $F_t$  e  $F_r$ . Para obter esses dois componentes, o seguinte procedimento foi utilizado.

Durante a conformação, são executados caminhos de ferramentas circulares que produzem um sinal estável para  $F_z$  e dois sinais sinodais para  $F_x$  e  $F_y$ . Estes são os dois sinais sinodais componentes da força no plano  $F_{xy}$ , que é resultante dos componentes tangenciais e radiais  $F_t$  e  $F_r$ , conforme figura 2.34. Para obter esses dois componentes, o seguinte procedimento foi utilizado, (AERENS et al., 2010).

A força no plano  $F_{xy}$  e o ângulo  $\psi$  entre  $F_x$  e  $F_y$  são calculados usando as fórmulas elementares 2.2 e 2.3.

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (2.2)$$

$$\psi = \arctan(F_y/F_x) \quad (2.3)$$

Como a velocidade da ferramenta é constante, o ângulo  $\theta$  pode ser calculado pela equação 2.4, onde  $t$  é o tempo passou entre o incremento de profundidade e a posição atual da ferramenta e  $T$  é o tempo para executar um contorno o tempo entre dois incrementos de profundidade consecutivos.

$$\theta = (t/T)2\pi \quad (2.4)$$

A figura 2.35(a) mostra as forças que interação da ferramenta de conformação com a chapa a ser conformada. A força de força 'Fa' e a força vertical 'Fv' se apresentam como as forças básicas do sistema de conformação onde a Fa se mostra como as forças geradas com o avanço em

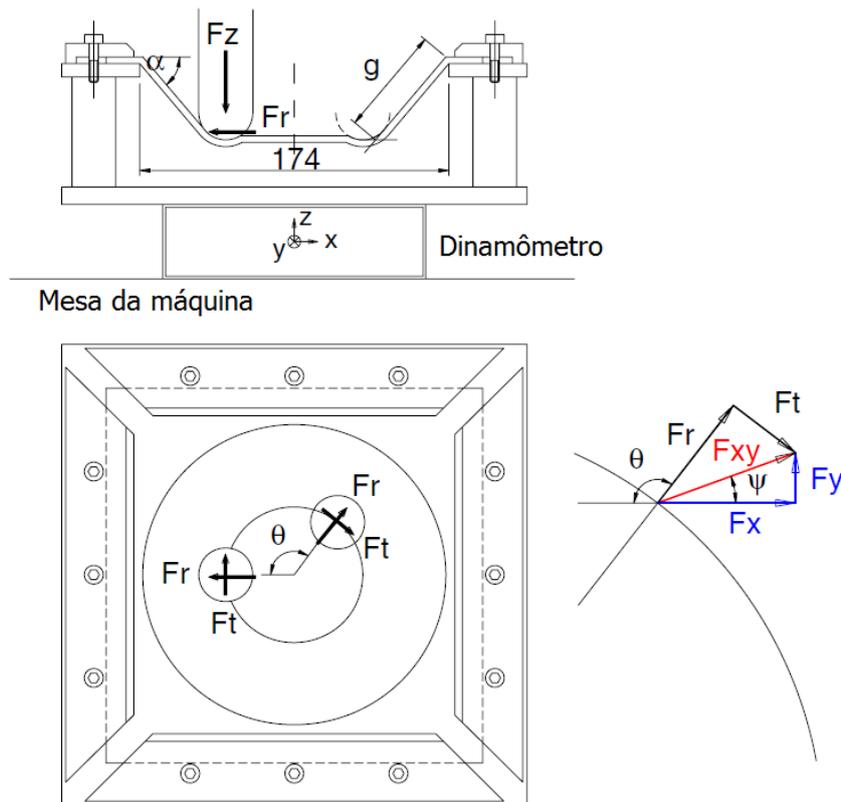


Figura 2.34: Esboço da plataforma montado no dinamômetro e a relação entre  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_t$ ,  $F_r$   
 Fonte: (AERENS et al., 2010)

$F_x$  e  $F_y$  representam as forças de conformação no sentido de penetração da ferramenta. A figura 2.35(b) apresenta as forças XYZ no sentido na qual elas são mensuradas pelo dispositivo durante a conformação (DIABB et al., 2017).

Um estudo realizado por Li et al. (2014c) e Li et al. (2014b), apresenta e descreve todos os experimentos práticos para a obtenção das forças do processo e em seguida realiza uma correlação da força entre o ângulo de parede e o  $A_p$ , gerando uma análise e uma formulação matemática para prever a força em Z e em Y quando se variar os dados de entrada supracitados. Ainda nesta linha de pesquisa Liu et al. (2013), estudou as forças de conformação modificando o material para AA7075-O e realizou a análise de orientação da chapa a ser conformada em relação à direção de laminação da chapa, obtendo resultados que mostram que a direção de laminação influencia nas forças de conformação.

Para o cálculo da força de conformação temos basicamente 5 autores que desenvolveram equações matemáticas para estimar a força de conformação do processo SPIF no eixo Z, Aerens et al. (2010), León et al. (2013), Bagudanch et al. (2013), Adams e Jeswiet (2015) e Bansal et al. (2017).

Aerens et al. (2010), desenvolveu a equação 2.5 para a predição da força em Z tendo como

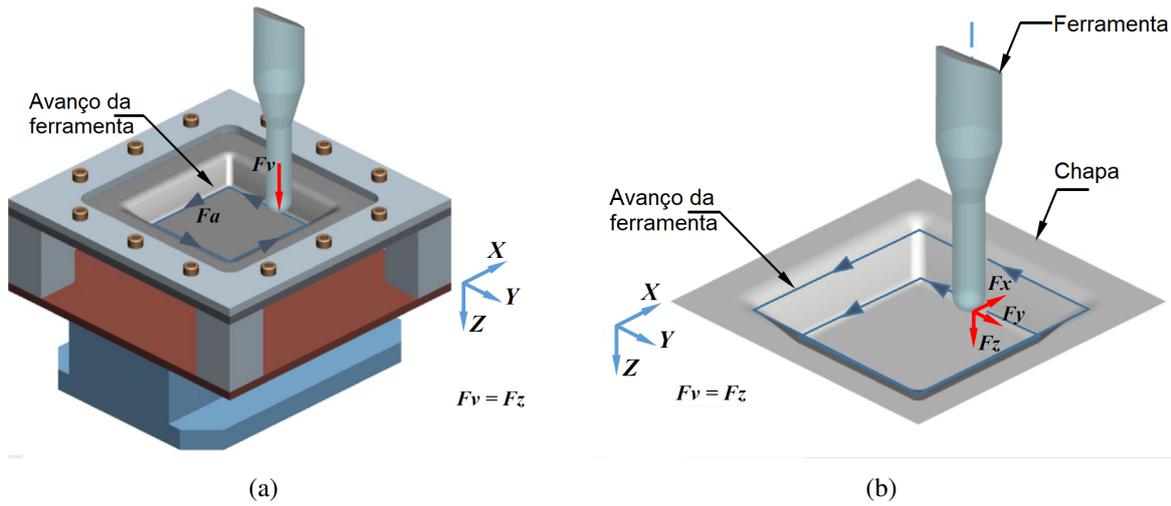


Figura 2.35: Forças de atuação durante o processo SPIF. (a) Direções de força  $F_a$  e  $F_v$  durante SPIF, (b) SPIF durante a conformação

Fonte:(DIABB et al., 2017)

variável dependente  $F_s$  que é a força em Z, dada em Newton, com as variáveis dependentes  $R_m$  é o valor de resistência à tração, dada em  $(N/mm^2)$ ,  $t$  é espessura da chapa utilizada dada em milímetros,  $d_t$  que é o diâmetro da ferramenta, dada em milímetros,  $\Delta h$  é altura do *scallop* que está relacionada ao incremento de profundidade  $\Delta h$  tendo em conta o diâmetro da ferramenta e o ângulo da parede e é calculado como a equação 2.6 e  $\alpha$  é o valor do ângulo de parede interna.

$$F_s = 0.0716 * R_m t^{1.57} d_t^{0.41} \Delta h^{0.09} \alpha \cos \alpha \quad (2.5)$$

Onde o  $\Delta h$  é:

$$\Delta h = 2 \sin \alpha \sqrt{\Delta h (d_t - \Delta h)} \quad (2.6)$$

León et al. (2013), desenvolveu a equação 2.7 para estimar a força no processo de estampagem incremental tendo como variável dependente Max.Force que é dada em Newton, as variáveis dependentes são:  $S_t$ , que é o percurso espiral esférico do início do centro da ferramenta até a profundidade máxima, como pode ser visto na figura 2.36,  $P_r$  que é o raio da ferramenta de conformação dado em milímetros,  $Fric$  é o coeficiente de atrito que pode variar, que neste caso variou de 0.01 a 0.4 e  $Thick$  é a espessura da chapa que é dada em milímetros.

$$\begin{aligned} Max.Force = & 362.131 + 397.5 * S_t - 179.377 * P_r - 480.227 * Fric + 7881.38 * Thick - 24.9375 \\ & * S_t * P_r - 426.562 * S_t * Fric - 429.062 * S_t * Thick + 14.6737 P_r^2 + 133.125 \\ & * P_r * Fric + 354.125 * P_r * Thick + 9171.05 * Fric^2 + 991.842 * Thick^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Adams e Jeswiet (2015), apresenta uma equação 2.8 para estimar a força do processo de

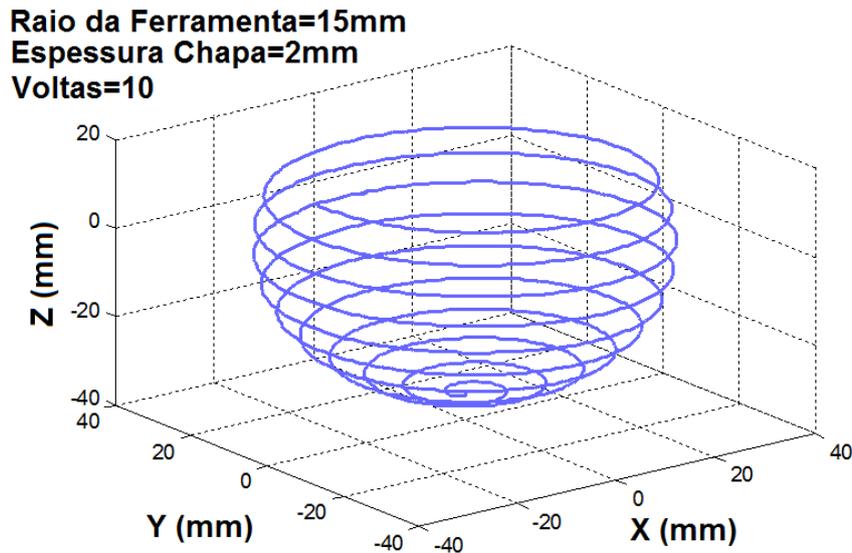


Figura 2.36: Caminho espiral esférico de nó à nó do centro da ferramenta no caso de 10 voltas, com uma ferramenta de 15 mm de raio e 2 mm de espessura da chapa

Fonte: (LEÓN et al., 2013)

estampagem incremental tendo como variável dependente  $Z^I$  que expressa a força no eixo Z em Newton e como variáveis dependentes  $dt$ , que representa o diâmetro da ferramenta em milímetros,  $\varphi$  que representa o ângulo de parede da peça a ser conformada e  $\nu$  que é o passo em Z, que é o mesmo que  $Ap$ .

$$Z^I = -0.03177dt - 0.01339\varphi + 0.8499\nu + 1.16954 \quad (2.8)$$

Bansal et al. (2017), baseou-se na equação 2.5 e modificou o cálculo do  $\Delta h$ , assim apresentado a equação 2.9 com um novo modelo de equação para  $\Delta h$ , como é apresentado na equação 2.10.

$$F_s = 0.0716\sigma t_0^{1.57} d_t^{0.41} \Delta h^{0.09} \alpha \text{Cos} \alpha \quad (2.9)$$

A equação de  $\Delta h$  utilizada para o novo cálculo é apresentada na equação 2.10.

$$\Delta h = \Delta Z^2 / 4d \sin^2 \alpha \quad (2.10)$$

A concepção da função matemática para encontrar um modelo teórico experimental de força de processamento foi realizado por Valle (2016), por meio da análise de regressão, que melhor representa o modelo teórico da força atuante nesse fenômeno, ou seja, o equacionamento proposto neste trabalho permite, em especial, estimar as cargas máximas presentes na deformação da peça,  $F_z$  pico e  $FR$ , nas direções X, Y e Z, a partir dos principais fatores. Os quais: diâmetro da ferramenta  $dt$  (mm); ângulo de inclinação da parede  $\alpha$  ( $^\circ$ ); espessura da chapa metálica  $t$  (mm);

incremento vertical  $z$  (mm); e avanço do punção  $f$  (mm/min). A ferramenta foi de metal-duro K40, revestida por carbonitreto de titânio alumínio (AlTiCN), e a chapa de aço comercial ASTM A653 CS-A G90. Esta formulação matemática pode ser vista na equação 2.11.

$$F_{z_{pico}P7} = -150 + 117dt + 20,1\alpha + 2105t + 583dz - 137dt*t - 1dt*dz - 38,9\alpha*t - 22,1\alpha*dz - 398t*dz \quad (2.11)$$

## 2.11 Modelo de Área de contato Peça-Ferramenta

Quando se fala sobre força no processo de estampagem incremental fica impossível não pensar na área de contato da ferramenta com a chapa e tentar entender qual a relação entre o tamanho da ferramenta, o  $A_p$ , a região de contato da ferramenta com a chapa e o que isto pode influenciar na força final do processo de conformação.

Para entender esta área buscou-se na bibliografia existente pesquisas sobre a área de contato peça-ferramenta e como ela influencia no processo de conformação.

Jeswiet et al. (2005), adaptou modelos matemáticos similares para encontrar um modelo de área de contato da ferramenta para o processo de estampagem incremental, a equação 2.12 foi gerada neste estudo. A figura 2.37 apresenta um esquema básico do procedimento utilizado para encontrar um equacionamento ideal para o contato da ferramenta e chapa. Onde  $D_{max}$  representa o dobro do diâmetro de contato ferramenta-chapa e  $\theta$  é o ângulo de inclinação de parede da peça, conforme figura 2.38 (esquerda).

$$d_{max} = \sqrt{2(1 - \cos(2\theta))} \quad (2.12)$$

Hamilton (2010), partindo da equação 2.12 aprofundou os estudos e criou uma nova definição de área de contato, apresentado na figura 2.38 (direita), assim desenvolvendo um novo modelo matemático, apresentado na equação 2.13

$$SA = (\pi * r^2(-\cos(H) + 1) * (1 - A)) + ((\theta + \lambda) * r * g) \quad (2.13)$$

Os componentes da força (espessura  $F_t$ ,  $F$  meridional e  $F_u$  circunferencial) são estimados estimando a área de contato entre a ferramenta e a chapa em qualquer instante. A área de contato foi aproximada de um retângulo (como mostrado na Figura 2.39 (a) com comprimento  $l$  e largura  $w$ ) com base na distribuição de pressão de contato observada durante FEA. A área do contato é assumida como metade da área de contato. O comprimento deste retângulo é igual ao comprimento de contato ( $d_{ABC}$  na Figura 2.39 (b)) na direção meridional.  $l = R_t(\alpha + \beta)$  onde  $\alpha$  é o ângulo da parede e  $\beta = \cos^{-1}(1 - \Delta z / R_t)$  é o sulco ângulo e  $R_t$  é o raio da ferramenta (veja Figura 2.39 (b)). (ASGHAR et al., 2014).

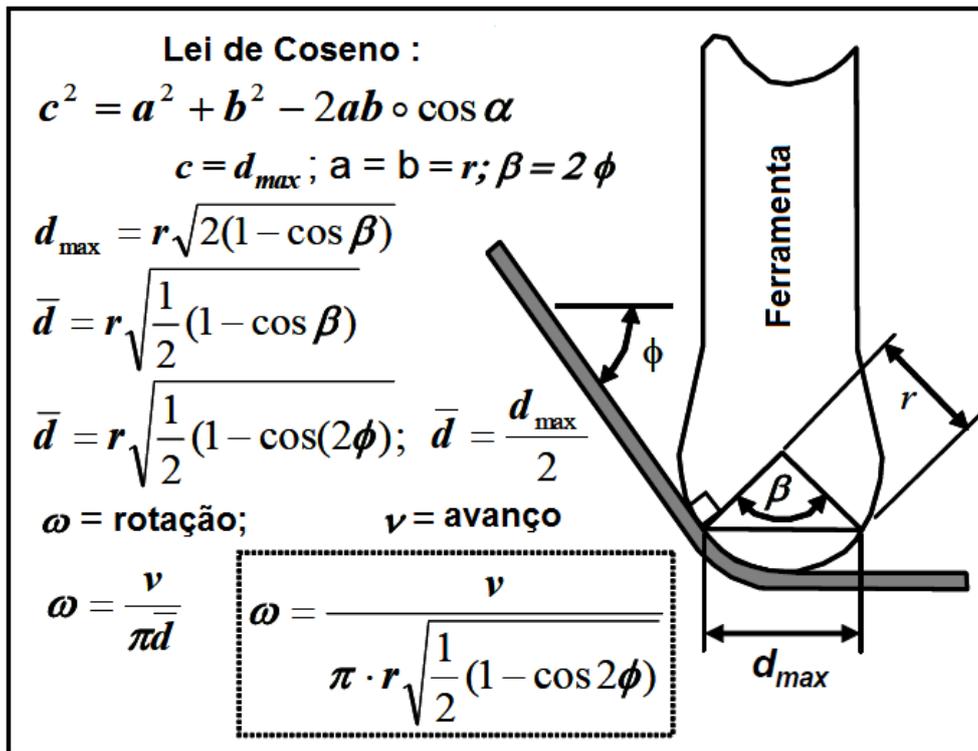


Figura 2.37: Geometria de contato da ferramenta chapa.(JESWIET et al., 2005)

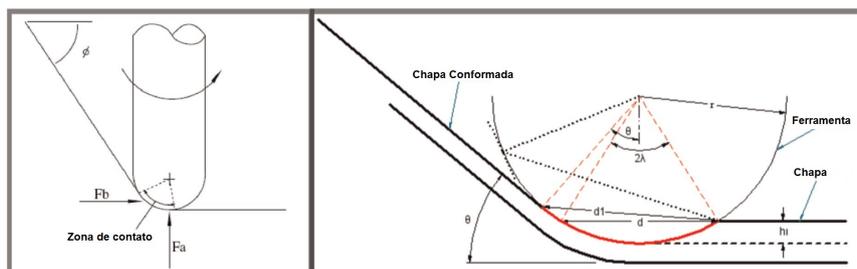


Figura 2.38: Modelos de contato desenvolvidos por Szekeres (esquerda) e Hamilton (direita) (BRANKER, 2011)

O desgaste significativo da ponta da ferramenta também pode contribuir para a criação de arranhões na superfície da chapa que esta sendo conformada. Por outro lado, uma estratégia de caminho de ferramenta se mantendo em uma hélice gradual ao longo da direção vertical (direção da profundidade), pode reduzir o desgaste prematuro, (SURESH K.AND KHAN; REGALLA, 2013).

Uma das mais importante qualidade da ferramenta é ter alta dureza e resistência ao desgaste para obter um bom acabamento superficial que a peça final necessita. Portanto, a ferramenta de conformação deve ter um bom tratamento térmico para melhorar a qualidade exigida, (SURIYA-PRAKAN, 2013).

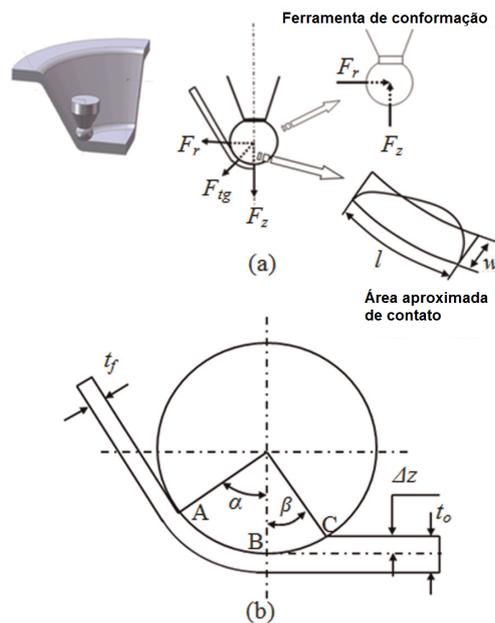


Figura 2.39: Contato da ferramenta(a) Representação esquemática de forças que atuam durante a conformação incremental de ponto único e geometria de contato aproximada e (b) ângulo de ranhura na endentação (ASGHAR et al., 2014).

## 2.12 Análise de variância

A ideia, na análise de variância (ANOVA), é comparar a variância devida aos tratamentos com a variação devida ao acaso, ou resíduo. Os cálculos ANOVA são resumidos em uma tabela com colunas para a fonte de variação, graus de liberdade, soma de quadrados, quadrados médios e estatísticas F, (ANJOS, 2008).

Os graus de liberdade (DOF) indicam a quantidade de experiências no conjunto de dados. DOF é um fator igual a um número de níveis de fator menos um. A razão F na tabela ANOVA para fazer um teste da hipótese nula de que todos os meios de tratamento são iguais (todos os valores  $\alpha_i$  são zero) versus a alternativa que alguns dos meios de tratamento diferem (alguns dos valores de  $\alpha_i$  são diferentes de zero). Quando a hipótese nula é verdadeira, F é de cerca de 1, dá ou leva alguma variação aleatória. Quando a alternativa é verdadeira, F-test para comparar a estatística F tende a ser maior que 1.

Os P-value no teste de hipóteses. Uma maneira de relatar os resultados de um teste de hipótese é declarar que a hipótese nula foi ou não foi rejeitada em um valor (ou valor de significância especificado). Isso geralmente é chamado de teste de nível de significância fixo. Por exemplo, podemos dizer que  $H_0: \mu_1$  e  $\mu_2$  é rejeitado no nível de significância de 0,05. Esta declaração de conclusões é muitas vezes inadequada, porque não dá ao decisor nenhuma ideia sobre se o valor calculado do teste, a estatística era apenas na região de rejeição ou se estava muito longe nesta região.

Além disso, indicar os resultados dessa forma impõe o nível predefinido de significância em outros usuários da informação. Essa abordagem pode ser insatisfatória porque alguns tomadores de decisão podem ficar desconfortáveis com os riscos que implicam 0,05. Além disso,  $P \leq 0,0001$  implica que o modelo desenvolvido é altamente significativo.

Para evitar essas dificuldades, a abordagem do P-value foi amplamente adotada na prática. O P-value é a probabilidade de a estatística de teste tomar um valor que seja pelo menos tão extremo como o valor observado da estatística quando a hipótese nula  $H_0$  é verdadeira. Assim, um valor de P transmite muita informação sobre o peso da evidência contra  $H_0$ , e assim um tomador de decisão pode tirar uma conclusão em qualquer nível de significância especificado. Mais formalmente, definimos o valor de P como o menor nível de significância que levaria à rejeição da hipótese nula  $H_0$ .

O coeficiente de determinação representa o quanto o modelo explica a variável dependente. Valores satisfatórios para  $R^2$  estão acima de 0.999, o que significa que a equação representa 99,9 % dos casos. O nível de significância representa o nível de correção necessário entre os dados apresentados com a variável dependente, que deve estar abaixo de 0,05 ou 5%.

# Capítulo 3

## Trabalhos correlatos

Neste capítulo apresenta-se os trabalhos com enfoque no processo de conformação incremental com aquecimento, onde é descrito os principais tipos de procedimento e dispositivos de aquecimento, que são atualmente utilizados, que visam a inserção de calor no processo para a melhoria de conformabilidade do processo, apresentando algumas desenvolvimentos de dispositivos de aquecimento que foram patenteados. Em busca da melhoria de processo apresenta-se estudos sobre o comportamento do desgaste da ferramenta de conformação e a qualidade das peças que foram conformadas com ferramentas desgastadas. Para é apresentado estudos onde se descreve as forças de conformação do processo sempre visando a qualidade das peças conformadas e a integridade das máquinas utilizadas no processo.

### 3.1 Estampagem com aquecimento

A estampagem incremental se apresenta como uma nova tendência para a conformação de pequenos lotes e prototipagem rápida, porém o processo apresenta algumas limitações que ainda impedem sua contribuição ativa no mercado industrial de conformação, (MALWAD; NANDEDKAR, 2014).

Para tentar solucionar um dos grandes problemas da estampagem incremental, que é a dificuldade de se obter superfícies complexas com boa qualidade superficial e dimensional, foi introduzido o aquecimento no processo de conformação, com adição de calor à chapa que será conformada, o que a torna mais maleável, (CAO et al., 2008), (MUGENDIRAN; GNANAVELBABU, 2014)

Para se melhorar a conformabilidade de alguns materiais realiza-se o aquecimento do blank, como no caso do titânio e suas ligas, Asghar e Reddy (2013), Göttmann et al. (2011). O titânio tem difícil conformação à temperatura ambiente, conforme demonstrado em trabalhos como os de Asghar e Reddy (2013) e Göttmann et al. (2011).

Com um controle rígido de temperatura e a análise das peças conformadas é possível se obter uma estrutura com menores tensões residuais, um processo mais estável e, por conseguinte, alcançar resultados de conformação por SPIF mais confiáveis e precisos e tempo de conformação menor, reduzindo, assim, os custos do processo, (AMBROGIO et al., 2009).

Para a estampagem incremental a quente é necessária uma atenção especial para o design do equipamento, a fim de assegurar uma distribuição homogênea da temperatura na chapa, (AMBROGIO et al., 2009).

### **3.1.1 Principais patentes ISF**

A técnica de SPIF com aquecimento vem sendo estudada por muitos autores, essas pesquisas deram origem a alguns registros de patentes, conforme descrito adiante. A patente 0044590, utiliza o processo de SPIF com adição de temperatura, baseando-se em um método de conformação que consiste em passar uma corrente elétrica pela chapa a ser conformada. Variando a magnitude da corrente, altera-se a força de conformação, reduzindo-se as fraturas e o springback (retorno elástico). A eletricidade pode ser aplicada para conformação a frio, a morno ou a quente, variando de acordo com a necessidade das operações, (ROTH, 2011).

A patente EP 1 899 089 B1 apresenta aquecimento por fluxo de calor (laser), provocando um aquecimento local que acompanha o caminho da ferramenta. A área de aquecimento é um pouco maior do que o diâmetro da ferramenta. Vários experimentos foram realizados com materiais dúcteis de até 1,2mm de espessura, trabalhando-se com uma temperatura máxima de aquecimento de 350°C. A invenção também permite fazer uso de um sistema para medir a temperatura na superfície do material da folha submetida ao fluxo de temperatura. A esse respeito, pelo menos um sensor de temperatura, tal como um pirômetro ou câmara térmica de infravermelhos, pode ser localizado perto da superfície da frente da zona de aquecimento da folha de material. A temperatura medida pode ser utilizada para o controle em tempo real da energia da radiação emitida a partir do aquecimento individual, o que significa se obter um controle mais preciso da temperatura para induzir a plasticidade, (CALLEBAUT et al., 2011).

A patente EP 2 559 499 B1 apresenta o processo de estampagem incremental com aquecimento por lâmpadas de halogênio junto com um sistema auxiliar de aquecimento. O sistema de aquecimento por lâmpada de halogênio fica na parte inferior do dispositivo de fixação (130) e o sistema auxiliar fica próximo à chapa a ser conformada (140), conforme mostra a Figura 3.1, (DUPRIEU; GUEGAN, 2013).

A patente EP 2559499 B1, levando em consideração o fato de que alguns materiais necessitam de um esforço mais significativo para serem conformados e que esses esforços podem bloquear o eixo árvore da máquina se não for rígida o suficiente, afetando diretamente a precisão da máquina, trabalha com o aquecimento da chapa a ser conformada como uma alternativa para resolver o problema. A conformação com aquecimento promove uma melhor conformabilidade e reduz a

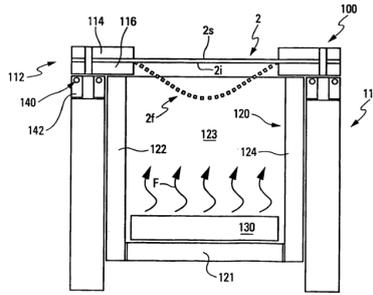


Figura 3.1: Aquecimento por lâmpada de halogênio  
 Fonte: (DUPRIEU; GUEGAN, 2013)

força necessária para a conformação e o retorno elástico. A possibilidade de conformar peças complexas e de precisão melhorou substancialmente com a introdução do método, (BOUKHNY et al., 2009).

### 3.1.2 Estampagem incremental com aquecimento

A introdução de calor no SPIF pode ser realizado através da utilização de cintas, mantas e resistências elétricas ou similares, o que confere à fabricação do dispositivo de aquecimento/fixação um bom custo-benefício, sendo possível, ainda, um controle de temperatura através de um termopar e um potenciômetro que podem ser analógicos ou digitais.

A Figura 3.2 apresenta uma solução simples de aquecimento. Neste caso, para se ter o aquecimento total da peça, deve-se inserir um novo parâmetro ao processo que é a dilatação do material a ser conformado. Isso é imprescindível para que o processo alcance as tolerâncias dimensionais solicitadas no projeto, (AMBROGIO et al., 2008).

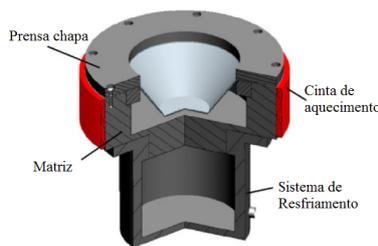


Figura 3.2: Dispositivo de aquecimento com cinta de aquecimento.  
 Fonte: (AMBROGIO et al., 2008)

Para verificar os efeitos do aquecimento no processo de conformação, Ji e Park (2008) realizaram experimentos com chapas de liga de magnésio AZ31, cuja maleabilidade é muito baixa à temperatura ambiente. Para se conseguir melhores resultados, adicionou-se temperatura ao processo de conformação, observando-se um aumento drástico na maleabilidade do material. A

técnica de conformação com aquecimento de forma incremental foi aplicada à chapa AZ31 para utilizar a sua máxima conformabilidade e a temperatura mais baixa possível para a formação de aplicações. Os testes foram realizados utilizando-se valores diferentes de temperatura, 20°C, 100°C, 150°C, 200°C e 250°C, para avaliar o comportamento da chapa durante a conformação. Concluiu-se que a temperatura que mais trouxe benefícios ao material foi 150 °C. Esse fato foi relacionado à redução do tamanho de grão, conforme Figura 3.3 (JI; PARK, 2008).

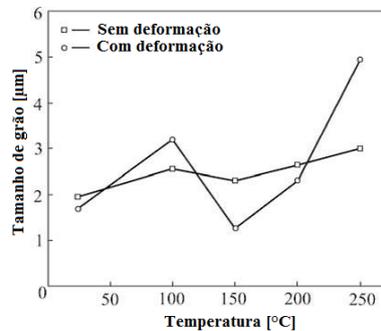


Figura 3.3: Variações de tamanho médio de grãos em diferentes temperaturas com/sem deformação

Fonte: (JI; PARK, 2008)

### 3.1.3 Estampagem incremental com aquecimento a laser

No processo de estampagem incremental, o aquecimento da chapa também pode ser obtido por laser. Nesse processo, o laser e a ferramenta movimentam-se sincronizadamente. Nos experimentos de Göttmann et al. (2011), o foco do laser é colocado na frente da ferramenta e tem a função de manter um aquecimento que chega a uma temperatura de 400°C, permitindo conformar com um passo incremental vertical em  $Z=0,35$  mm e uma velocidade de 4,000 mm/min. Restou demonstrado que na conformação de uma chapa de liga Ti-6AL-4V, espessura de 1,5mm, com aproximadamente 98 mm de profundidade, com um ângulo de parede de  $60^\circ(\alpha)$ , sem aquecimento, a profundidade de conformação não passa de 16 mm, (GÖTTMANN et al., 2011).

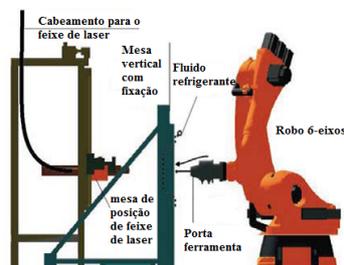


Figura 3.4: Aquecimento a laser com auxílio de robô.

Fonte: (DUFLOU et al., 2007)

### 3.1.4 Estampagem incremental com aquecimento por corrente elétrica e por fricção

Outro modo de realizar estampagem a quente é empregando-se corrente elétrica para o aquecimento de peças de geometria complexa, utilizada na liga de magnésio AZ 31. Os resultados mostram que a técnica é simples de ser aplicada. A Figura 3.5 demonstra como foram construídos os dispositivos para o processamento da chapa, (JI; PARK, 2008).

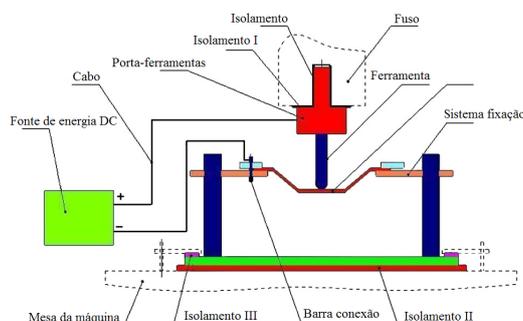


Figura 3.5: Princípio de eletroconformação  
Fonte: (JI; PARK, 2008)

Na modelagem com aquecimento, a seleção do material da ferramenta e o lubrificante são muito importantes para uma conformação bem sucedida. A ferramenta foi fabricada a partir de carboneto de tungstênio (YG8) e sua haste foi soldada. A fim de reduzir o atrito na interface ferramenta/chapa, foi polvilhado MoS2 em pó sobre a superfície das chapas (FAN et al., 2008).

A liga Ti-6AL-4V, muito utilizada na indústria aeronáutica, tem baixa conformabilidade à temperatura ambiente, mas mostra-se muito maleável quando conformada com adição de calor. Fan e Gao (2014), trabalhando com estampagem incremental com aquecimento elétrico (*electric hot incremental forming*), realizaram experimento de SPIF em chapas de titânio, com adição de aquecimento com a passagem de uma corrente elétrica através da chapa a ser conformada. Essa corrente elétrica gera o aquecimento e, aplicando-se uma corrente de 500A, a resistência à tração diminui em média 25%. Observou-se, ainda, que é importante manter a temperatura muito bem controlada para que não ocorram mudanças de fase indesejadas na estrutura do material.

O estudo das forças durante a conformação de chapa de liga de titânio Ti-6AL-4V foi realizado com o processo de estampagem incremental com ponto duplo e obteve-se menor resistência à tração quando a chapa foi aquecida por uma corrente elétrica de 80 e 140 A. Comparando-se as peças conformadas, a chapa conformada à temperatura ambiente ficou completamente retorcida, enquanto as peças conformadas com auxiliar de aquecimento demonstraram uma qualidade muito superior e uma distorção da forma da peça muito menor (OTSU et al., 2014).

A forma mais simples de inserir calor no processo de estampagem incremental é o aquecimento por atrito da ferramenta com chapa a ser conformada, esse atrito ocorre com a alta rotação

da ferramenta. Esse método de aquecimento é o mais econômico e viável, porém o atrito pode gerar um desgaste excessivo da ferramenta e principalmente da chapa a ser conformada (SILVA et al., 2008).

Otsu et al. (2014), realizaram vários ensaios com alta rotação para verificar a conformabilidade de ligas de magnésio, alumínio e titânio, conseguindo aumentar os limites de conformação em relação ao ângulo de parede.

No processo de estampagem incremental, o desgaste da ferramenta ainda não tem sido muito estudado em razão de seu baixo custo, porém esse aspecto pode ter influência no acabamento superficial ruim da peça, bem como gerar marcas indesejadas ou ainda acentuar o erro dimensional da peça a ser conformada.

Para melhor conservação da qualidade superficial da ferramenta e para redução do atrito da ferramenta com a peça, trabalha-se com a rotação natural da ferramenta (NTR). Em caso de rotação não natural da ferramenta (UTR), observa-se que ela desliza ao longo da superfície da peça de trabalho, amassando o material de base (Figura 3.6b) e, depois de um pequeno número de rotações em que a temperatura atinja um valor muito mais elevado, nota-se a colagem do material da peça de trabalho sobre a ferramenta de conformação (Figura 3.6), enquanto que no caso de NTR nenhuma colagem do material de base ocorre e uma excelente qualidade de superfície pode ser observada (Figura 3.6a) (PETEK et al., 2008).

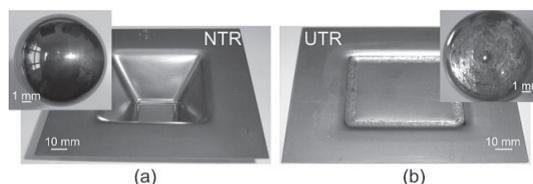


Figura 3.6: Comparação de ferramentas de conformação de SPIF: (a) Rotação Natural –NTR e (b) Rotação não Natural –UTR.

Fonte: (PETEK et al., 2008)

Dufrou et al. (2007), apresenta um estudo sobre o processo de conformação com aquecimento a laser na parte de trás da peça conformando uma chapa de liga de titânio TiAl6V4 e a liga 65Cr2 e com uso de um sistema de lubrificação e refrigeração na parte da frente da peça, conseguindo-se obter uma redução no erro dimensional da peça.

Ambrogio et al. (2008), apresenta um estudo de conformação de liga de magnésio AZ31 realizando um aquecimento até 300 °C, obtendo uma relevante melhoria na conformabilidade, e compara, ainda, as forças de conformação em relação ao passo em Z.

Fan et al. (2008), apresenta um estudo de conformação com aquecimento por corrente elétrica variando de 300 a 600A, para as ligas de titânio TiAl2Mn1.5 e magnésio AZ31 obtendo conformações em sua plenitude para formas simples, porém com marcas de queimado nas peças finais.

Ji e Park (2008), apresenta experimento que trabalha com temperaturas de até 250°C, sendo

que o aquecimento da peça é realizado através de um soprador térmico conformando um liga de magnésio AZ31, analisando ainda o crescimento de grão e definindo uma temperatura ideal para este material supracitado.

Ambrogio et al. (2009). Utiliza cinta de aquecimento para conformar a liga de magnésio AZ31 para processo de conformação com a adição de temperatura para o ensaio de NAKAZIMA, criando gráfico de conformação para ter uma referencia para o processo de estampagem incremental.

Göttmann et al. (2011), estuda o processo de conformação com aquecimento através de laser obtendo temperaturas superiores a 400°C, obtém peças de liga de titânio TiAl6V4 com elevadas marcas e distorções porem com aumento da ductilidade da chapa conformada.

Asghar e Reddy (2013), estuda o processo de conformação utilizando-se de duas ferramentas (que devem ser sincronizadas) e corrente elétricas de 80A a 140A, conformando peças de liga de titânio Ti-6Al-4V e liga de alumínio Al5052 T0, obtém peças com elevadas marcas, distorções porem com um grande aumento de na ductilidade.

Otsu et al. (2014), apresenta o processo de conformação utilizando como forma de aquecimento a alta rotação da ferramenta, que varia de 800 a 10000 rpm, para conformar chapa de alumínio A2017-T3 com a forma de uma pirâmide de base 40x40, obtendo-se a conformação das peças em sua plenitude.

Fan e Gao (2014), apresenta um processo de aquecimento por corrente elétrica variando de 150 a 500A para conformar um tronco de pirâmide com uma chapa de liga de titânio Ti-6Al-4V, ainda, uma análise de micrografia da peça após receber o aquecimento.

Hino et al. (2014), apresenta uma análise da potência do laser, que varia de 40 a 1300w com uma distância de foco entre 25 e 70mm, obtendo peças de geometria simples em liga de magnésio AZ31 e realizando a conformação da chapa em sua plenitude.

Xu et al. (2014), realiza uma comparação entre o processo de alta rotação e o de corrente elétrica em liga de magnésio AZ31B. Embora se obtenham peças simples com os processos de aquecimento, é sugerido que o processo de corrente elétrica pode confeccionar peças com paredes mais íngreme.

Ambrogio et al. (2012), realiza uma estudo de conformação entre 3 materiais distintos, liga de alumínio AA2024-T3, magnésio AZ31B-O e titânio Ti6Al4V, utilizando um corrente elétrica que vária de 100 à 260 A. As peças final apresentam melhores, devido as redução de distorção nas peças quando comparada as peças conformadas a temperatura ambiente.

Sy e Nam (2013), pesquisaram um novo projeto de sistemas de aquecimento para o processo o ISF utilizando corrente elétrica para conformar as chapas Liga de alumínio AA5055 e magnésio AZ31. conseguindo obter um ângulo de parede máximo (85°) alcançado em ISF com aquecimento para a chapa AA5055 é extremamente alto em comparação com o caso à temperatura ambiente.

A capacidade de formabilidade máxima do AZ31 pode ser obtida a 250 ° C.

Liu et al. (2016), realiza uma conformação de com aquecimento através de corrente elétrica com uma chapa de liga de titânio Ti6Al4V, chegando a uma temperatura superior a 500°C, para garantir a integridade da ferramenta foi desenvolvido um sistema de refrigeração interna na ferramenta, a figura 3.7 apresenta o projeto da ferramenta com refrigeração interna.

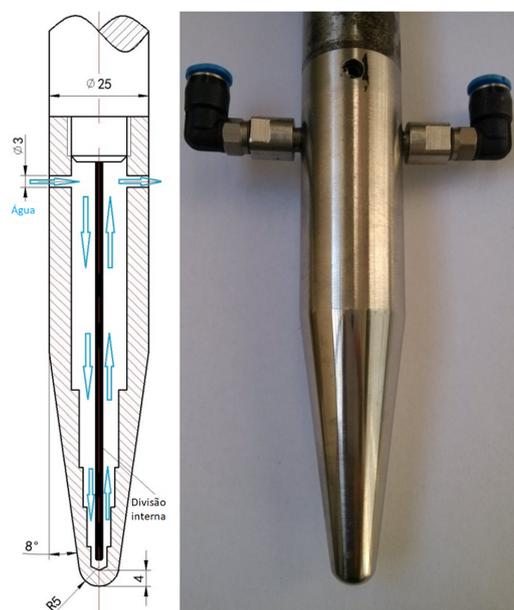


Figura 3.7: Ferramentas de conformação com canal interno de refrigeração  
Fonte: (LIU et al., 2016)

Sridhar e Rajenthirakumar (2016), realizaram um estudo de conformação de chapa de liga de alumínio AA6082 e um polímero de policarbonato, utilizando como forma de aquecimento bobina de aquecimento, que são resistência elétrica que dissipam calor para o ambiente. conseguindo melhorar a qualidade geométrica da peça final, reduzindo o retorno elástico para o polímero em 2% e para o alumínio em 1.5%.

Kulkarni (2016), em seu mestrado desenvolveu uma nova forma de aquecer a chapa a ser conformada, onde este aquecimento é dado por injeção de ar quente na parte superior da chapa a ser conformada, neste trabalho se conformou polímeros de poliestireno com um variação de temperatura de 65 à 175°C, conseguindo provar a eficiência do sistema de aquecimento. A figura3.8 apresenta o diapositivo de aquecimento desenvolvido.

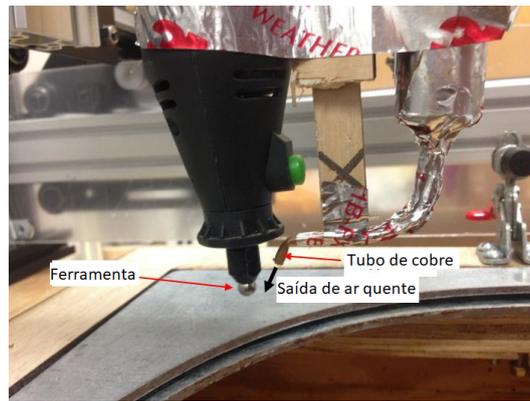


Figura 3.8: Dispositivo de aquecimento com ar quente na parte superior da peça  
 Fonte: (KULKARNI, 2016)

Shi et al. (2016), desenvolveram um novo dispositivo de aquecimento para o processo de conformação, baseando-se no aquecimento da peça através de óleo quente, conforme figura 3.9, conformando uma peça de liga de magnésio AZ31B. O ângulo limite de conformação incremental com aquecimento da chapa aumenta com o aumento da temperatura de conformação.

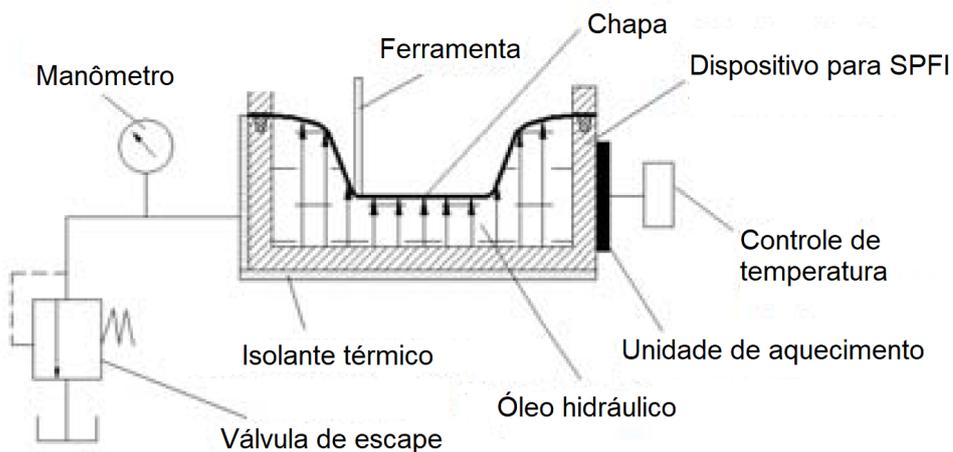


Figura 3.9: Dispositivo de aquecimento com óleo  
 Fonte: (SHI et al., 2016)

Francesco et al. (2017), realiza uma análise eficaz do sistema de aquecimento a laser foi testada em uma liga de titânio liga Ti6Al4V, selecionado por não ser magnético é mais difícil aquecer por indução. Em conclusão, apresentaram-se primeiros resultados mostrando a aplicabilidade da solução projetada como uma nova variável, aquecimento no ISF. Esta solução pode ser usada para melhorar a conformabilidade dos materiais difíceis de trabalhar à temperatura ambientes.

O Instituto Fraunhofer para Máquinas-Ferramentas e Tecnologia de conformação desenvol-

veu a configuração para conformação incremental em temperatura elevada. Esta configuração é adequada para o aquecimento global da chapa e pode ser facilmente adaptada para conformar grandes peças SPIF. É constituída pela fresadora CNC "Dynapod" adaptada para a conformação incremental (ver Figura 3.10a), (MOHAMMADI et al., 2017)

Esta plataforma oferece um espaço de trabalho de  $3500 \times 3000$  mm e é aplicável para usinagem simultânea de 5 eixos. Esta máquina tem uma alta rigidez e uma grande área de trabalho que pode ser usada para conformar partes SPIF grossas e grandes. Nesta configuração (ver Figura 3.10b), o aquecimento do ar forçado pode ser aplicado para o aquecimento global da chapa. Uma unidade de aquecimento com potência máxima de 16 kW foi utilizada para aquecer o ar que pode ser movido para a câmara de conformação por um ventilador poderoso com potência máxima e fluxo de ar de 0,55 kW e 15900 l / min, respectivamente. As saídas de ar foram projetadas na câmara para controlar a velocidade na qual o ar passa para a área de conformação, (MOHAMMADI et al., 2017).

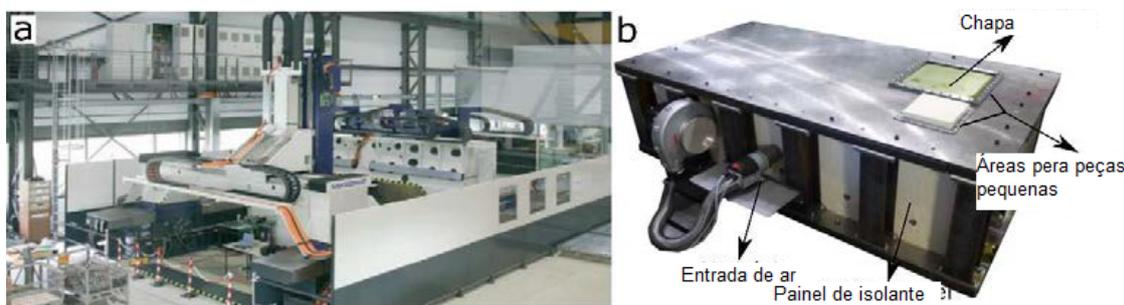


Figura 3.10: a) Fresadora CNC "Dynapod", usada para o processo SPIF b) Configuração do teste para aquecimento global.

Fonte: (MOHAMMADI et al., 2017)

Gupta e Jeswiet (2017), realizam um estudo de conformação com alta rotação para chapa de liga de alumínio AA 5754-H32. É possível aumentar a temperatura na interface da chapa-ferramentas aumentando a velocidade de rotação da ferramenta. Uma vez que a temperatura ultrapassa os limites de resistência da chapa, o desgaste iniciará resultando em danos na chapa.

Magnus (2017a) e Magnus (2017b), apresenta uma análise do estado da arte em ISF a com aquecimento mostrando vários métodos para adicionar de calor na chapa que estão sendo investigados atualmente. Especialmente naqueles métodos que utilizam um aquecimento regional da zona de conformação dinâmica, existem défices em medição permanente e controle da temperatura. Esta segunda parte descreve o desenvolvimento de uma instalação experimental e mostra os resultados da conformação de chapas Ti6Al4V. Com um controle e temperatura adequados, tanto o desgaste das pontas de ferramentas quanto a chapas podem ser mantidos em um nível baixo. Na conformação do Ti6Al4V, um processo estável de aquecimento e conformação pode ser alcançado em uma temperatura de zona de conformação de até 750 °C.

Tabela 3.1: Tipos de aquecimento

Tipo de aquecimento	Pontos fortes	Pontos fracos
Corrente elétrica	Aquecimento pontual; Fácil controle de temperatura	Custo elevado; Distorções na peça final; Ranhuras na peça final
Laser	Aquecimento pontual; Fácil controle de temperatura	Custo elevado; Sincronização do laser com a ferramenta
Soprador térmico	Baixo custo; Aquecimento total da peça	Baixas temperaturas; Controle de temperatura
Cinta de aquecimento	Baixo custo; Aquecimento total da peça	Limitação de tamanho; Temperatura
Alta rotação	Baixo custo; Aquecimento pontual da peça	Baixas temperaturas; Atrito elevado

Os tipos de aquecimentos e seus respectivos pontos fortes e fracos podem ser vistos na Tabela 3.1.

Com o intuito de reduzir erros e de se aprimorar o processo de estampagem incremental de ponto simples, busca-se na literatura pontos que podem ser melhorados. Um dos pontos de estudo de melhoria que vem sendo pesquisado é a introdução de uma nova variável no processo, a adição de calor, conforme estado da arte apresentado na Tabela 3.2.

Estado da arte do processo de aquecimento para ISF				
Ano	Autor	Aquecimento	Material	Temperatura
2017	Magnus (2017b)	Corrente elétrica	Titânio Ti-6Al-4V	750°C
2017	Gupta e Jeswiet (2017)	Alta rotação	Liga de alumínio AA 5754-H32.	120°C
2017	Mohammadi et al. (2017).	Ar quente	Liga de alumínio AA5182-O	260°C
2017	Francesco et al. (2017)	Laser	Titânio Ti-6Al-4V	650°C
2016	Shi et al. (2016)	Óleo quente	Liga de magnésio AZ31B	150 à 250°C
2016	Kulkarni (2016)	Ar quente	polímeros de poliestireno	65 à 175°C
2016	Sridhar e Rajenthirakumar (2016)	bobina de aquecimento	alumínio - AA6082 e polícarbonato de polímero	93°C e 396°C
2016	Liu et al. (2016)	Corrente elétrica	Titânio Ti6Al4V	500°C

2014	Ambrogio et al. (2012)	Corrente elétrica	Liga de alumínio AA2024-T3 magnésio AZ31B-O e titânio Ti6Al4V	150 à 225°C
2014	Xu et al. (2014)	Alta rotação, Corrente elétrica	Liga de magnésio AZ31B	250 à 500°C
2014	Hino et al. (2014)	Laser	Liga de magnésio AZ31	150 à 300°C
2014	Fan e Gao (2014)	Corrente elétrica	Titânio Ti-6Al-4V	970°C
2014	Otsu et al. (2014)	Alta rotação	Liga de alumínio A2017-T3	250°C
2013	Sy e Nam (2013)	Corrente elétrica	Liga de alumínio AA5055 e magnésio AZ31	200 à 300°C
2013	Asghar e Reddy (2013)	Corrente elétrica	Titânio Ti-6Al-4V e Alumínio Al5052 T0	480 à 650°C
2011	Göttmann et al. (2011)	Laser	Titânio Ti-6Al-4V	500°C
2009	Ambrogio et al. (2009)	Cinta de aquecimento	Magnésio AZ31	200 à 300°C
2008	Ji e Park (2008)	Sopradador térmico	Magnésio AZ31	150°C
2008	Fan et al. (2008)	Corrente Elétrica	Titânio TiAl2Mn1.5 e Magnésio AZ31	700°C
2008	Ambrogio et al. (2008)	Cinta de aquecimento	Magnésio AZ31	200 à 300°C
2007	Duflou et al. (2007)	Laser	Titânio TiAl6V4 e 65Cr2	20 à 300°C

Tabela 3.2: Estado da arte do processo de aquecimento para ISF

Observa-se também na Tabela Tabela 3.2 que a maioria dos casos estudados tratam de peças simples e que a maior parte faz uso de tipos de aquecimento com custo elevado de produção.

### 3.2 Medição das componentes de forças no ISF

A medição de forças durante o processo de conformação é muito importante, pois permitirá a proteção o limite de resistência mecânica dos fusos da máquina, ajuda no dimensionamento da ferramenta de conformação e de fixação e auxilia na análise do processo, sendo possível,

com a avaliação das componentes de força, modificar o caminho da ferramenta para facilitar a conformação, (BAGUDANCH et al., 2013).

Petek et al, (PETEK et al., 2009), apresentaram equipamentos experimentais para a conformação e medições de força em SPIF. As forças de conformadoras foram medidas usando um dinamômetro Kistler 9239 e amplificadas pelo Kistler 5001 para análise. Verificou-se que ao aumentar os ângulos da parede, a força de conformação é progressivamente aumentada. Tanto a rotação da ferramenta quanto a lubrificação não têm influências consideráveis na formação de forças, mas têm influência significativa na qualidade da superfície.

Duflo et al, (DUFLOU et al., 2007), demonstram existir uma relação entre a temperatura do processo e a força exercida pela ferramenta, sendo a chapa aquecida com laser. Uma das experiências conduzidas para comprovar a influência de um aumento da temperatura local para as forças do processo consistiu em formar uma série de cones em Al 5182. A partir de 1,25 milímetros de espessura de espaços em branco de tamanho 225 x 225 milímetros, que foram suportados por uma placa de apoio com 180 milímetros de diâmetro, formaram-se cones com um diâmetro externo inicial de 140 milímetros, uma profundidade de 20 milímetros e um ângulo de 40° de parede. O tamanho do passo incremental escolhido foi 0,5 milímetros (passos discretos) e a ferramenta era de 10 mm de diâmetro, fabricada em carboneto de tungstênio. Uma camada de grafite 33 foi aplicada ao lado do laser. A partir dos ensaios foi obtido o gráfico da Figura 3.11.

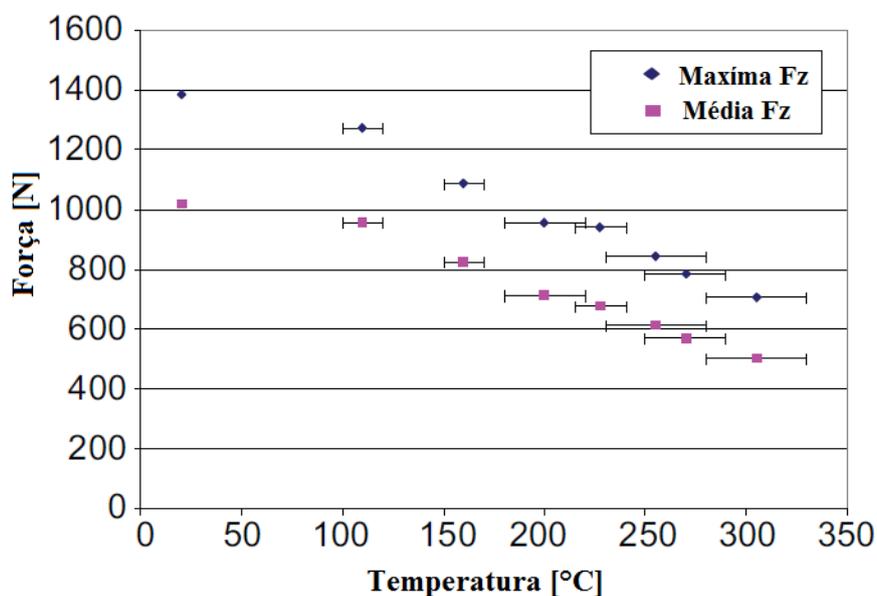


Figura 3.11: Forças axiais máximas e médias, em função da temperatura de aquecimento.

Fonte: (DUFLOU et al., 2007)

A força de conformação no eixo Z,  $F_Z$ , para o processo de SPIF variam juntamente com a variação do diâmetro da ferramenta, conforme estudado por Bagudanch, (BAGUDANCH et

Tabela 3.3: Relação de parâmetros utilizados e força gerada (BAGUDANCH et al., 2013)

ID	Diâmetro da ferramenta (mm)	Ap (mm)	Rotação	Força em Z (N)
1	20	0.2	Free	2420.85
2	20	0.5	Free	3581.40
3	20	0.2	1000	1902.00
4	20	0.5	100	2525.10
5	10	0.2	Free	1665.30
6	10	0.5	Free	2076.77
7	10	0.2	1000	1547.60
8	10	0.5	1000	1827.30
9	6	0.2	Free	1491.60
10	6	0.5	Free	1756.77
11	6	0.2	1000	1468.45
12	6	0.5	1000	1687.60

al., 2013). Os resultados mostram que a força máxima de conformação aumenta à medida que aumenta o diâmetro da ferramenta e o incremento do passo na direção Z. Por outro lado, a força de conformação diminui quando a velocidade do fuso aumenta.

A variação de alguns parâmetros de conformação são apresentados na Tabela 3.3.

Outro pertinente estudo realizado por Duflou et al. (2005) teve como objetivo medir as forças durante a estampagem e, assim, poder controlar e identificar pontos críticos e ótimos do processo. Segundo o estudo, os fatores que irão determinar a maior ou menor aplicação de força são: material, espessura e resistência mecânica da chapa, passo vertical e diâmetro da ferramenta.

Nessa experiência, o passo vertical foi de 0,5 mm, a ferramenta utilizada foi uma fresa de ponta esférica com um diâmetro de 10 mm e o ângulo de inclinação de parede de 50°. As forças foram medidas segundo seus componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ . Foi possível notar que o vetor resultante das forças  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  inicia a curva com valor igual a zero no início do processo de estampagem. Como indicado na Figura 3.11, à medida que a ferramenta vai se deslocando no eixo Z (aprofundando a chapa), a força ganha incremento rapidamente, até obter a profundidade desejada; a partir daí, as forças tendem a permanecer aproximadamente constantes.

O material utilizado foi uma chapa de alumínio 3003-O, com 1,2 mm de espessura. Na Figura 3.12 pode-se verificar a variação da força aplicada ao longo do tempo na deformação da chapa. Nota-se que no início do processo a força de estampagem aumenta bruscamente em um curto espaço de tempo. À medida que a chapa vai se conformando, a força utilizada tende a se estabilizar. Pode-se concluir que, na configuração da estratégia de usinagem do software CAM, o passo vertical deve ser variável, indo de um menor incremento para um maior, fazendo com que a variação de força seja menor. Consequentemente, o acabamento superficial melhora, a vida útil da ferramenta e do equipamento aumenta e a diferença geométrica entre o modelo teórico (em

CAD) e o real tende a diminuir.

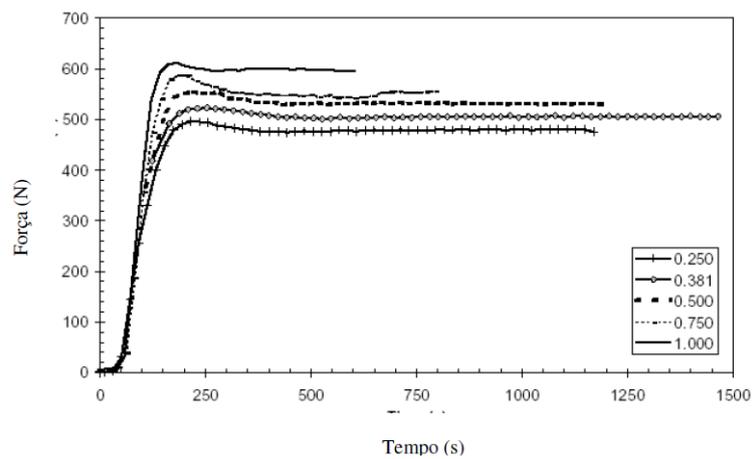


Figura 3.12: Gráfico da medição de força em função do tempo. A legenda do gráfico mostra as diferentes espessuras de chapas utilizadas no ensaio.

Fonte: (DUFLOU et al., 2005)

Para medir as forças de conformação, pode-se usar um dinamômetro piezoelétrico fixado na chapa do dispositivo de fixação. As forças medidas permitem avaliar que os formadores de cargas aumentam com o aumento da profundidade de passo da ferramenta. O ângulo de inclinação da parede e o diâmetro da ferramenta ao mesmo tempo em que diminuem a força necessária para a conformação. Pode-se reduzir até 50% da força de conformação com o acréscimo de temperatura, (AMBROGIO et al., 2008), como pode se visto na Figura 3.13.

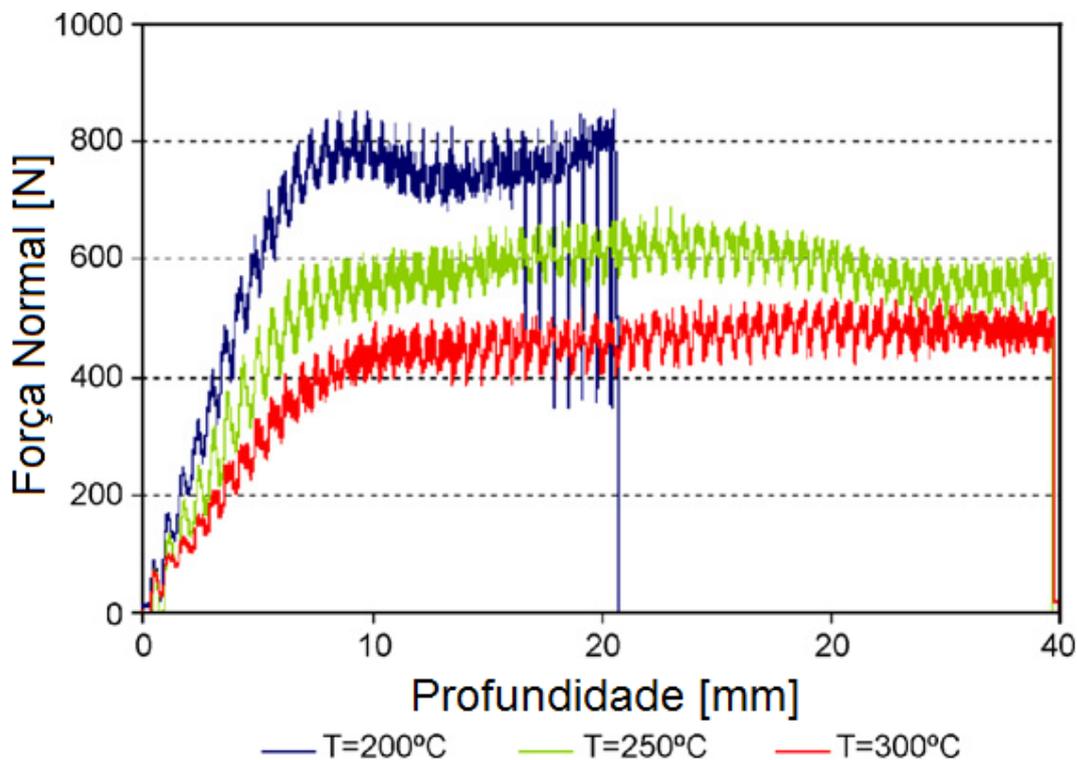


Figura 3.13: Força em relação a temperatura de processamento  
 Fonte: (AMBROGIO et al., 2008)

Ambrogio et al. (2006), apresenta um estudo das forças de conformação de uma chapa de alumínio 1050-O com 1mm de espessura, avaliando por meio do desenvolvimento de um modelo matemático simples para a adequação dos parâmetros de processamento, obtendo-se, assim, peças com melhores resultados de conformação.

Filice et al. (2006), apresenta um estudo de monitoramento de forças com o intuito de readequar os parâmetros de processamento antes que ocorra a fratura da peça que está sendo conformada. É apresentada uma análise da força em relação à espessura da chapa, ao ângulo da parede da peça, ao incremento em Z e ao diâmetro da ferramenta, concluindo que quanto maior qualquer um dos parâmetros citados maior a força necessária para a conformação.

Duflou et al. (2007), apresenta um breve estudo sobre o comportamento da força em relação à temperatura de processamento, para as chapas de liga Titânio TiAl6V4 e 65Cr2, onde a força máxima, de aproximadamente de 1400 N, é atingida quando a temperatura é ambiente, em torno de 20°, e a força mínima, de aproximadamente de 700 N, quando a temperatura é de 300°C.

Bouffieux et al. (2008), apresenta um estudo de modelagem de forças em correlação aos parâmetros de processamento utilizando diferentes técnicas e conclui que é um estudo complexo e difícil, para a chapa de liga de alumínio AA3103.

Bouffieux et al. (2008) realiza um estudo de força para uma chapa de alumínio AA3103, ve-

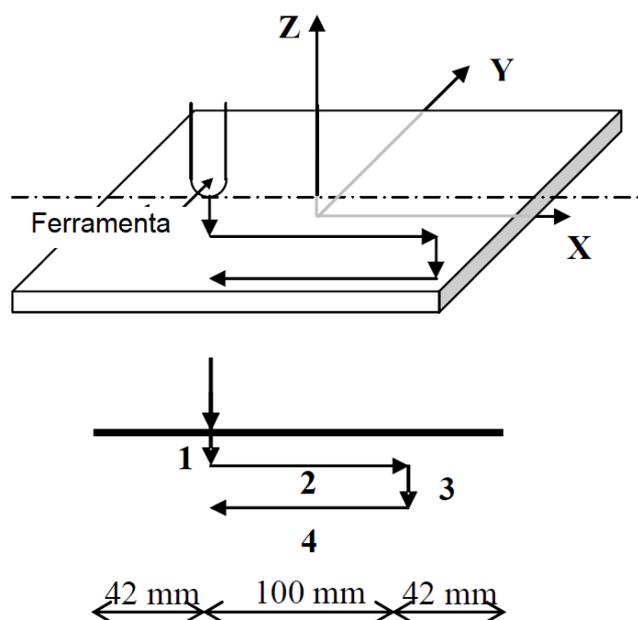


Figura 3.14: Trajetória da ferramenta para aquisição de força  
 Fonte: (BOUFFIOUX et al., 2008)

rificando as forças em relação aos movimentos da ferramenta em relação a chapa. Os movimentos da ferramenta foram divididos em 4 etapas distintas, conforme figura 3.14. O deslocamento da ferramenta é composto de cinco passos com uma posição inicial tangente à superfície da chapa: um primeiro recuo de 5 mm (passo 1), um movimento de linha na mesma profundidade ao longo do eixo X (passo 2), então um segundo recuo até a profundidade de 10 mm (passo 3) seguido por uma linha na mesma profundidade ao longo do eixo X (etapa 4) e a descarga (etapa 5).

As forças obtidas durante o processo de conformação em relação ao movimento da ferramenta, apresentadas na figura 3.15, pode-se observar as maiores forças estão relacionadas ao movimento de penetração da ferramenta na chapa.

Henrard et al. (2011), apresenta um estudo de modelagem de forças por elementos finitos, para a chapa de liga alumínio AA3003-O, obtendo-se as forças durante o processamento em software e depois comparando-as com as forças obtidas em um ensaio prático. É demonstrada a possibilidade de se obter, em alguns casos, boa relação entre processamento em software e ensaios práticos.

Aerens et al. (2010), apresenta uma fórmula analítica para o estudo da força em relação a alguns parâmetros de processamento como espessura da chapa, ângulo de parede, diâmetro da ferramenta e passo vertical em Z, para as ligas Alumínios AA3003, AA5754, Aço AISI 304 e 65Cr2. Fazendo uma regressão matemática consegue-se obter as fórmulas para cada parâmetro com boa precisão.

Bagudanch et al. (2013), apresenta um estudo sobre a força em relação aos parâmetros de

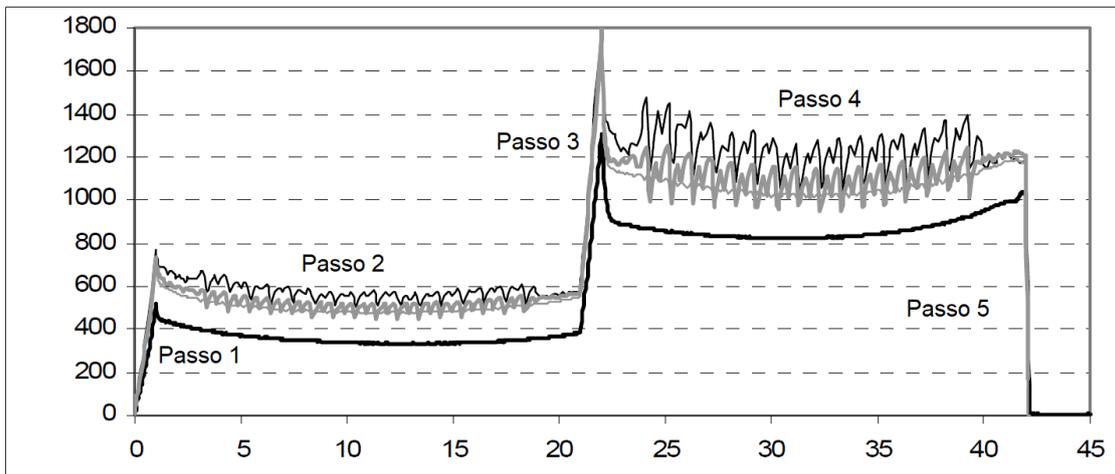


Figura 3.15: Trajetória da ferramenta para aquisição de força  
 Fonte: (BOUFFIOUX et al., 2008)

processamento como rotação, diâmetro da ferramenta e passo em Z, para a chapa de liga AISI 304, observando-se os maiores valores de força quando os parâmetros aumentam, com exceção da rotação, que quando aumenta, a força diminui.

Azevedo et al. (2015), apresenta um estudo de força de conformação relacionada ao tipo de lubrificante mostra uma pequena variação nas forças quando se modifica a lubrificação. Pode-se dizer que existe um lubrificante mais específico para cada tipo de material a ser conformado. Em qualquer processo de conformação, é desejável minimizar a quantidade de forças envolvidas para produzir uma determinada peça. Para apoiar as conclusões relacionadas aos efeitos lubrificantes, o efeito sobre as forças de conformação é estudado neste artigo. Enquanto a ferramenta descrevia a trajetória de conformação desejada, as forças radiais (horizontais) e compressivas (verticais) foram gravadas para AA1050 (representado na Figura 3.16 ) e DP780 (Figura 3.17).

Na estampagem incremental a conformação é feita gradualmente com o movimento da ferramenta, de modo que a forma desejada é alcançada no final do processo por meio do movimento da ferramenta e, por esse motivo, foi importante determinar o caminho da ferramenta, (HONAR-PISHEH; GHEYSSARIAN, 2017). O efeito do caminho da ferramenta nas forças de conformação foi examinado e é apresentado na figura 3.18.

A Figura 3.19 apresenta resultados de simulação para força axial em diferentes amplitudes para a frequência de vibração  $f = 20$  kHz. Cada ponto na figura representa o valor médio da força axial no processo de formação de um ciclo. Conforme observado na figura 3.19, a força axial em diferentes amplitudes aumentou inicialmente com aumento de profundidade na direção z e gradualmente estabilizada com aumento de profundidade adicional na direção z. Essa tendência foi observada devido à pequena deformação e deformação indesejada da chapa no processo de conformação inicial. Ao longo do processo de conformação, ocorreu um aumento gradual tanto para a deformação quanto para a deformação indesejada da chapa metálica. Isso resultou em

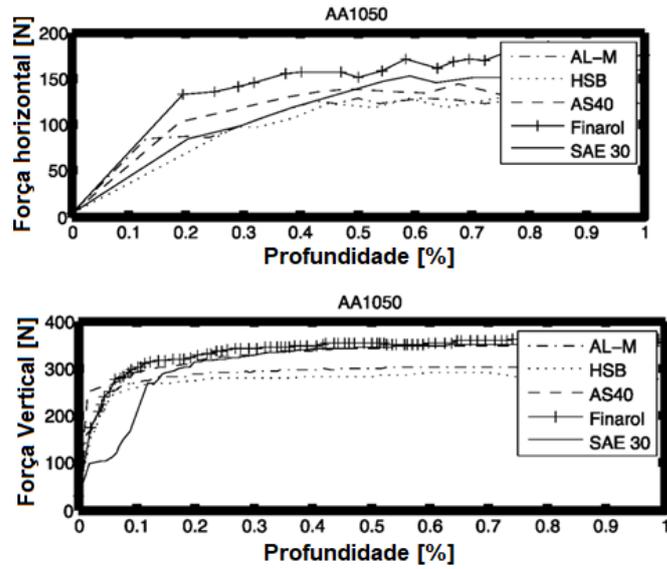


Figura 3.16: Distribuição das forças verticais e horizontais, em função da profundidade de conformação (em valor percentual) da Liga de alumínio 1050  
 Fonte: (AZEVEDO et al., 2015)

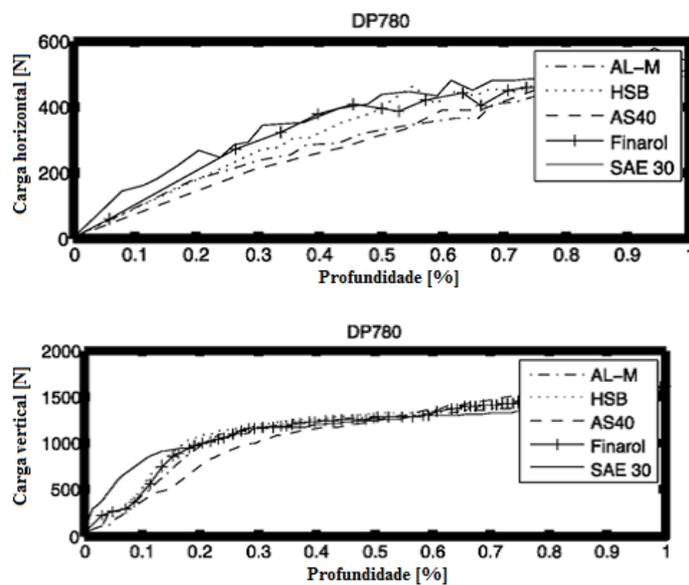


Figura 3.17: Distribuição das forças verticais e horizontais, em função da profundidade de conformação (em valor percentual) do aço DP 780  
 Fonte: (AZEVEDO et al., 2015)

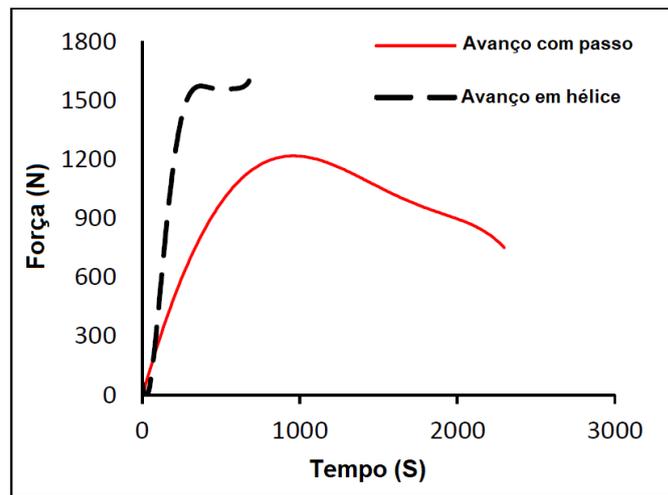


Figura 3.18: Variação de força para chapa de alumínio com caminho de ferramenta diferente  
 Fonte: (HONARPISHEH; GHEYSARIAN, 2017)

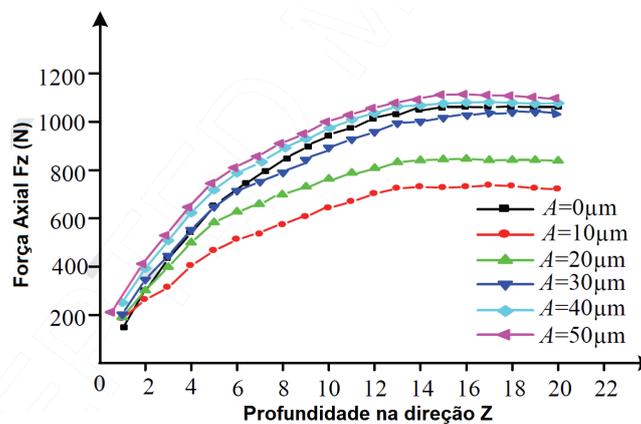


Figura 3.19: Força axial média junto com profundidade na direção z  
 Fonte: (LI et al., 2017a)

uma força axial maior. Finalmente, a deformação e a deformação indesejada se estabilizaram e estavam em seus valores máximos. Pode ver-se a partir da figura que a força axial com vibração ultra-sônica foi maior na força axial sem vibração, quando a amplitude é de  $A \geq 40 \mu\text{m}$ , (LI et al., 2017a).

Para melhorar a qualidade das peças, é necessário entender o processo em seus meandros, nesse sentido, alguns autores realizaram o estudo das forças durante o processamento, como pode ser observado na 3.4.

Tendo em vista a necessidade da busca pela melhoria do processo de estampagem incremental, para maior aplicação na indústria de conformação, o processo deve ser estudado e analisado com profundidade para se obter peças com melhor qualidade dimensional e de acabamento superficial.

Tabela 3.4: Estado da arte do processo de medição de forças no SPIF

Estado da arte do processo de medição de força no SPIF			
Ano	Autor	Material	Parâmetros analisados
2017	Li et al. (2017a)	Liga de aço Q235	Frequência de aquisição de dados de força
2017	Honarpisheh e Gheysarian (2017)	Alumínio e Cobre	Diâmetro da ferramenta e caminho da ferramenta
2017	Bansal et al. (2017)	Liga de alumínio 5052-O e Al3003-O	Diâmetro da ferramenta, Ap e ângulo de parede
2017	Wang et al. (2017)	Liga de alumínio 5052	Ap e profundidade da peça
2017	Li et al. (2017b)	Liga de alumínio 7075-O	Análise por elemento finito, ângulo de parede, Ap e espessura da chapa
2016	Li et al. (2016)	Este artigo fornece uma revisão sobre força	
2016	Valle (2016)	Liga de aço ASTM A653 CS-A G90	diâmetro da ferramenta, ângulo de parede, espessura da chapa, passo e avanço.
2015	Azevedo et al. (2015)	Alumínio 1050 e aço DP780	Lubrificantes: Repsol SAE 30, Total Finarol B 5746, Moly Slip AS 40, Weicon AL-M, Moly Slip HSB
2014	Li et al. (2014b)	Liga de alumínio 7075-O	Ângulo de parede, Ap e profundidade de conformação
2014	Li et al. (2014c)	Liga de alumínio 7075-O	Ângulo de parede, Ap e profundidade de conformação
2014	Li et al. (2014a)	Liga de alumínio 7075-O	Diâmetro da ferramenta
2013	Bagudanch et al. (2013)	AISI 304	Diâmetro da ferramenta, Ap e rotação
2010	Henrard et al. (2011)	Liga de alumínio AA3003-O	Ângulo de parede e Ap
2009	Aerens et al. (2010)	Ligas AA3003, AA5754, DC01, AISI 304 e 65Cr2	Espessura da chapa, ângulo de parede, diâmetro da ferramenta e Ap
2009	Petek et al. (2009)	Aço liga DC05	Ângulos da parede, rotação e lubrificação
2008	Bouffloux et al. (2008)	Alumínio AA3103	Movimento: penetração e deslocamento
2007	Duflou et al. (2007)	Titânio TiAl6V4 e 65Cr2	Temperatura de processo, ângulo de parede
2006	Filice et al. (2006)	Alumínio	Ap, diâmetro da ferramenta, ângulo de parede e espessura da chapa
2006	Ambrogio et al. (2006)	Liga alumínio AA 1050-O	Ângulo de parede, profundidade da peça e Ap

Esta tese pretende contribuir para o desenvolvimento da estampagem incremental de ponto simples com aquecimento, com baixo custo de aquecimento e boa qualidade dimensional, estudando as forças de conformação do processo, a conformação de peças complexas por SPIF com aquecimento e, ainda, o desgaste da ferramenta que está diretamente relacionado ao custo do processo e à qualidade final da peça.

### **3.3 Trabalhos correlatos a desgaste de ferramenta**

O processo de conformação SPIF utiliza uma ferramenta de conformação simples para a obtenção das peças. Para obter peças com boas qualidade de superfície, que apresentes poucas marcas de processamento, e qualidade dimensional compatível com a peça a ser conformada é necessária ter uma atenção especial com a ferramenta e com o seu desgaste natural, evitando o desgaste excessivo, que ocorre na maioria das vezes quando o atrito entre a ferramenta e a chapa é muito excessivo. Entretanto, segundo Branker et al. (2013), existe pouca bibliografia sobre o desgaste de ferramenta no processo de SPIF. A vida da ferramenta de conformação do processo de estampagem incremental necessita mais estudos Branker et al. (2013), especialmente para permitir uma modelagem do custo de fabricação com SPIF.

Branker et al. (2013), apresenta uma modelo de custo de ferramenta que não leva em conta a vida da ferramenta seu desgaste.

A fricção que ocorre no processo de SPIF acontece durante o contacto entre a ferramenta e a chapa. O ponto mais importante é saber como esta fricção irá influenciar o processo para definir os parâmetros e tentar controlar seus efeitos negativos. O controle do atrito é feito com o uso de um bom lubrificante e um excelente acabamento superficial da ferramenta e importante observar a chapa a ser conformada não deve ter imperfeições, portanto, é necessário polir a ponta da ferramenta e a placa não deve conter imperfeições superficiais, arranhões, riscos ou amassados. Um alto atrito pode resultar na incidência de desgaste prematuro da ferramenta ou da chapa, (SILVA et al., 2013).

Uma forma efetiva de reduzir a fricção é produzir a ferramenta como é de materiais com alta resistência à abrasão. Para algumas tarefas, o material da ferramenta é diferenciado para evitar reações químicas com o material com a chapa a ser conformada e assim aumentar a qualidade da superfície e reduzir o desgaste da ferramenta, com a ajuda de um lubrificante adequado. A ausência ou presença de lubrificação, bem como os tipos, causam variações na temperatura de processamento, na ferramenta e/ou ainda na chapa, (NIMBALKAR; M., 2013), (KOPAC; KAMPUS, 2005b).

Os efeitos de fricção da ferramenta na chapa podem danificar a superfície da peça final e reduzir ainda mais a conformabilidade do processo. Para reduzir esses efeitos no processo SPIF, (LU et al., 2014) desenvolveu uma ferramenta oblíqua cilíndrica com rolamento, Figura 3.20,

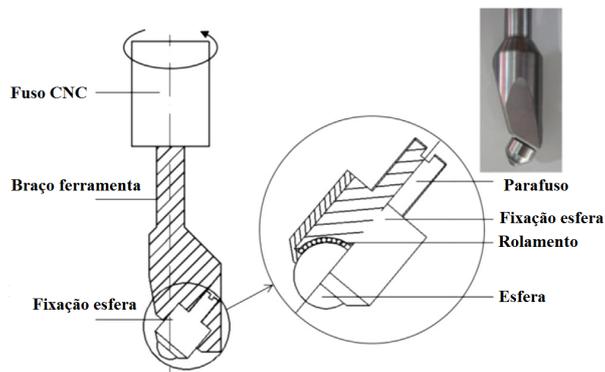


Figura 3.20: Ferramenta oblíqua.

Fonte: (LU et al., 2014)

que alcançou uma melhoria na qualidade das peças, especialmente na qualidade da superfície. As características da ferramenta também influenciam o processo de formação, pois o tamanho da ferramenta influencia o acabamento da superfície e também a formabilidade da peça. A relação entre o tamanho da ferramenta e a espessura da chapa a ser formada afeta a conformabilidade da chapa, (SURESH K.AND KHAN; REGALLA, 2015).

## Capítulo 4

# Planejamento dos ensaios do processo SPIF analisando o efeito do aquecimento, do desgaste da ferramenta e das componentes de força

Este capítulo apresenta a organização do trabalho em linhas gerais e o detalhamento das atividades necessárias para o planejamento e execução dos ensaios de conformação de peças no SPIF analisando os efeitos do aquecimento, do desgaste da ferramenta e das componentes de força do processo de estampagem incremental.

Para a análise do aquecimento e das componentes de força há etapas adicionais prévias que precisam ser realizadas antes de se iniciar a conformação propriamente dita. Na análise de forças é necessário desenvolver o dispositivo que permitirá a medição das forças envolvidas, enquanto que na estampagem com aquecimento, é necessário desenvolver e validar o dispositivo de aquecimento.

Para apresentação de todo o processo de maneira simples, completa e de fácil entendimento, o planejamento é estruturado utilizando a metodologia de fluxograma IDEF (*Integration Definition for Function Modeling*), cuja sistemática de funcionamento está melhor descrita no Apêndice A.

O IDEF é largamente utilizado na engenharia para representação gráfica de processos na forma de digramas hierarquizados, demonstrando como os *inputs*, *outputs*, controles e recursos necessários estão relacionados entre si para a execução do processo e suas atividades.

## 4.1 Fluxograma IDEF0: Proposta para realização de ensaio de conformabilidade

No fluxograma IDEF0 a atividade principal é a Atividade 0, sendo que dessa atividade principal são derivadas todas as demais atividades, como se cada atividade secundária fosse um *zoom* de um trecho da atividade principal ou de nível superior. Na presente tese, a Análise de conformabilidade do SPIF é a atividade principal em nível A0, na Figura 4.1 estão detalhados os principais dados de entrada, saída, controles e mecanismos do processo.

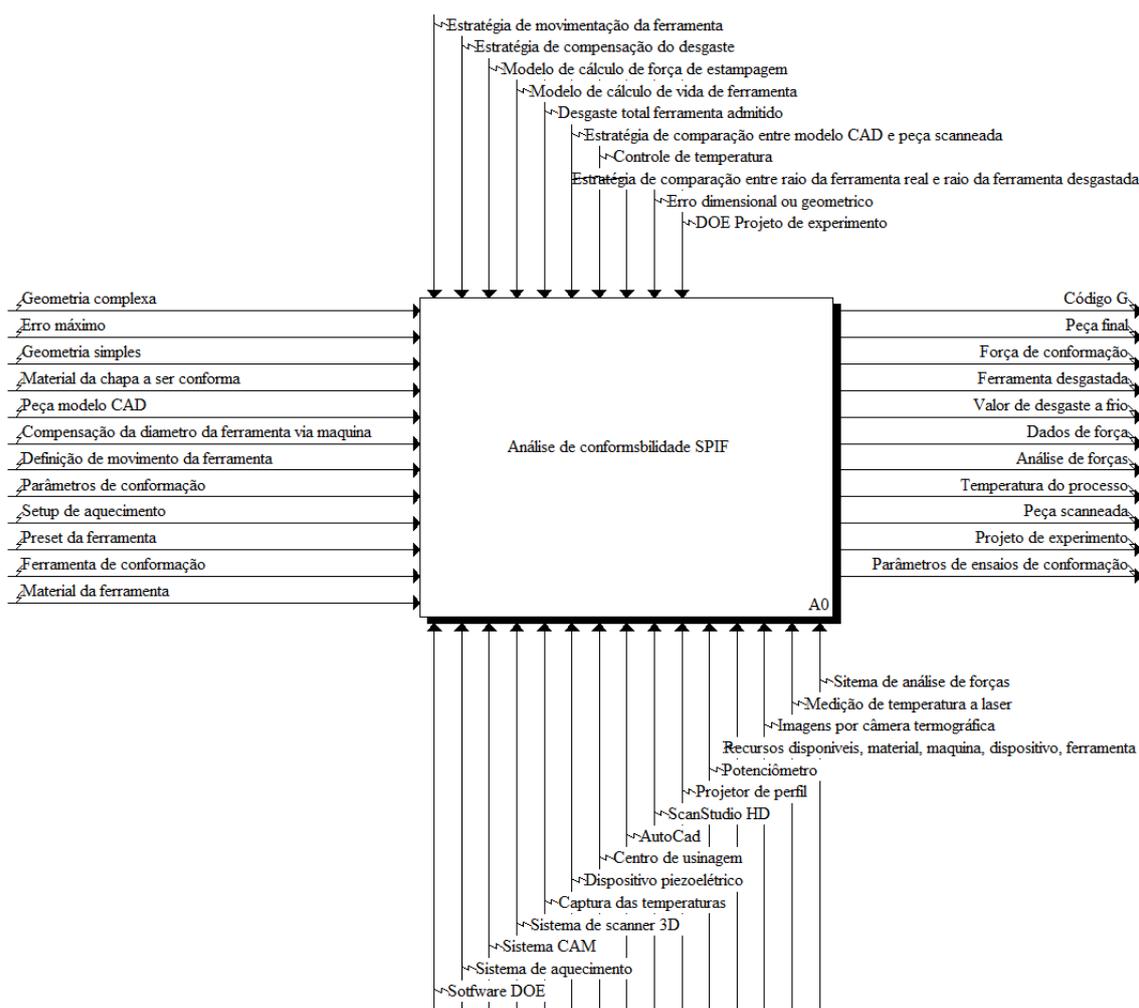


Figura 4.1: Atividades do IDEF0 –A0.

Fonte: Próprio autor

As entradas da atividade A0 são:

- Geometria da peça: que é dividida em geometria simples e geometria complexa. A complexidade da geometria a ser trabalhada é muito importante para guiar a execução do processo,

sendo que, quanto mais complexa a geometria, mais difícil a conformação. Não apenas o formato da geometria mas os ângulo de parede e a profundidade da peça podem ser fatores de complexidade.

- Erro máximo: é compreendido pela tolerância dimensional e da forma que é apresentada no projeto. Se as tolerâncias forem menores que  $\pm 0,6$  mm o processo tem que ser ajustado para se obter esses valores.
- Material da chapa a ser conformada: está diretamente relacionado com a força de conformação e com o desgaste da ferramenta.
- Peça modelo CAD: o modelo virtual em CAD auxilia na análise da peça após a conformação, pois o modelo escaneado será virtual.
- Material da ferramenta: deve ser adequado com o material da chapa a ser conformada e o tipo de processamento, com aquecimento ou a temperatura ambiente.
- Compensação do diâmetro da ferramenta via máquina: esta compensação ocorrerá no caso de uma sequência de produção, em que a ferramenta tende a se desgastar e passa a influenciar no erro total da peça.
- Definição de movimentação da ferramenta ou o melhor caminho que a ferramenta deverá percorrer para realizar a conformação: este parâmetro está diretamente ligado à programação CAD/CAM, na geração da malha do caminho da ferramenta que estará relacionada a diversos parâmetros como geometria da peça, temperatura de processamento, diâmetro da ferramenta, entre outros. Importante salientar que o geração do caminho da ferramenta obedece o modelo CAD, sendo assim o modelo utilizado para a programação tem que estar conforme a necessidades da peça final.
- Parâmetros de conformação: estarão relacionados à profundidade de corte em Z ( $A_p$ ), velocidade no plano XY, velocidade de descida em Z, rotação da ferramenta e temperatura de processamento.
- *Setup* do aquecimento: é a correta preparação do dispositivo de aquecimento para a execução da conformação, assim como o tempo de aquecimento antes do início da conformação. O tempo de aquecimento antes da conformação se faz necessário para o dispositivo de aquecimento alcançar a homogeneidade da temperatura.
- *Preset* da ferramenta: é o zeramento da ferramenta em relação à chapa a ser conformada. Este procedimento pode introduzir muitos erros no processo se não for executado corretamente.
- Ferramenta de conformação: pode-se utilizar diferentes formas, tamanhos e materiais para a ferramenta, cada modificação na ferramenta traz uma modificação ao processo. A qualidade superficial da ferramenta é muito importante para a qualidade do processo de conformação.

As saídas da atividade A0 são:

- Código G: é a geração do código NC a ser inserido na máquina CNC, onde estarão descritas as velocidades de processamento, os valores de Ap, rotação e a trajetória da ferramenta em relação a peça a ser conformada.
- Peça final: é o objetivo do processamento que é a obtenção de uma peça final dentro das especificações do projeto recebido.
- Força de conformação: será obtida após a análise dos dados de força oriundos do dispositivo piezoelétrico. O dispositivo piezoelétrico gera gráficos onde são apresentadas as forças de conformação durante todo o processamento.
- Ferramenta desgastada: é a ferramenta utilizada para a conformação de uma ou várias peças e que sofreu um desgaste em sua extremidade semiesférica (desgaste de ponta de ferramenta).
- Valor de desgaste: resulta da medida do desgaste sofrido na ponta da ferramenta de extremidade semiesférica após realização de um ou vários processos de conformação a frio. Nas presente tese a análise do desgaste somente ocorrerá no processo à frio, pois no processo a quente esse desgaste é minimizado.
- Dados de forças: são os obtidos pelo dispositivo piezoelétrico durante o processo de conformação.
- Análise de força: curva apresentada pelo dispositivo cuja análise congrega os resultados dos valores de força em relação aos parâmetros de processamento utilizado, procurando uma correlação entre parâmetros de processamento e força do processo, para se obter a melhor configuração de processamento com forças de conformação diminutas.
- Erro dimensional detectado: será obtido após a análise comparativa entre o modelo escaneado e o modelo CAD, obtendo-se as diferenças entre peça real e peça virtual, com um foco mais específico para as áreas planas das peças.
- Temperatura de processo: será obtida por medição de 30 em 30 segundos durante o processo de conformação. Estes dados de temperatura vão gerar a curva de aquecimento do dispositivo de aquecimento. Para realizar esta medição serão utilizados dois equipamentos, um termômetro a laser e um câmera térmica.
- Peça escaneada: é o modelo virtual da peça real obtida por escaneamento 3D da peça final do processamento.

Os controles da atividade A0 são:

- Estratégia de movimentação da ferramenta: como a ferramenta vai se movimentar para realizar a conformação da peça. Essa estratégia varia principalmente em relação à geometria final da peça. Após a realização de todas as análises para as duas peças distintas, um de geometria simples e a outra complexa, pode-se criar conceitos para a elaboração de uma melhor estratégia de conformação.
- Estratégia de compensação do desgaste da ferramenta: para realizar uma estratégia de compensação é necessário medição constante das peças e a correção poderá ser feita diretamente na máquina pelo operador, pois a máquina CNC permite a inserção de valores de desgaste de ferramenta.
- Modelo de cálculo de força de estampagem: para se obter uma prévia da força necessária para a conformação de uma peça é necessário se criar um modelo de cálculo baseado em testes empíricos.
- Modelo de cálculo de vida da ferramenta: para se estimar quanto tempo efetivo de conformação uma ferramenta vai resistir antes de apresentar um desgaste acentuado. O desgaste máximo aceitável para cada ferramenta vai depender das tolerâncias especificadas no projeto.
- Desgaste total da ferramenta admitido: para se obter um valor máximo de desgaste que a ferramenta de conformação pode ter é necessário um estudo prévio para analisar qual a influência do desgaste da ferramenta em relação à qualidade final da peça.
- Estratégia de comparação entre o modelo CAD e a peça escaneada: para se comparar as peças serão utilizados os softwares CAD e também pelo *Cloudcompare*, pois o CAD consegue obter uma análise pontual e o *Cloudcompare* obtém um análise de erro total.
- Controle de temperatura: este controle poderá ser feito pela redução da rotação e/ou por um termostato modelo on-off, este termostato vai controlar a temperatura interna do dispositivo de aquecimento, ligando e desligando conforme a temperatura programada.
- Estratégia de comparação entre raio da ferramenta real e o raio da ferramenta desgastada: para se analisar o desgaste de ferramenta foi utilizado um projetor de perfil que compara o raio da ferramenta com um gabarito de raio específico, onde se obtém a folga entre a peça e o gabarito.
- Projetos de experimento, DOE: onde são realizadas as variações dos parâmetros de processamento visando os melhores resultados com reduzidos ensaios práticos.

Os itens de mecanismos da atividade A0 são:

- Medição de temperatura: realizada por um termômetro laser e uma câmera térmica. Câmera térmica FLIR I40 (0 to 350 ° C) e termômetro laser modelo FU 900 EN 00 (-50 to 900 ° C).

- Imagens por câmera termográfica: para verificar o comportamento do calor durante o processamento. Câmera térmica FLIR I40 (0 to 350 ° C).
- Recursos disponíveis: material, máquina, dispositivo, ferramenta.
- Termostato: para regular a temperatura de aquecimento.
- Projetor de perfil: será utilizado para analisar o perfil da ferramenta após a sua utilização.
- ScanStudio HD: realiza a geração da malha virtual para a comparação como modelo da peça em CAD.
- AutoCad: realiza a comparação entre o modelo virtual e o projetos CAD.
- Centro de usinagem: executa os ensaios de conformação, de preferência o centro de usinagem tem que ser capaz de trabalhar com os 3 eixos simultâneos.
- Dispositivo Piezoelétrico: gera dados de força durante o processamento.
- Captura das temperaturas: realizada por uma câmera termográfica.
- Sistema de Scanner 3D: realiza a aquisição das nuvens de pontos para a geração do modelo escaneado virtual.
- Sistema CAM: gera o caminho da ferramenta de acordo com o modelo CAD, foi utilizado o Software Esprit CAM.
- Sistema de aquecimento: fornece calor à chapa a ser conformada, sem aquecer a mesa da máquina.

O processo de análise do nível A0 é subdividido em 6 níveis: A1 - Projeto de experimentos, A2 - Programação CAD/CAM, A3 - Processo de SPIF, A4 - Análise de erros dimensionais, A5 - Análise de força de conformação e A6 - Análise de desgaste de ferramenta. O processo A0 tem como principal saída a peça conformada e também todas as análises de erro dimensional, desgaste da ferramenta, temperaturas do processo e forças de conformação.

As sequências de atividades A1, A2, A3, A4, A5 e A6 são apresentadas na Figura 4.2, demonstrando o processo de análise quase em sua totalidade. Cada atividade possui as suas etapas complementares divididas em subníveis para se obter os resultados de saída esperados, com o detalhamento das atividades a serem realizadas.

Para ocorrer uma realimentação do processo após a conformação das peças na etapa A3, a peça conformada e a ferramenta de conformação passam por análises dimensionais e de desgaste. Os resultados destas análises retornam ao processo com o intuito de retroalimentação para a correção de distorções na peça, de desgaste excessivo e da força de conformação.

A realimentação ocorre a todo o momento quando se analisa o processo em andamento, condições de processamento podem ser calibradas tais como: temperatura, quantidade de lubrificante necessário, dentre outros, essa realimentação pode ocorrer imediatamente ou nas próximas conformações.

Na atividade A1 (Projeto de experimentos), conforme Figura 4.4, se desenvolvem as planilhas de execução de ensaios onde são descritos os parâmetros utilizados para cada teste. Esta atividade é subdividida em 2 etapas A11 (DOE força) e A12 (DOE desgaste), conforme Figura 4.3.

A atividade A2 (Programação CAD/CAM), conforme a Figura 4.4, é responsável pela geração do código G, sendo que essa atividade é a mesma para os processos de estampagem com aquecimento e a frio, não existindo assim diferenças no código CNC gerado. A geração do caminho da ferramenta nos dois casos tem como base uma trajetória helicoidal de movimentação da ferramenta, em que a velocidade de descida em Z é a mesma dos deslocamentos em XY. A trajetória helicoidal é a mais apropriada pois com ela se consegue minimizar as marcas indesejadas nas peças e ainda reduzir o tempo de conformação.

A atividade A3 (Processo de SPIF) é subdividida em dois subníveis: A31 (Processo com aquecimento) e A32 (Processo a frio), Figura 4.5. Essas duas atividades fornecem base para as próximas atividades, que é a execução do processo de conformação que tem dois processos de execução diferentes: o A311 (execução da conformação com aquecimento,) Figura 4.6, e o A321 (execução da conformação a frio), Figura 4.7.

A atividade A4 possui duas etapas complementares: A41 (*Scanner* 3D), em que ocorre o escaneamento das peças conformadas gerando um modelo virtual, e A42 (Análise do modelo virtual), atividade em que o modelo virtual é comparado com o modelo inicial da peça gerado no AutoCAD. Isso permite identificar possíveis diferenças entre a peça idealizada e a peça fabricada e a comparação entre as peças leva a possíveis correções do caminho da ferramenta para a melhoria da peça final (Figura 4.8).

A atividade A5 possui uma etapa complementar: A51 (Forças do processo a frio). Tendo em vista uma limitação no dispositivo piezoelétrico, a análise de forças só poderá ser realizada no processo de conformação a frio. Nesta etapa é realizada uma análise comparativa entre os valores de forças de conformação e a peça escaneada, podendo-se incluir nesse estudo o diâmetro da ferramenta de conformação. O desgaste da ferramenta tem que estar presente neste processo de análise para verificar se a força de conformação aumenta juntamente com esse desgaste (Figura 4.9).

A atividade A6 (Análise de desgaste de ferramenta) possui duas etapas complementares: A61 (Ferramenta do processo com aquecimento) e A62 (Ferramenta do processo a frio), em que ocorre a análise do desgaste da ferramenta após o processamento, Figura 4.10. Tanto para o processo com aquecimento e como para o a frio serão realizadas duas análises para cada ferramenta, uma análise de perfil no projetor de perfil e uma análise no microscópio. O projetor de perfil identifica

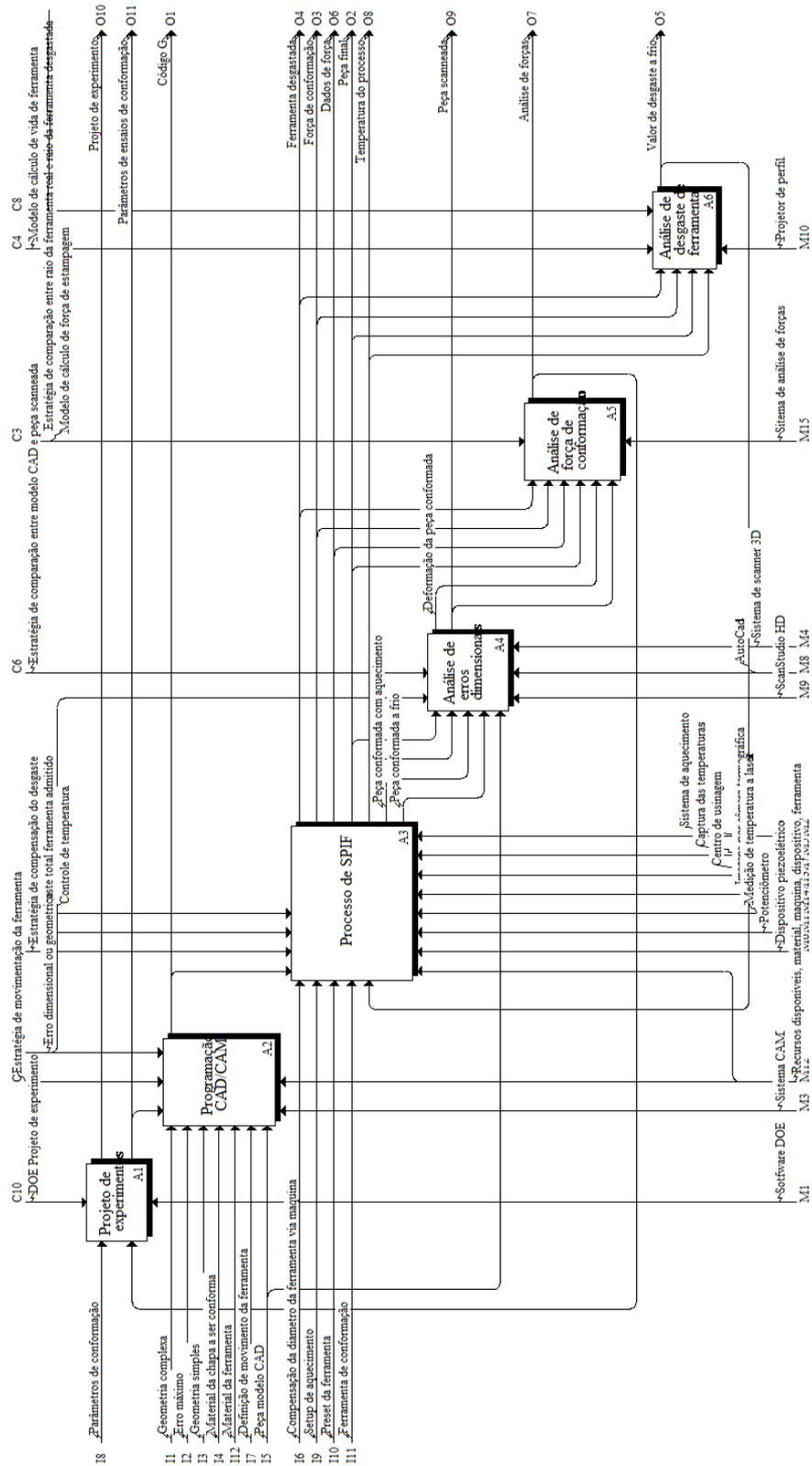


Figura 4.2: Atividades do IDEF0 com sub-atividades A1, A2, A3, A4, A5 e A6.

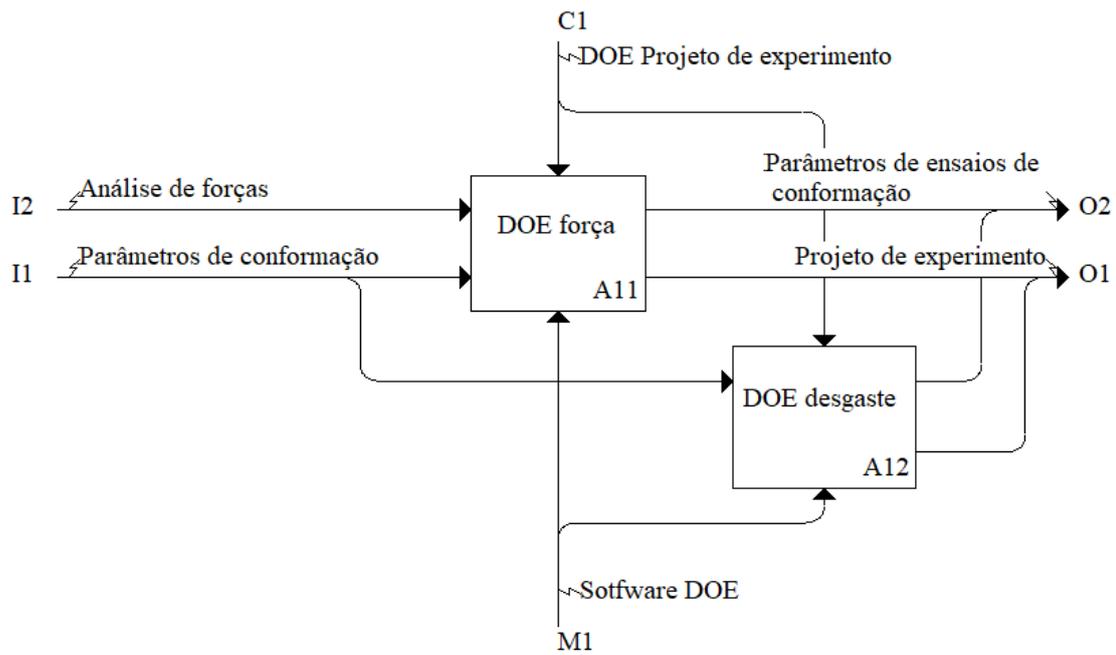


Figura 4.3: Atividade A1 subdividida em A11 e A12.

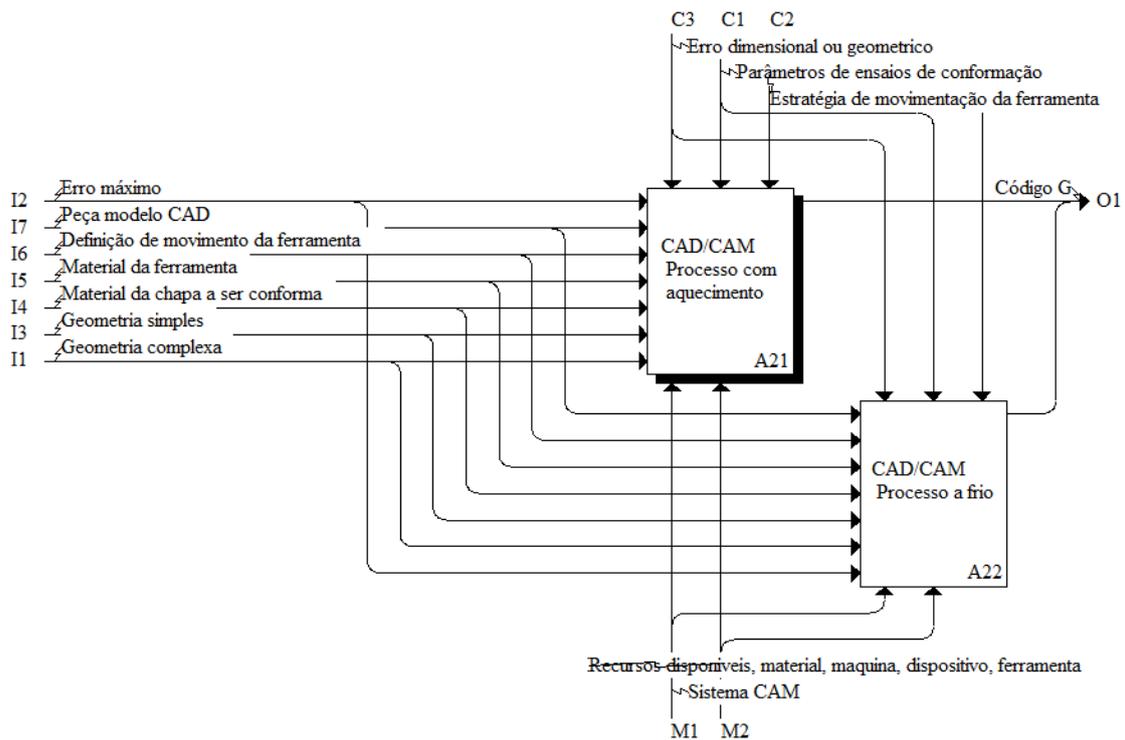


Figura 4.4: Atividade A2 subdividida em A21 e A22.

o perfil da ferramenta desgastada que será comparado com o gabarito do perfil da ferramenta enquanto nova, antes de ser utilizada para conformação.

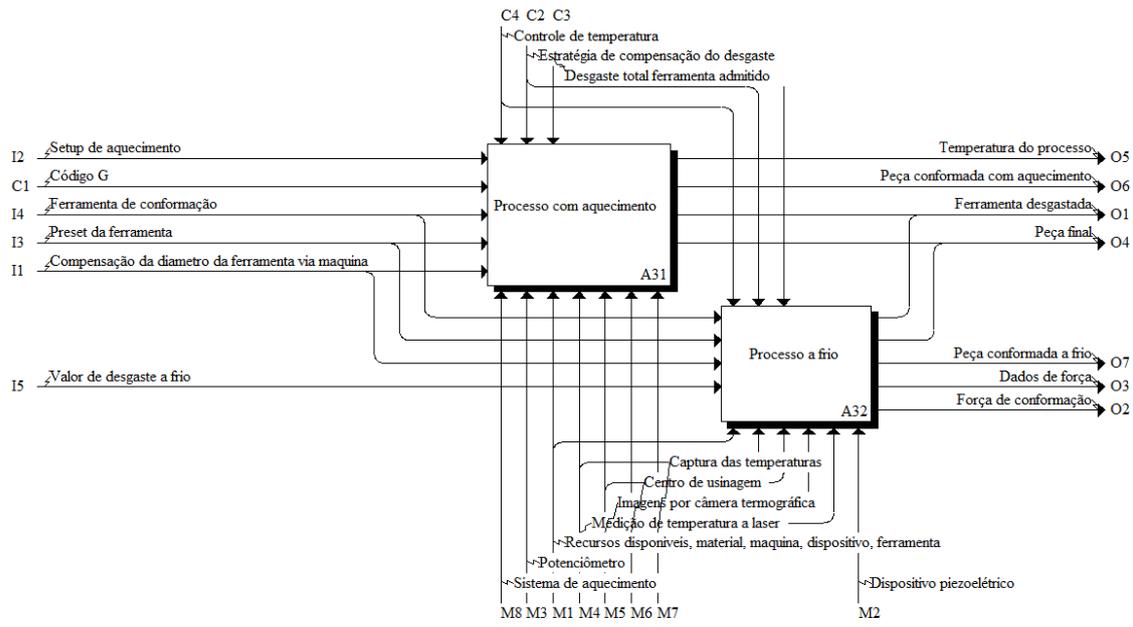


Figura 4.5: Atividade A3 subdividida em A31 e A32.

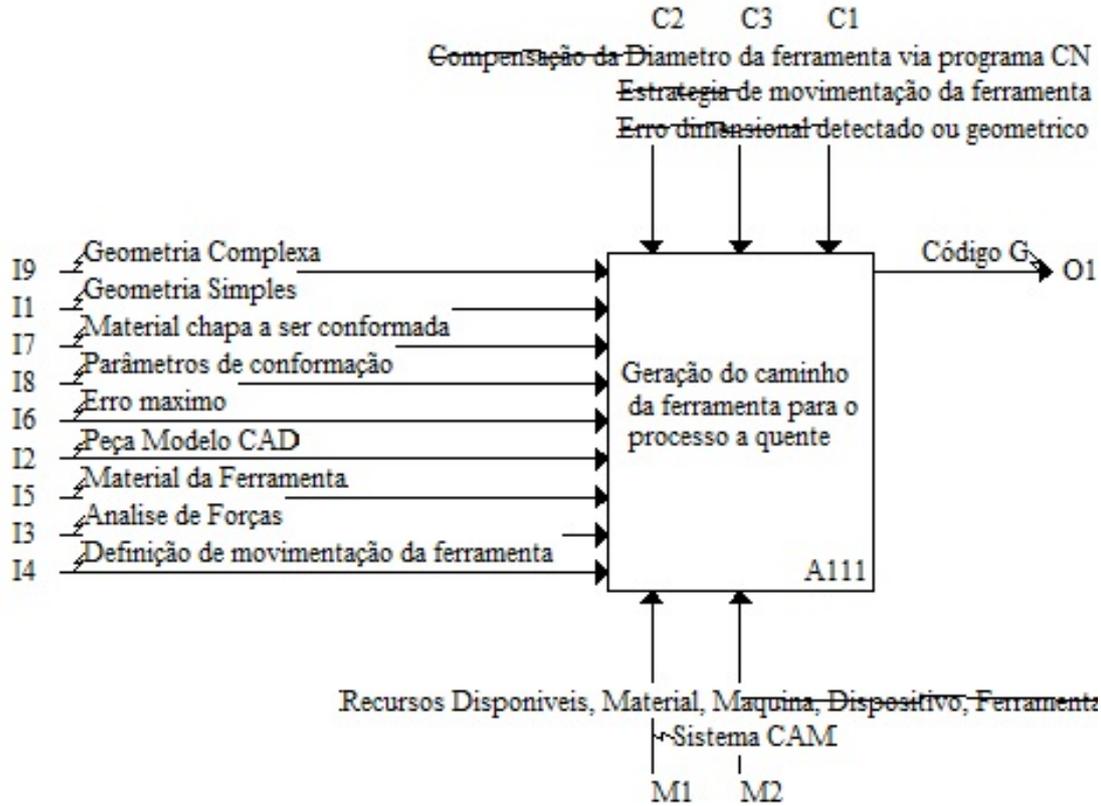


Figura 4.6: Subnível da A311 da atividade A31.

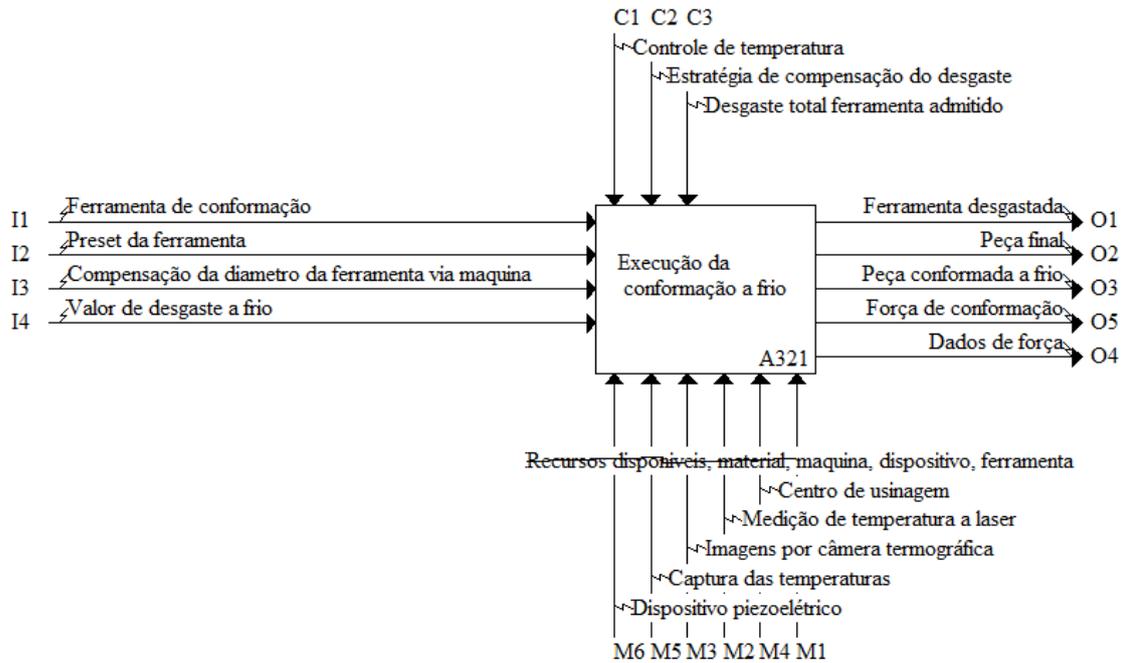


Figura 4.7: Subnível A321 da atividade A321.

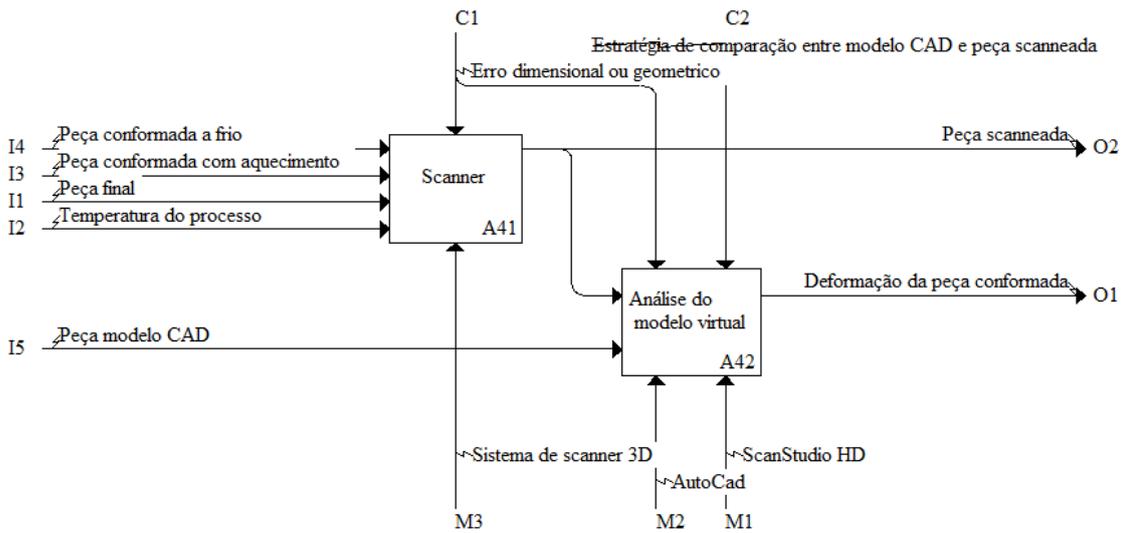


Figura 4.8: Os subníveis A41 e A42 da atividade A4.

## 4.2 Organização do trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, a tese foi dividida em 9 etapas, que foram realizadas na seguinte ordem:

- Revisão da literatura;

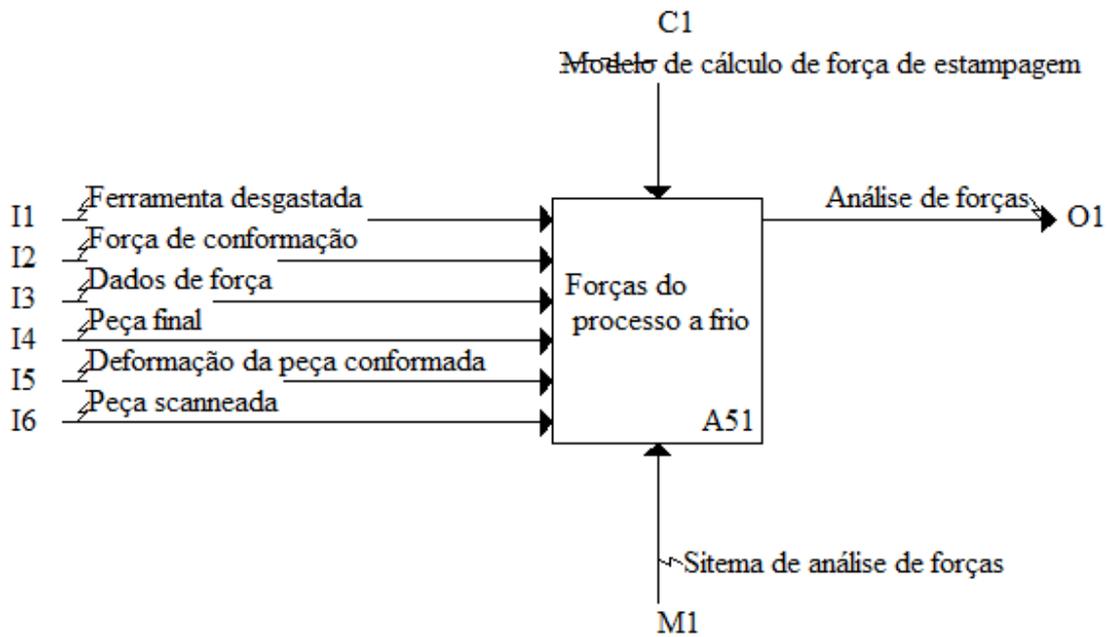


Figura 4.9: Subnível A51 da atividade A5.

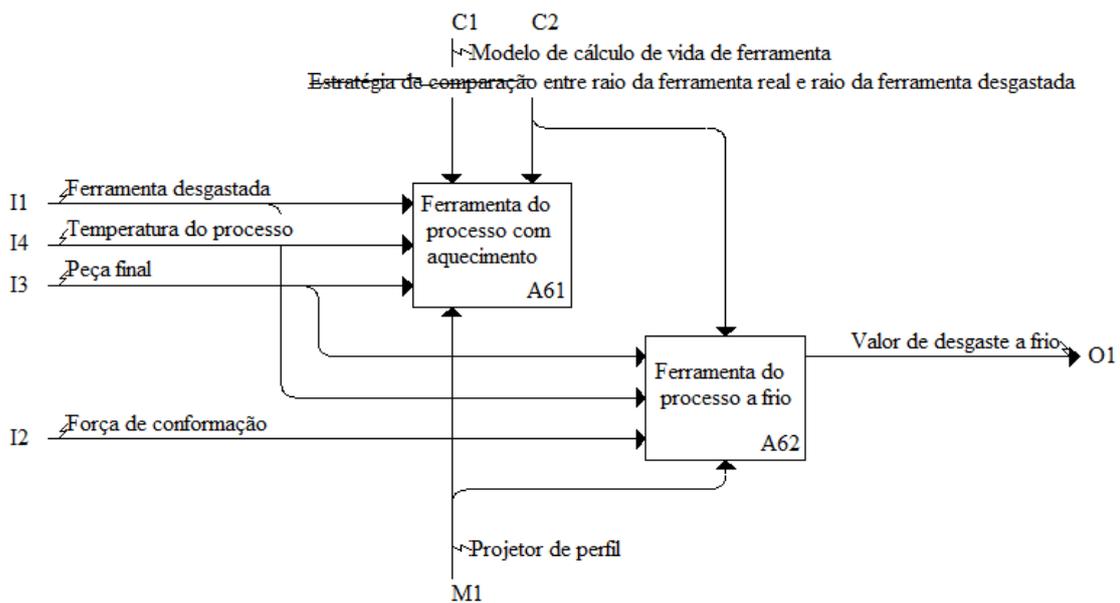


Figura 4.10: Subnível da A61 e A62 da atividade A6.

- Modelagem dos dispositivos de aquecimento e do dispositivo para estudo de forças/desgaste da ferramenta;
- Análise de transferência de calor do dispositivo de aquecimento através de software;
- Fabricação dos dispositivos;

- Realização de Ensaios;
- Análise de resultados;
- Montagem de planilha de experimentos;
- Execução de ensaios práticos;
- Análise de resultados e conclusões.

A etapa 1, revisão da literatura, refere-se aos trabalhos que estão em permanente evolução e influenciam a tese que está sendo escrita. As etapas 2, 3 e 4 compreendem o projeto e fabricação dos dispositivos de aquecimento, de medição de força e medição de desgaste de ferramenta. Em seguida se realizam os ensaios e se inicia a análise de resultados. As planilhas de experimentos e a geração das formulas matemáticas de predição de força e de desgaste são realizadas na etapa 8. Por fim, na etapa 9, é realizada a análise de resultados e são descritas as conclusões.

### **4.3 Dispositivo de fixação - análise de força**

Para analisar as forças do processo de estampagem, primeiramente constatou-se a necessidade de medição das forças XYZ envolvidas. A aquisição das forças foram adquiridas por dispositivo piezoelétrico é indicado para medição de força nos três eixos XYZ. Para medição das forças envolvidas no processo SPIF foi necessária a fixação do mesmo à bancada de conformação.

Desta forma construiu-se um conjunto de dispositivos conforme descrito a seguir. Para o desenvolvimento do dispositivo foi utilizado um software de modelamento 3D da Autodesk, o Inventor, por meio do qual é possível analisar todos os aspectos da montagem dos componentes, bem como a disposição do acoplamento do dispositivo de fixação com o dispositivo piezoelétrico, para realizar uma montagem simples e eficiente.

A Figura 4.11 mostra a montagem do conjunto de análises de forças, que é composto por dois outros dispositivos: um de fixação e o dispositivo piezoelétrico. O dispositivo de fixação é aparafusado no dispositivo piezoelétrico e este, por sua vez, é fixado na mesa da máquina.

A Figura 4.12 ilustra o conjunto de fixação para a análise de forças. O conjunto possui uma chapa de aperto que fica acima da chapa a ser conformada e uma chapa de perfil que fica logo abaixo da chapa a ser conformada, onde se executa um corte aproximado da peça a ser conformada, com o objetivo de reduzir as deformações no início da conformação. Como se percebe, a chapa de perfil é uma chapa de sacrifício e deve ser específica para cada tipo de peça executada. Os espaçadores servem para dar altura para a conformação das peças, podendo ser alterados conforme a necessidade. A chapa de fixação é a responsável pelo acoplamento do dispositivo de fixação ao dispositivo piezoelétrico.

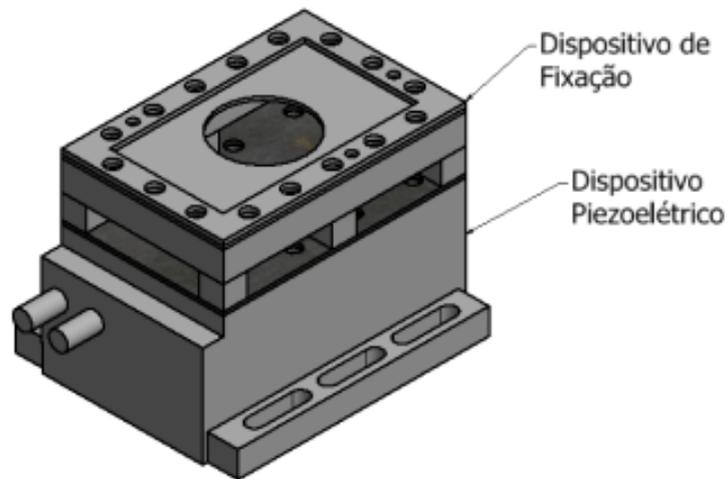


Figura 4.11: Montagem do dispositivo piezoelétrico

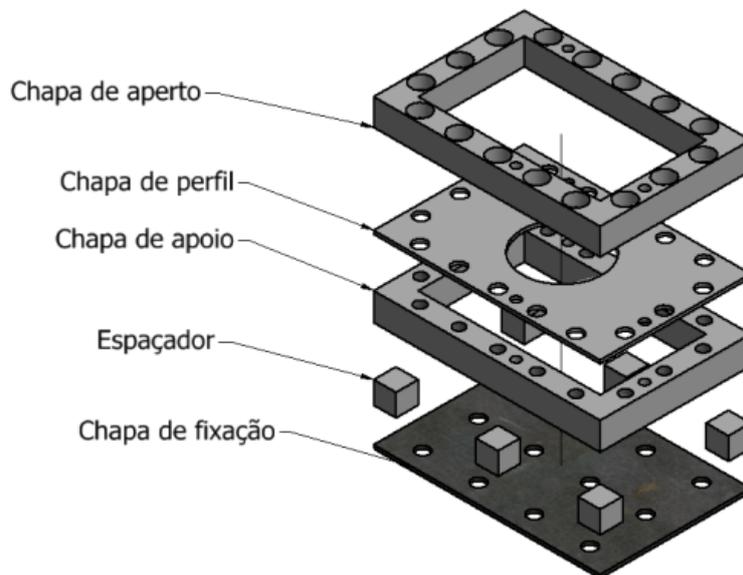


Figura 4.12: Dispositivo de fixação vista explodida

O projeto completo do dispositivo de análise de força com o detalhamento de peça a peça é apresentado no Apêndice C, o dispositivo foi fabricado a partir dos desenhos apresentados.

#### 4.4 Dispositivo de fixação com aquecimento

Para a fabricação do dispositivo foram considerados vários critérios analisados no software CFD, tais como espessura do revestimento, aberturas laterais no dispositivo e material aplicado na fabricação. As aberturas laterais da estrutura externa (a Figura 4.13 apresenta a vista isométrica)

têm como objetivo reduzir o custo de fabricação, diminuir o peso e ainda evitar a propagação da temperatura por condução através da chapa de aço.

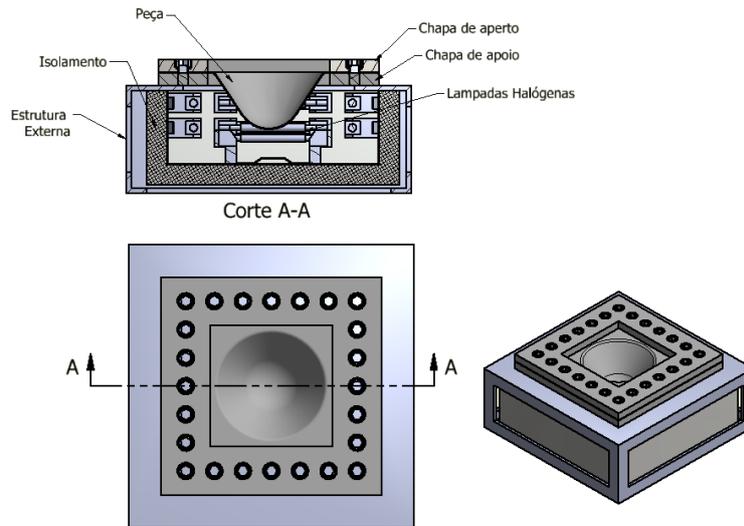


Figura 4.13: Projeto do dispositivo de fixação com aquecimento

O conjunto de fixação da peça é totalmente independente do dispositivo de aquecimento, para facilitar as medições e realizar duas análises sobre as dimensões da chapa conformada: uma com ela presa ao prensa-chapas e outra sem o prensa-chapas, obtendo-se um maior realismo nas medidas da peça durante o processo, salientando-se que todas as peças são medidas a uma temperatura de 20 °C. Para se obter uma pressão de aperto igualmente distribuída por toda a chapa, os parafusos devem ser apertados com o auxílio de um torquímetro, Figura 4.14.

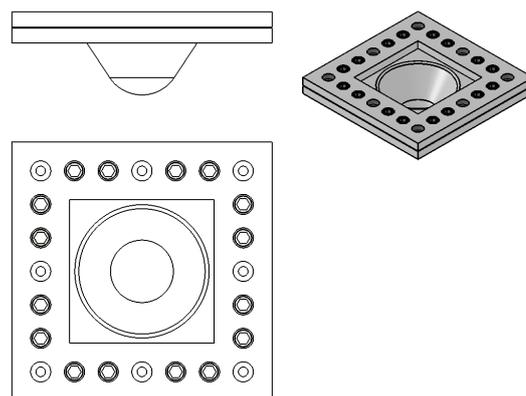


Figura 4.14: Projeto do dispositivo de fixação

Para controlar a temperatura do processo, foi utilizado um sensor que realiza o controle de temperatura por sistema *on-off*. Quando a temperatura chega ao valor predeterminado, o sistema

se desliga automaticamente e, quando a temperatura diminui, o sistema é religado, mantendo-se assim uma variação máxima de 20 °C, Figura 4.15.



Figura 4.15: Posicionamento do sensor de temperatura no conjunto

O projeto detalhado de todo sistema de aquecimento e fixação contendo as peças individuais pode ser visto no Apêndice D.

#### 4.4.1 Desenvolvimento do dispositivo de aquecimento

Para uma vasta aplicação no mercado industrial, um dispositivo de aquecimento precisa ter um projeto de baixo custo e de simples produção. Nessa linha, foi desenvolvido um dispositivo de aquecimento de formato quadrado utilizando lâmpadas halógenas para aquecimento com temperatura controlada.

O dispositivo de aquecimento foi projetado para proporcionar uma temperatura homogênea durante todo o processo e em todas as áreas da chapa a ser conformada. Para isso, foram distribuídas 11 (onze) lâmpadas de halogênio de 100 W, com comprimento de 113mm, que individualmente alcançam uma temperatura superior a 200 °C, sendo 2 (duas) para cada lado do dispositivo e 3 (três) no fundo, distribuídas simetricamente. Figura 4.16.

A disposição das lâmpadas foi idealizada por simulações de transferência de calor utilizando-se o software Autodesk CFD, onde foi modelada a estrutura física do dispositivo de fixação e do dispositivo de aquecimento. Objetivou-se a produção de um dispositivo de aquecimento universal, ou seja, que possa ser utilizado independentemente do formato final da peça a ser conformada.

Esse dispositivo de aquecimento traz um diferencial que é a simplicidade de sua construção e controle, juntamente com duas preocupações básicas para o processo: a dilatação do material e o aquecimento da mesa da máquina. O dispositivo após a fabricação é apresentado na figura 4.17.

Para evitar o aquecimento da mesa da máquina, o dispositivo de aquecimento foi revestido com lã de rocha em todas as laterais. Após a sua fabricação, realizou-se a análise com uma câmera térmica para verificar possíveis pontos de fuga de calor e, ao se identificarem esses pontos, foi realizada uma vedação com silicone para alta temperatura, tornando assim o dispositivo mais eficiente termicamente.

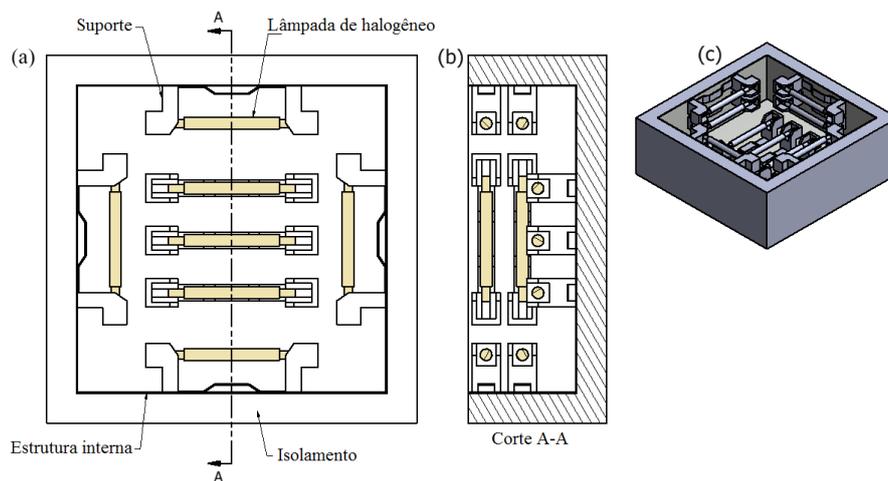


Figura 4.16: Dispositivo de aquecimento (a) vista superior (b) vista em corte (c) vista isométrica.

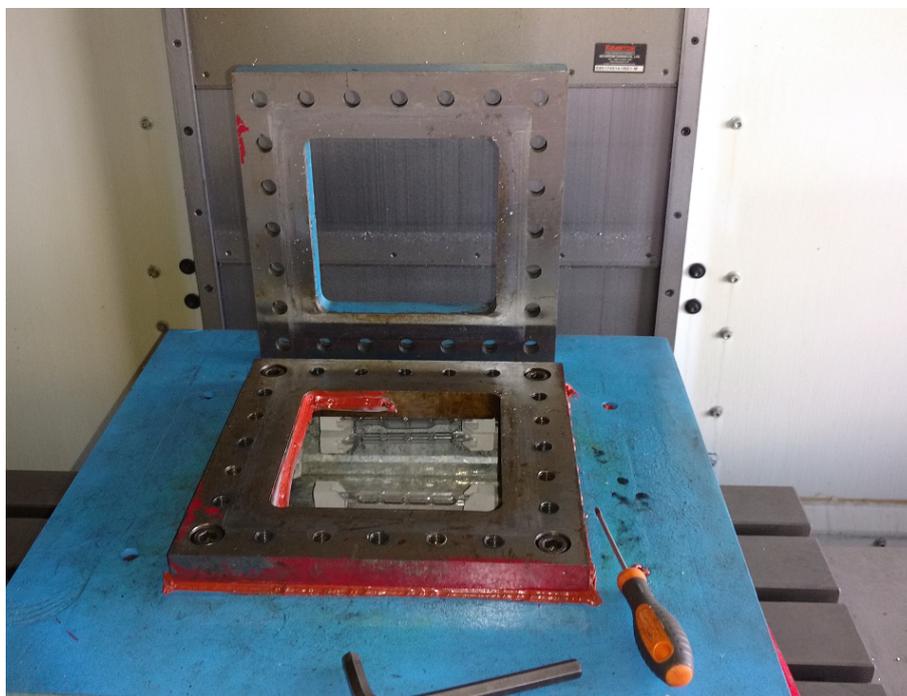


Figura 4.17: Dispositivo de aquecimento na máquina.

O controle da temperatura de processamento possibilita que se crie uma estratégia de conformação em que o perfil de temperatura durante toda a conformação se mantenha o mesmo, obtendo-se uma dilatação praticamente constante durante o processo.

A Figura 4.18, apresentado pela câmera térmica, mostra o perfil de temperatura no dispositivo de aquecimento com a chapa plana, no início de um processo de conformação, onde todas as resistências estão energizadas, liberando a potência máxima para se obter uma temperatura na chapa de aproximadamente 160 °C.

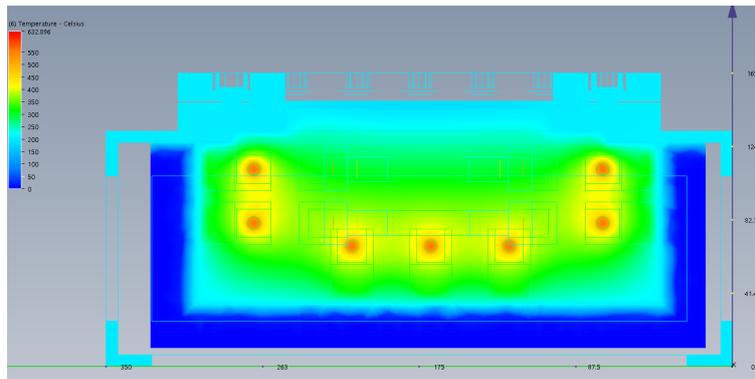


Figura 4.18: Perfil de temperatura no início do processo

Realizada a simulação do processo de estampagem incremental com aquecimento, foi obtido o perfil de temperatura final de conformação, conforme apresentado na Figura 4.19. Com a análise do perfil final de temperatura, observou-se que o perfil de temperatura varia conforme a profundidade, o que pode ocasionar uma conformação com variação na dilatação da peça e, conseqüentemente, variação nas dimensões finais da peça conformada. O perfil de temperatura gerado na simulação deve-se ao fato de que na simulação não foi considerado um sistema de controle para a temperatura.

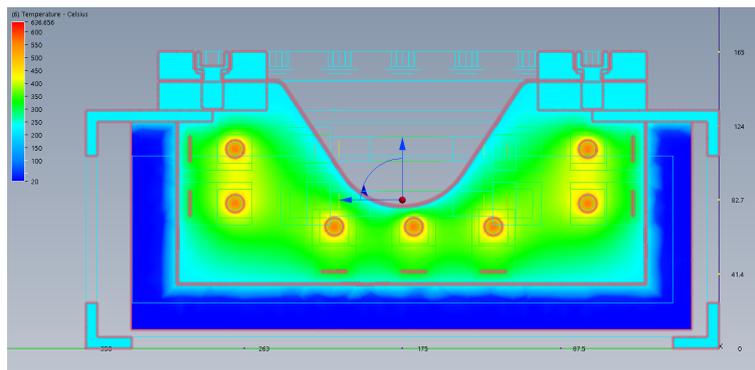


Figura 4.19: Perfil de temperatura no final do processo

Tendo como base as simulações realizadas no software CFD, foi fabricado o dispositivo de aquecimento universal. No trabalho a morno ocorre uma recuperação parcial da ductilidade do material e a tensão de conformação situa-se numa faixa intermediária entre o trabalho a frio e a quente. Em termos de conformação mecânica, chama-se de: (HELMAN; CETLIN, 1993).

- Trabalho a Quente (TQ), aquele que é executado em temperaturas acima de 0,5 da temperatura de fusão ( $T_f$ );
- Trabalho a Morno (TM), executado na faixa compreendida (grosseiramente) entre 0,3 e 0,5  $T_f$ ;

- Trabalho a Frio (TF), aquele que é executado entre 0 e 0,3 Tf.

A temperatura de trabalho pode variar de 198,1 °C à 330,15 °C, operando-se dentro de uma faixa na qual se tenha uma temperatura de trabalho a morno e sempre abaixo da temperatura de recristalização do material.

A deformação mecânica confere ao material endurecimento devido à mudança da sua microestrutura e ao acúmulo de tensão, em função da formação de defeitos e discordâncias. Por sua vez, o tratamento térmico aplicado, sem que ocorra a fusão, fará com que parte dessa energia seja liberada rearranjando a microestrutura, provocando o amolecimento do material. Essa segunda parte do processo é conhecida como recristalização. Normalmente, a recristalização é precedida por uma etapa chamada de recuperação, quando muitos defeitos e discordâncias são eliminados, (LOW et al., 2000).

O aquecimento traz vantagens ao processo como melhora da maleabilidade, redução do retorno elástico e do tempo de conformação, mas introduz uma variável de difícil controle, que é a dilatação da peça pelo calor.

Na tentativa de não alcançar a temperatura de recristalização do material, que gira em torno de 240°C, para as ligas 1050 e 3003 (LOW et al., 2000), visando reduzir as modificações da microestrutura do material, todas as conformações com a introdução de aquecimento ficaram abaixo do 230°C.

#### **4.4.2 Validação dispositivo de aquecimento**

Realizando-se testes preliminares para conferir o funcionamento do sistema, ainda foram encontradas algumas dificuldades, sendo a principal delas o posicionamento do sensor de temperatura. Testes práticos foram realizados posicionando-se o sensor na base inferior do dispositivo, longe da chapa, entretanto ele desligava as lâmpadas antes mesmo do processo de estampagem ocorrer, em aproximadamente 7 (sete) segundos.

O sensor de temperatura foi posicionado próximo à chapa a ser conformada para se obter uma temperatura homogênea do sistema, já que, conforme perfil de temperatura apresentado na Figura 4.20, essa é a região que mais se aproxima da temperatura real da chapa a ser conformada.

O sensor de temperatura foi inserido na chapa de apoio do lado esquerdo e regulado para realizar o desligamento automático de todas as resistências quando alcançam a temperatura de 300 °C, obtendo-se assim uma temperatura média durante o processamento de 160 °C sobre a chapa de alumínio de 1mm de espessura do início até o fim do processo, que durou 44 minutos. Para se iniciar o processo, é necessário alcançar uma temperatura 160 °C na chapa a ser conformada, o tempo inicial de aquecimento nesse caso foi de 22 minutos.

A temperatura foi medida constantemente durante o processamento utilizando-se uma câmera

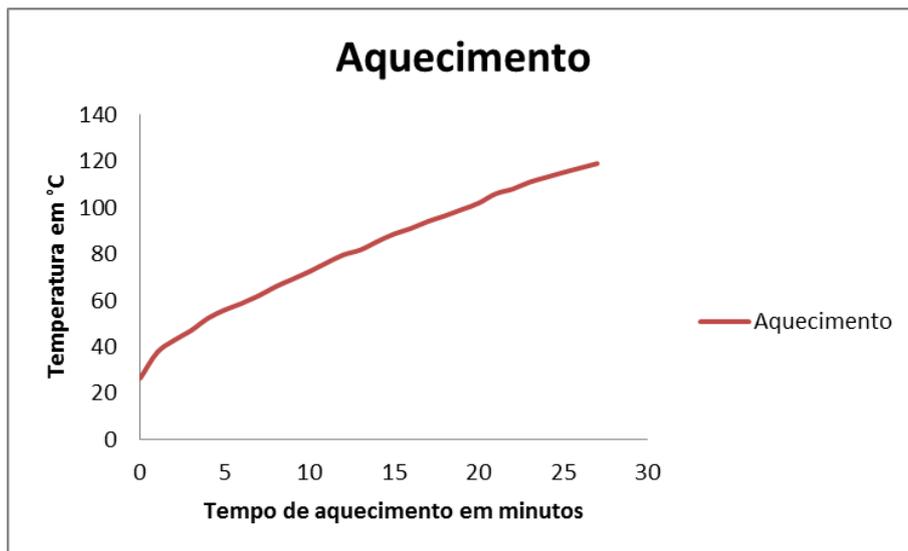


Figura 4.20: Curva de aquecimento para validação do dispositivo

térmica e um termômetro de infravermelho. A câmera térmica foi utilizada principalmente para verificar se o dispositivo de aquecimento possuía ponto de fuga de calor e para verificar como se comporta o fluxo de calor durante uma estampagem. O termômetro infravermelho foi utilizado para verificar a temperatura da chapa durante o processamento.

A Figura 4.20 apresenta o perfil real de temperatura no dispositivo extraído pela câmera térmica. A imagem da esquerda Figura 4.21 apresenta uma visão inicial do aquecimento, após 20 minutos, e a figura da direita Figura 4.21 (b) apresenta o perfil ao final de uma estampagem de 64 minutos, onde se verifica que o aquecimento na parte inferior do dispositivo que fica em contato com a mesa da máquina atinge uma temperatura máxima de 26°C, temperatura ambiente do dia do processamento.

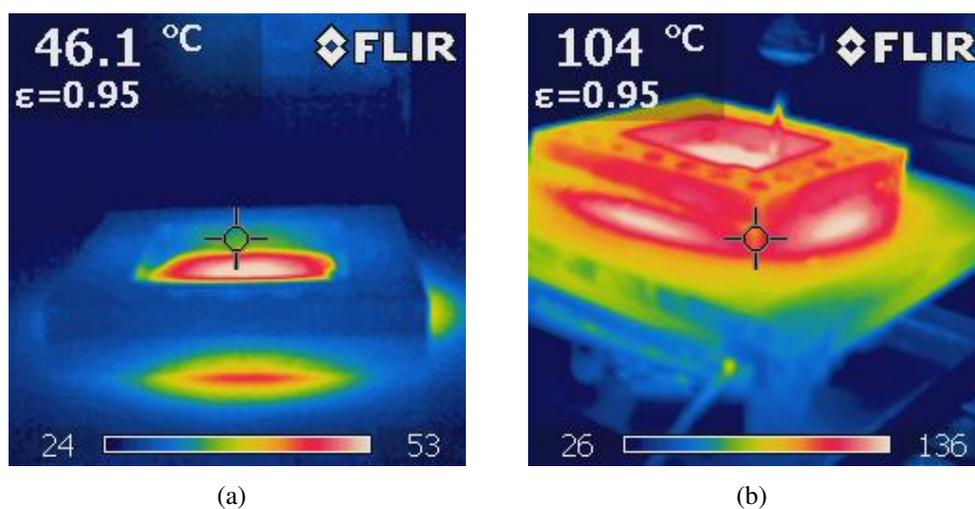


Figura 4.21: Perfil inicial de temperatura (a) Perfil final de temperatura (b).

A análise comparativa da Figura 4.18 e Figura 4.19 mostra que na simulação computacional, a base do dispositivo sofre aquecimento, chegando a 200 °C, enquanto que na foto do teste prático, realizada por câmera térmica (Figura 4.21) observa-se que a base não sofreu aquecimento, permanecendo à temperatura ambiente.

Para análise do potencial de aquecimento do dispositivo, foi traçada a curva de aquecimento do dispositivo por meio da realização de medições de 30 em 30 segundos com dois instrumentos de medição: um termômetro laser modelo FU 900EN 00 com um range de temperatura de -50 a 900 °C, erro de  $\pm 1,5$  °C; e uma câmera térmica FLIR I40 com range de temperatura de -20 a 350 °C e erro de  $\pm 2$  °C.

Nessa análise do potencial de aquecimento, observou-se que ele consegue alcançar no máximo a temperatura de 160°C, resultando em uma temperatura máxima no final do processamento de 180°C, pois a chapa conformada fica mais próxima às lâmpadas. Conforme a curva de aquecimento traçada, observa-se que a temperatura de 120°C é atingida em 30 minutos. Esta será a temperatura inicial de conformação.

# Capítulo 5

## Forças no Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples

Para melhor entendimento de como pode ser calculada a força de estampagem incremental é necessário conhecer as formulações matemáticas existentes para o cálculo de força em processos semelhantes. Os cálculos de força para o processo de estampagem convencional não levam em consideração a velocidade de deformação, a rotação da ferramenta ou outros parâmetros utilizados no processo.

Neste capítulo, realiza-se uma análise comparativa entre as equações matemáticas já existentes na literatura com as desenvolvidas nesta tese, ainda realizando uma mistura das formulações matemáticas, principalmente no formula de calculo de área de contato da ferramenta/chapa, introduzindo cálculos de área de contato ferramenta peça diferentes para observar o resultado final de predição de forças do processo de SPIF.

### 5.1 Modelo de área de contato entre ferramenta e peça

Dada uma esfera de raio  $R$ , a figura 5.1 apresenta a formação de calotas esféricas. A área em cor azul representa a extremidade da ferramenta em contato com a chapa. O raio da esfera é  $R$ , e o raio da base da calota esférica é  $r$ . A altura mede  $h$  que corresponde ao passo vertical no eixo  $Z$ ,  $A_p$ .

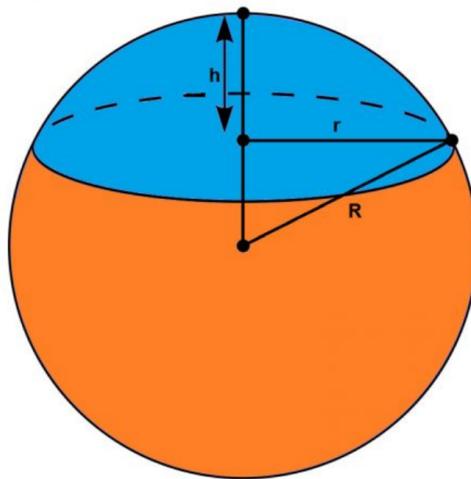


Figura 5.1: Calota esférica (INFOESCOLA, 2018)

Neste trabalho, para estimar a área de contato entre a ferramenta e a peça a ser conformada, será utilizada a fórmula da calota esférica, equação 5.1.

$$A = 2\pi R h \quad (5.1)$$

Onde:

- A - representa a área da calota esférica que expressa a área de contato da ferramenta com a chapa de conformação;
- h - representa a altura do passo de vertical em Z ( $A_p$ );
- R - representa o raio da esfera ou seja o raio da ferramenta de conformação.

Este novo cálculo de área de contato foi criado fazendo uma analogia considerando as zonas de fricção para ferramentas de fresamento e SPIF, como mostrado na figura 5.2 (BRANKER, 2011).

A Figura 5.2 mostra a comparação entre este conceito em SPIF e de usinagem, onde  $w$ , profundidade de corte,  $D$  é o diâmetro da ferramenta e taxa de alimentação,  $FD$ .

Esta fórmula matemática foi transformada para adequar-se ao processo de estampagem incremental. Como a área de contato da ferramenta e a peça ( $A$ ) a ser conformada depende da variação do  $A_p$ , apresentando a equação com os mesmos dados utilizados no processo, a fórmula 5.1 foi reescrita na forma da equação 5.2

$$A = 2\pi r A_p \quad (5.2)$$

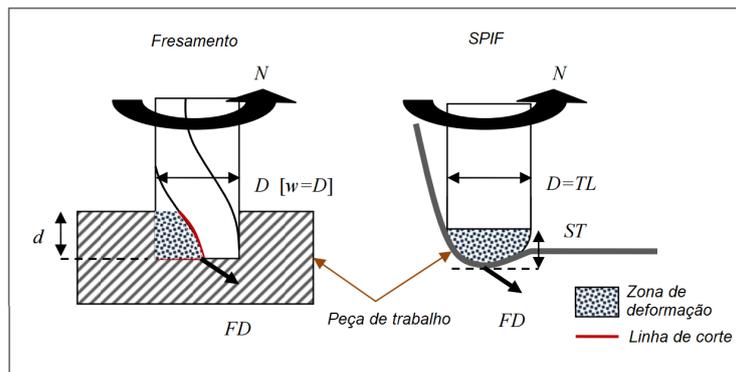


Figura 5.2: Comparação do parâmetro principal em SPIF e Fresamento (BRANKER, 2011)

Desconsiderando o retorno elástico do material, a área a ser conformada corresponde ao valor de penetração da ferramenta na chapa.

## 5.2 Projeto de experimento de força

O processo de SPIF pode ser dividido em alguns passos: fixação da chapa, descrição do material a ser utilizado, definição dos parâmetros de processo, programação CAD/CAM, setup da máquina, execução dos ensaios planejados e aquisição de força. O fluxograma das atividades foi detalhado utilizando o programa IDEF0, conforme apresentado no capítulo 4 do presente documento, figura 4.2, e a análise de forças está descrita na sub-atividade A5, detalhada na figura 4.9, também do capítulo anterior.

## 5.3 Fixação

Para a realização do experimento utilizou-se um centro de usinagem CNC da Haas (Mini Mill), projetada sobre um dispositivo específico de fixação de chapa, que foi montado sobre um dispositivo piezoelétrico (Apêndice C). A programação da máquina realizada pelo software Esprit CAM (Apêndice F).

A Figura 5.3 mostra a montagem do conjunto de análises de forças, que é composto por dois outros dispositivos: um de fixação e o dispositivo piezoelétrico. O dispositivo de fixação é aparafusado no dispositivo piezoelétrico e este, por sua vez, é fixado na mesa da máquina, este dispositivo trabalha com peças até a área máxima da mesa do piezoelétrico, evitando assim que o dispositivo de fixação exceda o tamanho do piezoelétrico para não criar novas fontes de erros ao sistema de aquisição.

Para a fixação da chapa no dispositivo de fixação foram utilizadas 8 parafusos M12 com um torque de 76 Nm aplicado com um torquímetro Tramontina Pro.

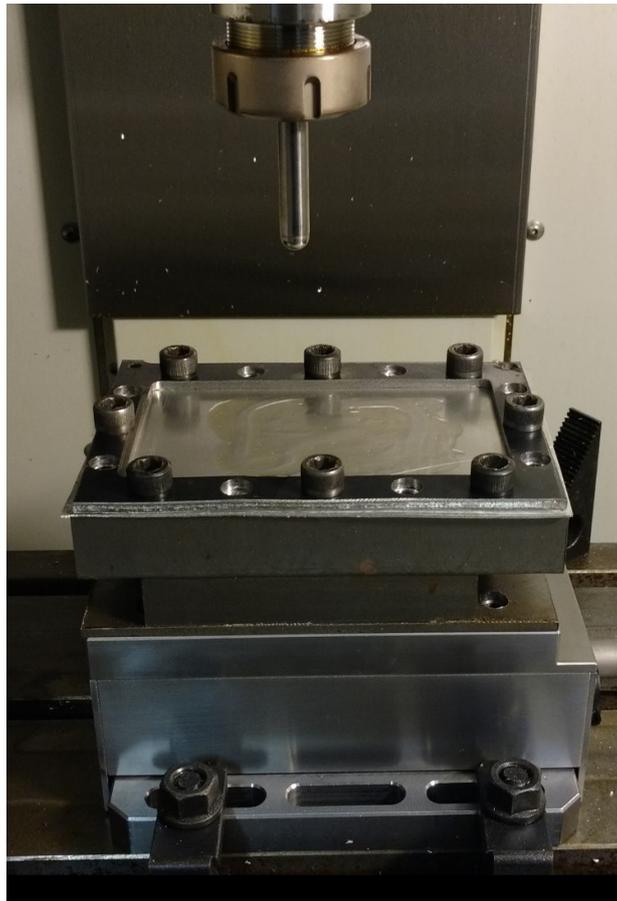


Figura 5.3: Dispositivo de força montado na máquina CNC

O dispositivo piezoelétrico é da Kistler modelo 9265B com seis componentes de força conectado ao amplificador Kistler 5017A de 8 canais.

### 5.3.1 Parâmetros de conformação e chapa conformada

A fim de estimar os limites de forças do processo de estampagem incremental no centro de usinagem Mini Mill da Haas, foram realizados testes preliminares de integridade da máquina. Os testes de usinagem foram realizados em chapa de alumínio liga 1050, para se obter valores de força da usinagem como referência no eixo Z, a fim de evitar danos devido a esforços axiais, direção Z, no fuso da máquina, obtendo-se valores da ordem de 1.000 N na usinagem que foi usado como valor limite para os ensaios associados ao SPIF. Assim, conhecendo valores de usinagem de alumínio liga 1050 com uma ferramenta de topo esférica de 12mm de diâmetros, adquire-se o valor máximo de referência do processo de conformação. A figura 5.4 apresenta a peça que foi usinada para se obter os dados iniciais.

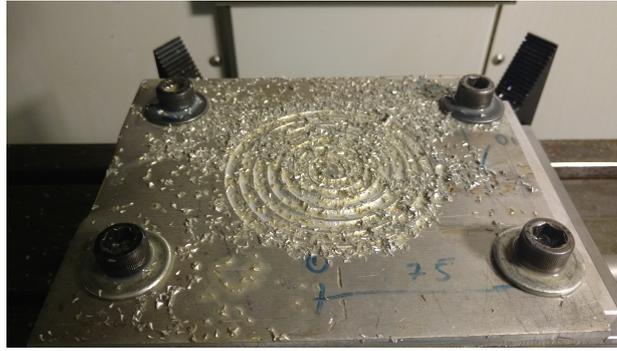


Figura 5.4: Peça usinada para dados iniciais de força

Os parâmetros de entrada no processo são passo vertical em Z ( $A_p$ ), rotação da ferramenta ( $\omega$ ) e velocidade de avanço no plano XY ( $f$ ), que no caso da trajetória da ferramenta em hélice, essa velocidade de avanço é para XYZ. Os valores de entrada variaram em:  $A_p$  de 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8, e 2.2 mm;  $f$  de 600, 1200, 2400 e 3600 mm/min;  $S$  de 600, 1200, 3000 e 6000 RPM. A tabela 5.1 apresenta as variáveis de entrada.

Tabela 5.1: Dados de entrada e suas variações

Parâmetros	$A_p$ (mm)	Avanço (mm/min)	Rotação (RPM)
Níveis	0.2	600	600
	0.4	1200	1200
	0.6	2400	3000
	1.0	3600	6000
	1.4	-	-
	1.8	-	-
	2.2	-	-

A variação de todos os testes de força realizados no Software DOE++ com o fatorial completo (Apêndice K) pode ser vista na Tabela 5.2.

A variação de todos os testes de força realizados, utilizando ferramentas com desgaste, pode ser vista na Tabela 5.3.

Foi utilizada chapa de alumínio liga 1050 com um formato retangular de 135 x 200mm, adequado para o tamanho do dispositivo piezoelétrico. O perfil da peça conformada pode ser visto na figura 5.5.

Tabela 5.2: Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos de força

Test	Entradas			Áreas			Saída
	Ap [mm]	f [mm/min]	S [RPM]	calculada Aeres	calculada Bansal	calculada Autor	tempo [min:seg]
1	0.2	600	600	3.5617	0.0041	7.8688	34:00
2	0.2	600	1200	3.5617	0.0041	7.8688	34:00
3	0.2	600	3000	3.5617	0.0041	7.8688	34:00
4	0.2	600	6000	3.5617	0.0041	7.8688	34:00
5	0.2	1200	3000	3.5617	0.0041	7.8688	17:00
6	0.2	3600	3000	3.5617	0.0041	7.8688	05:40
7	0.2	3600	600	3.5617	0.0041	7.8688	05:40
8	0.4	1200	3000	6.9911	0.0167	15.7376	08:30
9	0.4	3600	3000	6.9911	0.0167	15.7376	02:50
10	0.4	3600	6000	6.9911	0.0167	15.7376	02:50
11	0.6	600	600	10.2887	0.0377	23.6065	11:21
12	0.6	600	3000	10.2887	0.0377	23.6065	11:21
13	0.6	600	6000	10.2887	0.0377	23.6065	11:21
14	0.6	1200	3000	10.2887	0.0377	23.6065	05:41
15	0.6	2400	3000	10.2887	0.0377	23.6065	02:50
16	0.6	3600	3000	10.2887	0.0377	23.6065	01:38
17	0.6	3600	6000	10.2887	0.0377	23.6065	01:38
18	1.0	600	600	16.6388	0.1069	39.3442	06:48
19	1.0	1200	3000	16.6388	0.1069	39.3442	03:24
20	1.0	3600	3000	16.6388	0.1069	39.3442	01:08
21	1.0	3600	6000	16.6388	0.1069	39.3442	01:08
22	1.4	600	600	22.1709	0.2055	55.0818	04:52
23	1.4	1200	3000	22.1709	0.2055	55.0818	02:26
24	1.4	3600	3000	22.1709	0.2055	55.0818	00:49
25	1.4	3600	6000	22.1709	0.2055	55.0818	00:49
26	1.8	600	600	27.3342	0.3398	70.8195	03:48
27	1.8	1200	3000	27.3342	0.3398	70.8195	01:54
28	1.8	3600	3000	27.3342	0.3398	70.8195	00:38
29	1.8	3600	6000	27.3342	0.3398	70.8195	00:38
30	2.2	1200	3000	31.9847	0.5076	86.5572	01:33
31	2.2	3600	3000	31.9847	0.5076	86.5572	00:31
32	2.2	3600	6000	31.9847	0.5076	86.5572	00:31
33	2.2	600	60	31.9847	0.5076	86.5572	03:06

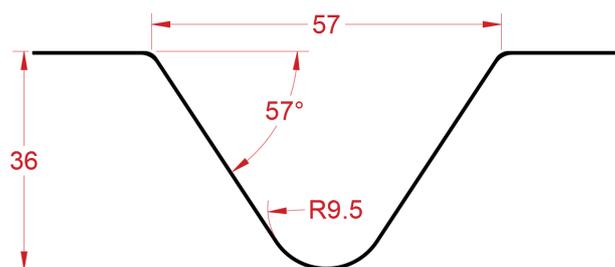


Figura 5.5: Perfil da peça conformada no ensaio de força, medida em mm.

Tabela 5.3: Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos de força utilizando ferramentas com desgaste

Teste de força com ferramenta desgastada com 0.223mm							
Teste	Ap [mm]	f [mm/min]	S [RPM]	Áreas Calculadas			Tempo [min:seg]
				Aeres	Bansal	Autor	
01	0.6	3600	6000	10.2887	0.0377	23.6065	01:38
02	1.4	1200	3000	22.1709	0.2055	55.0818	02:26
Teste de força com ferramenta desgastada com 0.220mm							
03	0.6	3600	6000	10.2887	0.0377	23.6065	01:38
04	1.4	1200	3000	22.1709	0.2055	55.0818	02:26
Teste de força com ferramenta desgastada com 0.174mm							
05	0.6	3600	6000	10.2887	0.0377	23.6065	02:26
06	1.4	1200	3000	22.1709	0.2055	55.0818	02:26
Teste de força com ferramenta desgastada com 0.105mm							
07	0.6	3600	6000	10.2887	0.0377	23.6065	02:26
08	1.4	1200	3000	22.1709	0.2055	55.0818	02:26

## 5.4 Equação de estimativa da força de estampagem SPIF

Diversas equações são encontradas na literatura para avaliar a vida da ferramenta levando em conta os principais parâmetros envolvidos na usinagem, sendo a mais utilizada a equação desenvolvida por Taylor. Essa equação foi mais tarde expandida para considerar outros parâmetros importantes como avanço (f), profundidade de corte (Ap) e um parâmetro de desgaste (MONTALVÃO et al., 2014).

Mesquita (1980) propôs um trabalho que relaciona as variáveis de usinagem com a fórmula expandida de Taylor modificada. Ferraz (2008), com o objetivo de apresentar e avaliar um novo modelo algébrico para descrever o desgaste de ferramenta de corte, no processo de usinagem de torneamento, utilizou-se do trabalho de Mesquita (1980) e realizou análise e determinação dos parâmetros da estrutura algébrica de Taylor tendo o desgaste da ferramenta de corte como variável dependente e obteve resultados satisfatórios.

Vários pesquisadores expressaram algebricamente a relação entre as variáveis do processo de usinagem, mas se desconhece que alguém tenha expressado as forças de conformação no processo de estampagem incremental. Desta forma, seguiu-se essa mesma estratégia para obtenção dos parâmetros da estrutura algébrica de Taylor, visando apresentar um novo modelo algébrico que descreva a força de conformação do processo de estampagem incremental de ponto simples.

Assim, baseando-se na equação 5.3 e realizando adaptações dos parâmetros para descrever as

forças do processo de estampagem incremental SPIF em relação aos parâmetros de conformação, chegou-se à equação 5.4.

$$V_b = CV^E T^F f^G A_p^H \quad (5.3)$$

Onde:

- $V_b$  –a variável dependente é o desgaste de flanco da ferramenta de corte dado em (mm);
- V, T, f,  $A_p$  –as variáveis independentes são a velocidade de corte (mm/min); o tempo de corte (min); avanço (mm/volta) e passo vertical em Z (mm), respectivamente;
- C, E, F, G,H –são os parâmetros do modelo algébrico proposto, que devem assumir valores diferentes para cada tipo de material da peça te.

$$F_{(XouYouZ)} = qA^k * f^w * S^v * Ap^l \quad (5.4)$$

Onde:

- $F_{(XouYouZ)}$  –a variável dependente é o desgaste de flanco da ferramenta de corte dado em Newtons (N);
- A, f, S,  $A_p$  –as variáveis independentes são área de contato da ferramenta com a chapa ( $mm^2$ ); taxa de alimentação (mm/min); rotação da ferramenta (RPM); e passo vertical em Z (mm), respectivamente;
- q, k, w, v, l –são os expoentes das variáveis de processamento do modelo algébrico, estes valores devem ser alterados para cada tipo de processamento ou modificação do processo como mudança de material, ferramenta, temperatura do processo, dentre outros.

Para determinação dos parâmetros do modelo algébrico proposto, serão utilizados os experimentos do processo de conformação por SPIF, que serão apresentados. Durante o processo, serão adquiridos os valores de força de processamento, específica para cada eixo,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , ( $F_{x_i}$ ) que serão atingidos em cada condição de conformação utilizada ( $A_i$ ,  $f_i$ ,  $S_i$ ,  $A_{p_i}$ ), onde i variou de 1 a n, assim como descreve a equação (5.5), a demonstração foi realizada apenas para  $F_x$  mas para a obtenção de  $F_y$  e  $F_z$  realiza-se o mesmo procedimento.

$$F_{x_i} = qA_i^k f_i^w f_i^v A_{p_i}^l \quad (5.5)$$

Para a determinação dos parâmetros q, k, w, v e l do modelo algébrico fez-se uso do logaritmo neperiano em ambos os lados da equação (5.5), obtendo-se assim a equação (5.6) :

$$\ln Fx_i = \ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i \quad (5.6)$$

Com base no desenvolvimento em modelos matemáticos, sempre há a existência de variáveis não controladas que passaremos a chamar de resíduos; representado por  $\epsilon_i$ , o resíduo em cada ponto  $i$  será dado pela seguinte expressão (5.7):

$$\epsilon_i = \ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i - \ln Fx_i \quad (5.7)$$

Supondo todos os possíveis resíduos, devido à influencia de todas as variáveis, tem-se a soma quadrática dos resíduos dada pela equação (5.8):

$$M = \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N (\ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i - \ln Fx_i)^2 \quad (5.8)$$

Considerando  $M$  como uma função das incógnitas  $q$ ,  $k$ ,  $w$ ,  $v$  e  $l$ , a condição para que a soma dos quadrados dos resíduos  $M$  seja mínima é que a derivada parcial de  $M$ , em relação a cada uma das derivadas parciais, seja nula [equação (5.9)].

$$\frac{\delta M}{\delta q} = 0; \quad \frac{\delta M}{\delta k} = 0; \quad \frac{\delta M}{\delta w} = 0; \quad \frac{\delta M}{\delta v} = 0; \quad \frac{\delta M}{\delta l} = 0 \quad (5.9)$$

Desenvolvendo-se as derivadas tem-se o conjunto de equações (5.10):

$$\begin{aligned} \frac{\delta M}{\delta q} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i - \ln Fx_i) \frac{1}{q} = 0; \\ \frac{\delta M}{\delta k} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i - \ln Fx_i) \ln A_i = 0; \\ \frac{\delta M}{\delta w} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i - \ln Fx_i) \ln f_i = 0; \\ \frac{\delta M}{\delta v} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i - \ln Fx_i) \ln S_i = 0; \\ \frac{\delta M}{\delta l} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln q + k \ln A_i + w \ln f_i + v \ln S_i + l \ln Ap_i - \ln Fx_i) \ln Ap_i; \end{aligned} \quad (5.10)$$

Considerando que o somatório  $\sum \ln C = N \ln C = NI$ , as equações (5.10) passam a ter a configuração das equações (5.11).

$$NI + k \sum_{i=1}^N \ln A_i + w \sum_{i=1}^N \ln f_i + v \sum_{i=1}^N \ln S_i + l \sum_{i=1}^N \ln ap_i - \sum \ln F x_i = 0; \quad (5.11a)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln A_i + k \sum_{i=1}^N (\ln A_i)^2 + w \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln A_i + v \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln A_i + l \sum_{i=1}^N \ln Ap_i \cdot \ln A_i - \sum \ln F x_i \ln A_i = 0; \quad (5.11b)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln f_i + k \sum_{i=1}^N \ln A_i \cdot \ln f_i + w \sum_{i=1}^N (\ln f_i)^2 + v \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln f_i + l \sum_{i=1}^N \ln Ap_i \cdot \ln f_i - \sum \ln F x_i \ln f_i = 0; \quad (5.11c)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln S_i + k \sum_{i=1}^N \ln A_i \cdot \ln S_i + w \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln S_i + v \sum_{i=1}^N (\ln S_i)^2 + l \sum_{i=1}^N \ln Ap_i \cdot \ln S_i - \sum \ln F x_i \ln S_i = 0; \quad (5.11d)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln Ap_i + k \sum_{i=1}^N \ln A_i \cdot \ln Ap_i + w \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln Ap_i + v \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln Ap_i + l \sum_{i=1}^N (\ln Ap_i)^2 - \sum \ln F x_i \cdot \ln Ap_i = 0; \quad (5.11e)$$

Portanto, conforme as equações (5.11) tem-se 5 equações e 5 incógnitas (q, k, w, v, e l). A solução desse sistema de equações heterogêneas será obtida utilizando-se o programa STADISK, (FERRAZ, 2008). Permitindo a determinação dos parâmetros algébricos da equação de estimativa de força.

## 5.5 Predição de Força de Estampagem para SPIF

Para a correlação das variáveis de entrada em relação aos parâmetros de saída do processo SPIF, a equação de estimativa de força foi utilizada. As correlações entre os parâmetros de entrada e saída foram obtidas pela resolução do sistema de equações 5.11 usando dados experimentais

extraídos de testes de conformação de liga de alumínio 1050 com chapas de 1mm de espessura.

A equação proposta foi um modelo matemático de regressão com 5 variáveis, assim deixando como variável dependente a força representada por  $F_{(XouYouZ)}$  que vai ser dada em Newtons, representa a forças nos eixos X, Y ou Z. Como variáveis independentes serão inseridos os valores dos parâmetros de entrada do processo "A", sendo a área de ferramenta em contato com a peça em  $\text{mm}^2$ , "f" que representa a taxa de alimentação no plano XY mm/min, "S" que representa a rotação da ferramenta em RPM e "Ap" que representa o passo vertical em Z em mm.

Os valores de q, K, W, V, l são parâmetros do modelo algébrico proposto, que deve assumir valores diferentes para cada tipo de material de peça a ser obtido pela resolução de um modelo de regressão multi-variável usando o software de análise estatística Statdisk Versão 12.0 e SPSS versão 13: (Apêndices H e I).

$$F_{(XouYouZ)} = qA^k * f^w * S^v * Ap^l \quad (5.12)$$

Desenvolvendo um modelo simples para calcular a força do processo onde:  $F_{(XouYouZ)}$  é a força de conformação nos eixos X, Y ou Z (obtido através de teste prático) A é a área de contato da ferramenta com a chapa, f é taxa de alimentação, S é velocidade de rotação, Ap é incremento em Z e os q, k, w, v e l são expoentes obtidos por software.

## 5.6 Passos dos experimentos

A análise de todo o processo de conformação segue os seguintes passos: a variação da força em relação ao aumento do Ap; a variação da força em relação ao aumento da fixação do Ap; a variação da forma em relação às variações de parâmetro; e ainda, analisar todas as variáveis juntas. Para isso foi utilizado um método de análise através do software DOE++, onde é possível analisar as variáveis individualmente e também em conjunto.

### 5.6.1 Perfil da curva de força para SPIF

Foram realizados 34 testes de conformação com diferentes dados de entrada. Após a realização desses testes, observa-se que existe uma curva padrão capaz de caracterizar o processo de SPIF, quando se conforma chapa de liga de alumínio 1050 com 1mm de espessura, utilizando uma ferramenta de aço SAE 1045 com 12,53mm de diâmetro, lubrificação de óleo VG68, sendo a geometria da peça um tronco cone.

Esta curva do perfil de força pode ser dividida em 3 (três) regiões distintas. Na primeira região tem-se o aumento da força do processo, que inicia com zero no início do processamento e chegando próximo de 450N. Na segunda região há uma pequena redução da força de conformação,

uma redução que é aproximadamente 10% da força máxima de processamento. Na terceira, tem-se a estabilização do processo e, logo em seguida, a finalização do processo de conformação, reduzindo a força a zero, Figura 5.6.

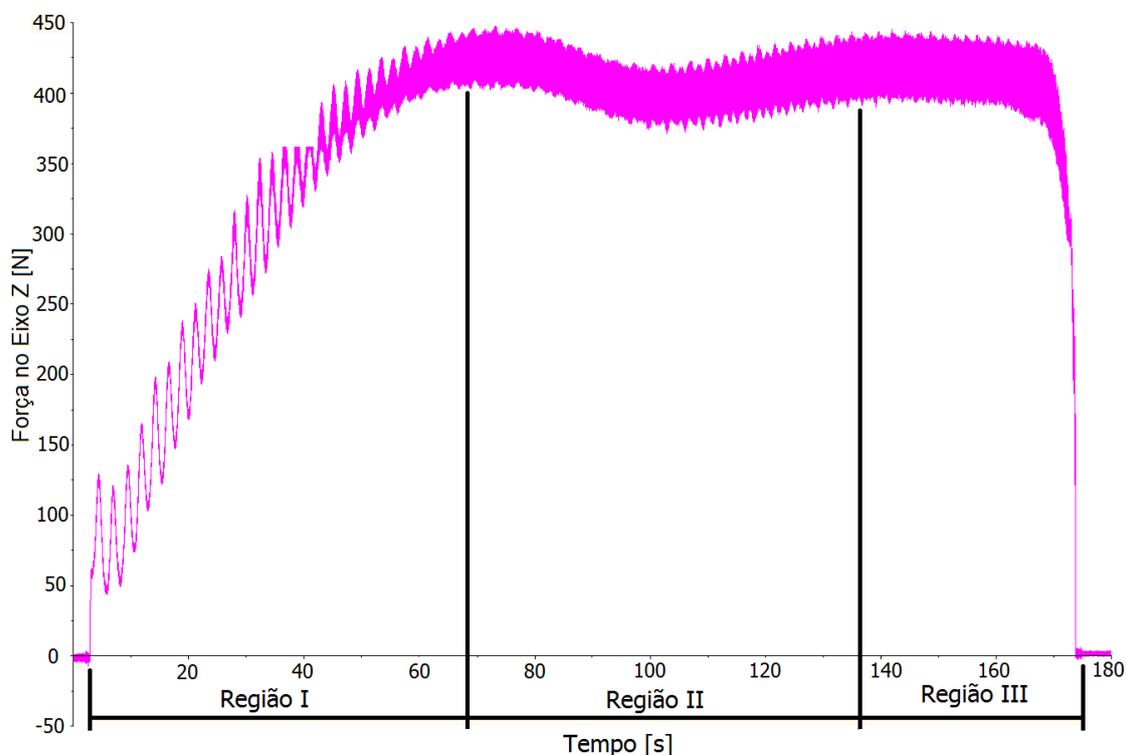


Figura 5.6: Curva padrão do processo para o eixo Z

A região 01 é onde ocorre o início do processo de conformação. Como o processo é incremental, à medida que a profundidade vai aumentando a área de contato da ferramenta com a chapa também aumenta, o contato se inicia pontualmente com uma área tendendo a zero, que vai aumentando até o valor de área referente ao passo vertical, que é o mesmo que profundidade de corte em Z. Porém essa área aumenta até uma profundidade média de 5 mm, pois partir desta profundidade o ângulo de parede da peça se mantém sem alteração e a área de contato ferramenta-chapa também se mantém constante, onde os valores das áreas serão calculadas através das equações 2.6, 2.10 e 5.2. Com a evolução do teste, a força vai aumentando até o limite de resistência da deformação plástica do material. Nesta região geralmente se atinge a força máxima de processamento, que é ponto mais alto da curva.

A região 02 da Figura 5.6 é caracterizada por uma redução na força de conformação, em média uma redução da força de 10% da força máxima de conformação. Neste momento a chapa base sofre uma deformação indesejada devido à força atingida no processo e à falta de apoio da chapa, assim em uma parte da peça onde deveria ficar plana pode ficar com uma inclinação de até 5°.

O detalhe da figura 5.7 apresenta um esboço da região de deformação indesejada, que geralmente ocorre nas áreas planas da peça. Para evitar esta deformação indesejada pode-se utilizar uma chapa de apoio próximo do perfil final desejado.

Na região 03 as forças de conformação ficam em um patamar geralmente na máxima força de conformação, sem muitas oscilações, isto se deve ao fato de que as deformações indesejadas, vistas na região 02 cessaram e a força atuante no processo atua única e exclusivamente para realizar a deformação plástica da chapa. No final desta região, a força começa a reduzir devido a mudança na geometria da peça e se inicia a conformação da parte final da peça que é uma semiesfera. Em seguida, a força reduz a zero pela finalização do processo.

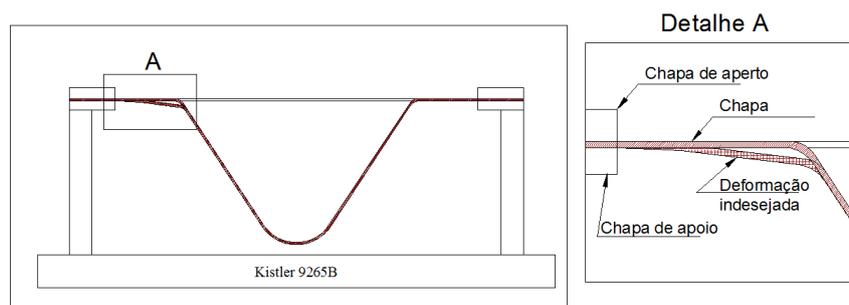


Figura 5.7: Deformação indesejada

Para se validar a hipótese das deformações indesejadas, foram realizados ensaios com o auxílio de chapa de apoio do perfil, deixando a chapa de apoio com o raio maior que o raio máximo da peça em 3 mm. Essa chapa servirá de apoio para o perfil da peça reduzindo assim as deformações indesejadas, onde se observou a mudança do perfil em curva de força do processo, não existindo a região 2 apresentada na figura 5.6.

A figura 5.8 apresenta a montagem do dispositivo juntamente com a chapa de apoio de perfil.

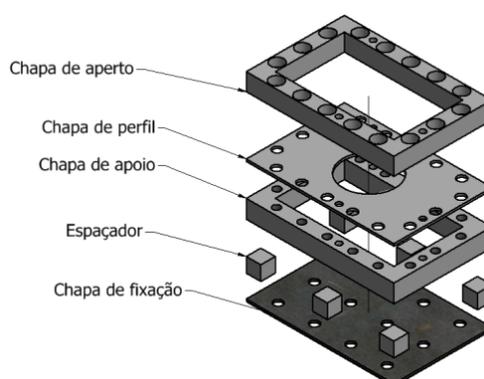


Figura 5.8: Dispositivo com chapa de apoio

Para todos os ensaios de força foi adquirido os gráficos dos valores de forças no eixos X, Y e Z, estes gráficos são apresentados no Apêndice B. A partir destes dados de força foram realizadas todas as análises de influência dos parâmetros em relação as forças.

## 5.6.2 Influência dos parâmetros em relação à força Z

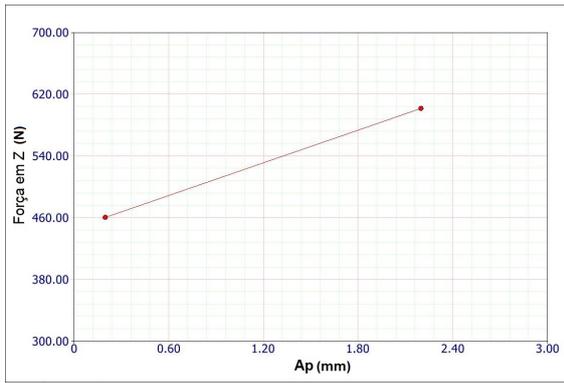
Para melhor compreensão do comportamento da força durante o processo de estampagem incremental, foi realizada uma análise das forças de conformação em Z, em relação às variáveis de entrada  $A_p$ , avanço e rotação, cujos gráficos são apresentados na figura 5.9.

Nesta figura pode-se observar que quanto maior o  $A_p$  inserido no processo, maiores são as forças a que o processo fica submetido. Com uma profundidade de corte ( $A_p$ ) de 0.2 mm o carregamento pode chegar até 460 N, enquanto que uma  $A_p$  de 2.2 mm o carregamento pode chegar até 602 N. Com um aumento de  $A_p$  em 11 vezes no valor inicial os valores forças aumentam em média 30%.

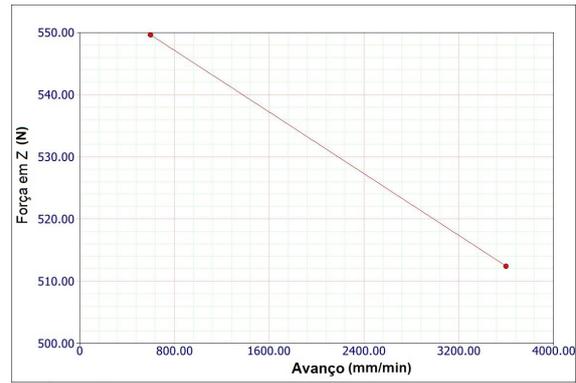
Os esforços de conformação tendem a aumentar quando a área de contato da ferramenta com a chapa aumentam, isto decorre do aumento do  $A_p$ . Realizando a trajetória da ferramenta em hélice não se obtém picos de força, pois o  $A_p$  é inserido no processo gradualmente, o caminho percorrido pela ferramenta para introduzir o  $A_p$  é uma helicóide. Assim o valor de  $A_p$  não é inserido todo de uma vez no processo, mas sim distribuído ao longo de uma volta toda na peça.

Em relação ao avanço, pode-se observar um comportamento próximo ao de um processo de usinagem, onde o aumento do avanço reduz a pressão específica de corte, devido ao aumento da velocidade de processamento, neste processo a força de conformação Z como em X e Y reduz a medida que o avanço aumenta. Assim, quando tem-se um avanço de 600 mm/min a força de conformação em Z é de aproximadamente 550 N. Quando trabalha-se com um avanço de 3600 mm/min obtêm-se uma força em Z de 512 N uma redução de força próxima de 8 %. Este comportamento, provavelmente se deve ao fato de que o aumento do avanço aumenta a geração de calor e assim reduzindo a resistência ao cisalhamento do material.

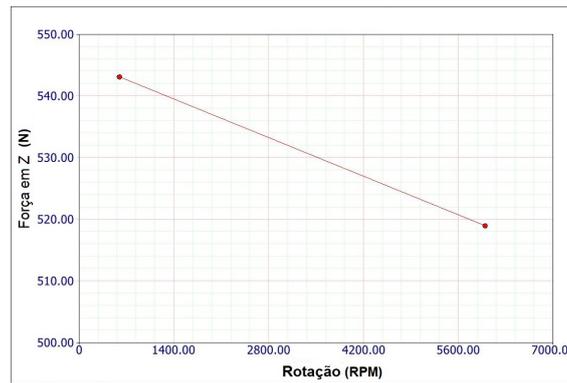
Como já era esperado, o aumento da rotação reduz a força de conformação, tendo em vista que o aumento da rotação aumenta o atrito entre a ferramenta e a chapa ocasionando o aumento da temperatura no ponto de conformação, a temperatura por sua vez aumenta a maleabilidade do material, facilitando a conformação. Quando o processo trabalha com uma rotação de 600 RPM a força no eixo Z está no valor aproximado de 543 N. Por outro lado, quando a rotação está em 6000 RPM o valor da força no eixo Z correspondente é 519 N, uma redução de aproximadamente 5 % na força. Este valor de redução de força não é muito significativo, mas aumento rotação auxilia no acabamento final da peça, pois a ferramenta passa várias vezes no mesmo ponto da peça realizando assim uma espécie de polimento, durante o processo de conformação, melhorando a qualidade superficial da peça final.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9: Força em Z em relação aos parâmetros de processo (a)  $A_p$ , (b) avanço e (c) rotação

### 5.6.3 Influência do $A_p$ na força Z

O tempo de processamento e os valores de  $A_p$  estão intimamente ligados, o incremento dos valores de  $A_p$  reduzem significativamente o tempo de conformação, porém junto com a redução do tempo vem o aumento de força de conformação. Enquanto o  $A_p$  aumenta mais de 11x, de 0.2 para 2.2 mm, as forças de conformação em Z aumentam menos de 30%, de 447 N para 591 N, em se tratando do processo de conformação com uma rotação de 6000 RPM. À medida que a rotação vai diminuindo o valor da força máxima em Z vai aumentando também gradualmente, para as rotações de 3000, 1200 e 600 RPM as forças máximas são de 603, 610 e 612 N, respectivamente. Figura 5.10.

Esta variação no incremento de força ocorre de forma similar em todos os eixos, o que muda é apenas a intensidade da força, pois a força máxima do processo no eixo X é de 309 N e de 298 N no eixo Y, bem inferiores aos valores no eixo Z, que são na ordem de 450 N.

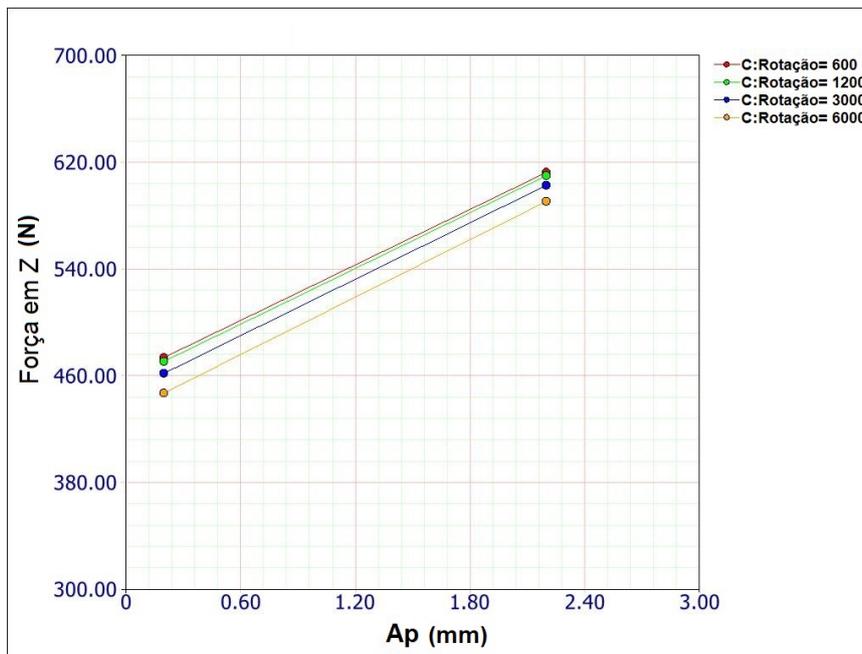


Figura 5.10: Gráfico de interação nas forças em Z com AP e rotação

Quando observa-se o comportamento da força no eixo Z correlacionando o Ap e o avanço, pode se afirmar que ele se assemelha ao comportamento da correlação de Ap e rotação, porém reduzem um pouco a diferença entre as variáveis, quando os valores de entradas são elevados. Independentemente do avanço, quando se aumenta o Ap, o valor da força em Z tende para um determinado valor máximo, conforme apresentado na Figura 5.11.

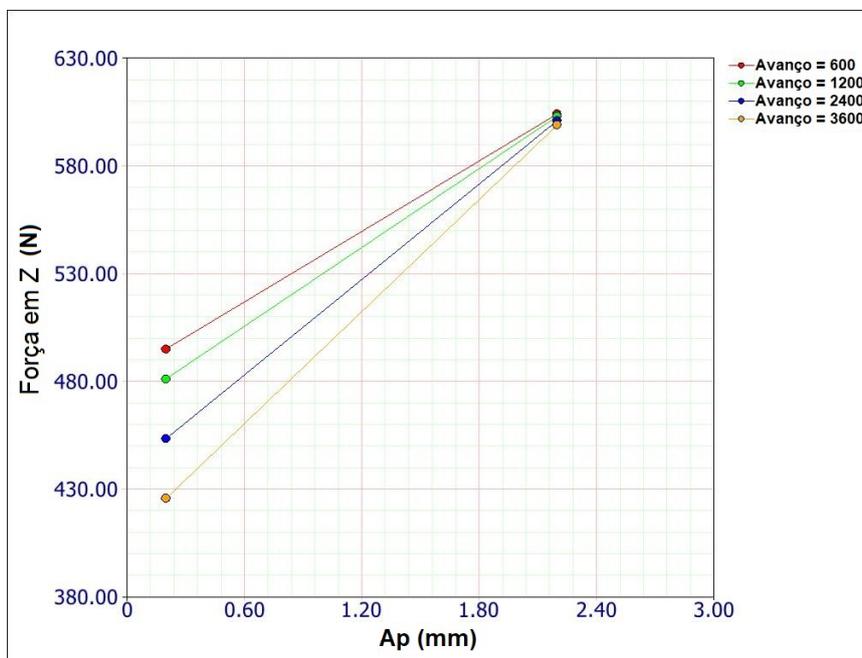


Figura 5.11: Gráfico de interação das forças em Z com AP e avanço

### 5.6.4 Influência da rotação na força Z

Após realização dos ensaios descritos na Tabela 5.2 e dos resultados de força apresentados pelo dispositivo piezoelétrico, traçou-se os gráficos das figuras 5.12 e 5.13 para análise da interação das forças em Z tanto com a rotação e o avanço, como com a rotação e o passo vertical (Ap), respectivamente.

Com os resultados obtidos e a avaliação da peça final, foi possível constatar que a rotação da ferramenta é importante para a melhoria da qualidade superficial da peça. Analisando a figura 5.12, observa-se que quando trabalha-se a rotação junto com o avanço consegue-se uma redução mais significativa da força de processamento no eixo Z. Com o aumento da rotação, tem-se uma redução nas forças de conformação, sendo que a força necessária para a conformação pode-se reduzir mais de 4%, à medida que se aumentam os valores de avanço. Quando é realizada a conformação com 6000 RPM é possível reduzir em média mais de 4% da força final no eixo Z em toda a gama valores de avanço utilizados.

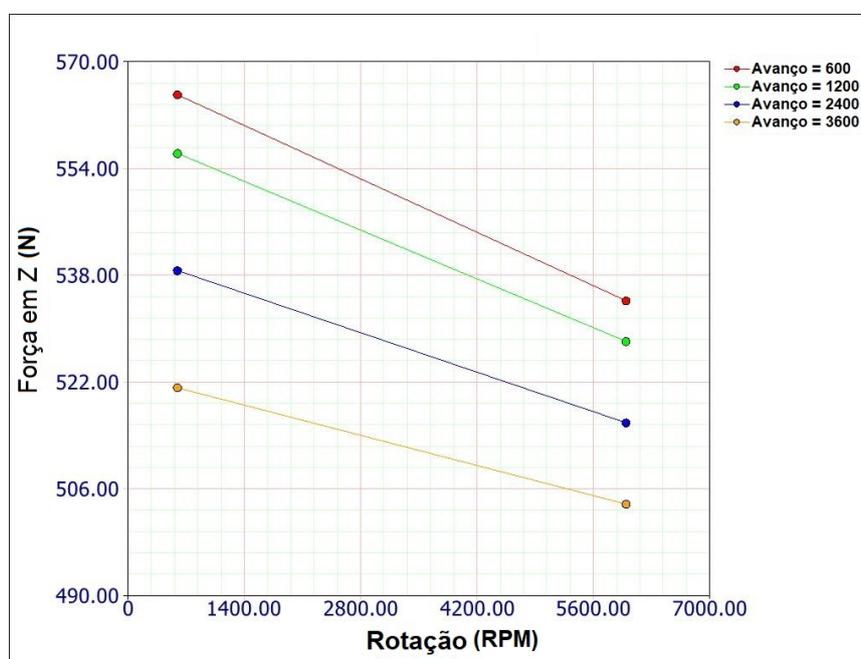


Figura 5.12: Gráfico de interação nas forças em Z com rotação e avanço

A figura 5.13 apresenta a relação de força no eixo Z com a rotação e o passo vertical em Z (Ap), descrevendo a força para cada valor de Ap inserido no processo. Assim pode-se observar que o comportamento da força em relação à rotação não se altera com a mudança do Ap. Nos ensaios realizados, com o aumento linear da rotação, a força sofreu redução também linear, independente do valor do Ap.

Para todos os valores de força alterando a rotação de 600 RPM para 6000 RPM reduz-se em média 5% do valor da força em Z. Ainda observa-se que a cada aumento de 0.2mm de Ap gera um incremento de 3% na força em Z.

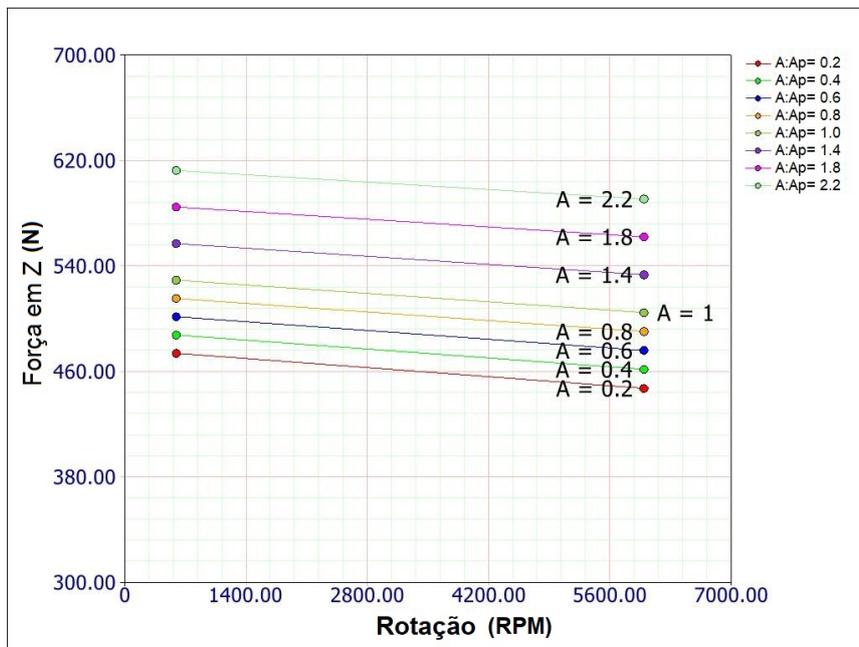


Figura 5.13: Gráfico de interação nas forças em Z com rotação e  $A_p$

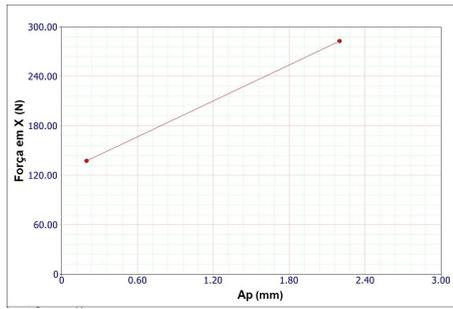
### 5.6.5 Influência dos parâmetros em relação à força X e Y

Para conseguir o entendimento total do comportamento das forças no processo de SPIF, foi realizada também a análise para os eixos X e Y e traçado os gráficos das figuras 5.14 e 5.15.

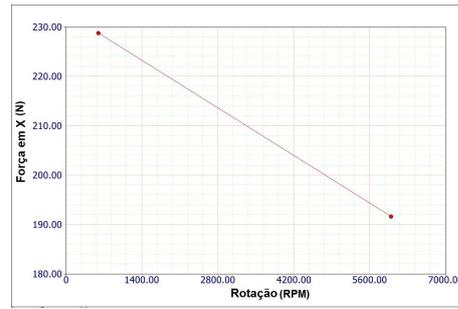
Com a análise dos gráficos supra citados, pode-se observar que o comportamento das forças em X e Y em relação ao  $A_p$  são similares ao comportamento das forças no eixo Z, estando os maiores esforços relacionados diretamente ao eixo Z.

Como pode ser observado nas figuras 5.14(a) e 5.15(a), quando o valor de  $A_p$  aumenta a força de conformação também aumenta, porém não na mesma proporção. Em média, quando o  $A_p$  é de 0.2mm a força no eixo X vale 137.53 N e no eixo Y corresponde a 179.96 N, analisando a outra extremidade da reta quando o  $A_p$  inserido é de 2.2 mm, o valor para o eixo X passa para 282.70 N, onde o aumento da força é de aproximadamente 200% e o incremento em  $A_p$  é de 11 vezes. Para o eixo Y o valor da força passa para 272.87 N, um aumento de um pouco maior de 50% da força inicial.

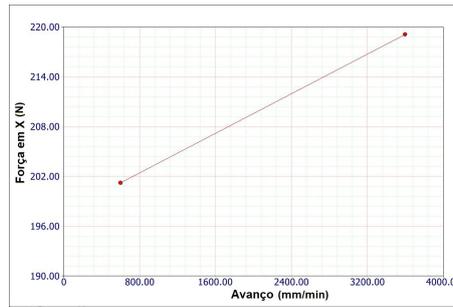
Este aumento de força é correspondente ao aumento da porção de material que está sendo conformado, assim a força aumenta para os três eixos X, Y e Z.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.14: Força em X em relação a (a) Ap (b) Rotação (c) Avanço

A rotação no processo gera atrito entre a ferramenta e a chapa a ser conformada, este atrito gera calor, facilitando assim a conformação do material, constatado pela redução da força de conformação. Este fato pode ser verificado para os 3 eixos X, Y e Z.

Os valores de força no eixo X com uma rotação de 600 RPM são em média 228.72 N e para Y em média são 244.31 N. Quando o valor de rotação chega ao máximo testado, 6000 RPM, foi obtida uma redução na intensidade da força de 20% no eixo X e de 17% para o eixo Y, passando as forças média para 191.60 N e 208.53 N respectivamente. Os gráficos das figuras 5.14(b) e 5.15(b) representam aos valores dos eixos X e Y, respectivamente, para todas as variações de rotação utilizadas no processo.

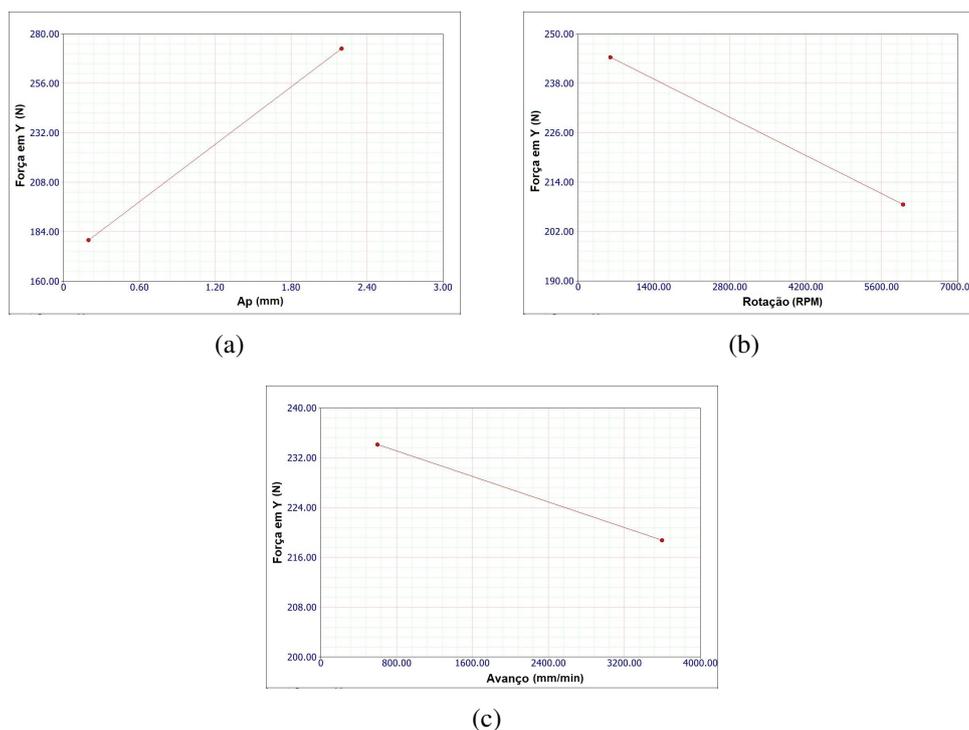


Figura 5.15: Força em Y em relação a (a) Ap (b) Rotação (c) Avanço

Conforme apresentado nos gráficos das figuras 5.14(c) e 5.15(c), as forças geradas no eixo X e Y em relação aos valores de avanço utilizados apresentam uma diferença não significativa, enquanto o valor de X sobe de 201.22 para 219.09 N os valores de Y reduzem de 234.11 para 218.73 N, isto nos pontos mais extremos da curva, cujos avanços são de 600 e 3600mm/min. Com o aumento do avanço em 600%, as forças em X aumentam em média 9% e em Y reduzem em média 7%. Existe uma variação pequena entre as forças X e Y, menor que 9%, que pode ser objeto de estudos futuros. Trabalhando com os parâmetros de avanços supracitados, a variação da força de conformação, dentro dos limites de processamento, não deve influenciar a qualidade do processo de conformação.

Correlacionando o módulo das forças em X e Y com o módulo da força em Z, realizando a divisão simples entre os módulos dessas forças consegue-se observar que a força Z é em média 2.682 vezes maior que a força X e em relação a força Y a força Z é em média 2.416 maior.

O erro médio para encontrar a força Z em relação à força dos eixos X e Y é em média 10% para os cálculos com valores de X e 1% para os cálculos com valores de Y, assim pode-se utilizar um valor médio de 2,5 vezes que, multiplicando pelo valores de  $F_x$  e  $F_y$ , obtém-se os valores de forças de  $F_z$ .

### 5.6.6 Erro no processo e usinagem de material base

Durante a sequência de processamento ocorreram problemas graves com a conformação da peça em dois ensaios, decorrendo na usinagem da chapa-base e no desgaste excessivo da ferramenta.

Os parâmetros utilizados nestes testes foram:  $A_p$  0.6 mm, 6000 RPM e 3600 mm/min no primeiro teste. O resultado do processamento pode ser visto na figura 5.16 e os parâmetros de  $A_p$  1,4 mm, 3000 RPM e 1200 mm/min, obtendo como resultado a figura 5.17. Esses dois testes foram realizados em momentos distintos e com ferramentas de conformação novas, conformando a geometria da figura 5.5.

Com 3 mm de profundidade de processamento a ferramenta começou a usinar a chapa a ser conformada, gerando cavaco em excesso, tal fato pode ter ocorrido por 3 motivos: lubrificação insuficiente, ferramenta ruim ou material da chapa aderido na ponta da ferramenta de conformação, gerando assim arestas postiças de corte. Dentre esses motivo, o mais provável é a lubrificação insuficiente.



Figura 5.16: Erro de processamento com parâmetros  $A_p$  0.6 mm, S6000 RPM e F3600 mm/min



Figura 5.17: Erro de processamento com parâmetros  $A_p$  1.4 mm, S3000 RPM e F1200 mm/min

A falta de lubrificação pode ter ocorrido pelo fato do óleo lubrificante não estar espalhado em

toda a peça ou não haver lubrificante na primeira região de contato entre a ferramenta e a chapa. Foi observado que, possivelmente devido à uma lubrificação deficiente, ocorreu uma adesão do material da chapa na ponta da ferramenta de conformação, criando uma aresta postiça e gerando assim um gume de corte na ferramenta de conformação, propiciando a usinagem irregular do material.

### 5.6.7 Análise Espectral

Nos insumos previstos inicialmente, a ferramenta de conformação era nova, sem desgaste, com 12,53 mm de diâmetro, conformando chapa de liga de alumínio 1050 com 1 mm de espessura. Para realizar a análise espectral, identificou-se frequências correlatas ao processo de conformação. Afim de verificar a assinatura espectral do desgaste da ferramenta foi realizada uma segunda rodada de ensaios de conformação, com ferramentas que apresentavam desgaste conhecidos. A tabela 5.4 apresenta os ensaios planejados com ferramenta com desgaste da ordem de 0.1mm a 0.223mm.

#### 5.6.7.1 Ferramenta sem desgaste

No processo de aquisição de dados de força com o dispositivo piezoelétrico, Kistler 9265B, foi realizado o levantamento dos dados de frequência. As componentes da força de estampagem em X, Y e Z, mostradas no domínio do tempo, foram mapeadas por domínio da frequência, com uma frequência de amostragem de 1200 Hz. Desta forma, é possível a aquisição de sinais de frequência sem aliasing<sup>1</sup> de até 600 Hz, se presentes no sinal. Foi realizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a fim de realizar uma análise espectral do sinal e identificar as frequências preponderantes no processo e sua amplitude. A partir da FFT observa-se que existe uma frequência característica associada à rotação da ferramenta indicando um contato permanente da ferramenta com a peça onde a frequência característica pode ser calculada como:  $F = RPM/60 (Hz)$ .

Nessa equação observa-se que com a modificação da rotação o sinal de frequência se modifica, mantendo picos de amplitude em valores que se repetem como padrão do processo. Com rotação de 600, 1200, 3000 e 6000 RPM ocorrem picos de 10, 20, 50 e 100Hz respectivamente. Outra componente de frequência predominante no sinal é o valor de 60 Hz associado à frequência da rede elétrica.

Como os ensaios foram realizados predominantemente com ferramenta sem desgaste, não foram detectados descontinuidades ou frequência características ao padrão de desgaste dos primeiros ensaios.

Quando se verifica os picos de amplitude (magnitude em Decibéis) que ocorrem em cada

---

<sup>1</sup>Caso a frequência de amostragem não seja suficientemente alta, ocorre a sobreposição do espectro (aliasing), impossibilitando recuperar o sinal original

rotação específica, pode-se observar que quanto maior o avanço, menor a magnitude. Como exemplo, pode-se utilizar o processamento com o Ap de 0.6mm, rotação de fixada em 3000 RPM, variando o avanço em 1200, 2400 e 3600 mm/mim obtemos em 50Hz com amplitude de 19, 15 e 8 na componente de força em X; 18, 15 e 8 no em Y; e a componente em Z com valores de 9, 4 e 0.2, respectivamente.

As figuras 5.18 e 5.19 apresentam a característica da frequência de dois processos de conformação com parâmetros de processamento diferentes, onde é possível ver a variação dos valores da frequência em relação aos parâmetros utilizados.

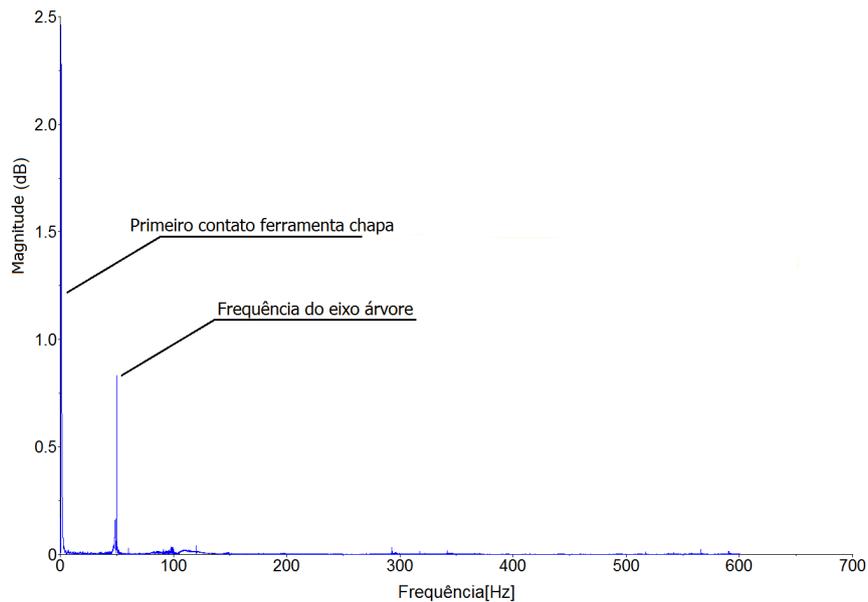


Figura 5.18: Frequência do eixo X Ap 1.8mm S3000RPM F3600mm/min

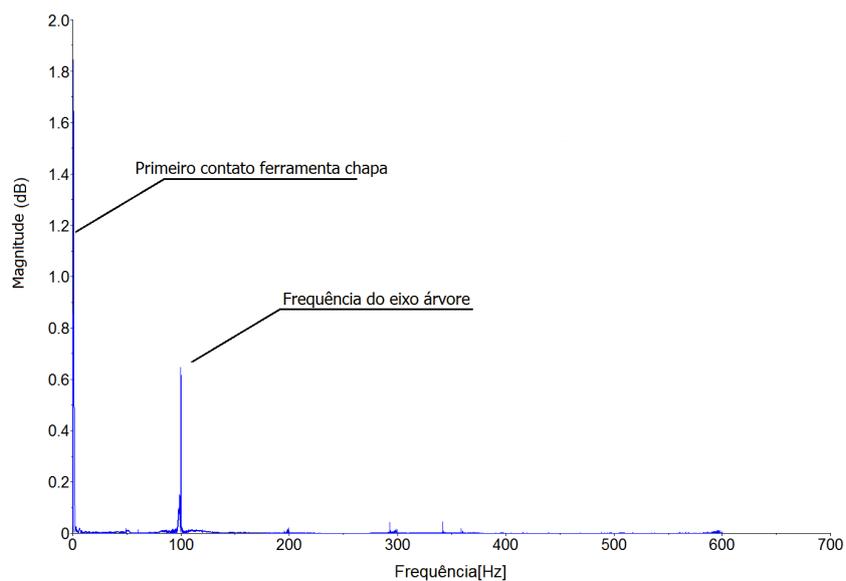


Figura 5.19: Frequência do eixo X Ap 2.2mm S6000RPM F3600mm/min

### 5.6.7.2 Ferramenta com desgaste

Para analisar o efeito do desgaste da ferramenta nas forças de conformação foram utilizadas quatro ferramentas com desgaste diferentes, sendo os valores de desgaste de 0.223, 0.220, 0.174 e 0.105 mm. Estas ferramentas são oriundas de trabalhos de estampagem incremental tendo sido descartadas por estarem gerando inconformidades no estampagem. O perfil de uma ferramenta com desgaste pode ser vista na figura 5.20.

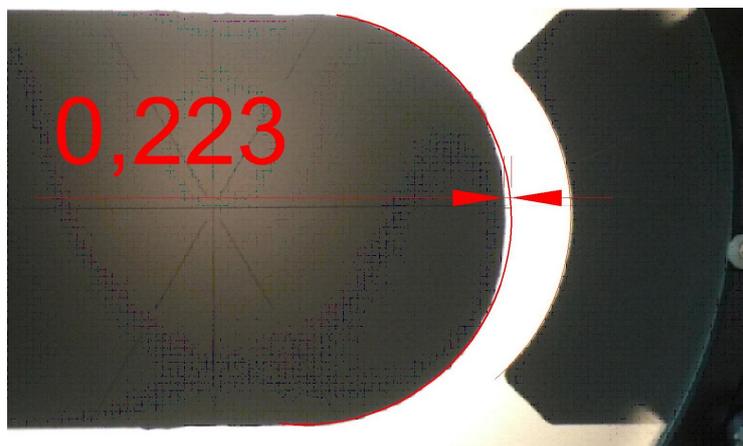


Figura 5.20: Ferramenta com desgaste

Os parâmetros de processamento utilizados juntamente com as forças obtidas no processo são apresentados na tabela 5.4, onde pode-se observar que o desgaste influencia sim na força de conformação. No entanto, com os testes realizados com ferramentas com níveis de desgaste diferentes, observou-se que o aumento do desgaste da ferramenta não implicou no simples aumento ou redução das forças de conformação nos três eixos. Não sendo possível diagnosticar qual o tipo de influência que o desgaste tem na força de conformação. Isso pode estar relacionado ao acabamento superficial da ferramenta pois, como se tratam de ferramentas que foram descartadas por apresentarem desgaste, a superfície da ponta da ferramenta possui variação entre as ferramentas utilizadas, que também podem interferir na força de conformação.

Quando comparamos as força de conformação dos processos com as ferramentas com 5.4 e sem desgaste 5.5, pode-se observar que o processo de conformação que utiliza ferramentas com desgaste tem menor força de conformação, principalmente no eixo Z, pois, provavelmente estas ferramentas geram mais atrito, por possuírem uma área de contato maior. Quando se aumenta a área de contato ferramenta-chapa é gerado maior aquecimento para o processo de conformação e por sua vez este aquecimento aumenta a maleabilidade do material e facilita a estampagem, reduzindo a força necessária para realização da mesma conformação de chapa.

Os ensaios foram realizados obtendo-se a resposta em frequência, associada ao efeito do desgaste, identificando assim as frequências características dos desgastes que geram vibração e maior atrito com a peça. A magnitude das frequências do processo, principalmente do eixo Z, aumentaram em média 4x, mostrando assim que o processo por utilizar uma ferramenta com desgaste

Tabela 5.4: Ensaios com ferramenta com desgaste

Teste de força com ferramenta desgastada com 0.223mm						
Teste	Ap (mm)	f (mm/min)	S (RPM)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
01	0.6	3600	6000	188	151	394
02	1.4	1200	3000	243	224	409
Teste de força com ferramenta desgastada com 0.220mm						
03	0.6	3600	6000	161	130	452
04	1.4	1200	3000	210	205	506
Teste de força com ferramenta desgastada com 0.174mm						
05	0.6	3600	6000	160	178	433
06	1.4	1200	3000	228	241	510
Teste de força com ferramenta desgastada com 0.105mm						
07	0.6	3600	6000	150	159	447
08	1.4	1200	3000	226	223	500

Tabela 5.5: Ensaios com ferramenta sem desgaste

Teste de força com ferramenta sem desgaste							
Teste	Ap [mm]	f [mm/min]	S [RPM]	Força (N)			Tempo [min:seg]
				Fx	Fy	Fz	
01	0.6	3600	6000	158	185	478	01:38
02	1.4	1200	3000	244	221	555	02:26

gera maior vibração, o que pode vir a ocasionar marcas e imperfeições na peça final e pode levar as regiões mais finas da peça à fratura prematura.

## 5.7 Análise de Variância e Regressão Múltipla

Com a intenção de prever o comportamento da força do ensaio de conformação, evitando possíveis danos à máquina, ferramenta ou à própria peça que está sendo conformada, é realizada a regressão múltipla com os dados de entrada e saída e feita a análise de variância (ANOVA), mostra o quanto o novo modelo matemático explica a variável.

Realizando regressão múltipla das variáveis de processo conseguimos obter uma série de equações que podem prever o comportamento da força.

Para uma maior precisão no equacionamento e qualidade do resultado final da predição de força utilizou-se para o cálculo da área 3 formulações matemáticas diferentes, duas existentes na literatura para o cálculo de área de contato da ferramenta com a chapa e uma terceira que foi desenvolvida.

Para obter valores aceitáveis de erro nas formulações a área foi enquadrada como variável de-

Tabela 5.6: ANOVA equações força

Eixo	Equação	Sum of squares	Mean squares	F value	P value	R Square	Std. Erro
Z	Aerens	19.838	4.960	7286.7	0.000	0.999	0.260
Z	Autor	23.304	5.826	.	.	1.000	Indef
Z	Bansal	93.318	23.330	493565.5	0.000	1.000	0.007
X	Aerens	19.851	4.963	21700.338	0.000	1.000	0.015
X	Autor	2.126	0.709	45.067	0.000	0.823	0.125
X	Bansal	93.318	23.330	558664.9	0.000	1.000	0.006
Y	Aerens	19.845	4.961	10839.257	0.000	0.999	0.021
Y	Autor	23.304	5.826	.	.	1.000	Indef
Y	Bansal	93.318	23.330	549582.8	0.000	1.000	0.007

pendente. Como o cálculo da área pode variar conforme os autores, foram utilizados três fórmulas diferentes de cálculo de área. Tendo com base o cálculo de área do Arens utilizando a equação 2.6, Basal utilizando a equação 2.10 e uma formulação própria apresentada na equação 5.2.

Todas as equações sofreram modificações matemáticas para deixar o  $F_z$  como variável dependente. Este procedimento foi realizado pois a força em Z é a maior e mais importante do processo para a preservação da máquina CNC e com a equação nesse formato também poderá auxiliar no desenvolvimento da ferramenta de conformação.

Trabalhando com a equação 2.6, equação da área de AERES et al., 2010, como base para descrever o contato da ferramenta, foi possível obter a equação 5.13, que possui um valor de erro de 0,260%. Trocando a equação 2.6 por 2.10, equação de área de BANSAL et al., 2017, obtem-se a equação 5.14 que possui um valor de erro de 0,007%. Para finalizar a análise foi realizado mais uma o substituindo a equação 5.14 por 5.15, equação de área desenvolvido nesta tese. A análise estatística destas equações, a ANOVA, apresenta resultados com Erro Padrão de valor indefinido, conforme pode ser vistos na Tabela 5.6.

O coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), um dos resultados da ANOVA, representa o quanto o modelo explica a variável. Valores satisfatórios para R<sup>2</sup> estão acima de 0.999, o que significa que a equação representa 99,9 % dos casos. O nível de significância representa o nível de correção necessário entre os dados apresentados com a variável dependente, que deve estar abaixo de 0,05 ou 5%.

$$F_z = \sqrt[{-0.07}]{A/25,559 * (Ap^{0.931}) * (f^{5.77E-5}) * (S^{-0.003})} \quad (5.13)$$

$$F_z = \sqrt[{-0.011}]{A/0,1133812 * (Ap^{2.002}) * (f^0) * (S^{-0.001})} \quad (5.14)$$

$$F_z = \sqrt[{-6,7E-10}]{A/39.33 * (Ap^1) * (f^{-2E-11}) * (S^{7.47E-11})} \quad (5.15)$$

Para obter os valores da equação para a força de eixo X, realizou-se novamente o procedimento. Trabalhando com a equação 2.6, como base para descrever o contato da ferramenta, consegue-se obter a equação 5.16, que possui um valor de erro de 0.015%. Trocando a equação 2.6 por 2.10 obtemos a equação 5.17 que possui um valor de erro de 0.00646%. Para finalizar a análise foi realizado mais uma equação substituindo a equação 5.14 por 5.2, gerando a equação 5.18. A análise estatística destas equações, a ANOVA, apresenta resultados com Erro Padrão de 0.000, conforme pode ser vistos na Tabela 5.6.

$$F_x = \sqrt[{-0.174}]{A/42.47858 * (Ap^{0.975}) * (f^{0.01}) * (S^{-0.015})} \quad (5.16)$$

$$F_x = \sqrt[{-0.02}]{A/0,11789 * (Ap^{2,007}) * (f^{0.001}) * (S^{-0,002})} \quad (5.17)$$

$$F_x = (93.9323 * A^{0.3}) * (f^{0.043}) * (S^{-0.078}) \quad (5.18)$$

A tabela 5.7 apresenta os parâmetros de processamento, dados de entrada, valores de força adquirido pelo dispositivo piezoelétrico, valores de força utilizando as equações, 5.16, 5.17 e 5.18 e % Erro de cada equação. O % Erro é resultado de uma análise comparativa entre os valores obtidos nos testes e os valores calculados, gerando assim o campo % Erro, onde os valores positivos indicam que o valor calculado ficou superior ao valor experimental e os valores negativos demonstram que os valores calculados ficam acima.

Para obtenção dos valores da equação para a força de eixo Y, realizou-se novamente o procedimento. Trabalhando com a equação 2.6, como base para descrever o contato da ferramenta, conseguimos obter a equação 5.19, que possui um valor de erro de 0.015%. Trocando a equação 2.6 por 2.10 obtemos a equação 5.20 que possui um valor de erro de 0.00646%. Para finalizar a análise foi realizado mais uma equação substituindo a equação 5.14 por 5.2, gerando a equação 5.21. A análise estatística destas equações, a ANOVA, apresenta resultados com Erro Padrão de 0.000, conforme pode ser vistos na Tabela 5.6.

$$F_y = \sqrt[{-0.105}]{\Delta_h/30.876643 * (Ap^{0.941}) * (f^{-0.004}) * (S^{-0.007})} \quad (5.19)$$

$$F_y = \sqrt[{-0.016}]{\Delta_h/0,1162514 * (Ap^{2,004}) * (f^0) * (S^{-0,002})} \quad (5.20)$$

Tabela 5.7: Componente de força na direção X: valores Experimentais x Valores calculados

Teste	Dados de entrada			Força Fx(N)	Cálculo Fx (N) com Área por			% Erro		
	Ap(mm)	f(mm/min)	S(RPM)		Aeres	Basal	Autor	Aeres	Basal	Autor
1	0.2	600	600	151	155	143	139	2.68	-5.16	-7.62
2	0.2	600	1200	148	146	134	132	-1.34	-9.71	-10.71
3	0.2	600	3000	135	135	122	123	-0.05	-9.69	-8.87
4	0.2	600	6000	119	127	114	117	6.81	-4.40	-2.05
5	0.2	1200	3000	144	140	126	127	-249	-12.35	-11.98
6	0.2	3600	3000	156	150	133	133	-4.13	-14.52	-14.82
7	0.2	3600	600	157	172	157	151	9.44	-0.23	-4.04
8	0.4	1200	3000	157	142	161	156	-9.83	2.47	-0.60
9	0.4	3600	3000	163	151	170	164	-7.49	4.27	0.37
10	0.4	3600	6000	174	142	159	155	-18.37	-8.86	-10.92
11	0.6	600	600	174	164	210	194	-5.46	20.90	11.46
12	0.6	600	3000	152	143	179	171	-5.80	17.82	12.54
13	0.6	600	6000	122	135	167	162	10.56	36.97	32.84
14	0.6	1200	3000	144	149	185	176	3.48	28.79	22.39
15	0.6	2400	3000	171	155	192	182	-9.32	12.25	6.18
16	0.6	3600	3000	170	159	196	185	-6.64	15.22	8.68
17	0.6	3600	6000	158	150	183	175	-5.37	15.67	10.78
18	1.0	600	600	205	192	252	226	-6.25	23.13	10.27
19	1.0	1200	3000	189	174	222	205	-7.89	17.71	8.69
20	1.0	3600	3000	197	185	235	215	-5.87	19.31	9.32
21	1.0	3600	6000	173	175	219	204	0.97	26.76	17.94
22	1.4	600	600	251	230	283	250	-8.33	12.74	-0.37
23	1.4	1200	3000	244	208	249	227	-14.58	2.22	-6.87
24	1.4	3600	3000	228	222	263	238	-2.63	15.57	4.49
25	1.4	3600	6000	216	209	246	226	-3.18	13.82	4.49
26	1.8	600	600	286	282	309	270	-1.24	8.04	-5.71
27	1.8	1200	3000	253	256	272	245	1.13	7.65	-3.15
28	1.8	3600	3000	261	273	288	257	4.42	10.24	-1.57
29	1.8	3600	6000	260	257	268	243	-1.26	3.25	-6.40
30	2.2	1200	3000	282	319	292	260	13.22	3.60	-7.72
31	2.2	3600	3000	300	340	309	273	13.36	2.89	-9.06
32	2.2	3600	6000	304	320	288	258	5.38	-5.27	-14.98
33	2.2	600	6000	324	289	263	239	-10.80	-18.73	-26.14

Tabela 5.8: Componente de força na direção Y: valores Experimentais x Valores calculado

Teste	Dados de entrada			Força Fy(N)	Cálculo Fy(N) com Area By			% Erro		
	Ap(mm)	f(mm/min)	S(RPM)		Aeres	Basal	Autor	Aeres	Basal	Autor
1	0.2	600	600	275	239	187	282	-13.19	-31.91	2.64
2	0.2	600	1200	195	228	172	221	16.89	-11.95	13.19
3	0.2	600	3000	145	214	153	189	47.88	5.60	30.67
4	0.2	600	6000	148	205	140	172	38.34	-5.13	16.23
5	0.2	1200	3000	252	209	153	234	-17.13	-39.24	-7.04
6	0.2	3600	3000	184	200	153	195	8.85	-16.78	5.97
7	0.2	3600	600	182	223	187	205	22.51	2.88	12.57
8	0.4	1200	3000	192	169	182	213	-11.91	-5.16	10.81
9	0.4	3600	3000	175	162	182	204	-7.32	4.05	16.71
10	0.4	3600	6000	154	155	167	189	0.56	8.43	22.60
11	0.6	600	600	195	185	246	240	-5.35	26.37	22.95
12	0.6	600	3000	226	166	202	271	-26.64	-10.84	20.01
13	0.6	600	6000	220	158	185	257	-28.04	-16.01	16.83
14	0.6	1200	3000	192	161	202	201	-15.90	4.95	4.51
15	0.6	2400	3000	171	157	202	202	-8.03	17.84	18.13
16	0.6	3600	3000	170	155	202	204	-8.91	18.54	19.90
17	0.6	3600	6000	185	148	185	209	-20.08	-0.11	12.74
18	1.0	600	600	207	202	281	250	-2.52	35.60	20.92
19	1.0	1200	3000	219	177	230	248	-19.39	4.81	13.42
20	1.0	3600	3000	197	169	230	225	-14.06	16.51	14.11
21	1.0	3600	6000	171	162	210	211	-5.47	23.09	23.41
22	1.4	600	600	280	245	305	294	-12.63	8.77	5.03
23	1.4	1200	3000	221	214	249	252	-3.16	12.69	13.94
24	1.4	3600	3000	227	205	249	238	-9.59	9.72	4.91
25	1.4	3600	6000	212	196	228	223	-7.56	7.73	5.15
26	1.8	600	600	286	317	324	287	10.75	13.39	0.28
27	1.8	1200	3000	248	277	265	244	11.74	6.94	-1.74
28	1.8	3600	3000	259	266	265	252	2.61	2.40	-2.60
29	1.8	3600	6000	235	254	243	235	7.98	3.49	0.07
30	2.2	1200	3000	276	375	279	257	35.80	1.03	-6.75
31	2.2	3600	3000	294	359	279	268	22.26	-5.15	-8.98
32	2.2	3600	6000	270	343	256	252	27.12	-5.29	-6.73
33	2.2	600	6000	319	367	256	280	15.19	-19.84	-12.26

$$F_y = \sqrt[{-7.1E-10}]{\Delta_h/39.330488 * (Ap^1) * (f^{-3.72E-11}) * (S^{5.28E-11})} \quad (5.21)$$

A tabela 5.8 apresenta os parâmetros de processamento, dados de entrada, valores de força adquirido pelo dispositivo piezoelétrico, valores de força utilizando as equações, 5.16, 5.17 e 5.18 e % Erro de cada equação.

A tabela 5.9 apresenta os valores dos dados de entrada no processo juntamente com a respectiva força em X, Y e Z, obtidas através dos ensaios pelos sistemas piezoelétrico, onde podemos comparar com os valores encontrados pelo cálculos da equações 5.13, 5.14 e 5.15, que geram a previsão de força para a variação dos dados de entrada.

Visando a compressão total das equações desenvolvidas foi criada uma coluna na tabela 5.9

Tabela 5.9: Componente de força na direção Z: valores Experimentais x Valores calculado

Teste	Dados de entrada			Força (N)			Cálculo Fz com Área By			% Erro		
	Ap (mm)	f (mm/min)	S (RPM)	Fx	Fy	Fz	Aeres (N)	Basal (N)	Autor (N)	Aeres	Basal	Autor
1	0.2	600	600	151	275	584	651	499	584	11.55	-14.59	0
2	0.2	600	1200	148	195	460	632	468	460	37.47	1.81	0
3	0.2	600	3000	135	145	403	608	431	403	50.87	6.92	0
4	0.2	600	6000	119	148	372	590	405	372	58.66	8.76	0
5	0.2	1200	3000	144	252	514	608	431	514	18.36	-16.17	0
6	0.2	3600	3000	156	184	435	609	431	435	39.98	0.94	0
7	0.2	3600	600	157	182	435	652	499	435	49.98	14.66	0
8	0.4	1200	3000	157	192	464	402	489	465	-13.46	5.34	0
9	0.4	3600	3000	163	175	457	402	489	457	-12.05	6.95	0
10	0.4	3600	6000	174	154	430	390	459	430	-9.27	6.73	0
11	0.6	600	600	174	195	491	379	609	491	-22.90	24.01	0
12	0.6	600	3000	152	226	590	353	526	590	-40.12	-10.82	0
13	0.6	600	6000	122	220	570	343	494	570	-39.83	-13.33	0
14	0.6	1200	3000	144	192	436	354	526	436	-18.92	20.68	0
15	0.6	2400	3000	171	171	447	354	526	447	-20.87	17.71	0
16	0.6	3600	3000	170	170	456	354	526	456	-22.40	15.39	0
17	0.6	3600	6000	158	185	478	343	494	578	-28.14	3.35	0
18	1.0	600	600	205	207	514	402	670	514	-21.85	30.26	0
19	1.0	1200	3000	189	219	547	375	578	547	-31.42	5.74	0
20	1.0	3600	3000	197	197	506	375	578	506	25.79	14.31	0
21	1.0	3600	6000	173	171	484	364	543	484	-24.69	12.21	0
22	1.4	600	600	251	280	610	512	711	610	-16.10	16.48	0
23	1.4	1200	3000	244	221	555	478	614	555	-13.88	10.59	0
24	1.4	3600	3000	228	227	538	478	614	538	-11.08	14.09	0
25	1.4	3600	6000	216	212	513	464	576	513	-9.48	12.34	0
26	1.8	600	600	286	286	594	727	744	594	22.47	25.21	0
27	1.8	1200	3000	253	248	536	679	642	536	26.75	19.87	0
28	1.8	3600	3000	261	259	572	680	642	572	18.88	12.32	0
29	1.8	3600	6000	260	235	543	660	603	543	21.56	11.10	0
30	2.2	1200	3000	282	276	568	1038	666	568	82.83	14.32	0
31	2.2	3600	3000	300	294	609	1039	666	609	70.68	9.42	0
32	2.2	3600	6000	304	270	584	1009	626	584	72.77	7.14	0
33	2.2	600	6000	324	319	624	1008	626	624	61.46	0.27	0

que faz a comparação entre os valores medidos e os valores encontrado pelas equações, este erro foi inserido na forma de porcentagem.

## 5.8 Síntese e Conclusão do Capítulo

Para avaliação da força de processamento em relação aos parâmetros de processo, foi realizada uma série de ensaios de conformação com o auxílio de um dispositivo piezoelétrico para medição das forças. Adquiridos os valores de força em X, Y e Z durante o processamento, seguiu-se com a análise estatística e regressão múltipla para desenvolvimento da fórmula matemática de predição de força, permitindo a realização do planejamento da conformação de forma a garantir a integridade da máquina.

Foram realizados 33 ensaios de conformação para chapa de liga de alumínio 1050, utilizando uma ferramenta de aço SAE 1045 de diâmetros de 12,53mm, realizando uma peça simples de tronco cone, com lubrificação de óleo VG68. Após análise dos resultados dos ensaios, pode-se afirmar que a variação nos parâmetros de processamento, avanço, rotação e  $A_p$ , interferem diretamente no resultado das forças finais dos eixos Z, Y e X. Quando tem-se um aumento no avanço e na rotação obtêm-se uma redução na força de conformação, o valor dessa redução varia conforme os parâmetros utilizados. Por outro lado, quando aumenta-se os valores de  $A_p$ , a força aumenta. Esse aumento de força está diretamente relacionado com os valores de  $A_p$ , pois o aumento do  $A_p$  aumenta a área de contato ferramenta/chapa, onde o  $A_p$  poderá aumentar seu valor em até 11 vezes, 0,2 para 2,2mm e o valor da força vai aumenta em média 30% .

Esta tese fornece uma contribuição na área de predição de força baseada nos parâmetros de processamento, com um erro máximo de 1%. Porém, tendo em vista, o fator de área de contato e ângulo de parede interna da peça, para a melhor predição da força o cálculo da variável de processo área de contato foi calculada pela equação 5.14 fornece uma estimativa da força no processo de SPIF, agregando mais variáveis e com um baixo erro padrão.

A possibilidade de se estimar o valor de força necessária para se realizar uma conformação SPIF significa uma melhoria na tecnologia do SPIF, possibilitando a otimização do processo produtivo, melhorando os cálculos dos custos de um processo de conformação e ainda garantindo a integridade da máquina utilizada.

# Capítulo 6

## Desgaste de Ferramenta no Processo de Estampagem Incremental de Ponto Simples

Este capítulo trata de um estudo de desgaste de ferramenta no processo de estampagem incremental de ponto simples, visando o equacionamento matemático empírico, capaz de estimar o tempo de vida da ferramenta de conformação, através de realização de ensaios práticos com análise de desgaste da ferramenta. Logo após os ensaios realiza-se o tratamento estatístico dos dados, que foram obtidos com a variação dos parâmetros de processamento como  $A_p$ , avanço e rotação. Após a aquisição dos dados é feita uma análise voltada para a correlação entre o desgaste da ferramenta e os parâmetros de entrada.

### 6.1 Modelo de Desgaste de Ferramenta

#### 6.1.1 Análise teórica do desgaste de ferramenta

Toda a ferramenta, seja ela de corte ou de conformação, possui um tempo de vida útil que geralmente está intimamente ligada à produtividade ou à qualidade da peça final. Com a estampagem incremental não poderia ser diferente.

No processo de estampagem incremental o desgaste da ferramenta ocorre apenas nas áreas de contato ferramenta-chapa a ser conformada, tendo sido identificados dois tipos de desgaste: o desgaste de topo ( $D_t$ ) e o desgaste de topo angulado ( $D_{ta}$ ), Figura 6.1.

A Figura 6.1(a) apresenta em preto o desgaste de topo, a Figura 6.1(b) representa o desgaste de topo angulado e a Figura 6.1(c) apresenta a união dos dois tipos desgastes, que representa o desgaste real ou total da ferramenta.

A tendência do desgaste de topo é ocorrer principalmente no início do processo de conformação, quando é apenas o topo da ferramenta que executa a conformação. Na medida em que a peça vai

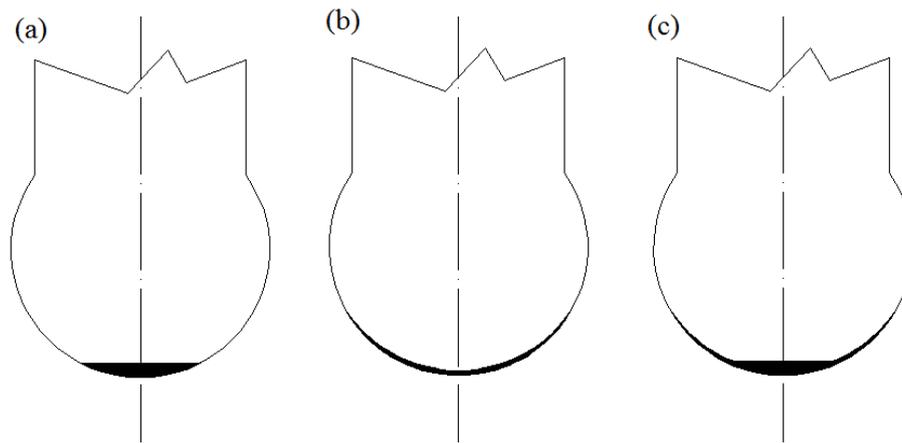


Figura 6.1: Tipo de desgaste, (a) desgaste de topo (Dt), (b) desgaste de topo angulado (Dta) e (c) desgaste total.

ganhando forma, esse contato da ferramenta vai aumentando, criando assim o segundo desgaste, Dta, que está relacionado ao ângulo de parede da peça. Quanto maior este ângulo, maior a área de desgaste da ferramenta.

A Figura 6.2 apresenta o comportamento do processo de conformação onde a ferramenta penetrou 0,6 mm na chapa a ser conformada. Pode-se observar que o ponto de conformação, que é onde o atrito e o desgaste são gerados, corresponde à área pequena da ferramenta, sendo considerado o topo da ferramenta. O desgaste de topo é mais acentuado pois no início da conformação apenas esta parte da ferramenta entra em contato com a chapa, no decorrer da conformação pode-se observar que esta parte específica da ferramenta continua em contato com a peça do início ao fim do processamento.

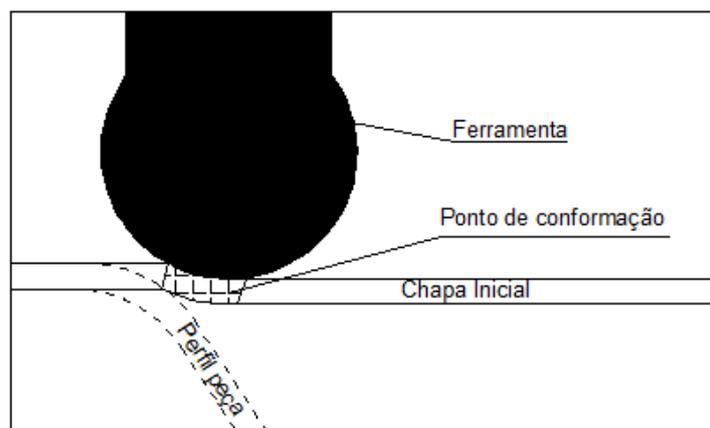


Figura 6.2: Início da conformação.

A Figura 6.3 apresenta a tendência do desgaste total, onde o ponto de conformação é maior e atinge a área mais abrangente da ferramenta, gerando assim um desgaste não apenas no topo da

ferramenta, mas também na lateral, formando o desgaste de topo angulado, onde o tamanho da área em que vai ocorrer o desgaste está ligada ao ângulo de parede da peça a ser conformada.

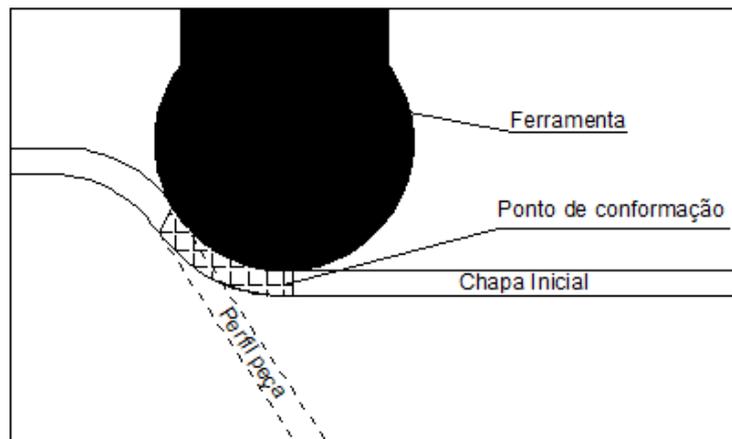


Figura 6.3: Conformação com 5mm de profundidade.

A estampagem incremental pode gerar mais ou menos desgaste na ferramenta dependendo de como o processo de conformação é executado. Para analisar esse desgaste utilizou-se uma ferramenta com mais de 50 horas efetivas de conformação. Esta ferramenta é dividida em duas partes, o corpo e a parte esférica, o corpo fabricado em aço 1060 e a parte esférica é uma esfera que foi engastada no corpo, Figura 6.4.

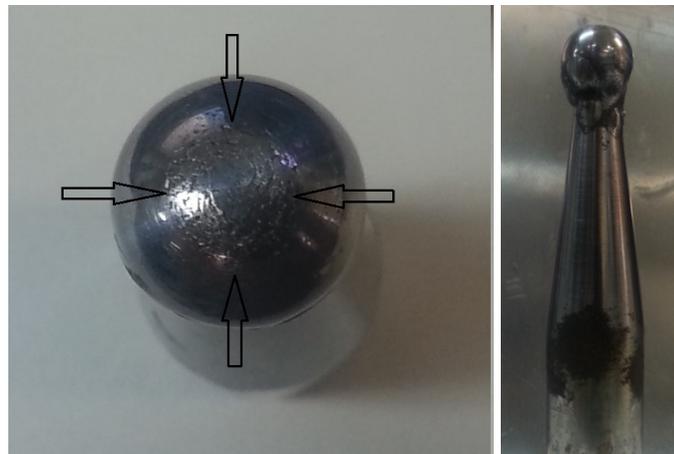


Figura 6.4: Foto de desgaste de topo.

A ferramenta apresentada na figura 6.4, apresenta um desgaste elevado de topo, maior que 0,4 mm, e um desgaste pequeno de topo angulado, que não foi possível estimar, o que pode ter ocorrido em razão de a ferramenta ter trabalhado apenas em baixas rotações e a frio. O desgaste de topo pode ter sido ocasionado pelo fato dessa ferramenta, em específico, ter trabalhado com conformação de aço SAE1008 e com AISI 304, que apresenta maior dificuldade de conformação quando comparado à chapa galvanizada utilizada neste trabalho.

A ferramenta apresentada na Figura 6.4 tem uma fabricação diferenciada, pois possui um corpo em aço SAE 1080 temperado e revenido. Na sua ponta foi inserida uma esfera de rolamento, furada por eletroerosão e introduzida na peça sob pressão no corpo de aço.

Posteriormente a ferramenta foi quebrada e soldada como pode ser visto na Figura 6.4. Trata-se de uma ferramenta excelente, porém com um custo de produção muito elevado. O projeto original pode ser observado na Figura 6.5.

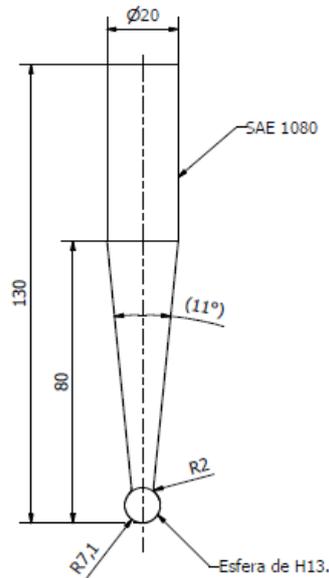


Figura 6.5: Projeto de ferramenta com esfera.

As ferramentas de estampagem incremental inteiriças possuem um desgaste mais acentuado, tanto no desgaste de topo como no desgaste de topo angulado. A Figura 6.6 apresenta uma ferramenta produzida com aço H13 temperado e revenido, que possui 30 horas de conformação, trabalhando com estampagem incremental com aquecimento e com SPIF com alta rotação.

Para quantificar seu desgaste, a ferramenta foi analisada em um projetor de perfil da Hexagon modelo JT12A-B, que, conforme mostrado na Figura 6.7 permite mensurar o desgaste sofrido pela ferramenta.

As ferramentas de estampagem incremental apresentam desgaste acima de 0,3mm de desgaste de topo, sendo fácil sua medição. Com um projetor de perfil pode-se visualizar o desgaste de topo e o desgaste de topo angulado, ambos os desgastes podem ser atribuídos principalmente ao atrito gerado no processo.

A Figura 6.8 apresenta uma medida de desgaste de topo da ferramenta de conformação. O valor representa a diferença entre a ferramenta inicial e uma ferramenta com 20 horas de uso, valendo lembrar que a confecção de uma peça por estampagem incremental pode levar alguns minutos ou muitas horas.



Figura 6.6: Desgaste da ferramenta.

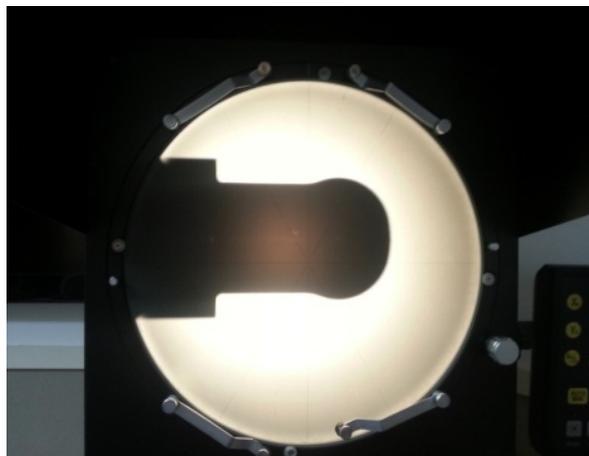


Figura 6.7: Projetor do perfil –ferramenta.

Para analisar e prever o desgaste da ferramenta será feita uma analogia com o processo de usinagem baseado em um modelo teórico do desgaste de ferramenta, levantando experimentalmente as correlações existentes entre os parâmetros do processo que impactam na vida da ferramenta ( $T$ ), avanço ( $f$ ), velocidade de corte ( $V_c$ ), profundidade de deformação ( $A_p$ ) e rotação.



Figura 6.8: Ferramenta com desgaste.

## 6.2 Estimativa de vida de ferramenta

Diversas equações são encontradas na literatura para avaliar a vida da ferramenta levando em conta os principais parâmetros envolvidos na usinagem, sendo a mais utilizada a equação desenvolvida por Taylor. Essa equação foi mais tarde expandida para considerar outros parâmetros importantes como avanço ( $f$ ), profundidade de corte ( $A_p$ ) e um parâmetro de desgaste (MONTALVÃO et al., 2014).

Mesquita (1980) propôs um trabalho que relaciona as variáveis de usinagem com a fórmula expandida de Taylor modificada. Ferraz, (FERRAZ, 2008), com o objetivo de apresentar e avaliar um novo modelo algébrico para descrever o desgaste de ferramenta de corte, no processo de usinagem de torneamento, utilizou do trabalho de Mesquita (1980) e realizou a análise e determinação dos parâmetros da estrutura algébrica de Taylor, tendo o desgaste da ferramenta de corte como variável dependente e obteve resultados satisfatórios.

Vários pesquisadores expressaram algebricamente a relação entre as variáveis do processo de usinagem, mas se desconhece que alguém tenha expressado as forças de conformação no processo de estampagem incremental. Desta forma, seguiu-se essa mesma estratégia para obtenção dos parâmetros da estrutura algébrica de Taylor, visando apresentar um novo modelo algébrico que descreva o desgaste de ferramenta no processo de estampagem incremental.

Desta forma, seguindo a mesma estratégia, baseou-se na equação 6.1 e realizou-se adaptações dos parâmetros, para descrever o desgaste da ferramenta de conformação do processo de estampagem incremental SPIF em relação aos parâmetros de conformação, gerando assim a equação 6.2.

$$V_b = CV^E T^F f^G A_p^H \quad (6.1)$$

Onde:

- $V_b$  –a variável dependente é o desgaste de flanco da ferramenta de corte dado em (mm);
- $V, T, f, Ap$  –as variáveis independentes são a velocidade de corte (mm/min); o tempo de corte (min); avanço (mm/volta) e passo vertical em Z (mm), respectivamente;
- $C, E, F, G, H$  –são os parâmetros do modelo algébrico proposto, que devem assumir valores diferentes para cada tipo de material da peça te.

$$Dt = K f^P * T^M * S^v * Ap^A \quad (6.2)$$

Onde:

- $Dt$  –a variável dependente é o desgaste de topo da ferramenta de conformação (mm);
- $f, T, S, Ap$  –as variáveis independentes são a taxa de alimentação (mm/min); tempo de conformação (min); rotação da ferramenta (RPM); e passo vertical em Z (mm), respectivamente;
- $K, P, M, L, A$  –são os expoentes das variáveis de processamento do modelo algébrico, estes valores devem ser alterado para cada tipo de processamento ou modificação do processo como modificação de material, ferramenta, temperatura do processo, entre outros.

Para determinação dos parâmetros do modelo algébrico proposto, serão utilizados os experimentos do processo de conformação por SPIF, que serão apresentados. Durante o processo, serão adquiridos os valores de desgaste de ferramenta correlacionando o tempo de processamento, específico para cada grupo de parâmetros utilizados, que serão atingidos em cada condição de conformação utilizada ( $f_i, T_i, S_i, Ap_i$ ), onde  $i$  variou de 1 a  $n$ , assim como descreve a equação (6.3).

$$Dt = K f_i^P T_i^M S_i^L Ap_i^A \quad (6.3)$$

Para a determinação dos parâmetros  $K, P, M, S$  e  $A$  do modelo algébrico fez-se uso do logaritmo neperiano em ambos os lados da equação (6.3) obtendo-se assim a equação (6.4) :

$$\ln Dt_i = \ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln Ap_i \quad (6.4)$$

Com base no desenvolvimento em modelos matemáticos, sempre há a existência de variáveis não controladas que passaremos a chamar de resíduos; representado por  $\epsilon_i$ , o resíduo em cada ponto  $i$ , será dado pela seguinte expressão (6.5):

$$\epsilon_i = \ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln A p_i - \ln D t_i \quad (6.5)$$

Supondo todos os possíveis resíduos, devido à influencia de todas as variáveis, tem-se a soma quadrática dos resíduos dada pela equação (6.6):

$$W = \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N (\ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln A p_i - \ln D t_i)^2 \quad (6.6)$$

Considerando W como uma função das incógnitas K, P, M, L e A, a condição para que a soma dos quadrados dos resíduos W seja mínima é que a derivada parcial de W, em relação a cada uma das derivadas parciais, seja nula [equação (6.7)].

$$\frac{\delta W}{\delta K} = 0; \frac{\delta W}{\delta P} = 0; \frac{\delta W}{\delta M} = 0; \frac{\delta W}{\delta L} = 0; \frac{\delta W}{\delta A} = 0 \quad (6.7)$$

Desenvolvendo-se as derivadas tem-se o conjunto de equações (6.8):

$$\begin{aligned} \frac{\delta W}{\delta K} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln A p_i - \ln D t_i) \frac{1}{K} = 0; \\ \frac{\delta W}{\delta P} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln A p_i - \ln D t_i) \ln f_i = 0; \\ \frac{\delta W}{\delta M} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln A p_i - \ln D t_i) \ln T_i = 0; \\ \frac{\delta W}{\delta L} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln A p_i - \ln D t_i) \ln S_i = 0; \\ \frac{\delta W}{\delta A} &= 2 \sum_{i=1}^N (\ln K + P \ln f_i + M \ln T_i + L \ln S_i + A \ln A p_i - \ln D t_i) \ln A p_i; \end{aligned} \quad (6.8)$$

Considerando que o somatório  $\sum \ln K = N \ln K = N I$ , as equações (6.8) passam a ter a configuração das equações (6.9).

Portanto, conforme as equações (5.11) tem-se 5 equações e 5 incógnitas (K, P, M, L, e A). A solução desse sistema de equações heterogêneas será obtida utilizando-se o programa STADISK, (FERRAZ, 2008). Permitindo a determinação dos parâmetros algébricos da equação de estimativa de força.

$$NI + P \sum_{i=1}^N \ln f_i + M \sum_{i=1}^N \ln T_i + L \sum_{i=1}^N \ln S_i + A \sum_{i=1}^N \ln Ap_i - \sum \ln Dt_i = 0; \quad (6.9a)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln f_i + P \sum_{i=1}^N (\ln f_i)^2 + M \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln f_i + L \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln f_i + A \sum_{i=1}^N \ln Ap_i \cdot \ln f_i - \sum \ln Dt_i \ln f_i = 0; \quad (6.9b)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln T_i + P \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln T_i + M \sum_{i=1}^N (\ln T_i)^2 + L \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln T_i + A \sum_{i=1}^N \ln Ap_i \cdot \ln T_i - \sum \ln Dt_i \ln T_i = 0; \quad (6.9c)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln S_i + P \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln S_i + M \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln S_i + L \sum_{i=1}^N (\ln S_i)^2 + A \sum_{i=1}^N \ln Ap_i \cdot \ln S_i - \sum \ln Dt_i \ln S_i = 0; \quad (6.9d)$$

$$NI \sum_{i=1}^N \ln Ap_i + P \sum_{i=1}^N \ln f_i \cdot \ln Ap_i + M \sum_{i=1}^N \ln T_i \cdot \ln Ap_i + L \sum_{i=1}^N \ln S_i \cdot \ln Ap_i + A \sum_{i=1}^N (\ln Ap_i)^2 - \sum \ln Dt_i \cdot \ln Ap_i = 0; \quad (6.9e)$$

### 6.2.1 Cálculo dos parâmetros do equacionamento matemático empírico

Os parâmetros estimados para o equacionamento matemático empírico serão obtidos através da resolução do sistema de equações (6.9), utilizando-se dados experimentais extraídos de ensaios de conformação de chapa de alumínio Alcoa 1050, com uma ferramenta de SAE 1045.

A equação (6.10) tem como variável dependente 'Dt' que é o desgaste de topo [mm] e com variáveis independentes : 'f' que é a velocidade de conformação no plano XY ou quando o movimento é em espiral o valor de velocidade é para XYZ [mm / min], 'T' que é o tempo de conformação [Min], 'S' é o valor de rotação da ferramenta e 'Ap' que é o valor de incremento em Z, (profundidade em cada camada de conformação da chapa).

Os valores de K, P, M, L, A são parâmetros algébricos do modelo, estes parâmetros vão assumir valores diferentes com a variação do tipo de material utilizado na conformação, estes valores são obtidos por uma resolução matemática de regressão de múltiplas variáveis, para isto foi utilizados dois software diferentes Statdisk versão 12.0 e SPSS versão 13:

$$Dt = K f^P T^M S^L A p^A \quad (6.10)$$

## 6.3 Parâmetros experimentais para ensaios de desgaste de ferramentas

O processo de SPIF pode ser dividido em alguns passos: descrição material a ser utilizado, definição dos parâmetros de processo, programação CAD/CAM, setup da máquina e execução dos ensaios planejados, conforme modelado na figura 4.2.

### 6.3.1 Material utilizado

A definição do material a ser utilizado no processo de conformação vai guiar todas as etapas seguintes, pois dependendo do tipo de material utilizado na ferramenta e/ou na chapa a ser conformada tem que se variar os parâmetros de conformação, lubrificação e estratégia de conformação.

Realizou-se a escolha da chapa em alumínio 1050 pela fácil conformabilidade e alta ductilidade o que facilita a conformação, o material da ferramenta foi aço SAE 1045, pois é material que pode-se trabalhar com ou sem tratamento térmico. Se a ferramenta gastas-se rapidamente tornando o processo inviável teria-se a possibilidade do material sobre um processo de endurecimento por tempera.

A chapa conformada possui o formato quadrado de 190mm de lado, tendo neste caso sido utilizado dois materiais diferentes. O primeiro Alumínio 1050 da empresa Alcoa com 1mm de espessura com a composição química, segundo o fabricante, Tabela 6.2. O segundo material utilizado foi chapa de aço galvanizado, pois possui uma resistência mecânica maior que a do alumínio 1050, com espessura de 0.95mm com dureza de 52 HRb. A composição química do aço galvanizado pode ser vista na Tabela 6.1

A ferramenta de conformação foi fabricada em aço SAE 1045 laminado com dureza de 179HB e resistência a tração de 570MPa, com o diâmetro inicial de 12.7mm. A ferramenta foi usinada em um torno CNC para confeccionar a ponta esférica necessária para o processo, a composição química do SAE 1045 é apresentado na tabela 6.3. Esta ferramenta não sofreu nem um tipo de tratamento após a usinagem.

A lubrificação durante o processo correu com óleo VG68 5ml para cada peça executada. O

Tabela 6.1: Composição química do Aço Galvanizado

Composição química Aço Galvanizado	
Carbono	0,15 %
Manganês	0,6 %
Silício	0,05 %
Fosforo	0,05 %
Ferro	99,1 %

Tabela 6.2: Composição química do alumínio 1050, Alcoa

Composição química alumínio 1050	
Alumínio	99.5%
Silício	0.25%
Ferro	0.40%
Cobre	0.05%
Manganês	0.05%
Zinco	0.05%
Titânio	0.03%
Outros	0.03%

valor de 5 ml de óleo foi definido por testes preliminares.

Os ensaios preliminares servem para validar e definir a quantidade de lubrificante necessária para a conformação da peça plenamente. Os ensaios foram realizados em uma máquina ROMI D600. Para realizar a movimentação foi utilizado o Software ESPRIT CAM, a programação, com uma trajetória de ferramenta em hélice, com um ângulo mínimo de hélice de 1°C e os parâmetros completo do Software pode ver visto no Apêndice F.

Os parâmetros utilizados para programação do código G constam na Tabela 6.4. Sendo assim realizou-se os testes 01 e 04 com 10ml de óleo VG 68, estes dois os foram escolhidos por serem, respectivamente, os de menor e maior exigência de força de processamento, caracterizada pelo Ap e velocidade de rotação.

Os dois testes foram realizados e a conformação ocorreu em sua plenitude, onde estes testes servem com base inicial para a definição a quantidade mínima de lubrificante a ser utilizado na conformação das peças definidas pelo projeto de experimento.

Desta forma, seguiu-se para a realização de novos testes variando a quantidade de lubrificante. Os testes 01 e 04 foram realizados com 8, 6, 4 e 2 ml de óleo lubrificante. As conformações com 8, 6 e 4ml de óleo foram realizadas com sucesso. Nos testes com 2 ml de óleo não se obteve a conformação adequada da peça, gerando um desgaste excessivo na peça como pode ser visto na Figura 6.9.

Foi utilizado para a as conformações uma peça de geometria simétrica e simples, como pode

Tabela 6.3: Composição química do SAE 1045, ArcelorMittal.

Composição química SAE 104,	
Carbono	0,430 - 0,480 %
Manganês	0,60 - 0,90 %
Silício	0,150 - 0,300 %
Ferro	98,7 - 98,0 %

Tabela 6.4: Parâmetros do processo - ensaios preliminares

Teste	Ap (mm)	Rotação (RPM)	Avanço (mm/min)	Tempo (min)
01	0,2	3000	1200	1h17min
02	0,2	6000	1200	1h17min
03	0,6	3000	1200	22min
04	0,6	6000	1200	22min

ser vista na figura 6.10.

A programação CAD/CAM define o caminho da ferramenta que vai ser executada pela ferramenta de conformação, este caminho é delimitado pelo modelo CAD que foi inserido no software de CAD/CAM. Para a definição do movimento da ferramenta foi utilizado o Software ESPRIT CAM com uma estratégia de acabamento com uma movimentação nos três eixo simultaneamente, realizando uma trajetória de descida em hélice com um angulo mínimo de 1°C, como pode ser vista na figura 6.11, esta estratégia de hélice reduz o tempo de conformação e reduz as marcas da peça final.

A fixação da chapa para ser conformada foi realizada através de um dispositivo prensa chapa, onde a chapa é presa por 12 parafusos M12, na qual os parafusos receberam um aperto de 76Nm com um torquímetro de estalo Tramontina Pro. Na Figura 6.12 pode-se observar a fixação do dispositivo na mesa da máquina e a fixação da chapa de alumínio.

### 6.3.2 Projeto de experimentos

Para otimizar os ensaios práticos, correlacionando as variáveis e reduzindo o número de experimentos a serem realizados, foi utilizado o software DOE++ que visa facilitar a aplicação das técnicas do tradicional delineamento de experimentos, possibilitando estudar os fatores que podem afetar um produto ou processo. Desse modo é possível, de maneira precisa, identificar a importância desses fatores e otimizar projetos e processos. Além do método padrão, o software também permite a realização de análises a partir de dados em intervalo e censuras à direita, permitindo um grande avanço nas análises relacionadas à confiabilidade.



Figura 6.9: Resultado da conformação da peça utilizando 2ml de óleo lubrificante

Os parâmetros de entrada são, passo vertical em Z ( $A_p$ ), avanço no plano XY ( $f$ ) e rotação da ferramenta ( $\omega$ ). Estes parâmetros de entrada possuem uma variação de:  $A_p$  0.2, 0.4 e 0.6 mm;  $f$  de 600, 1200, e 2400 mm/min, S de 600, 1200, e 2400 RPM. São 3 variáveis com uma variação em 3 níveis. conforme tabela 6.5.

Tabela 6.5: Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos

Parâmetros	$A_p$ (mm)	Avanço (mm/min)	Rotação (RPM)
Níveis	0.2	600	600
	0.4	1200	1200
	0.6	2400	2400

Optou-se por executar todas as combinações possíveis entre esses valores que executar 27 ensaios e não utilizar réplicas dos ensaios, pois são 3 incógnitas com uma variação em 3 níveis, assim reduzindo este número de ensaios, de 81 para 27, mantendo a qualidade de resposta do experimento, foi utilizado o método Taguchi L27 ortogonal. Este método foi aplicado a partir do software DOE++ que correlaciona as variáveis e reduz o número de experimentos a serem realizados. O método visa facilitar a aplicação das técnicas do tradicional delineamento de experimentos (DOE), possibilitando estudar os fatores que podem afetar um produto ou processo. Desse modo é possível, de maneira precisa, identificar a importância desses fatores e aperfeiçoar projetos e processos. Com a aplicação desse método foi obtida a tabela 6.6 de experimentos a serem realizados.

Cada teste foi repetido  $n$  vezes até conformar um lote de 10 peças ou até a ferramenta apresentar um desgaste de topo 0,10mm, desgaste de topo conforme apresentado na figura 6.1, definiu-se

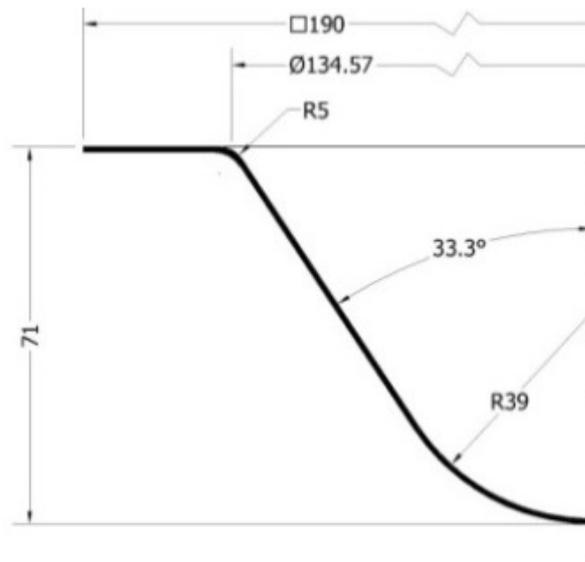


Figura 6.10: Perfil da peça a ser conformada (unidades em milímetros)

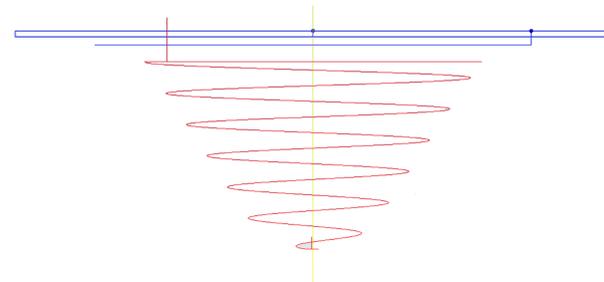


Figura 6.11: Trajetória da ferramenta

os dois critérios, o desgaste máximo da ferramenta de 0,10mm ou a conformação de um lote de 10 peças, o que ocorrer primeiro. O parâmetro de desgaste de 0,10 mm, pois como pode ser visto na figura 6.13 um desgaste pequeno na ferramenta gera uma planificação na ponta de ferramenta grande assim não conformando peças com detalhes pequenos.

## 6.4 Análise de desgaste da ferramenta de SPIF

Para entender os efeitos do desgaste da ferramenta na própria ferramenta e correlaciona-lo ao processo de conformação, foi realizado um estudo do desgaste de topo gerado na ferramenta. Para qualificar e quantificar o valor de desgaste, aplicou-se o o teorema de Pitágoras para modelar a ocorrência de desgaste na região.

Para encontrar o comprimento do Linha de planificação C, foi utilizada o teorema de Pitágoras. Substituindo os valores de X e Y na formula de Pitágoras pelos valores da Figura 6.13 (b) como função do valor do desgaste superior medido na ferramenta (Dtt), obtivemos a equação (6.11).

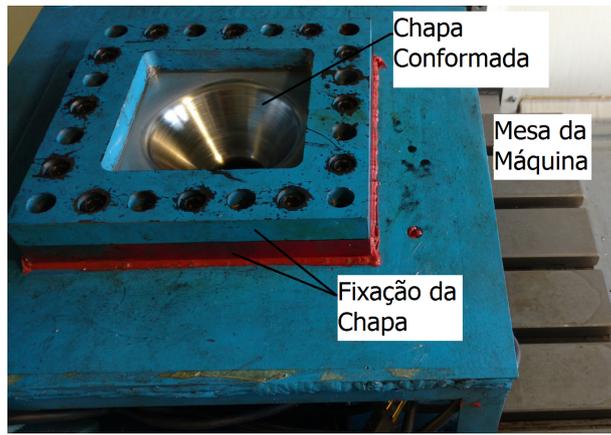


Figura 6.12: Dispositivo de fixação

$$r^2 = (r - D_{tt})^2 + \left(\frac{C}{2}\right)^2 \quad (6.11)$$

Para melhorar a compreensão do modelo de desgaste de topo a figura 6.13 (a) apresenta um como exemplo, uma ferramenta de 12,53 mm de diâmetro que sofreu um desgaste de topo de 0,05 mm, que pode ser observado na parte mais escura da ferramenta, com este valor ocorre uma planificação da ferramenta. Este pequeno desgaste superior faz com que a parte superior da ferramenta tenha sua área de contato com a peça aumentada de um contato de ponto para uma área de contato, neste caso, 1,58mm de diâmetro. A área de contato aumentada causa maior fricção entre a ferramenta e a chapa e gera um aumento progressivo no desgaste da ferramenta, reduz a qualidade do acabamento da peça final e limita o nível de detalhamento da peça final conformada e gera um maior erro dimensional da peça conformada.

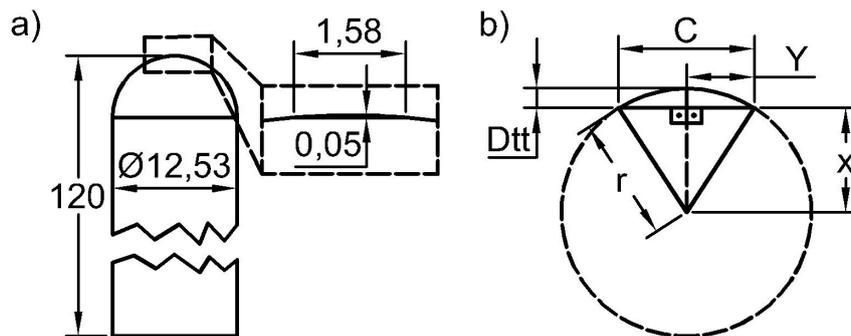


Figura 6.13: Desgaste de topo (Dtt) (a) aplicação de teorema de Pitágoras no desgaste de topo (b)

Realizando as operações matemáticas necessárias para colocar o C como variável dependente, se obtém o valor da linha de contato ferramenta-chapa, equação (6.12).

$$C = \sqrt{((r - (D_{tt}/2)) * (8 * D_{tt}))} \quad (6.12)$$

Tabela 6.6: Fatores e os respectivos níveis de ensaios práticos

Teste	Entradas			Saida
	Ap [mm]	f [mm/min]	S [RPM]	tempo [h:min]
1	0.2	600	600	26:06
2	0.2	600	1200	26:06
3	0.2	600	2400	26:06
4	0.2	1200	600	12:13
5	0.2	1200	1200	12:13
6	0.2	1200	2400	01:09
7	0.2	2400	600	06:06
8	0.2	2400	1200	04:16
9	0.2	2400	2400	03:03
10	0.4	600	600	12:13
11	0.4	600	1200	12:13
12	0.4	600	2400	01:13
13	0.4	1200	600	06:06
14	0.4	1200	1200	04:16
15	0.4	1200	2400	00:36
16	0.4	2400	600	03:03
17	0.4	2400	1200	01:50
18	0.4	2400	2400	00:18
19	0.6	600	600	06:31
20	0.6	600	1200	08:09
21	0.6	600	2400	00:48
22	0.6	1200	600	04:04
23	0.6	1200	1200	04:04
24	0.6	1200	2400	00:22
25	0.6	2400	600	01:01
26	0.6	2400	1200	02:02
27	0.6	2400	2400	00:36
Tempo total de conformação: 186h56min22s				

Para a análise do desgaste da ferramenta, foi utilizado um projetor de perfil Hexagon JT12A-B, para comparação entre o perfil da ferramenta inicial e o perfil da ferramenta final.

A análise do desgaste, Figura 6.14 mostra uma remoção de imagem do perfil do projetor de desgaste superior como a ferramenta de formação correspondente ao teste 6, que apresentou um desgaste de 0,223mm.

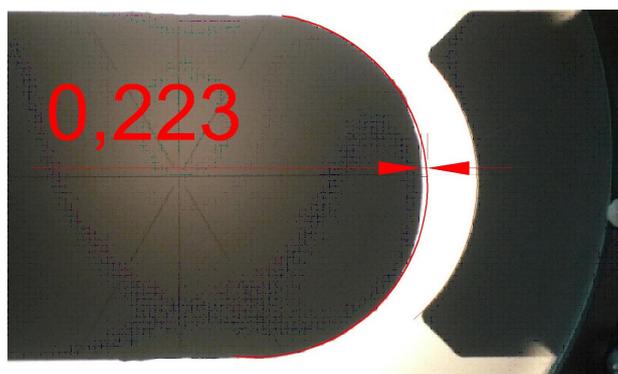


Figura 6.14: Imagem de projetor de perfil do teste (6)

## 6.5 Execução dos testes e análises

O software Reliasoft foi utilizado para realizar o teste de análise de variância. Para realizar as medições da rugosidade, foi utilizado um rugosímetro SJ-310 com uma resolução de 0,002 microns. O perfil da superfície de rugosidade média (Ra), a unidade de rugosidade mais utilizada na literatura é obtida pela média aritmética das 5 medidas realizadas em cada peça. A rugosidade média de cada lote, onde o lote é composto pelo quantidade de peças conformadas com aquele mesmo parâmetro, é mostrada na Tabela 6.7.

A tabela 6.7 mostra os fatores de entrada associadas as tecnologia do SPIF ( $A_p$ ,  $f$ ,  $S$ ) com os fatores de saída da rugosidade superficial das peças, o desgaste da ferramenta e tempo de conformação.

A Figura 6.15(a) apresenta uma peça um acabamento superficial menor que 0,4 microns. Esta peça foi conformada com os seguintes parâmetros:  $A_p = 0,2$  mm,  $S = 1200$  rpm e  $f = 600$  mm / min. Esses parâmetros estão relacionados ao teste 2 e a parte apresentada é a segunda peça de uma sequência de 10. Em particular, para esta peça obteve-se uma rugosidade Ra de 0,33 microns.

A figura 6.15(b) mostra uma peça com marcas contínuas em toda a área conformada. As marcas são simétricas e são devidas ao fato de se usar baixa rotação juntamente com um alto valor de  $A_p$ . Esta peça foi conformada com os seguintes parâmetros:  $A_p = 0,6$  mm,  $S = 600$  rpm e  $f = 1200$  mm / min. Estes parâmetros estão relacionados ao teste 22 e a parte apresentada é a segunda parte de uma sequência de 10. Para esta peça, em particular, obteve-se a rugosidade Ra de 1,07 microns.

Ao observar os resultados das peças conformadas, podemos notar que o acabamento final das peças varia muito com a variação dos parâmetros de conformação.

Tabela 6.7: Valores de entrada e saída do processo de SPIF

Test	Entrada			Saída		
	Ap [mm]	f [mm/min]	S [RPM]	Ra μm	Desgaste [mm]	Tempo [h:min]
1	0.2	600	600	0.774	0.110	26:06
2	0.2	600	1200	0.338	0.101	26:06
3	0.2	600	2400	0.208	0.168	26:06
4	0.2	1200	600	0.495	0.220	12:13
5	0.2	1200	1200	0.304	0.159	12:13
6	0.2	1200	2400	0.321	0.223	01:09
7	0.2	2400	600	0.478	0.133	06:06
8	0.2	2400	1200	0.425	0.146	04:16
9	0.2	2400	2400	0.253	0.204	03:03
10	0.4	600	600	0.388	0.06	12:13
11	0.4	600	1200	0.727	0.03	12:13
12	0.4	600	2400	0.747	0.101	01:13
13	0.4	1200	600	0.478	0.053	06:06
14	0.4	1200	1200	0.533	0.078	04:16
15	0.4	1200	2400	0.343	0.105	00:36
16	0.4	2400	600	0.643	0.173	03:03
17	0.4	2400	1200	0.957	0.131	01:50
18	0.4	2400	2400	0.448	0.162	00:18
19	0.6	600	600	0.797	0.141	06:31
20	0.6	600	1200	1.003	0.082	08:09
21	0.6	600	2400	0.849	0.106	00:48
22	0.6	1200	600	1.085	0.068	04:04
23	0.6	1200	1200	0.947	0.056	04:04
24	0.6	1200	2400	0.302	0.349	00:22
25	0.6	2400	600	0.903	0.168	01:01
26	0.6	2400	1200	0.883	0.098	02:02
27	0.6	2400	2400	0.652	0.174	00:36

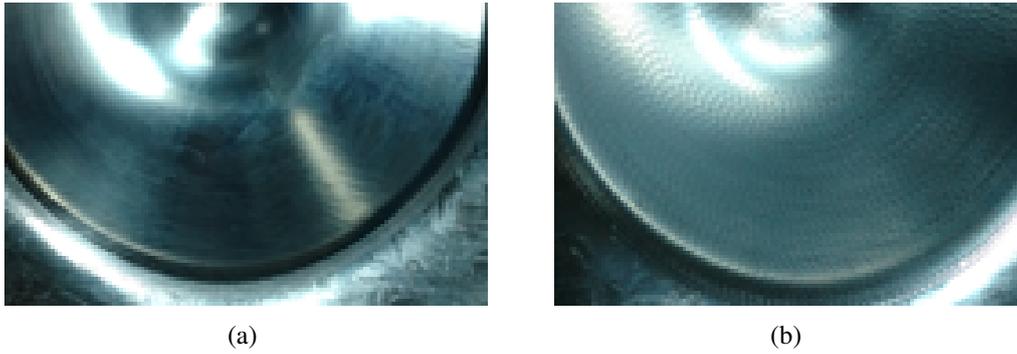


Figura 6.15: Aspecto visual da parte interna do teste 2 com Ra de 0,338  $\mu\text{m}$  (a) e teste 22 com Ra de 1,085  $\mu\text{m}$  (b)

### 6.5.1 Efeitos das variáveis de entrada

Para avaliar os efeitos dos fatores de entrada com fatores de saída, Figura 6.16 e Figura 6.17 onde Figura a 6.16 analisa os efeitos de  $A_p$ , avanço e rotação em relação ao desgaste da ferramenta, sendo uma análise individual dos fatores de entradas com o desgaste da ferramenta. A figura 6.17 apresenta uma análise dos efeitos de  $A_p$ , avanço e rotação em relação a rugosidade.

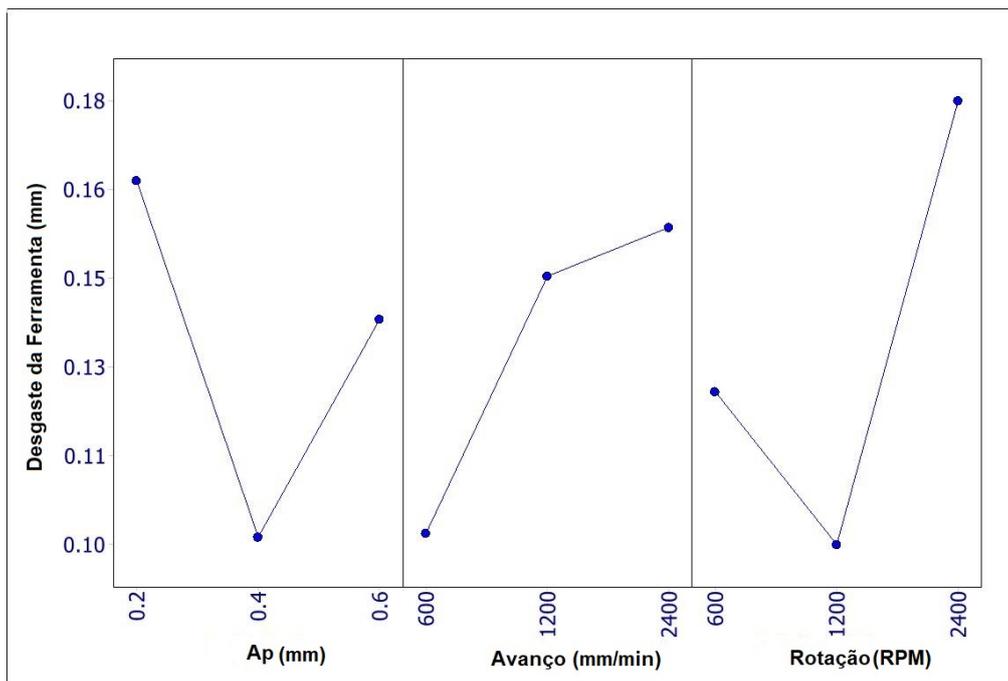


Figura 6.16: Análise do desgaste de ferramenta em relação ao parâmetros de entrada

A figura 6.16 mostra as correlações entre as variáveis de entrada, rotação,  $A_p$  e avanço, com relação de variáveis de saída que é desgaste da ferramenta, esta análise é realizada pelo método de mínimos quadrados, pode-se observar que os valores mais baixos das variáveis geram um menor desgaste na ferramenta, mas, conseqüentemente, temos um tempo de conformação mais longo.

Observando os efeitos da variação da variável  $A_p$ , quando o  $A_p$  é de 0,2 mm, obtemos os maiores valores de desgaste, uma vez que o passo é pequeno e as etapas sobrepostas, o processo também tem um alto tempo de processamento, deixando a ferramenta mais tempo em contato com a peça a ser conformada; já o passo 0.4 mm é o que apresenta o menor desgaste, porque reduz o tempo de contato da ferramenta e a chapa a ser conformada, mas não aumenta muito os esforços de conformação; já um valor de  $A_p$  de 0.6 mm reduz o tempo de conformação drasticamente e possivelmente tem uma força de conformação por passo. Vale enfatizar que o incremento não é executado todo ao mesmo tempo, mas sim aos poucos, como o ângulo da hélice do caminho do ferramenta, sendo é definido pelo software CAM. (Apêndice F)

Em relação ao avanço, o desgaste da ferramenta aumenta de forma crescente, o que se esperava, pois quanto maior o valor da velocidade de avanço de conformação, maior o desgaste da ferramenta, isso resulta nos maiores esforços de conformação.

Quando observa-se o desgaste da ferramenta em relação à rotação, tem-se um comportamento diferenciado que se esperaria normalmente, porque trabalhando com baixas rotações, o desgaste é relativamente alto devido ao fator de arrasto da ferramenta em relação à placa, já na rotação de 1200 RPM, obtém-se o menor desgaste da ferramenta, provavelmente, devido ao aquecimento local da chapa a uma temperatura tolerável para a ferramenta de formação ao ponto de contribuir para a redução dos esforços de conformação da chapa moldada. Na rotação de 2400 RPM, gera-se alta fricção entre a ferramenta e a chapa que obtém-se uma temperatura elevada que para a conformação pode ser excelente, mas para a ferramenta a temperatura muito alta gera a degradação da ferramenta, levando ao seu desgaste prematuro, em função dos diversos mecanismos de desgaste gerado pela alta temperatura.

A Figura 6.17 apresenta uma relação entre  $A_p$ , o avanço ( $f$ ) e a rotação ( $S$ ) em relação à rugosidade  $R_a$  da peça final. Esta análise é realizada pelo método dos mínimos quadrados, mostrando que a processamento com altas rotações pode produzir menor rugosidade superficial das peças, melhorando o acabamento de peças em conformadas. O fato mais importante a observar é a melhoria da qualidade da superfície à medida que o valor da rotação aumenta, ainda pode ser dito que há um avanço que seria um ponto ótimo para a questão da rugosidade que seria de 1200 mm/min.

Quando analisamos cada uma das variáveis individualmente, pode-se notar que para o valor do passo de 0,2mm, o desgaste é mais acentuado e a rugosidade da superfície é baixa, agora quando o  $A_p$  aumenta o oposto do que foi imaginado, o desgaste da ferramenta diminui (figura 6.17 e a rugosidade aumenta. O avanço não apresenta um padrão entre desgaste e rugosidade, como pode ser visto na Figura 6.17, porque quando o avanço utilizado é 600mm/min, o desgaste é baixo e a rugosidade é elevada; já com um avanço de 1200 mm/min, o desgaste é elevado a rugosidade é baixa; já com um avanço de 2400 mm/min o desgaste alto e a rugosidade também. A rotação também não apresenta um padrão definido, porque quando a rotação é de 600 RPM, a ferramenta sofre desgaste elevado e a alta rugosidade agora quando a rotação é alta 2400 RPM, o

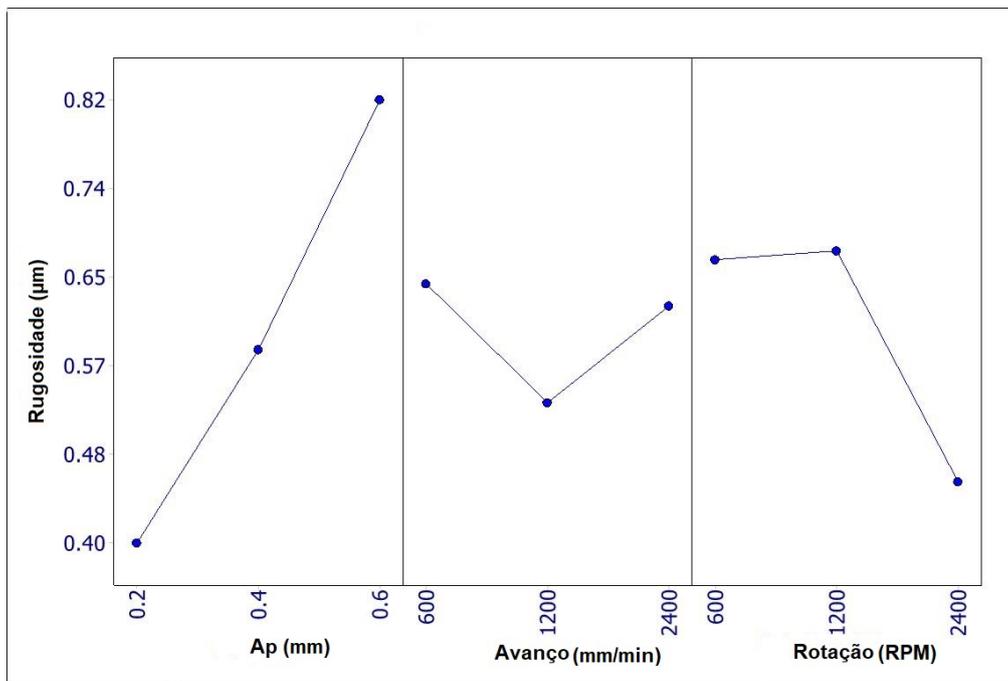


Figura 6.17: Análise da rugosidade da peça final em relação ao parâmetros de entrada

desgaste da ferramenta é elevado e a rugosidade é baixa.

A Figura 6.18 as variáveis de entrada (rotação e avanço) são analisadas, com a variável de saída do desgaste da ferramenta, para obter uma compreensão geral do processo completo em relação às variáveis de entrada com o desgaste da ferramenta. Neste gráfico foi analisado o avanço e a rotação pelo método de mínimos quadrados, onde pode-se observar na apresentação das três linhas de tendência que é o processo com um ponto ótimo com o que seria com seria próximo dos valores de rotações 1200RPM e avançar em 1200 mm/min.

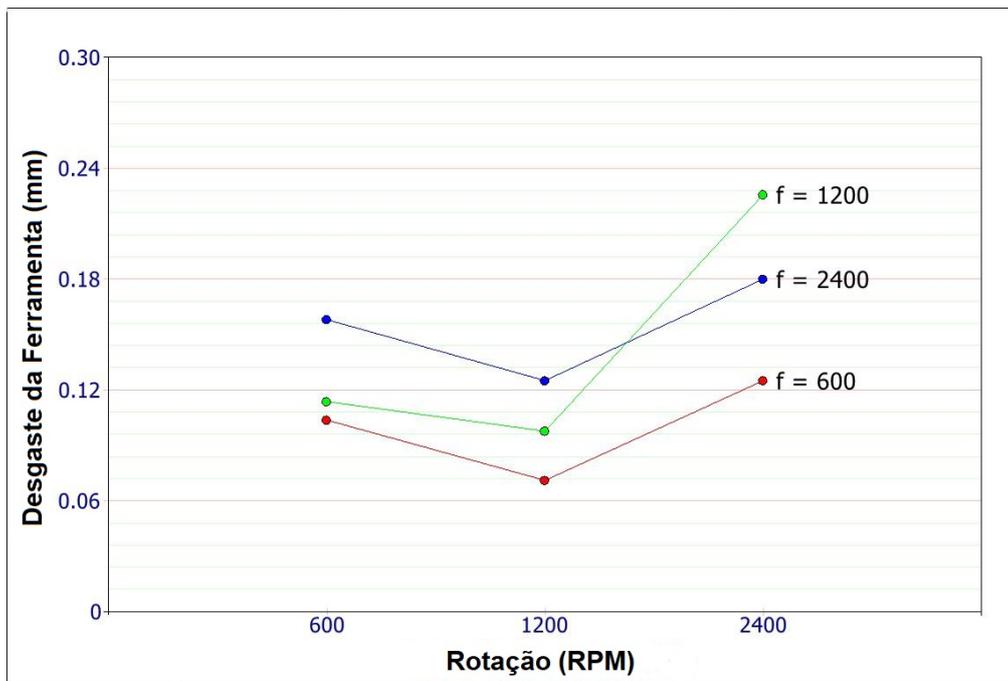


Figura 6.18: Análise do desgaste de ferramenta de conformada em relação aos dados de entrada

A Figura 6.19 apresenta a rugosidade da peça final em relação aos parâmetros de entrada (avanço e a rotação) foram analisados usando o método quadrático de mínimos quadrados, observando-se uma forte tendência que o processo pode gerar peças finais com um acabamento superficial com valores de rugosidade menor que 0,4 microns, quando os valores de rotação e avanço são de 2400 RPM e avanço de 1200mm/min, respectivamente, isto pode estar relacionado com a temperatura de processamento da visão que quanto mais rápida a execução do processo, maior a temperatura de processamento e o aquecimento é pontual, realizada pelo atrito da ferramenta com a chapa, redução do tempo de trabalho, conseqüentemente o tempo de contato da ferramenta com a chapa, a conformação é reduz ao tempo de dissipação de calor durante o processo de conformação, aumentando a temperatura média de processamento.

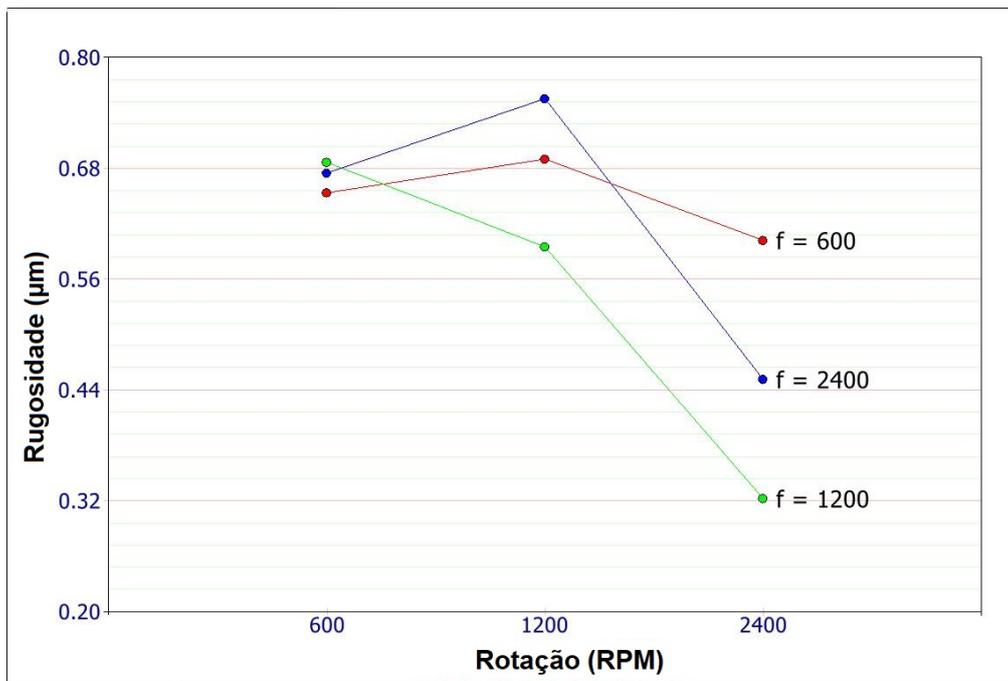


Figura 6.19: Análise da rugosidade da peça final em relação as parâmetros de entrada

A melhoria da qualidade da superfície pode ser relacionada a dois fatores principais, com o aumento da rotação aumenta o atrito entre a ferramenta e a chapa a ser conformada, aumentando assim a temperatura pontual de conformação, facilitando a conformação e reduzindo as marcas de conformação e/ou o aumento da rotação faz com que a ferramenta gire muitas vezes no mesmo ponto, criando assim um tipo de polimento na chapa, melhorando assim o acabamento superficial. Estes dois fatores podem ser correlacionados e trabalhar em conjunto para obter uma peça com bom acabamento.

O atrito elevada gerado pela alta rotação pode ser equiparado às taxa de avanço, porque quando o avanço aumenta demasiadamente, a temperatura do processo também aumenta, como o aquecimento é pontual causado pelo atrito com o aumento do avanço ocorre a redução do tempo de processamento assim não há suficiente tempo para isso este calor é dissipado.

A Figura 6.20, 6.21 e 6.22 apresenta uma parte da análise de rugosidade que correlaciona a rotação,  $A_p$  e avanço na Figura 6.20, onde o valor  $A_p$  é 0,2 mm para a Figura 6.21, o  $A_p$  é 0,4 mm e  $A_p$  na Figura 6.22 é de 0,6 mm, pode-se observar que quando aumenta o valor de  $A_p$ , conseqüentemente o valor da rugosidade também aumenta, mas se os outros parâmetros aumentam, ocorre uma diminuição da rugosidade, também pode ser observado que irrelevantemente do valor de  $A_p$  quando é que uma rotação é alta, próxima de 2400 RPM, obtemos uma boa qualidade de superfície. Olhando agora para a relação que a rugosidade tem com o avanço para este processo, quando o valor de avanço próximo ao valor de 1200 mm/min se obtém a melhor qualidade de superfície ou seja baixa rugosidade superficial.

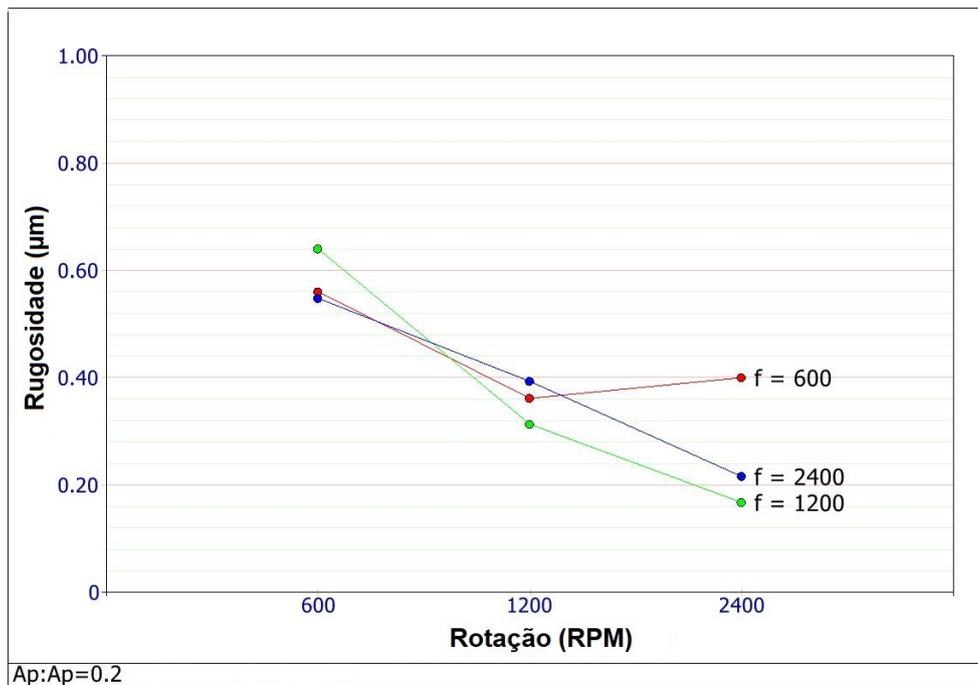


Figura 6.20: Análise da rugosidade da peça final em relação aos dados de entrada, com um  $A_p=0,2\text{mm}$

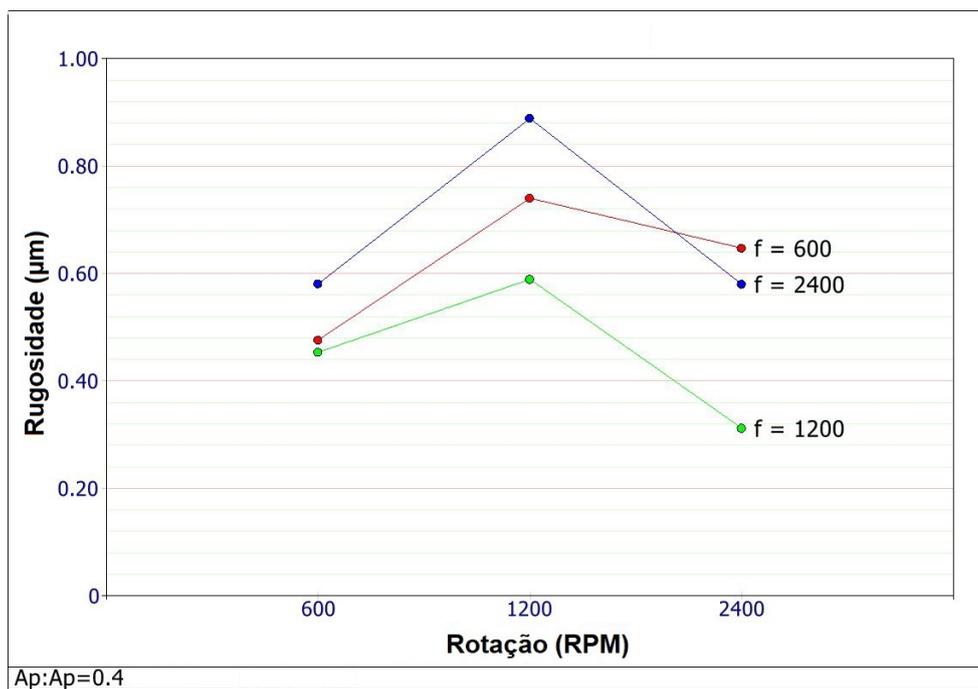


Figura 6.21: Análise da rugosidade da peça final em relação aos dados de entrada, com um  $A_p=0,4\text{mm}$

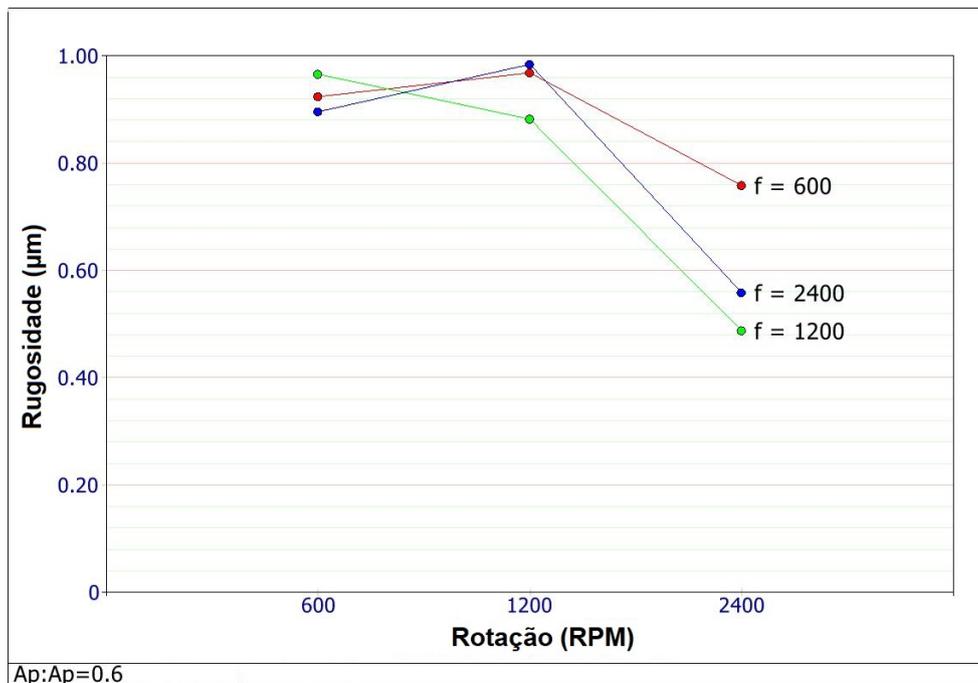


Figura 6.22: Análise da rugosidade da peça final em relação aos dados de entrada, com um  $A_p=0,6\text{mm}$

A Figura 6.23, 6.24 e 6.25 apresenta a análise do desgaste da ferramenta em relação aos parâmetros de rotação e avanço, separados pelo valor de  $A_p$  que é dividido por 0,2 0,4 e 0,6 mm, pode-se observar que o desgaste da ferramenta quando se usa uma  $A_p$  de 0,2mm é muito maior quando comparada com o  $A_p$  de 0,6 mm, isso deve-se ao fato de que, que o tempo de contato do ferramenta é muito maior para  $A_p=0,2$  mm, a ferramenta fica mais tempo em fricção com a peça, por outro lado, a conformação de 0.6 mm deve desgastar mais a ferramenta porque teoricamente necessita de mais força de conformação, o  $A_p$  maior reduz o tempo de conformação, mas não necessariamente aumenta o desgaste, pois o caminho da ferramenta sempre é realizado na hélice, com isto o  $A_p$  não executa em um único momento, mas sim distribuindo ao longo de uma volta completa na execução da peça. Esta ideia é válida para peças que não sejam de tamanho que pode ser consideradas micro peças, teoricamente, quanto maior, a peça maior pode ser nosso  $A_p$ , em vista do que o valor de  $A_p$  será inserido gradualmente no processo de conformação. Vale ressaltar que esta é uma análise parcial dos parâmetros de entrada do processo.

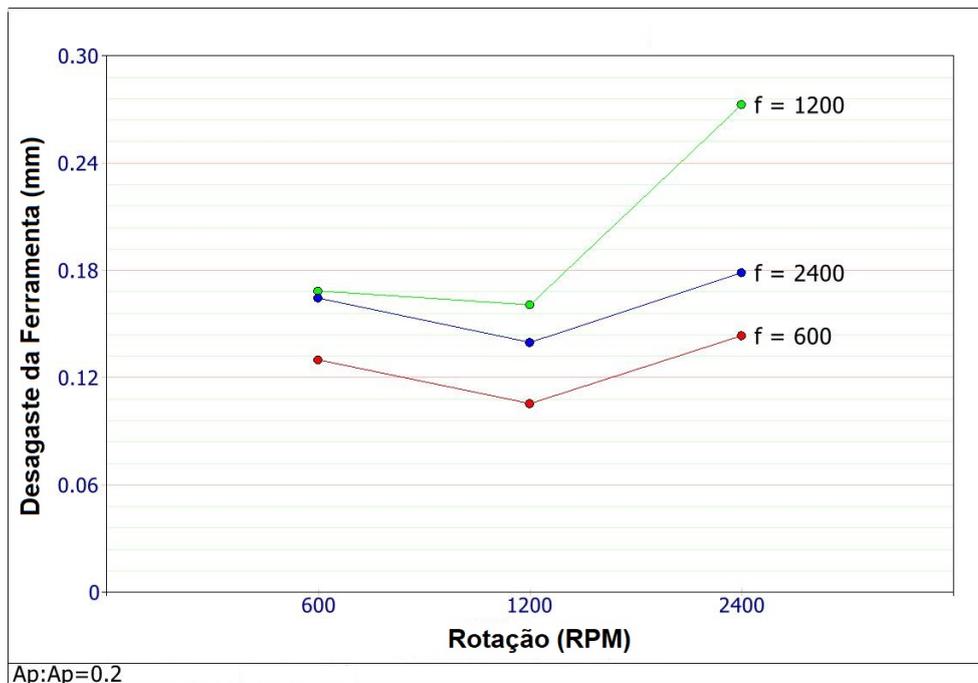


Figura 6.23: Análise do desgaste da ferramenta em relação ao Ap 0,2mm

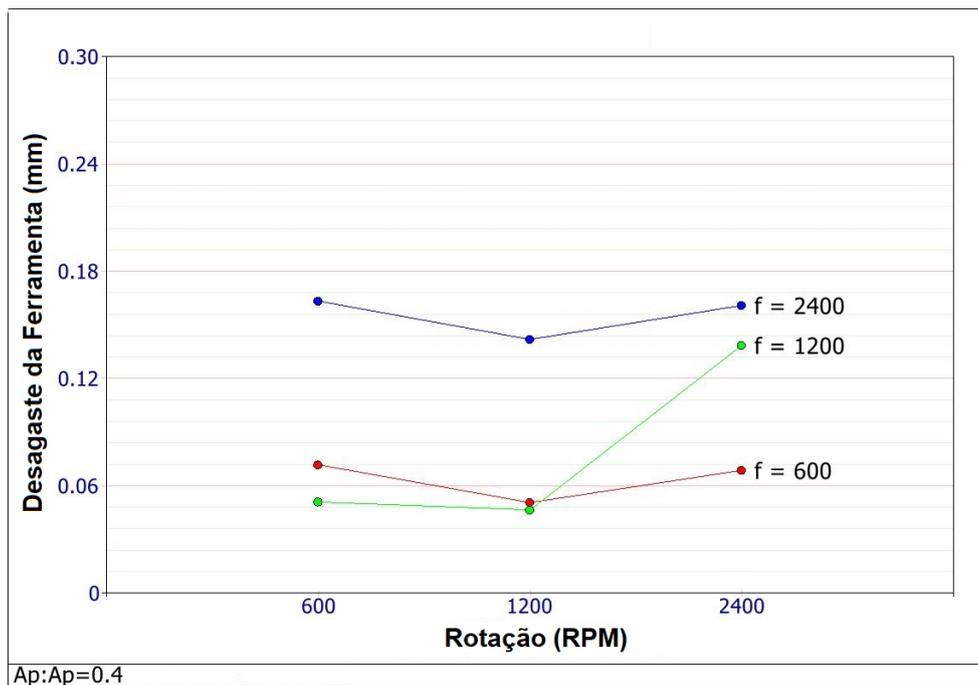


Figura 6.24: Análise do desgaste da ferramenta em relação ao Ap 0,4mm

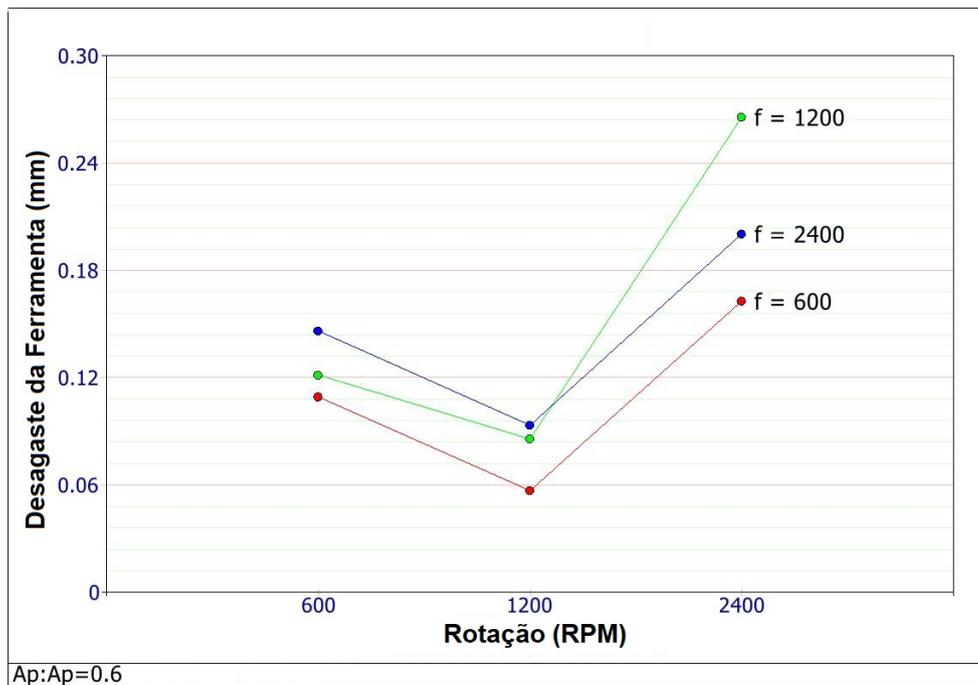


Figura 6.25: Análise do desgaste da ferramenta em relação ao  $A_p$  0,6mm

A alta rotação da ferramenta gera alta fricção entre a chapa a ser formada e a ferramenta de formação. Embora esta fricção possa prejudicar o acabamento da peça, a análise dos testes realizados resultou na conclusão de que quanto maior a rotação, melhor a rugosidade da parte final. Mas apenas na rotação não melhora o processo, trabalhando com uma relação entre rotação e avanço, pode reduzir o tempo de conformação e obter uma boa qualidade de superfície.

## 6.6 Equacionamento matemático empírico de predição de vida de ferramenta

Para definir um equacionamento matemático para explicar o comportamento da chapa de aço galvanizada com uma ferramenta de conformação SAE 1045 no processo SPIF, foi feita uma regressão múltipla do modelo teórico experimental. Com os resultados obtidos, no software SPSS e Statdisk, a equação 6.13 foi configurada. (Apêndice H e I)

Além dos coeficientes e do fator de multiplicação da equação, o software apresenta o coeficiente de determinação do modelo ( $R^2$ ) e o valor de significância ( $\text{sig}$ ) como resposta.

O coeficiente de determinação representa o quanto o modelo explica a variável, neste caso o Dtt. Valores satisfatórios para  $R^2$  estão acima de 0.7, o que significa que a equação representa 70 % dos casos. O nível de significância representa o nível de correção necessário entre os dados apresentados com a variável dependente, que deve estar abaixo de 0,05 ou 5 por cento.

Para a equação (6.13), o valor R2 obtido foi de 0,495, o que significa que o modelo explica 49,5 por cento do desgaste e os valores de significância obtidos também estavam fora dos limites aceitáveis e o objetivo proposto no estudo, onde  $K = 0,886$ ,  $f = 0,719$ ,  $T = 0,014$ ,  $S = 0,656$  e  $Ap = 0,002$ .

$$Dt = 1,695 f^{(-0,89)} T^{(-0,420)} S^{(-0,116)} Ap^{(-1,064)} \quad (6.13)$$

Assim a equação 6.13 deve ser reestruturada para atingir o objetivo. Neste caso, uma modificação foi feita na ordem das variáveis que deixam como variável dependente do tempo de conformação, ou melhor, a vida útil da ferramenta, tomando uma equação (6.14) como segue:

$$T = K f^P Dt^M S^L ap^A \quad (6.14)$$

Ao modificar os dados de entrada do SPSS, para ajustar a nova equação, os novos coeficientes foram obtidos, sendo os mesmos apresentados na equação (6.15).

$$T = 5.598.448,143 f^{(-0,876)} Dt^{(-0,581)} S^{(-0,973)} Ap^{(-1,681)} \quad (6.15)$$

Fazendo uma nova análise da convergência da equação 6.15 no software SPSS, obtivemos um coeficiente de determinação (R2) de 0,822 mostrando que o modelo explica 82,2 por cento da vida útil da ferramenta e os valores significativos foram  $K = 0,000$ ,  $F = 0,001$ ,  $Dtt = 0,014$ ,  $S = 0,00$  e  $Ap = 0,000$ , tudo abaixo de 0,05.

### 6.6.1 Gráficos de resposta e efeitos de interação para Dtt e T

Se o modelo considerar com precisão o efeito do fator, os resíduos (as diferenças entre os valores de resposta observados em cada nível de fator e os valores de resposta previstos pelo modelo) devem ser aproximadamente normais e distribuídos de forma independente, como pode ser visto nas figuras 6.26 e 6.27, onde observa-se que alguns pontos da curva não se encaixam na linha normal.

Na figura 6.26, pode-se ver que alguns pontos não foram ajustados à curva, causando alguns erros de convergência e uma imprecisão na conveniência da fórmula matemática. Os pontos fora da curva estão fora dos limites programados da linha residual, que neste caso é de -0.4 a +0.4.

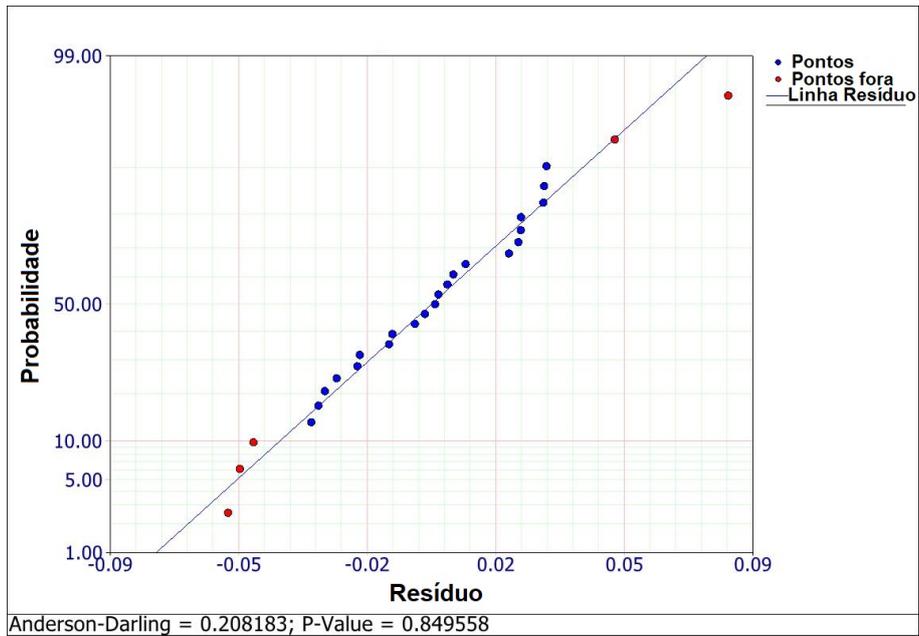


Figura 6.26: Probabilidade residual para o desgaste da ferramenta

Pode ser observado na figura 6.27 que a maioria dos valores convergiu para perto da linha de resíduos normais, obtendo assim um excelente resultado da equação matemática realizada em relação ao tempo de vida da ferramenta.

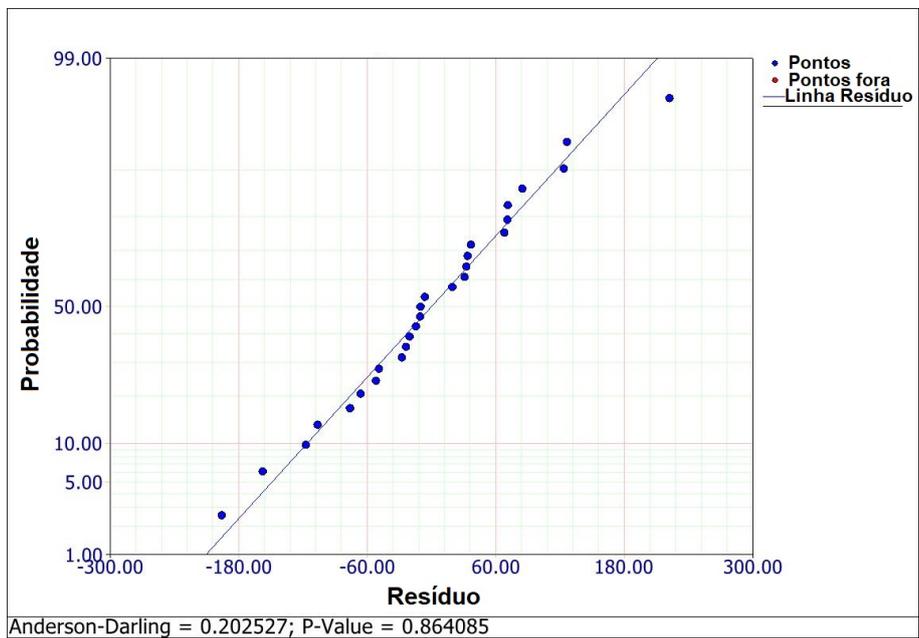


Figura 6.27: Probabilidade residual para o tempo de vida de ferramenta

## 6.7 Confirmação de resultados experimentais

### 6.7.1 Confirmação: Experimental X Calculado

Para obter uma melhor comparação entre os resultados obtidos através das medições e o resultado obtido pelos equacionamentos matemáticos geradas, foi criada a Tabela 6.8, onde pode-se observar os valores medidos e calculados (preditos).

Tabela 6.8: Experimental X Calculado

Teste	Fatores			Experimental			Calculado		% Erro	
	Ap (mm)	f (mm/min)	S (RPM)	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Desgaste [mm]	Tempo [min]	Desgaste [mm]	Tempo [min]	Desgaste (%)	Tempo (%)
1	0.2	600	600	0.774	0.110	1567	0.115	2204	4.54	28.91
2	0.2	600	1200	0.338	0.101	1567	0.106	1180	5.01	32.80
3	0.2	600	2400	0.208	0.168	1567	0.098	447	71.23	250.35
4	0.2	1200	600	0.495	0.220	733	0.149	803	47.64	8.63
5	0.2	1200	1200	0.304	0.159	733	0.137	494	15.63	48.52
6	0.2	1200	2400	0.321	0.223	70	0.341	207	34.66	66.36
7	0.2	2400	600	0.478	0.133	367	0.187	586	29.05	37.43
8	0.2	2400	1200	0.425	0.146	257	0.200	283	27.34	9.23
9	0.2	2400	2400	0.253	0.204	183	0.213	118	4.47	54.56
10	0.4	600	600	0.388	0.06	734	0.075	977	20.85	24.96
11	0.4	600	1200	0.727	0.03	734	0.069	745	57.11	1.53
12	0.4	600	2400	0.747	0.101	73	0.169	187	40.51	60.87
13	0.4	1200	600	0.478	0.053	367	0.095	572	44.43	35.94
14	0.4	1200	1200	0.533	0.078	257	0.102	233	23.70	10.17
15	0.4	1200	2400	0.343	0.105	37	0.213	99	50.84	63.28
16	0.4	2400	600	0.643	0.173	183	0.119	156	44.21	16.88
17	0.4	2400	1200	0.957	0.131	110	0.137	94	4.51	17.12
18	0.4	2400	2400	0.448	0.162	18	0.268	42	39.70	56.65
19	0.6	600	600	0.797	0.141	391	0.064	301	119.92	30.03
20	0.6	600	1200	1.003	0.082	489	0.053	210	52.22	132.86
21	0.6	600	2400	0.849	0.106	49	0.130	92	18.93	46.94
22	0.6	1200	600	1.085	0.068	245	0.073	250	7.41	2.39
23	0.6	1200	1200	0.947	0.056	245	0.067	143	17.37	71.15
24	0.6	1200	2400	0.302	0.349	22	0.172	25	103.10	12.35
25	0.6	2400	600	0.903	0.168	61	0.123	80	35.96	24.21
26	0.6	2400	1200	0.883	0.098	122	0.085	56	14.99	117.55
27	0.6	2400	2400	0.652	0.174	37	0.130	21	33.44	78.83
Tempo total efetivo de conformação: 186h56min22s							Media		33.44	35.94

As colunas do modelo previsto estão apresentando os dados calculados a partir das fórmulas de desgaste da ferramenta e da vida da ferramenta. Para compreender a relação entre os valores foram calculados e medidos, foi dividido um valores pelo outro assim a coluna de porcentagem de erro, onde se pode observar qual o valor do erro para cada experimento executado. A taxa de erro geral é 33,44 % para a fórmula de desgaste e 35,94 % para a fórmula da vida, os valores de erros pode-se melhorar com a execução de ensaios com variação do material ferramenta e outros

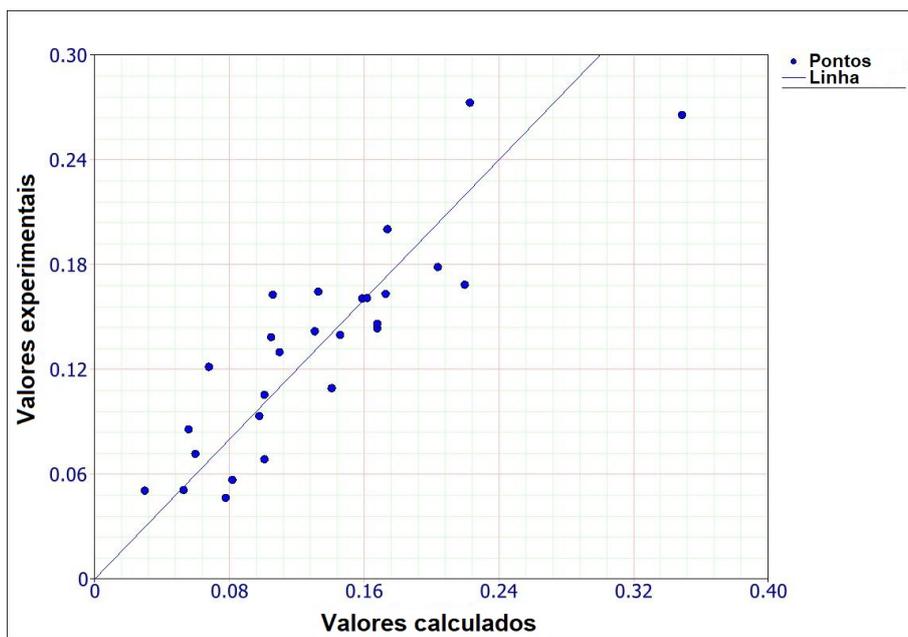


Figura 6.28: Gráfico valores experimentais e calculados de resposta para o desgaste de ferramenta

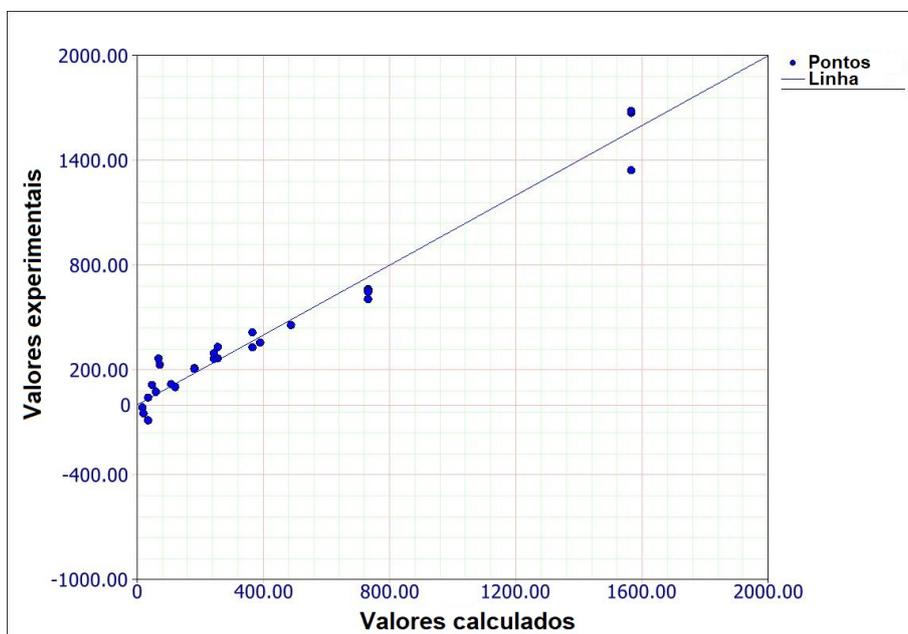


Figura 6.29: Gráfico de valores experimentais e calculados em resposta ao tempo de conformação

parâmetros de processo, porém este equacionamento matemático é o único que pode estar a vida da ferramenta o para o processo de SPIF.

Um gráfico de respostas experimentais e previstos está representado nas Figuras 6.28 e 6.29. Pode-se ver que a distribuição de pontos está próxima da linha reta, mas na figura 6.28 pode ser visto dois pontos adicionais, teste 6 e teste 24, enquanto na figura 6.29 podemos ver 3 pontos além do ensaio 1,2 e 3, mas, em geral.

Observa-se que os pontos de dados são distribuídos próximos da linha, indicando uma precisão entre as respostas experimentais e calculadas.

## 6.7.2 Análise de causas e efeitos

Para análise de causa e efeito dos parâmetros de entrada com os dados de saída, a Tabela 6.9 foi realizada.

Tabela 6.9 mostra que, quando o avanço aumenta, o desgaste da ferramenta e a temperatura do processo aumentam, o tempo de processamento diminui e a rugosidade da parte final é pouco influenciada pelo avanço. O aumento do desgaste da ferramenta e a temperatura de processamento aumentam em conjunto, o tempo de processamento não é influenciado pela rotação, mas com rotação aumentada pode ser alcançada uma melhoria significativa no acabamento da superfície da peça.

Quando  $A_p$  aumenta, o desgaste da ferramenta não mostra variações significativas, há um aumento na temperatura de processamento, o tempo de formação é sensivelmente reduzido e a qualidade da superfície da peça de trabalho melhora.

Tabela 6.9: Condições de entrada e resultado de saída

Aumenta $\triangle$ Diminui $\nabla$ Indiferente $\diamond$	condições de conformação		
	Avanço	Rotação	$A_p$
Aumento do desgaste	$\triangle$	$\triangle$	$\diamond$
Aumento da temperatura de processamento	$\triangle$	$\triangle$	$\triangle$
Aumento do tempo de processo	$\nabla$	$\diamond$	$\nabla$
Aumento da rugosidade da peça	$\diamond$	$\nabla$	$\nabla$

## 6.8 Resumo e conclusões do capítulo

Esta secção apresenta um equacionamento matemático associado ao desgaste da ferramenta e avaliação da vida útil da ferramenta para o processo SPIF, onde a ferramenta foi fabricada em aço SAE 1045 sem tratamento térmico, utilizada para conformar chapas de aço galvanizado com 0,95 mm de espessura, conformando um peça de geometria simples simétrico, circular no formato de tronco de pirâmide. Trabalhando com os parâmetros de processamento pode-se utilizar uma ferramenta de conformação por 1567 minutos apresentado um desgaste de topo inferior a 0,1 milímetros.

Com a realização dos testes experimentais, foi possível obter um equacionamento matemático de predição do tempo de vida de uma ferramenta para o SPIF, equação 6.15, com o par de ferramentas de aço SAE 1045 conformando chapas de aço galvanizado. Os resultados do estudo apresentam um modelo original de previsão do desgaste da ferramenta em relação aos parâmetros de entrada para o processo SPIF, a taxa de erro geral é de 33,44 % para o modelo de previsão de desgaste e de 35,94 % para o modelo de tempo de vida de predição.

Foi verificado experimentalmente as rotações de 1200 RPM e 2400 RPM melhoram o acabamento superficial da peça, pois nestas rotações ocorre uma espécie de polimento da peça devido a ferramenta passar varias vezes no mesmo ponto, por outro lado aumenta o desgaste da ferramenta devido ao aumento de atrito entre a chapa e a ferramenta. Demonstrou-se que existe uma relação entre a velocidade de avanço e de rotação da ferramenta capaz de produzir peças com alta qualidade de superficial e tempo reduzido de produção, isto principalmente para Ap de 0,4mm rotação de 2400 RPM e avanço 1200 mm/min.

A resistência mecânica da chapa, espessura da chapa, dureza da ferramenta e o acabamento da ponta também são parâmetros do processo SPIF que podem influenciar o desgaste da ferramenta, estes parâmetro se mantiveram-se constantes nestas análises .

Esta secção fornece uma contribuição relevante para estimar a vida da ferramenta do processo de estampagem incremental, permitindo uma melhoria na tecnologia SPIF, entendendo os parâmetros tecnológicos e sua influencia no desgaste da ferramenta e na qualidade superficial da peça possibilitando a otimização do processo de SPIF, que, por meio do modelo empírico, faz uma melhor definição das condições de formação para obter um processo com maior produtividade e menor custo conseguido prever as trocas de ferramenta, para fabricação de um lote de peças, conhecendo-se a vida da ferramenta para um determinado critério de fim de vida associado a um desgaste de topo específico da ferramenta.

# Capítulo 7

## Estampagem de ponto simples com aquecimento

Este capítulo trata da melhoria de processo através da inserção de um novo parâmetro no processo associado ao aquecimento da chapa. Trabalhando na determinação de parâmetros para obter a melhor qualidade superficial com uma baixo tempo de conformação e ainda obter peças de geometria complexa no processo de estampagem incremental de ponto simples.

### 7.1 Parâmetros experimentais para ensaios com aquecimento

Para a execução dos ensaios aquecimento se seguiu os mesmo passos supracitas para os ensaios para desgaste tendo como variação na temperatura de processo juntamente com a forma de aquecimento, por lampadas halogenas e por alta rotação, foi conformada dois peças diferentes uma de geometria simples e outra de geometria complexa, para a lubrificação foi utilizada graxa de alta temperatura dispositivo de fixação e os parâmetros de conformação.

#### 7.1.1 Chapa conformada e parâmetros de conformação

As geometrias conformadas no processo de SPIF com aquecimento são duas, a primeira de geometria simples, Figura 7.1, onde foi analisada a performance do processo verificando a qualidade da peça final, que é a rugosidade interna da peça, foi comparado a geometria inicial, modelo CAD, com a peça final conformada, esta peça física foi escaneada e gerado uma modelo virtual da peça física. A segunda é peça é de geometria complexa, Figura 7.1, que visa conformar uma peça que consiga superar o limites do processo de SPIF.

Os parâmetro de entrada no processo são, passo vertical em Z ( $A_p$ ), velocidade de avanço no plano XY ( $f$ ), no caso da trajetória da ferramenta em hélice a velocidade de avanço é para XYZ

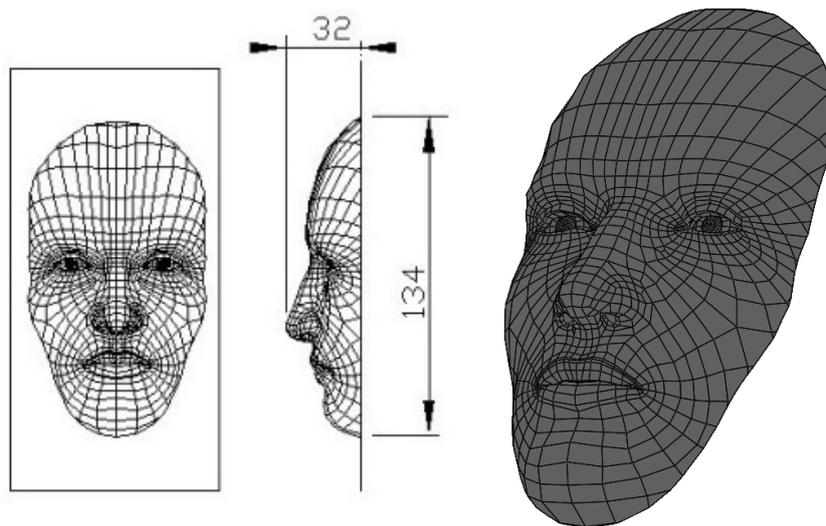


Figura 7.1: Peça de geometria complexa (a) desenho técnico em 2D (b) Vista em 3d

e a rotação da ferramenta ( $\omega$ ). Os valores de entrada variaram em:  $A_p$  de 0,2, 0,4 e 0,6mm;  $f$  de 600, 1000 e 1800 mm/min;  $S$  fixado em 600 RPM. A tabela 7.1 apresenta as variáveis de entrada dos ensaios que analisaram a qualidade da geometria com e sem aquecimento. Todos o processo de conformação foram executados na máquina CNC ROMI D600.

Tabela 7.1: Ensaios para validação de melhora na geometria

Teste	$A_p$ (mm)	Rotação (RPM)	Avanço(mm/min)	Tempo (min)
01	0,2	600	600	123
02	0,4	600	1000	92
03	0,6	600	1800	31

Os experimentos foram planejados para analisar a temperatura máxima e a rugosidade final da peça para realização do comparativo entre os processos de SPIF com aquecimento e SPIF com alta rotação (SPIFs). Vale ressaltar que o atrito gerado pela alta rotação pode gerar uma deterioração na superfície interna da peça, desta forma tornou necessária a análise da rugosidade da peça foi em vários pontos. Para entender a relação direta da rugosidade e aquecimento montou-se uma tabela apenas com variação da rotação produzindo peças com e sem aquecimento, Tabela 7.2.

Todos os experimentos supracitados foram realizadas com a peça de geometria simples. Para a peça complexa foi montado uma nova planilha de testes que visa a conformação total da peça e sem perder a riqueza de detalhes. A tabela 7.3 apresenta os ensaios. Para estes ensaios foram criados estratégia para a conformação, conformação total (CT) que conforma toda a peça de uma só passada e a conformação inicia pelo detalhes (CID), que irá conformar a peça em duas passadas, a primeira conformando um pedaço do queixo e testa e o nariz em sua totalidade e a segunda passada irá iniciar a peça e conformar a peça novamente deixando de conformar as partes já conformadas.

Tabela 7.2: Ensaios para validação de melhora de rugosidade

Teste	Ap(mm)	Rotação (RPM)	Avanço(mm/min)	Aquecimento	Repetições
01	0,6	300	1800	Não	3
02	0,6	300	1800	Sim	3
03	0,6	1000	1800	Não	3
04	0,6	1000	1800	Sim	3
05	0,6	3000	1800	Não	3
06	0,6	3000	1800	Sim	3
07	0,6	6000	1800	Não	3
08	0,6	6000	1800	Sim	3

Tabela 7.3: Ensaios para validação de melhora de rugosidade

Teste	Ap(mm)	Rotação (RPM)	Avanço(mm/min)	Aquecimento	Estratégia
01	0.2	6000	1200	Não	CT
02	0.2	6000	1200	Não	CID
03	0.2	6000	1200	Sim	CT

Um comparativo da conformação por SPIF com aquecimento entre as chapas de ligas alumínio 1050 e 6063, com 1,0 mm e 1,2 mm de espessura respectivamente, com o propósito de verificar os parâmetros de processamento para ligas e espessura de chapas diferentes assim validando o processo de SPIF com aquecimento. A conformação com aquecimento se deve ao tipo de geometria a ser utilizada, geometria complexa, utilizando um aquecimento combinado de alta rotação e por lâmpadas de halogêneo, assim ultrapassando uma temperatura de 220° C. Foram realizados também testes com baixa rotação para verificar a influência da rotação no processo de conformação com aquecimento.

Foram planejados 4 testes com parâmetros de processamentos diferentes, apresentados na tabela 7.4 para realizar uma comparação entre materiais diferentes onde a liga de alumínio 1050 possui resistência a tração de 55 MPa a liga 6063 possui 130 MPa, ainda para confirmar a eficiência do processo as chapas tem espessuras diferentes 1.0 mm e 1.2 mm respectivamente.

Tabela 7.4: Parâmetros de processo

Teste Numero	Parâmetros de processo				
	Ap(mm)	f(mm/min)	S(RPM)	Material	aquecimento
01	0.2	1200	6000	Liga Al6063	Sim
02	0.2	1200	6000	Liga AL1050	Sim
03	0.2	1200	600	Liga Al6063	Sim
04	0.2	1200	6000	Liga Al6063	Não

Todos os testes foram realizados com a mesma estratégia de conformação, com caminho da ferramenta em hélice movimentando os 3 eixos simultaneamente, X Y e Z, fazendo com que a

velocidade de conformação se mantenha constante. Por a peça possuir detalhes pequenos, foi utilizado o passo em Z adaptativo, ou seja quando o software verificar a necessidade de reduzir o Ap, para reduzir erros de conformação, é realizada uma variação no Ap automaticamente, sem interferência direta do usuário.

## **7.2 Análise de melhoria de processo no SPIF com aquecimento**

Os ensaios com aquecimento foram divididos em duas grande partes. Um parte inicial de estudos com aquecimento e alta rotação e a segunda parte onde baseando-se na análises e resultados da primeira etapa se executou ensaios com geometria complexas para conseguir demonstrar todo o potencial do processo de SPIF com aquecimento.

### **7.2.1 Ensaios de SPIF com aquecimento peça simples**

Os experimentos foram projetados para analisar a temperatura máxima que pode ser alcançada juntando dois processos de aquecimento, lâmpadas de halogêneo e fricção, sem comprometer a qualidade da peça a ser conformada, realizando um paralelo comparativo entre a união dos processos de aquecimento.

Conformando uma geometria simples com uma chapa de alumínio de 1 mm de espessura, mantendo constantes os parâmetros de processamento, avanço 1800 mm/min, AP em 0,6 mm, a variação de rotação ocorreu de 300 RPM até 6000 RPM e também usando ou não aquecimento por lâmpada de halogêneo, para cada conjunto de parâmetros foram realizados três testes. (7.2)

Adotando a metodologia descrita e a variação dos parâmetros apresentados na Tabela 7.2, foi possível conformar todas as peças em sua plenitude sem nenhuma fissura ou quebra. Porém observou-se que a rugosidade superficial teve uma grande variação entre as peças e em algumas peças ocorreu variação de rugosidade ao logo da mesma peça.

O tempo total de processamento foi de 18 minutos, com um caminho de ferramenta helicoidal, realizado pelo CAM Esprit, com um mínimo de 1 grau de hélice.

O uso de alta velocidade de rotação tem uma grande preocupação em relação ao desgaste da ferramenta. Para analisar a ferramenta, utilizou-se três métodos: inspeção visual, medida com de calibre raio e se detectado um desgaste excessivo medições através de um projetor de perfil.

Para realizar a análise da superfície após o processamento será utilizada uma rugosidade do equipamento Mitutoyo SJ-310 com uma resolução de 0,002 microns, fazendo 10 medições em cada peça e fazendo uma média aritmética para identificar o perfil da rugosidade média dos parâmetros. Utilizamos a escala de rugosidade média (Ra).

Os testes realizados com valores de rugosidade Ra e a temperatura média aferidas, estão

dispostas na Tabela 7.5, com as configurações dos parâmetros de processamento.

Tabela 7.5: Condições de entrada e resultado de saída

Teste	Ap (mm)	Rotação (RPM)	Avanço (mm/min)	Aquecimento	Rugosidade (Ra)um	Temp. Máx (°C)
01	0,6	300	1800	Não	1,314	26,3
02	0,6	300	1800	Sim	1,274	168,0
03	0,6	1000	1800	Sim	0,784	183,2
04	0,6	1000	1800	Não	0,954	62,5
05	0,6	3000	1800	Sim	0,609	215,0
06	0,6	3000	1800	Não	0,767	76,0
07	0,6	6000	1800	Sim	0,679	232,0
08	0,6	6000	1800	Não	0,819	103,1

## 7.2.2 Resultados dos ensaios

O teste 1 apresenta uma qualidade superficial com a rugosidade alta, quando se compara com os outros testes, ainda levando em conta a rugosidade da chapa de entrada como base, a rugosidade da chapa antes do processamento é Ra 0,328 microns.

A figura 7.2 é a imagem da peça final do teste 2, ou seja, baixa rotação e com aquecimento. A peça apresenta baixa qualidade superficial, a rugosidade média da peça foi de Ra = 1,314 microns.



Figura 7.2: Peça resultante da conformação do teste 2

As peças dos testes 5 e 6, executadas a 3000 rpm com e sem aquecimento, ficaram ambas com marcas ao longo da peça, como pode ser visto na figura 7.3.

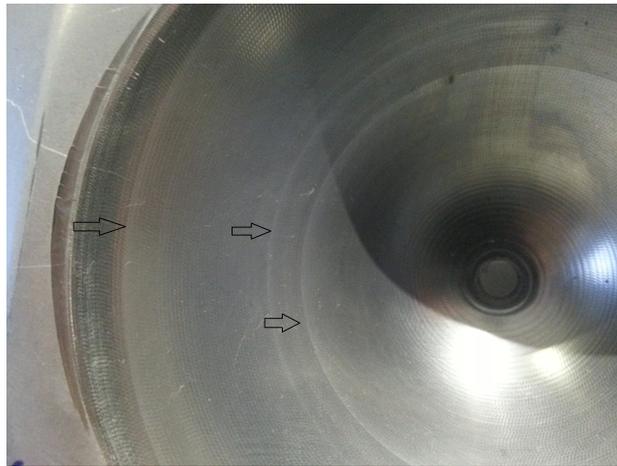


Figura 7.3: Peça resultante da conformação do teste 5

As rugosidades das peça executados com os parâmetros do teste 5 e 6 não ocorreu variação significativo na rugosidade Ra, apesar das marcas deixadas na peça e que estão destacadas por setas na figura 6. Estas marcas podem estar associadas a diferença de temperatura na chapa ao longo do processo. Uma análise mais específica dos motivos das marcas da peça podem ser feitas mediante a realização de novos ensaios com monitoramento detalhado da temperatura ao longo da peça durante o processo de estampagem.

As peças produzidas com os parâmetros do teste 7 apresentaram um melhor acabamento visual sem contudo apresentarem uma variação muito grande da rugosidade em relação a peça do teste 5, o acabamento pode ser observado na figura 6.



Figura 7.4: Peça resultante da conformação do teste 7

De todo o conjunto de peças executadas, os melhores valores de rugosidade foram apresentados nas peças processadas com alta rotação e aquecimento.

O monitoramento da temperatura entre os testes realizados, permite afirmar que o aumento da rotação provoca o aumento da temperatura de processamento. Nos testes a baixa rotação (abaixo de 1000 rpm) e com aquecimento, a temperatura máxima alcançada foi de 183°C. No teste 7, em que houve aquecimento por lâmpadas e ainda rotação elevada (6000 rpm), a temperatura máxima chegou a 232°C.

Os ensaios com baixa rotação apresentaram os piores resultados de acabamento superficial. A rugosidade média das peças produzidas ficou em  $Ra = 1,314$  microns (fig. 5), enquanto que nos testes 5 e teste 7 (fig. 6 e 7) a rugosidade média medida foi de  $Ra = 0,609$  microns e  $Ra = 0,679$  microns, respectivamente. As chapas brutas antes do processamento possuíam  $Ra=0,328$  microns.

Fazendo uma análise no processo de conformação em relação à rotação e à rugosidade superficial, observou-se que as peças conformadas a alta rotação obtiveram uma melhor qualidade superficial. Como a rugosidade superficial das peças dos testes 5 e 7, realizados a 3000 e 6000 rpm respectivamente foram muito próximas, para se estimar o ponto ótimo propõe-se a realização de novos testes com uma menor taxa de variação da rotação, realizando até mesmo rotações entre 2000 e 3000 rpm.

Testes 4, 6 e 8, que possuem, no entanto, sem aquecimento, o calor é gerado através do atrito com a peça da ferramenta, a rotação é gerada pelo local de aquecimento, pois a peça de trabalho é excelente, o calor é dissipado rapidamente por peça, como pode ser visto na Figura 7.5. Observa-se que os valores de rugosidade ficam sempre acima dos valores dos testes que utilizam aquecimento.

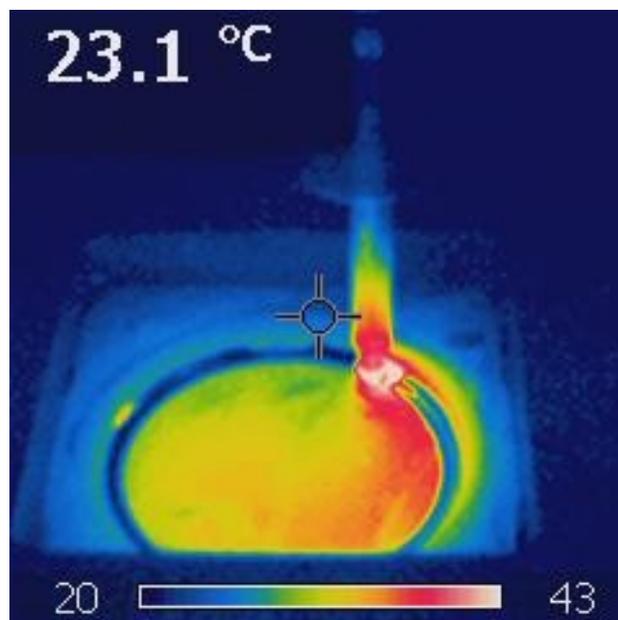


Figura 7.5: Dissipação de calor no processo SPIF

A geração de calor por fricção com aquecimento por lâmpadas de halogêneo é mostrada na

Figura 7.6, onde é apresentada a evolução da temperatura, a medida que a profundidade da peça vai aumentando, conseqüente-mente o tempo também, ocorre o aumento de temperatura. Este aumento de temperatura ocorre principalmente porque o calor gerado pela rotação não consegue se dissipar com tanta facilidade devido a profundidade da peça.

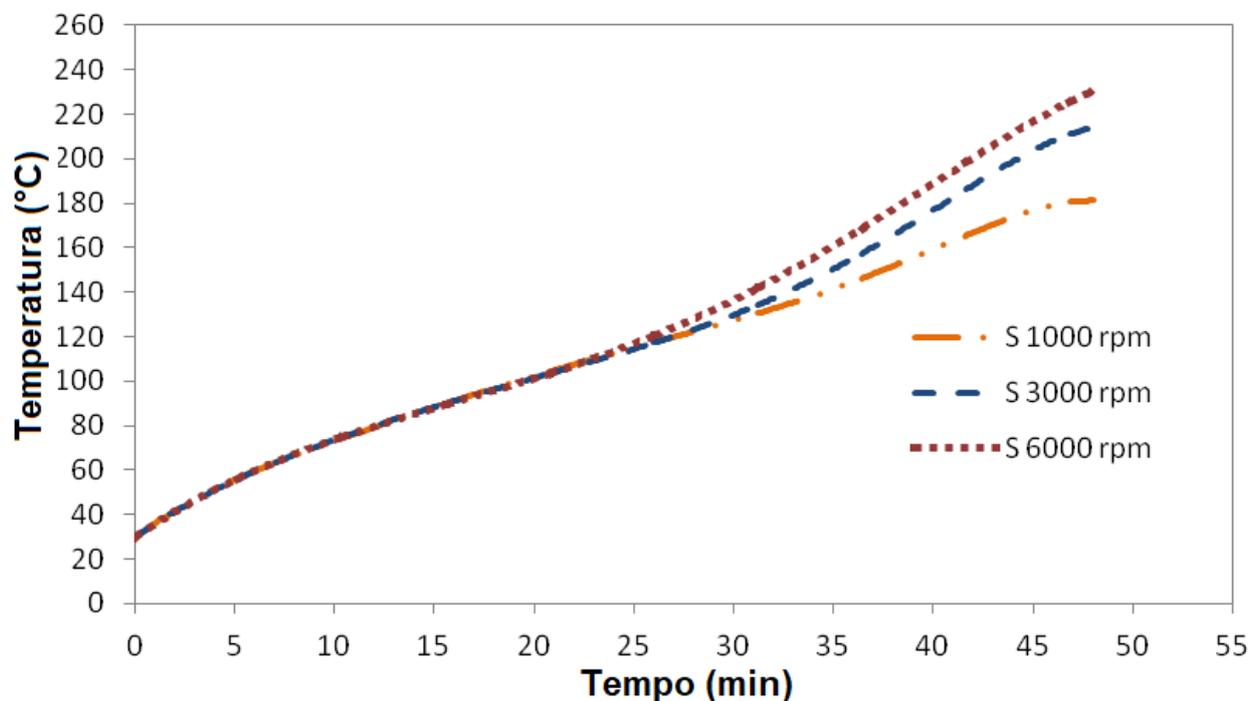


Figura 7.6: Perfil de aquecimento com alta rotação e lâmpadas de halogêneo

Ainda podemos salientar que o aumento da rotação da ferramenta causa um maior aumento na temperatura do processo, pois aumento de rotação significa aumento de atrito entre ferramenta e chapa.

Para demonstra a forma com que ocorre a dissipação do calor, a Figura 7.7 apresenta a imagem de um câmera térmica em diferentes profundidades do processo, A Figura 7.7(A) apresenta a temperatura no início do processo onde pode se observar que o caminho da ferramenta esta de cor azul com as bordas em verde o que representa uma temperatura de 76° C. A Figura 7.7 (b) apresenta o caminho da ferramenta com na cor amarela com as bordas vermelhas que representa uma temperatura maior que 100°C isto confirma que a medida que a profundidade aumenta a a taxa de dissipação de calor reduz.

### 7.2.3 Análise da geometria das peças conformadas

Utilizando as peças conformadas dos testes de 4 á 8 foi realizado uma analise de perfil final, para verificar se o aquecimento trás ganhos dimensionais para as peças conformadas.

Para comparar os resultados foi usado como referência o perfil de projeto (CAD) que foi

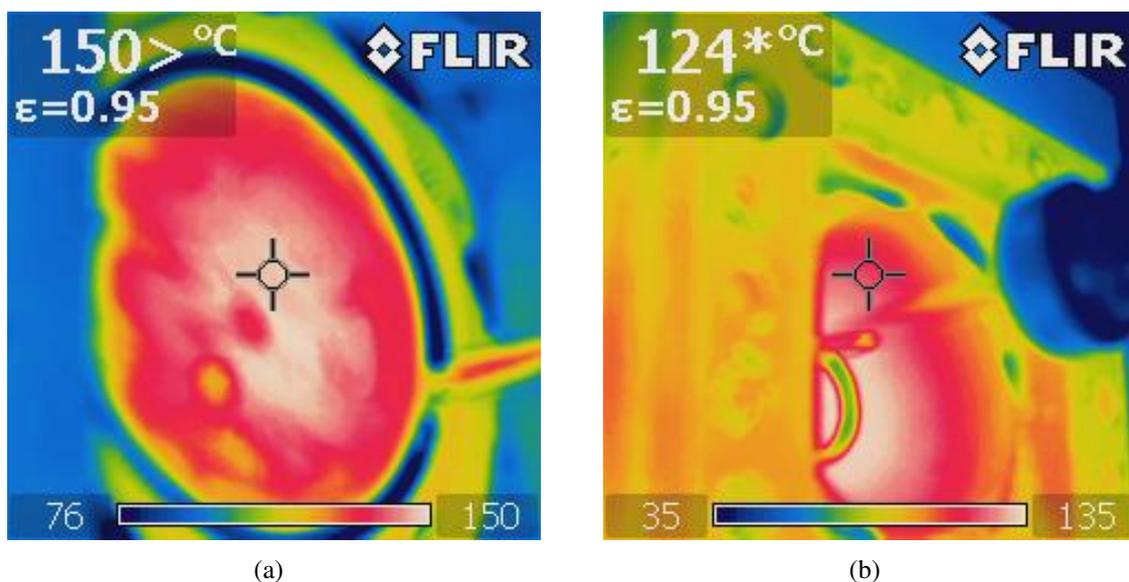


Figura 7.7: Imagem da câmera térmica: (a) Início do processo de conformação, (b) Processo de conformação com 30 de profundidade.

comparado com o perfil efetivo, após a conformação, que foi realizada a pela digitalização das peças por um scanner 3D (XYZ).

A análise comparativa entre as peças executadas foi feita através de um scanner 3D, Nextengine, modelo de scanner 3D 2020I com precisão dimensional de  $\pm 0,127$  mm, no qual registrou-se a digitalização de peças e geração de uma nuvem de pontos, para geração subsequente de um modelo sólido computacional. Este modelo computacional (perfil efetivo) foi comparado com o design de perfil (CAD) inicialmente usado para a programação da máquina CNC. E então estes dois modelos, conformado a temperatura ambiente e a peça conformada a  $160^{\circ}\text{C}$  foram comparados. Para melhor digitalização e geração de nuvem de pontos, as peças foram pintadas com uma camada de tinta branca, para que o scanner possa obter todos os detalhes da peça. Para melhorar a captura de pontos pelo scanner, a peça foi coberta pelo *Developer Spotcheck SKD-S2*, como mostrado na figura 7.8.

Para uma compreensão completa das peças conformadas, elas foram digitalizadas em um scanner 3D gerando o perfil efetivo, onde você pode observar todas as diferenças entre o perfil real e o perfil que foi modelado em CAD, e assim pode fazer mudanças na programação CAD/CAM da peça para reduzir erros e discrepâncias entre os modelos.

A varredura foi realizada em três etapas distintas. Em primeiro lugar, a peça foi digitalizada no scanner 3D gerando uma nuvem de pontos. Em seguida, a malha foi corrigida no software de modelagem (Figura7.9) por meio de preenchimento de espaços vazios. E o terceiro estágio é a geração de uma superfície NURBS. Uma superfície NURBS para gerada no *Software ScanStudio HD* versão 1.3.2.

Obteve a digitalização de superfície NURBS de peças conformadas, elas foram comparadas

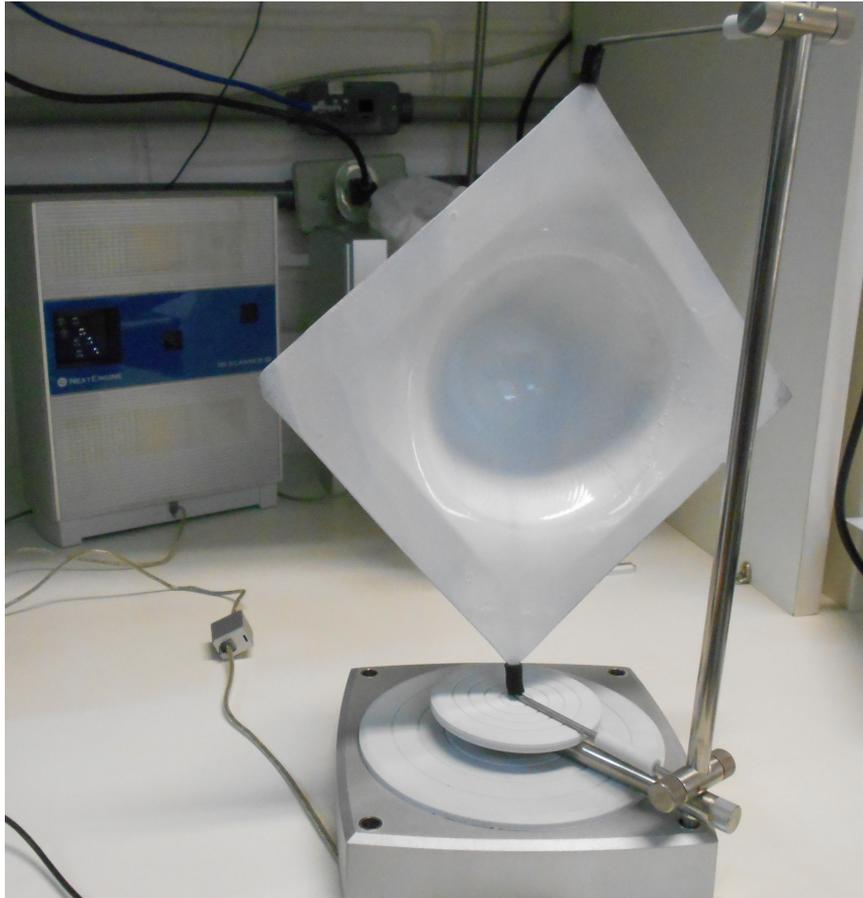


Figura 7.8: Scanner: Digitalização da peça conformada

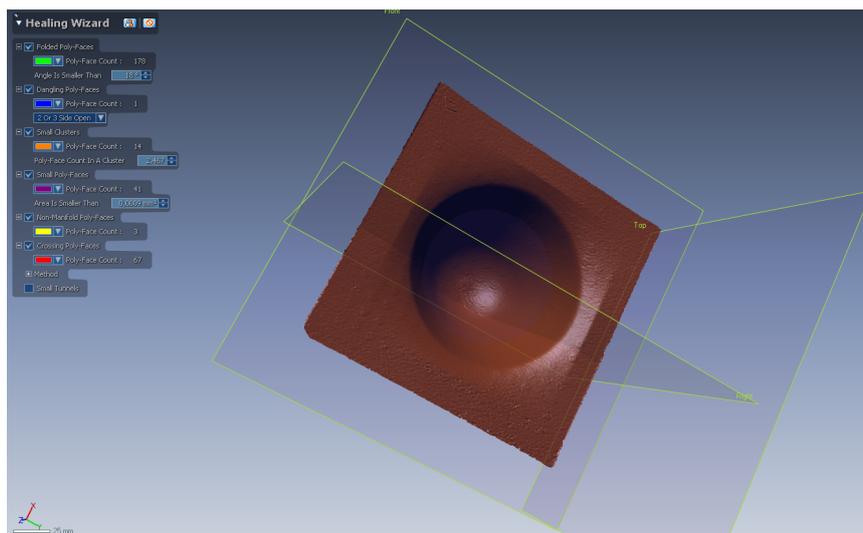


Figura 7.9: Malha criada pela digitalização

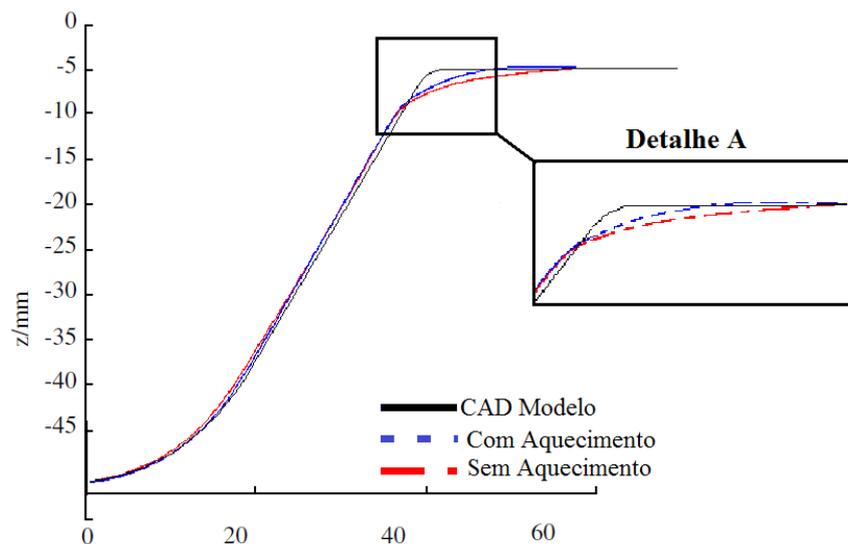


Figura 7.10: Comparação entre os modelos

com o perfil do projeto (CAD). A comparação entre os modelos foi realizada no software Autodesk Autocad2015 com perfil sobreposto realizando o alinhamento com os planos de referência das duas partes. Todas as peças conformadas foram digitalizadas e foram feitas uma comparação entre a peça conformada e o perfil do projeto CAD e a comparação entre as peças conformadas com aquecimento e sem aquecimento.

Observou-se que mesmo com o processo de aquecimento do material, o comprimento final da peça ficou cerca de 0,05mm maior que o comprimento previsto e na largura da peça também ocorreu pouca variação, desta forma não é necessário considerar a dilatação neste caso em específico.

A análise comparativa dos processos com aquecimento e a frio permitiu identificar os locais em que o processo de conformação com aquecimento proporcionou resultados mais satisfatórios, permitindo melhorias no processo conformação conforme Figura 7.10.

A análise comparativa dos processos com aquecimento e a frio permitiu identificar áreas planas da peça onde processo a com aquecimento obteve resultados mais satisfatórios, proporcionando uma melhoria significativa chegando em alguns pontos a reduzir a deformação indesejada em mais de 0,5 mm. Isso significa uma redução nos erros dimensionais da peça, amplia em grande escala a possibilidade e aplicação da peça conformada por estampagem incremental em processos de produção.

Para se validar e ampliar o estudo da melhoria do perfil final da peça, se realizou novos ensaios com novas variação de parâmetros de processo, a nova configuração dos ensaio é apresentado na (Tabela 7.7 ensaios para validação de melhora na geometria)

Observou-se que as peças conformadas com  $A_p$  de 0,2 mm e  $F$  de 600 mm/min com e sem aquecimento não mostraram diferenças entre elas, mas apresentaram diferença média de 0,6 mm para cada lado, totalizando 1,2 mm de perfil menor do que o Perfil CAD do projeto.

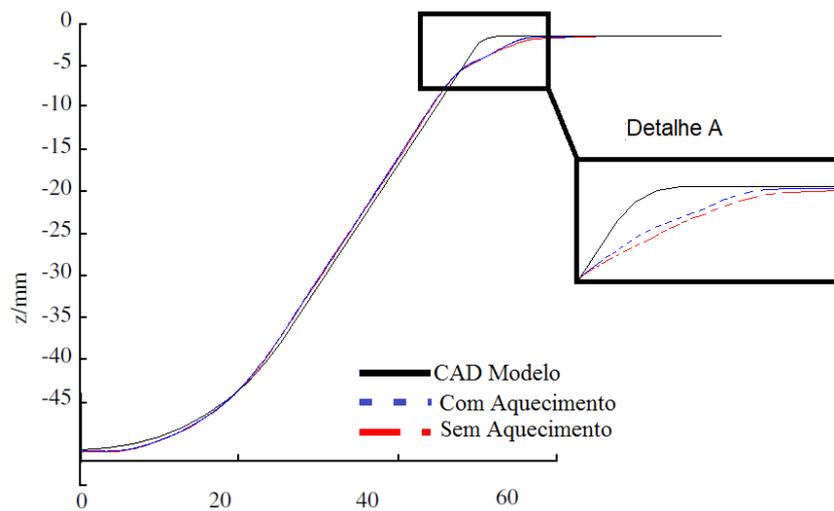


Figura 7.11: Peças conformadas com Ap de 0,4mm

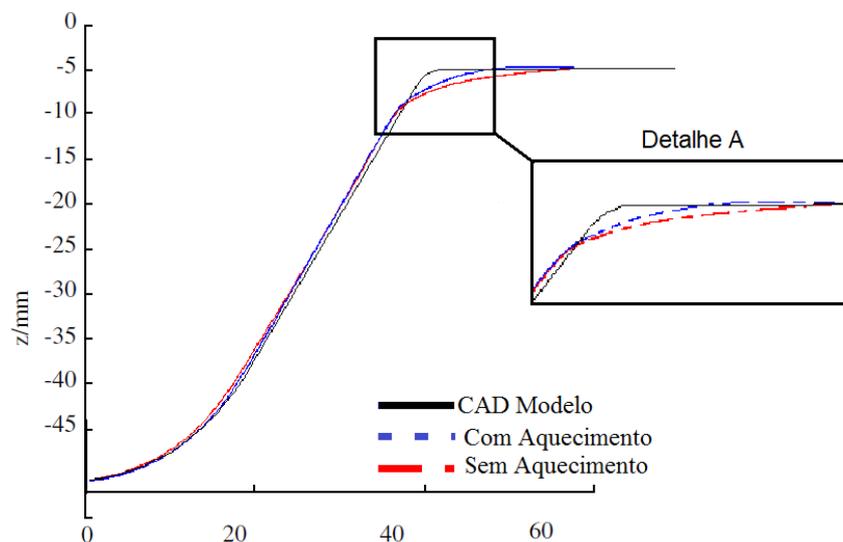


Figura 7.12: peças conformadas com Ap de 0,6mm

Entre as peças conformadas através do Ap de 0,4 mm e F de 1000 mm/min, que foram conformadas com a adição de calor, apresentou uma ligeira melhora nas áreas planas da peça, ou seja, mais próxima da extensão desejada (perfil CAD), mas uma melhoria insignificante porque giram cerca de 0,3 mm das peças conformadas à temperatura ambiente, ver Figura 7.11.

A Figura 7.11 mostra a comparação do perfil obtido pela varredura da peça de trabalho com e sem calor e com o modelo CAD. No detalhe A, pode-se ver que o perfil das peças formadas é superior a 2,6 mm (o ponto mais distante) do perfil de feixe desejado.

A análise comparativa do perfil real para o perfil desejado das peças moldadas com 0,6 mm AP e F de 1000 mm/min, com e sem aquecimento, permitiu identificar os locais que o processo com aquecimento SPIF, apresenta os resultados mais satisfatórios, mostrando melhorias no processo de conformação, como mostrado na Figura 7.12.

A Figura 7.12 mostra que a peça conformada com aquecimento fica mais próxima do perfil CAD, um ponto a ser destacado é a região de transição da parte plana para o início da peça, desta diferença pode ser observada com maior clareza, no detalhe A da figura 7.12. O erro máximo do perfil conformada com aquecimento 1,2 mm, enquanto que para SPIF sem aquecimento foi de 2,3mm.

A análise comparativa dos processos com e sem calor permitiu a identificação de áreas da parte plana onde o processo de aquecimento alcançou melhores resultados, proporcionando uma melhoria significativa no processo, em alguns pontos, para reduzir a deformação indesejada. Isso significa uma redução no erro dimensional da peça de trabalho.

O contorno da peça estava mais próximo do perfil final, sendo a parte que foi formada com aquecimento apenas 0,15mm menor que o modelo CAD, resultando em um erro máximo de 0,3 mm na peça de trabalho. Em todas as peças conformadas com aquecimento não foi considerada dilatação para compensação da peça ou ferramenta de conformação.

A redução do erro dimensional das peças conformadas com o auxílio do aquecimento foi principalmente as partes que possuem os parâmetros de processamento mais altos para que o aumento dos parâmetros  $A_p$  e  $F$  aumentem significativamente os esforços de conformação. A temperatura imposta no processo ajudou a reduzir esses esforços permitindo a conformação da peça em um tempo de processamento menor e com um menor erro dimensional.

Para completar o estudo, realizou-se uma comparação entre o modelo CAD com modelos de partes escaneadas no *Cloud Software*, versão 2.6.0, para verificar a distância média de peças conformadas com o  $A_p$  de 0.6 em comparação com o modelo CAD. O alinhamento das peças para a análise foi realizado com o auxílio de ferramentas de software próprio.

A distância média entre a peça conformada a temperatura ambiente e o modelo foi de 0,587 mm e a peça conformada com aquecimento foi 0,360mm em relação ao modelo CAD.

#### **7.2.4 Ensaios de SPIF com aquecimento peça complexa**

A conformação de uma geometria complexa visa superar limites de conformação ao processo de SPIF, acionando um novo parâmetro, o aquecimento com o intuito de reduzindo um dos pontos negativos do processo assim aumentando a capacidade de conformação do processo incremental de de ponto único para a conformação de uma geometria complexa, o que aumenta a flexibilidade da chapa a ser conformada e, por outro lado, também tem que se aumentar o controle dimensional final da peça conformada, devido à dilatação da chapa e da ferramenta durante o processamento.

Três testes com diferentes parâmetros de conformação foram realizados para uma melhor análise do processo. Os parâmetros de conformação mantinham inalterado, com o  $A_p$  de 0,2 mm a rotação em 6000 RPM e o avanço em 1200 mm/min. Nestes testes se variou a estratégia de conformação e aquecimento para analisar a capacidade do processo para poder conformar

peças de geometria complexas com ou sem o auxílio de aquecimento. Os testes programado para realizar conformação total da peça (CT), conformação total iniciando pelos detalhes (CID), ambos conformados a temperatura ambiente, e por conformação total com aquecimento, como pode ser visto na tabela 7.9, ensaios para validação de melhora de rugosidade.

Na execução do teste 1, a conformação foi concluída porem a peça conforma acabou por se romper no final da execução, na parte mais profunda e a ultima a ser conformada a ponta do nariz. Observando a fratura da chapa conformada, ela apresenta uma caracterista do material como se ele tivesse fundido por alta temperatura ou como o atrito é alto e existe pouco espaço para a ferramenta se movimentar o que impossibilita o calor gerada por atrito se dissipar isto pode ter contribuído para a degradação do material, como pode ser observado na figura 7.13.

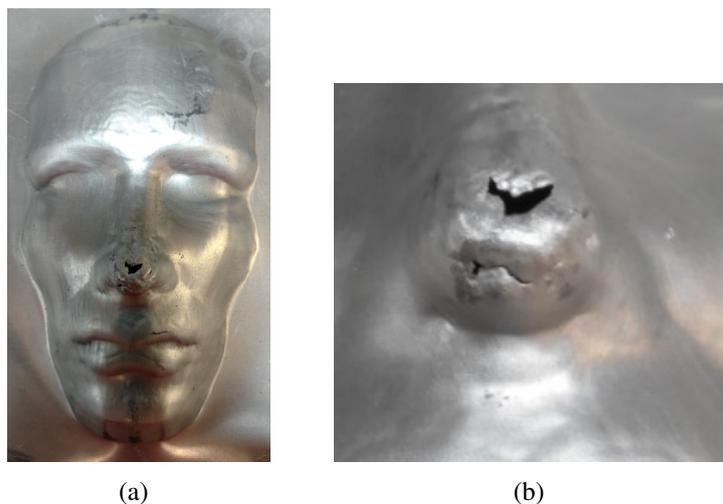


Figura 7.13: Teste 1 (a) peça final (b) detalhe da fratura

Após as execução dos ensaios verifica-se se a ferramenta de conformação para se analisar se ocorreu desgaste da sua ponta, pois a ponta da ferramenta que fica diretamente em contato com a chapa durante a conformação. A verificação da ferramenta foi realizada em um projetor de perfil com a ajuda de um gabarito para confirmar o perfil da ferramenta.

Para se compreender o comportamento e os valores de temperatura alcançados no processo, durante a conformação foi tirado varias fotos do processo com uma câmera térmica. A figura 7.14 pode-se observar que onde a ferramenta esta conformando efetivamente o valor de temperatura eh maior e que no caminho da ferramenta a temperatura vai reduzindo onde o caminho que a ferramenta atravessa gerando calor é visualizado como a parte de trás. Este aquecimento pontual gerado pelo atrito acaba reduzindo assim o endurecimento do material facilitando a deformação plástica do material. À medida que a peça está sendo conformada, a chapa aquece pontualmente. O impacto deste ponto de aquecimento é minimizado quando aumentamos a área de conformação, uma vez que o aquecimento do ponto permanecerá o mesmo porem a peca perdera calor rapidamente reduzindo a temperatura geral de processamento.

A execução do teste 2 prosseguiu sem aquecimento onde esta conformação ocorrera em duas

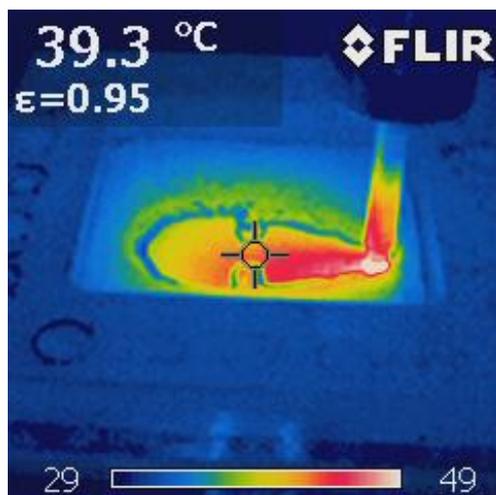


Figura 7.14: Imagem da câmera térmica do conformação do rosto

etapas distintas, processo vai iniciar pela conformação dos detalhes com a o nariz queixo e boca para depois em uma segunda etapa dar prosseguimento a conformação, realizado a conformação da peça em sua totalidade. Este teste foi feito em uma tentativa de evitar o afinamento da chapa nos pontos mais profundo de conformação, no entanto, também apresentou rupturas como se observa na figura 7.15.

A ruptura que ocorreu no nariz foi menor do que pelos parâmetros de conformação do teste 1. Esta peça foi que mais apresentou erros de conformação, pois a conformação deixou marcas na peça principalmente entre as etapas de conformação, resultando em uma conformação irregular e também na ruptura dos em dois pontos no nariz e no queixo.

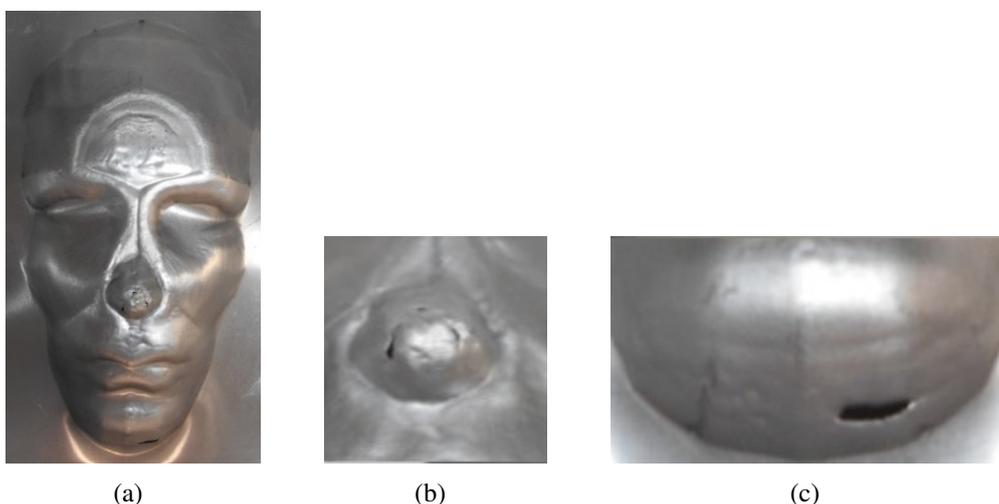


Figura 7.15: Teste 2 (a) peça final (b) detalhe do nariz (c) detalhe do queixo

As rupturas da chapa ocorreram nos dois pontos mais cruciais onde a geometria da peça se aproxima de um ângulo de  $80^{\circ}$ . A ruptura do queixo, foi devido ao afinamento da chapa e os esforços de conformação pois, a ruptura ocorreu depois da ferramenta ter passado pelo local.

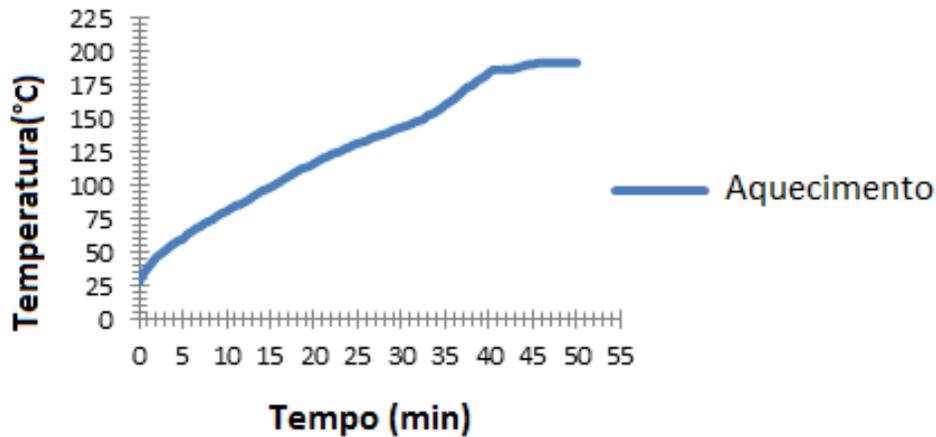


Figura 7.16: Curva de aquecimento com 50min

O teste 3 combina as duas formas de aquecimento, alta rotação e aquecimento por lâmpadas de halogêneo. A conformação da chapa foi realizada de forma direta, em um passe único. Para permitir a estabilidade da temperatura de processamento deixou-se o dispositivo de aquecimento ficar ligado em temperatura máxima por 50 minutos, permitindo que a matriz de aquecimento atinja a temperatura de estabilidade, após o tempo de aquecimento foi realizada toda a estratégia de conformação, se inicia na parte mais externa da peça para interna. A curva de aquecimento é apresentada na figura 7.16.

Pode-se observar na figura 7.16 que a temperatura fica em um patamar próximo ao tempo de 45 minutos assim chegando a máxima temperatura possível de obter com este dispositivo de aquecimento.

A figura 7.17 apresenta a sequencia de conformação através do tempo, assim foram feitas 5 imagens do processo de conformação para representar o processo do inicio ao fim.



Figura 7.17: Sequência de conformação

A peça resultante da execução do teste 3 não apresentou nenhuma fissura e conseguiu obter todos os detalhes do modelo de CAD, ver figura 7.18. Vale a pena notar que antes da formação, a chapa apresentou uma deformação, criando uma protuberância para cima, causada pelo calor do dispositivo e provavelmente pela dilatação do material. Devido a este calor, a placa de alumínio sofreu expansão, dilatação, tendo em vista que a chapa esta fixada pelo quatro lados não permitindo a expansão do material para os lados, isso acabou provocando uma deformação indesejada

da chapa inteira. Essa deformação gerou uma marca na peça, criando assim uma conformação indesejada na peça final. Este problema pode ser facilmente resolvido modificando a programação CAM e iniciando a o processamento um pouco mais alto que a chapa.

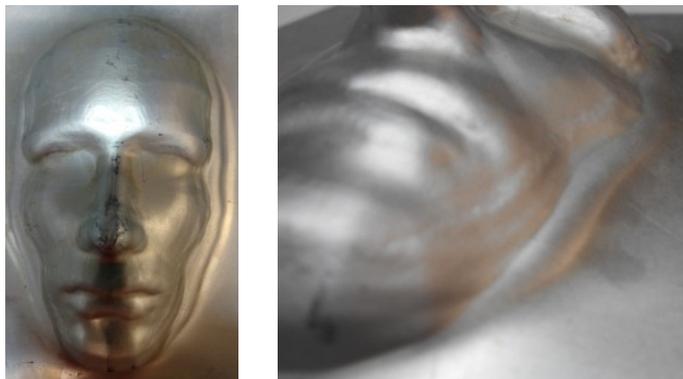


Figura 7.18: Teste 3

A deformação indesejada causada pelo dispositivo de calor é descrita na figura 7.19, que mostra a chapa antes e depois do aquecimento.

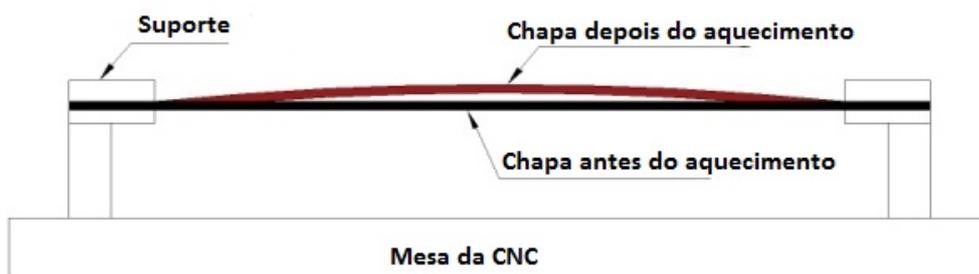


Figura 7.19: Deformação indesejada em Z causa pelo dispositivo de aquecimento

### 7.2.5 Ensaios de SPIF com aquecimento e variação da chapa

Realizando os teste conforme a tabela 7.4, Na execução do teste 01 ocorreram vários problemas com relação a conformação, que foram sendo corrigidos ao longo do processamento. O primeiro e mais grave foi que durante a conformação, após 4 mm de profundidade, a ferramenta começou a usinar o material da chapa, removendo material da chapa com significativa liberação da cavaco. Para contornar este problema se reduziu a rotação de 6000 para 3000 RPM, porém o problema persistiu. Optou-se assim por reduzir o avanço de 1200 para 600mm/min, o que também não surtiu efeito e o processo continuava com muito atrito gerando usinagem na chapa.

Para uma nova tentativa de solução voltamos com os valores originais de rotação e avanço para 6000RPM e 1200mm/min e reanalizamos todo processamento.

Nessa nova análise se observou a existência de 4 regiões distintas na peça que está sendo conformada. A primeira mais na periferia da peça tem a graxa branca intacta, pois a ferramenta não passou por esta região. A segunda na parte mais central da chapa em que pode-se ver que a graxa fica escura, pois a ferramenta já passou por este local. A terceira região e mais importante, apresentada na Fig.7.20 com setas vermelhas, é a região de conformação, onde a ferramenta fica em contato direto com a chapa a ser conformada, e que não possui nenhum tipo de lubrificação. A quarta região a área ainda a ser conformada.

Desta forma, para a continuação do teste 01 foi adicionado lubrificante diretamente na chapa durante todo o processamento. Esta graxa foi inserida continuamente ao longo de todo o processo em um ponto do caminho da ferramenta e abaixo de sua ponta, de tal forma que a ferramenta seja capaz de distribuir essa lubrificação por todo o caminho percorrido.



Figura 7.20: Teste 1

Como resultado do teste 01 conseguiu-se conformar toda a peça porém com vários defeitos e inconformidade. Conforme apresentada na Fig. 7.21(a), observa-se marcas indesejadas na peça e ainda pequenas trincas na chapa ao longo do perfil. Mais especificamente, ocorreram 4 trincas, que apesar de serem trincas muito sutis, podem comprometer a aplicabilidade peça.

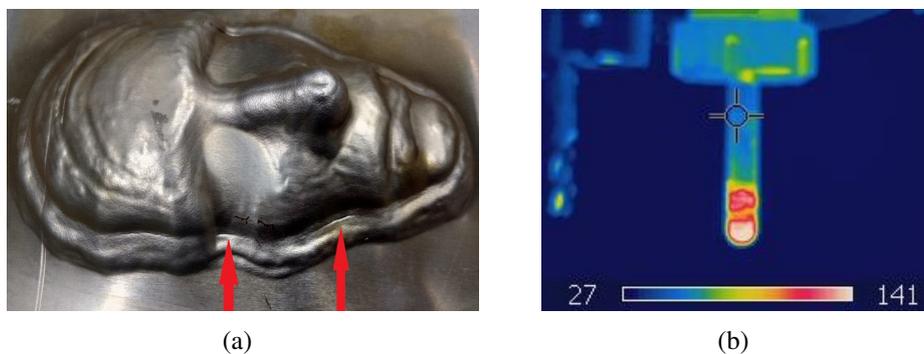


Figura 7.21: Teste 1 (a) Perfil da peça (b) Ferramenta depois de conformação

A Fig.7.21(b) apresenta o perfil de temperatura após a conformação, onde a temperatura mais alta obviamente é na ponta da ferramenta. É importante observar que temperatura do corpo da ferramenta não passa muito dos 50 graus Celsius, o que significa que a integridade da máquina e do sistema de fixação da ferramenta não são afetados pelo aquecimento.

Após a conformação a ferramenta foi verificada e se observou que não havia desgaste na ferramenta, porém ela tinha muito material aderido em sua ponta. Para a ferramenta retornar as suas características iniciais foi realizado um polimento rápido com lixa grão 2000. A Fig.7.22(a) apresenta a ferramenta após a conformação e a figura 7.22(b) a ferramenta após o polimento.

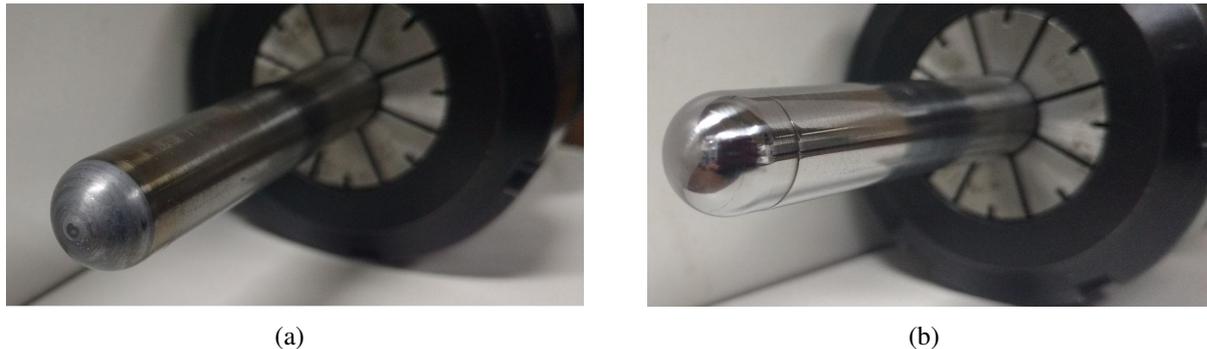


Figura 7.22: Ferramenta (a) antes da conformação (b) depois do polimento

O teste 02 alterando para a liga de alumínio 1050 foi executado em seguida para se analisar as diferenças entre os materiais. A conformação ocorreu sem nenhum problema conseguindo conformar a peça em sua plenitude sem nenhuma marca ou imperfeição, fig 7.23.

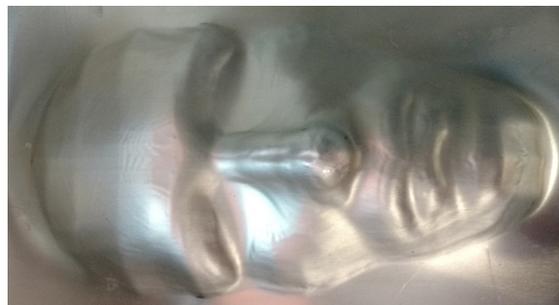


Figura 7.23: Teste 02 - liga de alumínio 1050

O teste 03 com rotação em 600 RPM, 10x menor, foi executado para verificar a influência da alta rotação no processo de conformação com aquecimento e verificar se a alta rotação não esta expulsando a lubrificação do processo durante a conformação. Para conseguir a conformação total foi inserido uma quantidade maior de lubrificante, em media 12 gramas. Para evitar ter que adicionar mais lubrificante durante o teste como teste 01.

A Fig. 7.24 apresenta a peça conforma pelo teste 03 que apresenta apenas uma pequena fratura na ponta do nariz, onde esta fratura pode ter corrido por falta de lubrificação, pois a ferramenta

é grande em relação ao detalha da peça a ser conformada, a ferramenta acaba descendo sem uma amplitude de movimento nos eixos X e Y.

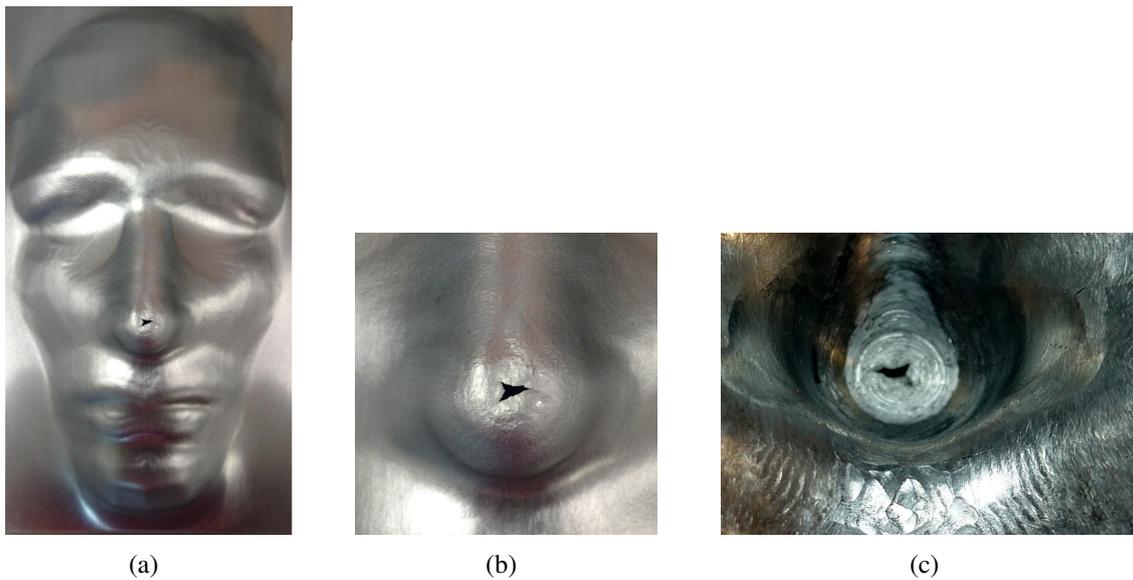


Figura 7.24: Teste 03 (a) peça final (b) detalhe da fratura externa (c) detalhe da fratura interna

A Fig. 7.24(a) apresenta as características gerais da peça final onde se pode observar a fratura que ocorreu na ponta do nariz, os detalhes desta fratura é apresenta na Fig. 7.24(b). A parte interna da peça, por onde acontece a conformação da peça é apresenta na Fig. 7.24(c) que evidencia o detalhe da parte interna da fratura.

O teste 4 é executado sem aquecimento para verificar se o processo de conformação com aquecimento traz vantagens para o processo com aquecimento, a Fig. 7.25(a) apresenta a peça final e a Fig. 7.25(b) mostra o detalhe da região onde ocorreu a ruptura da chapa. Quando comparamos a ruptura ocorrida no teste 03 e no teste 4 pode-se observar que a ruptura do teste 4 é bem maior em tamanho e em área de ruptura.

A ruptura do teste 4 se deve pelo afinamento da chapa, pois na região da ruptura a chapa ficou extremamente fina não suportando a conformação. O afinamento se deve a profundidade alta da peça em um ponto específico e ao tamanho de ferramenta que foi demasiadamente grande para a conformação deste detalhe.

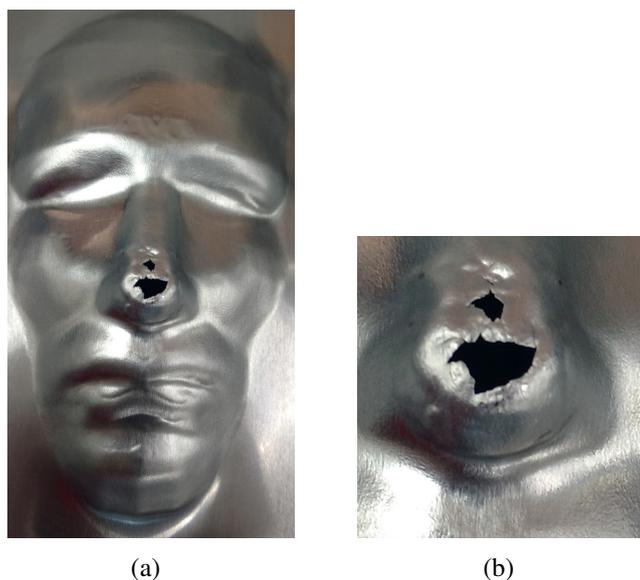


Figura 7.25: Teste 04 (a) Peça (b) Detalhe da fratura

O teste 01 foi refeito porém agora com abundância de graxa, em media 16 gramas, para reduzir imperfeições, este teste conseguiu conformar a peça em sua plenitude porém com uma fratura na ponta do nariz porem esta fratura é bem menor que as dos outros testes e possivelmente esta fratura pode ser evitada com a redução do tamanho da ferramenta, com isto a área fica com mais acesso para se inserir a lubrificação.

A figura. 7.26(a) apresenta a peça final conformada e o detalhe a fratura da peça figura 7.26(b) e a parte interna da chapa, o lado que entra em contato com a ferramenta é apresentado na figura 7.26(c).

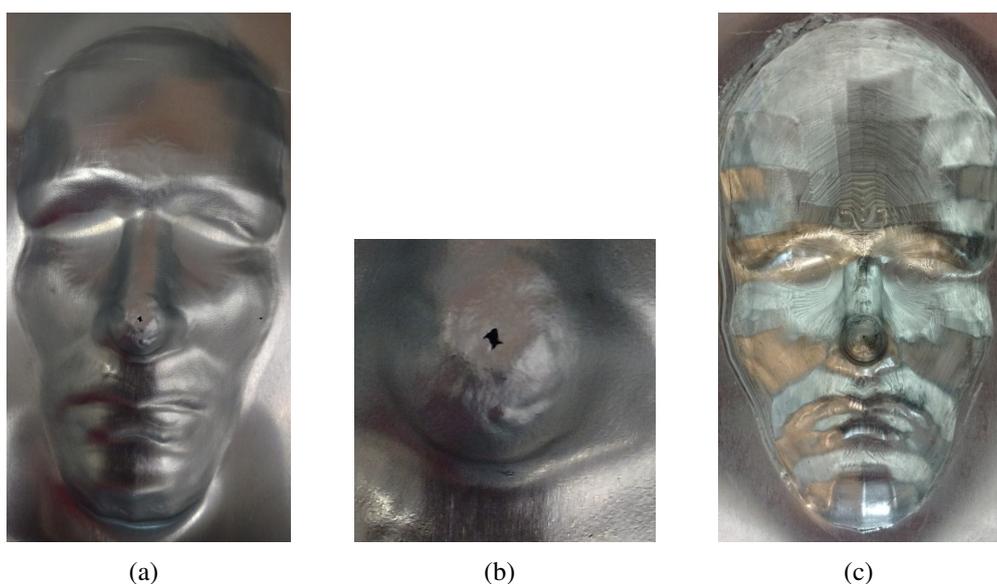


Figura 7.26: Teste 01 segunda peça (a) peça final (b) Detalhe da fratura externa (c) Detalhe da fratura interna

### 7.3 Síntese e conclusão do capítulo

O processo de estampagem incremental de ponto simples consegue produzir peças complexas, como uma face humana, em poucos minutos. Pode-se variar os parâmetros de processamento para obter peças fazendo uma relação entre tempo de processamento e qualidade da superficial, pode-se utilizar  $A_p$  de 0,2 mm, avanço de 600 mm/min e S de 2400 RPM que poderá gerar uma rugosidade  $R_a$  de 0,208 microns ou utilizar um  $A_p$  de 0,6mm, S de 3000 RPM e 1800 mm/min de avanço que poderá gerar uma rugosidade  $R_a$  de 0,602 microns. Quando se insere o aquecimento no processo como um novo parâmetro, consegue-se conformar peças complexas com maior facilidade e melhor qualidade. A conformação com aquecimento apresenta-se como uma opção para estampagem de peças complexas, com ângulos íngremes de até 80 graus de inclinação.

No SPIF com aquecimento e alta rotação, é necessário ter atenção especial para a lubrificação pois, a alta rotação expulsa a lubrificação que deveria existir entre a ferramenta e a peça. Contudo a alta rotação traz benefícios para a conformação, ao gerar aquecimento pontual na chapa por atrito, acaba por aumentar a maleabilidade do material e melhorar a capacidade de conformação do processo. Desta forma, o auxílio da alta rotação é relativo pois se a lubrificação não for suficientemente abundante para o processo, as peças podem vir a fraturar durante o processamento.

Para finalizar, para o sucesso a conformação é necessário escolher um tamanho de ferramenta adequada que possa realizar a conformação de peça com facilidade do início ao fim, levando em conta todos os detalhes da peça final desejada. Como critério prático pode-se adotar que todas as cavidades da peça têm que ser maior que a ponta da ferramenta em no mínimo 50%.

O presente estudo traz como contribuição para a academia e indústria a demonstração da viabilidade técnica do uso do processo de estampagem incremental de ponto simples com aquecimento para produção de peças complexas, com dados de processo e projeto de dispositivo de aquecimento.

# Capítulo 8

## Conclusões

Os principais desafios da estampagem incremental são a melhoria da qualidade superficial da peça e sua precisão dimensional. O processo de estampagem incremental de ponto simples é o processo com o menor custo e mais simples de ser aplicado quando comparado com os outros processo de estampagem incremental.

Para se demonstrar o potencial da aplicação da estampagem incremental de ponto simples (SPIF) para a produção de peças complexas personalizadas, a presente tese apresenta uma pesquisa aplicada experimental dividido em três análises: análise de força de conformação, análise de desgaste de ferramenta e a análise de conformação com aquecimento. Durante a presente pesquisa, foram geradas publicações nas três áreas pesquisadas, que estão sintetizadas no Apêndice E.

Este capítulo apresenta as conclusões associadas ao processo de estampagem incremental de ponto simples com foco na análise de força de conformação, desgaste da ferramenta e na aplicação de aquecimento ao processo. Onde os objetivos principais foram alcançados para a força de conformação foi desenvolvido um modelo teórico experimental para a estimativa da força de conformação nos eixo X, Y e Z em relação o parâmetros de processamento,  $A_p$ , avanço e rotação. Para o desgaste da ferramenta foi desenvolvida modelo experimental capaz de estimar o tempo de vida da ferramenta em relação ao parâmetros de processamento. Após análise da aplicação do aquecimento é possível afirmar que o aquecimento traz melhoria ao processo de SPIF conseguindo conformar peças de geometria complexas.

### 8.0.1 Modelo Predição Força

A análise dos ensaios de conformação foi construída por meio da verificação da relação da força em função da variação dos parâmetros de processamento. Observando os resultados obtidos, após realização de conformação utilizando um conjunto de ferramenta fabricada em aço SAE 1045 conformando chapa de alumínio 1050 com 1 mm de espessura com 33 ensaios com dados

de entrada distintos, pode-se afirmar que a variação nos parâmetros de processamento: avanço, rotação e passo vertical em z ( $A_p$ ), alteram a resultado das forças final em Z, Y e X. Quando temos um aumento no avanço e na rotação obtemos uma redução na força de conformação, o valor dessa redução varia conforme os parâmetros utilizados. Por outro lado, quando se aumenta os valores de  $A_p$ , a força de conformação aumenta. Esse aumento de força está diretamente relacionado com os valores de  $A_p$  introduzidos no processo. Foi observado que com um aumento de  $A_p$  em até 11 vezes, o valor da força aumenta em média 30%.

Este trabalho fornece uma contribuição relevante ao apresentar um equacionamento matemático de predição das forças do processo de conformação, SPIF, em relação aos parâmetros de processamento utilizados com um erro máximo de 1% para as forças do eixo Z. Além disso, pode-se estimar ainda as correção entre as forças envolvidas, com uma erro médio máximo de 10%.

Para as forças de conformação foi criado um modelo teórico experimental de predição de forças onde pode-se prever as forças de conformação conforme os parâmetros utilizados no processamento, sendo utilizados os 3 principais parâmetros de processamento: Avanço, rotação da ferramenta e  $A_p$ . Pode-se obter a predição das forças para os 3 eixos X, Y e Z, assim também conseguindo correlacionar os valores de forças entre os 3 eixos de conformação.

A adaptação da equação de 5.14 agrega ainda mais variáveis ao processo, ao considerar o fator de área de contato e o ângulo de parede interno da peça, fornece uma estimativa da força no processo de SPIF, agregando mais variáveis e com um baixo erro padrão.

A possibilidade de se estimar o valor de força necessária para se realizar uma conformação SPIF significa uma melhoria na tecnologia do SPIF, possibilitando a otimização do processo produtivo, a redução dos custos de um processo empírico e ainda garantindo a integridade da máquina e equipamentos utilizada.

A predição das forças de conformação auxiliam no desenvolvimento das ferramentas de conformação e fornecem segurança para o processo de conformação com máquinas CNC pois, conhecendo as forças do processo pode-se correlacionar com o carregamento máximo que a máquina suporta.

## **8.0.2 Modelo Predição Desgaste**

No desgaste de ferramenta a contribuição mais importante é a criação de um modelo matemático capaz de prever o desgaste da ferramenta de conformação e assim estimar o seu tempo de vida.

O tempo de vida de ferramenta está diretamente correlacionado com o custo do processo assim estimando o tempo de vida pode-se estimar o custo das ferramentas utilizadas no processo, gerando uma confiabilidade nas estimativas de custo.

Um contribuição muito importante para o processo de estampagem incremental na parâmetro lubrificação que para as peças simples, com um diâmetro aproximado de 135mm gera uma área

de conformação aproximadamente com 0,014 metros para a conformação desta área é necessário uma quantidade mínima de 5ml de óleo VG68.

A análise de desgaste foi baseada em uma avaliação da vida para o processo SPIF de uma ferramenta de conformação fabricada em aço SAE 1045, sem tratamento térmico utilizada para conformar chapas de aço galvanizado com 0,95 mm de espessura. Após a realização de 27 ensaios com parâmetros de entrada distintos e com tempos de conformação variando de 18 minutos a 1567 minutos para cada ensaio. No ensaios de 1567 minutos, para uma mesma ferramenta, o desgaste de topo foi inferior a 0,1 milímetros,

Os dados de saída foram avaliados e com isso foi possível definir um modelo empírico e apresentar duas equações matemáticas, sendo uma de predição de desgaste e outra de predição de tempo de vida de ferramenta. A comparação com os dados reais de saída e os dados de saída utilizando as formulações matemática mostram que a taxa de erro para a fórmula de desgaste é de 33,44% e de 35,94% para a fórmula de vida.

Ao apresentar formulação matemática de predição de vida útil da ferramenta de conformação do processo de estampagem incremental, este trabalho fornece uma contribuição relevante para a academia e principalmente para a indústria. Esta conquista significa uma melhoria na tecnologia SPIF, possibilitando a otimização do processo produtivo, que, por meio um equacionamento matemático empírico para predição do desgaste da ferramenta, em relação aos parâmetros do processo, têm-se uma melhor definição das condições de conformação antes do efetivo início dos testes de fabricação. Reduz os erros de produção, desde o início já será possível pelo uso das formulações matemática, calibrar os dados de entrada aos resultados necessários, otimizando assim o processo produtivo, reduzindo custos envolvidos e o tempo de preparação e de produção em geral.

### **8.0.3 SPIF com Aquecimento**

Na análise de resultados dos testes de conformação, observou-se uma melhora significativa na qualidade da superfície da peça conformada a quente e por fricção quando comparada com peças formadas em baixa velocidade de rotação, com aquecimento ou não. Vale ressaltar que os excelentes resultados foram alcançados com velocidade de rotação em torno de 3000 rpm, observando que nesta rotação o atrito funcionou como um sistema de aquecimento que em conjunto com o dispositivo de aquecimento fizeram a chapa chegar em uma temperatura máxima de 215 °C.

Apesar do aumento do custo de fabricação do dispositivo de aquecimento, o avanço dos estudos no processo com aquecimento trata de um investimento que pode ser de fácil recuperação com aumento a gama de aplicação do processo, permitindo trabalhar com chapas de maior espessura e de maior resistência mecânica, por conta dos ganhos em maleabilidade e redução do erro dimensional que se obtém com a inserção do aquecimento ao processo.

A adição de calor no SPIF significa uma melhoria no processo, pois torna a chapa mais maleável, reduz o tempo de processamento, melhora a acurácia do processo e ainda permite à obtenção de superfícies que não seriam possíveis a temperatura ambiente.

O SPIF tem limitações quando se trata de íngremes ângulos de parede da peça (acima de 80°). Esses limites podem ser minimizados ou mesmo eliminados quando inserimos novos fatores no processo, conforme feito na presente pesquisa com a inserção de calor. O aquecimento no processo pode permitir a conformação de uma peça de geometria complexa e com ângulos de parede superior a de 80°, mas também pode trazer inconvenientes ao processo, como a expansão da chapa a ser conformada. As intercorrências consequentes da inserção de calor devem ser identificadas e monitoradas para que não prejudiquem a produção da peça final. Para a peça de geometria complexa executado com aquecimento, necessitamos 12 gramas de graxa branca para um área de conformação retangular, aproximadamente 75x134mm gerando uma área aproximada de 0,01 metros.

Este trabalho contribui para o estado da arte do processo de SPIF com aquecimento, apresentando um novo dispositivo de aquecimento disponibilizando dados de conformação que mostram a melhora na peça final decorrentes do processamento com auxílio do aquecimento, assim deixando evidente o potencial e aplicabilidade do processo de SPIF com aquecimento, que consegue conformar peças de geometria complexa em sua plenitude.

O processo de SPIF com aquecimento se apresenta com uma solução para ampliar os limites de processo pois, consegue obter peças de geometria complexa e com ângulos íngremes, mais que 80 graus e ainda em peças simples se provou que com o auxílio de aquecimento pode-se reduzir as deformações indesejadas nas áreas planas do início da conformação.

Nesta tese não foi constatada a interferência de da dilatação do material na qualidade final da peças, porém no início do processamento é necessário verificar a existência de deformações indesejadas na chapa de conformação.

## **8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

A modelagem de formulação matemática de predição da força e do desgaste de ferramentas dão precisão ao processo, permitem redução de custos e tempo, e a conformação com aquecimento permitiu constatar que o aquecimento contribui com a conformabilidade do material sendo portanto um aliado quando se deseja atuar na conformação de peças complexas.

Para trabalhos futuros, apresenta-se a seguir sugestões a serem desenvolvidos para melhorar a solução as formulações matemáticas propostas neste trabalho.

### **8.1.1 Modelo Predição Força**

Para a melhorar os modelos de predição de forças seria importante introduzir na modelagem mais alguns parâmetro de processamento, principalmente os relacionadas ao material utilizado com: resistência mecânica da chapa, espessura da chapa e a área de estampagem.

As forças de conformação quanto se utiliza no processo o parâmetro aquecimento, para entender o que ocorre com as forças de conformação e tentar encontra a temperatura ideal de processamento.

### **8.1.2 Modelo Predição Desgaste**

O modelo de vida de ferramenta desenvolvido neste tese estão voltados para o conjunto, ferramenta fabricada em 1045 conformando chapa de aço galvanizado. Se faz necessário a realização de mais testes com variação do material da ferramenta e da chapa afim de inseri no modelo de vida de ferramenta dados de resistência mecânica tanto da ferramenta como da chapa a ser conformada.

Para se definir com maior precisão o desgaste da ferramenta se sugere que além da medição do desgaste da ponta de ferramenta seja feita a análise de peso da ferramenta antes de depois da conformação isto para indicar o volume de material perdido pela ferramenta.

### **8.1.3 Uso Aquecimento**

Para estudos futuros, sugere-se investigar o processo de SPIF com calor para geometria complexa, envolvendo área planas, outros materiais e aumentando os parâmetros de processamento, a fim de reduzir o tempo de processamento e melhorar o acabamento final.

o processo de conformação com aquecimento necessita também um controle da estrutura cristalina do material para ser obter um grão mais uniforme em toda a peça, para isto se faz necessário um controle preciso da temperatura do processamento e ao mesmo tempo a possibilidade de variação da temperatura de processamento.

os valores de  $A_p$  introduzidos no processo, onde o  $A_p$  poderá aumentar seu valor em até 11 vezes e o valor da força vai aumentar em média 30%, isto falando de um conjunto de ferramenta fabricada em aço SAE 1045 conformando chapa de alumínio 1050 com 1 mm de espessura.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, D.; JESWIET, J. A new model for contact geometry in single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 229, n. 6, p. 982–989, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0954405414535580>.

AERENS, R.; EYCKENS, P.; BAEL, A. V.; DUFLOU, J. R. 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, Feb 2010. ISSN 1433-3015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2160-2>.

ALLWOOD, J.; BRAMLEY, A. N.; RIDGMAN, T.; MILEHAM, A. A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 220, n. 2, p. 323–327, 2006.

ALLWOOD, J. M.; MUSIC, O.; RAITHATHNA, A.; DUNCAN, S. R. Closed-loop feedback control of product properties in flexible metal forming processes with mobile tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 58, n. 1, p. 287–290, 2009.

AMBROGIO, G.; BRUSCHI, S.; GHIOTTI, A.; FILICE, L. Formability of az31 magnesium alloy in warm incremental forming process. *International Journal of Material Forming*, Springer, v. 2, p. 5–8, 2009.

AMBROGIO, G.; FILICE, L.; GAGLIARDI, F. Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming. *Materials & Design*, Elsevier, v. 34, p. 501–508, 2012.

AMBROGIO, G.; FILICE, L.; MANCO, G. Warm incremental forming of magnesium alloy az31. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 57, n. 1, p. 257–260, 2008.

AMBROGIO, G.; FILICE, L.; MICARI, F. A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 177, n. 1, p. 413–416, 2006.

Amino. *Amino*. 2017. Access date: 2 Oct. 2011. Disponível em: <http://www.aminonac.ca/NC-Dieless-Forming.php>.

ANJOS, A. d. Análise de variância. *Notas de Aula, Capítulo*, v. 7, 2008.

ARAGHI, B. T.; MANCO, G.; BAMBACH, M.; HIRT, G. Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 58, n. 1, p. 225–228, 2009.

ASGHAR, J.; LINGAM, R.; SHIBIN, E.; REDDY, N. Tool path design for enhancement of accuracy in single-point incremental forming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 228, n. 9, p. 1027–1035, 2014.

ASGHAR, J.; REDDY, N. Importance of tool configuration in incremental sheet metal forming of difficult to form materials using electro-plasticity. 2013.

ATTANASIO, A.; CERETTI, E.; GIARDINI, C.; MAZZONI, L. Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 197, n. 1, p. 59–67, 2008.

AZEVEDO, N. G.; FARIAS, J. S.; BASTOS, R. P.; TEIXEIRA, P.; DAVIM, J. P.; SOUSA, R. J. A. de. Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and aluminum materials. *Int J Precis Eng Manuf*, v. 16, n. 3, p. 589–595, 2015.

BAGUDANCH, I.; CENTENO, G.; VALLELLANO, C.; GARCIA-ROMEU, M. Forming force in single point incremental forming under different bending conditions. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 63, p. 354–360, 2013.

BAHLOUL, R.; ARFA, H.; SALAH, H. B. Application of response surface analysis and genetic algorithm for the optimization of single point incremental forming process. In: TRANS TECH PUBL. *Key Engineering Materials*. [S.l.], 2013. v. 554, p. 1265–1272.

BAMBACH, M.; HIRT, G.; JUNK, S. Modelling and experimental evaluation of the incremental cnc sheet metal forming process. *Proceedings 7th COMPLAS, Barcelona, Spain*, p. 7–10, 2003.

BANSAL, A.; LINGAM, R.; YADAV, S. K.; REDDY, N. V. Prediction of forming forces in single point incremental forming. *Journal of Manufacturing Processes*, p. –, 2017. ISSN 1526-6125. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517300889>.

BEHERA, A. K.; LAUWERS, B.; DUFLOU, J. R. Tool path generation framework for accurate manufacture of complex 3d sheet metal parts using single point incremental forming. *Computers in Industry*, Elsevier, v. 65, n. 4, p. 563–584, 2014.

BELCHIOR, J.; GUINES, D.; LEOTOING, L.; RAGNEAU, E. Force prediction for correction of robot tool path in single point incremental forming. v. 554, p. 1282–1289, 2013.

BENEDETTI, M.; FONTANARI, V.; MONELLI, B.; TASSAN, M. Single-point incremental forming of sheet metals: Experimental study and numerical simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v. 231, n. 2, p. 301–312, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0954405415612351>.

BOUFFIOUX, C.; EYCKENS, P.; HENRARD, C.; AERENS, R.; BAEL, A. V.; SOL, H.; DUFLOU, J.; HABRAKEN, A. Identification of material parameters to predict single point incremental forming forces. *International Journal of Material Forming*, Springer, v. 1, p. 1147–1150, 2008.

BOUKHNY, M.; GORDON, R.; MORGAN, M.; YADLOWSKY, A. *System for controlling a surgical system based on irrigation flow*. Google Patents, 2009. EP Patent 1,729,658. Disponível em: <http://www.google.tl/patents/EP1729658B1?cl=pt-PT>.

- BRANKER, K. A study of energy, carbon dioxide emissions and economics in machining: milling and single point incremental forming. Canadian theses, 2011.
- BRANKER, K.; ADAMS, D. W.; SZEKERES, A.; JESWIET, J. Investigation of energy, carbon dioxide emissions and costs in single point incremental forming. In: \_\_\_\_\_. *Re-engineering Manufacturing for Sustainability: Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Singapore 17-19 April, 2013*. Singapore: Springer Singapore, 2013. p. 291–295. ISBN 978-981-4451-48-2. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2\\_48](https://doi.org/10.1007/978-981-4451-48-2_48).
- CALLEBAUT, B.; DUFLOU, J.; VERBERT, J. *Asymmetric incremental sheet forming system*. [S.l.]: Google Patents, 2011. US Patent 7,984,635.
- CALLEGARI, M.; AMODIO, D.; CERETTI, E.; GIARDINI, C. Sheet incremental forming: Advantages of robotised cells vs. cnc machines. InTech, 2006.
- CALLEGARI, M.; GABRIELLI, A.; PALPACELLI, M.-C.; PRINCIPI, M. Robotised cell for the incremental forming of metal sheets. In: *Proceedings ESDA 2006, Eighth ASME Conference Engineering Systems Design and Analysis*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 4–7.
- CAO, J.; HUANG, Y.; REDDY, N.; MALHOTRA, R.; WANG, Y. Incremental sheet metal forming: advances and challenges. In: *Proceedings of International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2008), Gyeongju, Korea*. [S.l.: s.n.], 2008.
- CAVALER, L. C. d. C. Parâmetros de conformação para a estampagem incremental de chapas de aço inoxidável aisi 304l. 2010.
- DALEFFE, A. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro. 2008.
- DALEFFE, A.; SCHAEFFER, L.; FRITZEN, D.; CASTELAN, J. Analysis of the incremental forming of titanium f67 grade 2 sheet. In: TRANS TECH PUBL. *Key Engineering Materials*. [S.l.], 2013. v. 554, p. 195–203.
- DIABB, J.; RODRÍGUEZ, C.; MAMIDI, N.; SANDOVAL, J.; TAHA-TIJERINA, J.; MARTÍNEZ-ROMERO, O.; ELÍAS-ZÚÑIGA, A. Study of lubrication and wear in single point incremental sheet forming (spif) process using vegetable oil nanolubricants. *Wear*, v. 376, n. Part A, p. 777 – 785, 2017. ISSN 0043-1648. 21st International Conference on Wear of Materials. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004316481730128X>.
- DUFLOU, J.; CALLEBAUT, B.; VERBERT, J.; BAERDEMAEKER, H. D. Laser assisted incremental forming: formability and accuracy improvement. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 56, n. 1, p. 273–276, 2007.
- DUFLOU, J.; LAUWERS, B.; VERBERT, J.; TUNCKOL, Y.; BAERDEMAEKER, H. D. Achievable accuracy in single point incremental forming: case studies. In: *Proceedings of the 8th European Scientific Association for material Forming Conference on Material Forming*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 675–678.

DUFLOU, J.; VERBERT, J.; BELKASSEM, B.; GU, J.; SOL, H.; HENRARD, C.; HABRAKEN, A. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 57, n. 1, p. 253–256, 2008.

DUFLOU, J. R.; SZEKERES, A.; VANHERCK, P. Force measurements for single point incremental forming: an experimental study. In: TRANS TECH PUBL. *Advanced Materials Research*. [S.l.], 2005. v. 6, p. 441–448.

DUPRIEU, B.; GUEGAN, N. *Procédé et dispositif de formage incrémental*. Google Patents, 2013. EP Patent App. EP20,120,178,446. Disponível em: <http://www.google.st/patents/EP2559499A1?cl=pt-PT>.

DURANTE, M.; FORMISANO, A.; LANGELLA, A.; MINUTOLO, F. M. C. The influence of tool rotation on an incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 209, n. 9, p. 4621–4626, 2009.

FAN, G.; GAO, L. Mechanical property of ti-6al-4v sheet in one-sided electric hot incremental forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 72, 2014.

FAN, G.; GAO, L.; HUSSAIN, G.; WU, Z. Electric hot incremental forming: a novel technique. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 48, n. 15, p. 1688–1692, 2008.

FARIAS, J.; MARTINS, M. A.; AFONSO, D. G.; MARABUTO, S. R.; FERREIRA, J. A.; SOUSA, R. de. Cad/cam strategies for a parallel kinematics spif machine. In: TRANS TECH PUBL. *Key Engineering Materials*. [S.l.], 2013. v. 554, p. 2221–2229.

FERRAZ, A. Q. Análise e determinação dos parâmetros da estrutura algébrica de taylor tendo o desgaste da ferramenta de corte como variável dependente. Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

FILICE, L.; AMBROGIO, G.; MICARI, F. On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring. *CIRP annals-Manufacturing technology*, Elsevier, v. 55, n. 1, p. 245–248, 2006.

FILICE, L.; FRATINI, L.; MICARI, F. Analysis of material formability in incremental forming. *CIRP annals-Manufacturing technology*, Elsevier, v. 51, n. 1, p. 199–202, 2002.

FIORENTINO, A. Force-based failure criterion in incremental sheet forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 68, n. 1-4, p. 557–563, 2013.

FRANCESCO, G.; GIUSEPPINA, A.; LUIGINO, F. Incremental forming with local induction heating on materials with magnetic and non-magnetic properties. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 183, p. 143–148, 2017.

FRITZEN, D. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de latão 70/30. 2012.

GIANPAULO, A. M.; TIAGO, G.; LÍRIO, S. Estampagem incremental é opção para pequenos lotes de peças. *Corte e conformação de metais*, Corte e conformação de metais, v. 90, p. 91–93, 2012.

- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. *São Paulo*, v. 5, n. 61, p. 16–17, 2002.
- GÖTTMANN, A.; DIETRICH, J.; BERGWEILER, G.; BAMBACH, M.; HIRT, G.; LOOSEN, P.; POPRAWE, R. Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts. *Production Engineering*, Springer, v. 5, n. 3, p. 263–271, 2011.
- GUPTA, P.; JESWIET, J. Observations on heat generated in single point incremental forming. *Procedia Engineering*, v. 183, n. Supplement C, p. 161 – 167, 2017. ISSN 1877-7058. 17th International Conference on Sheet Metal, SHEMET17. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817315655>).
- HAMILTON, K. A. S. Friction and external surface roughness in single point incremental forming: A study of surface friction, contact area and the ‘orange peel’ effect. Canadian theses, 2010.
- HAN, F.; MO, J. hua; QI, H. wei; LONG, R. fen; CUI, X. hui; LI, Z. wei. Springback prediction for incremental sheet forming based on fem-ponn technology. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 23, n. 4, p. 1061 – 1071, 2013. ISSN 1003-6326. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632613625674>).
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. [S.l.]: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Fundação Christiano Ottoni, 1993.
- HENRARD, C.; BOUFFIOUX, C.; EYCKENS, P.; SOL, H.; DUFLOU, J.; HOUTTE, P. V.; BAEL, A. V.; DUCHENE, L.; HABRAKEN, A. Forming forces in single point incremental forming: prediction by finite element simulations, validation and sensitivity. *Computational mechanics*, Springer, v. 47, n. 5, p. 573–590, 2011.
- HINO, R.; KAWABATA, K.; YOSHIDA, F. Incremental forming with local heating by laser irradiation for magnesium alloy sheet. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 81, p. 2330–2335, 2014.
- HIRT, G.; AMES, J. Environmental and economic benefits of cnc incremental sheet forming for prototyping and low volume production of sheet components. *9th International Workshop on Ecology and economy in manufacturing*, p. 18–21, 2003.
- HIRT, G.; AMES, J.; BAMBACH, M.; KOPP, R. Forming strategies and process modelling for cnc incremental sheet forming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 53, n. 1, p. 203–206, 2004.
- HIRT, G.; JUNK, S.; BAMBACH, M.; CHOUVALOVA, I.; AMES, J. Flexible cnc incremental sheet forming: process evaluation and simulation. *Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany*, p. 12, 2005.
- HONARPISHEH, M.; GHEYSARIAN, A. An experimental study on the process parameters of incremental forming of explosively-welded al/cu bimetal. *Journal of Computational amp; Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, v. 7, n. 1, p. 73–83, 2017. ISSN 2228-7922. Disponível em: [http://jcarme.srttu.edu/article\\_646.html](http://jcarme.srttu.edu/article_646.html)).
- HUSSAIN, G.; DAR, N.; GAO, L.; CHEN, M. A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 187, p. 94–98, 2007.

- HUSSAIN, G.; GAO, L.; HAYAT, N.; CUI, Z.; PANG, Y.; DAR, N. Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 203, n. 1, p. 193–201, 2008.
- HUSSAIN, G.; GAO, L.; ZHANG, Z. Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 37, n. 9, p. 920–926, 2008.
- HUSSAIN G.AND MAHNA, A.; IQBAL, A. Response surface analysis of cold formability of polymers in incremental sheet forming: Effect of parameters and associated thermal softening. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Publisher, v. 17, p. 613–621, May 2016.
- INFOESCOLA. *Virtualizacao - VMWare e Xen*. 2018. Disponível em: <https://www.infoescola.com/geometria-espacial/calota-esferica/>.
- JACKSON, K.; ALLWOOD, J. The mechanics of incremental sheet forming. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 209, n. 3, p. 1158–1174, 2009.
- JACKSON, K.; ALLWOOD, J.; LANDERT, M. Incremental forming of sandwich panels. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 204, n. 1, p. 290 – 303, 2008. ISSN 0924-0136. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607010801>.
- JESWIET, J.; MICARI, F.; HIRT, G.; BRAMLEY, A.; DUFLOU, J.; ALLWOOD, J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 54, n. 2, p. 88–114, 2005.
- JI, Y.; PARK, J. Incremental forming of free surface with magnesium alloy az31 sheet at warm temperatures. *Transactions of nonferrous metals society of China*, Elsevier, v. 18, p. s165–s169, 2008.
- JIMÉNEZ, I.; LÓPEZ, C.; MARTINEZ-ROMERO, O.; MARES, P.; SILLER, H.; DIABB, J.; SANDOVAL-ROBLES, J. A.; ELÍAS-ZÚÑIGA, A. Investigation of residual stress distribution in single point incremental forming of aluminum parts by x-ray diffraction technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 91, n. 5-8, p. 2571–2580, 2017.
- KIM, T.; YANG, D. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, v. 42, n. 7, p. 1271–1286, 2000.
- KOPAC, J.; KAMPUS, Z. Incremental sheet metal forming on cnc milling machine-tool. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 162, p. 622–628, 2005.
- KOPAC, J.; KAMPUS, Z. Incremental sheet metal forming on CNC-milling machine tool Title. *Journal of Materials Processing Technology*, Publisher, v. 162-163, p. 622–628, May 2005.
- KULKARNI, S. *Heat assisted single point forming of polymer sheets*. Tese (Doutorado) — Clemson University, 2016.
- KUMAR, Y.; KUMAR, S. Incremental sheet forming (isf). In: *Advances in Material Forming and Joining*. [S.l.]: Springer, 2015. p. 29–46.

- KURRA, S.; RAHMAN, N. H.; REGALLA, S. P.; GUPTA, A. K. Modeling and optimization of surface roughness in single point incremental forming process. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 4, n. 3, p. 304 – 313, 2015. ISSN 2238-7854. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785415000071>).
- KURRA, S.; REGALLA, S. P. Experimental and numerical studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 158–171, 2014.
- LE, V. S. Modeling of single point incremental forming process for metal and polymeric sheet. 2009.
- LENĐEL, R.; MILUTINOVIĆ, M.; IVANIŠEVIĆ, A.; VILOTIĆ, D.; MOVRIN, D.; SKAKUN, P. Single point incremental forming of large-size components. *Journal for Technology of Plasticity*, v. 39, n. 1, 2014.
- LEÓN, J.; SALCEDO, D.; CIÁURRIZ, C.; LUIS, C.; FUERTES, J.; PUERTAS, I.; LURI, R. Analysis of the influence of geometrical parameters on the mechanical properties of incremental sheet forming parts. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 63, p. 445–453, 2013.
- LI, P.; HE, J.; LIU, Q.; YANG, M.; WANG, Q.; YUAN, Q.; LI, Y. Evaluation of forming forces in ultrasonic incremental sheet metal forming. *Aerospace Science and Technology*, Elsevier, v. 63, p. 132–139, 2017.
- LI, Y.; DANIEL, W. J.; MEEHAN, P. A. Deformation analysis in single-point incremental forming through finite element simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 88, n. 1-4, p. 255–267, 2017.
- LI, Y.; LIU, Z.; DANIEL, W.; MEEHAN, P. A. Simulation and experimental observations of effect of different contact interfaces on the incremental sheet forming process. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 29, n. 2, p. 121–128, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2013.822977>).
- LI, Y.; LIU, Z.; LU, H.; DANIEL, W. B.; LIU, S.; MEEHAN, P. A. Efficient force prediction for incremental sheet forming and experimental validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 73, n. 1-4, p. 571–587, 2014.
- LI, Y. L.; LIU, Z. B.; LU, H. B.; DANIEL, W.; MEEHAN, P. A. Experimental study and efficient prediction on forming forces in incremental sheet forming. In: TRANS TECH PUBL. *Advanced Materials Research*. [S.l.], 2014. v. 939, p. 313–321.
- LI, Y. L.; SUN, J.; LI, J. F. A brief review of forming forces in incremental sheet forming. In: TRANS TECH PUBL. *Materials Science Forum*. [S.l.], 2016. v. 861, p. 195–200.
- LIU, R.; LU, B.; XU, D.; CHEN, J.; CHEN, F.; OU, H.; LONG, H. Development of novel tools for electricity-assisted incremental sheet forming of titanium alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer Verlag, v. 85, n. 5, p. 1137–1144, 2016.
- LIU, Z.; LI, Y.; MEEHAN, P. A. Experimental investigation of mechanical properties, formability and force measurement for aa7075-o aluminum alloy sheets formed by incremental forming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Springer Berlin Heidelberg, v. 14, n. 11, p. 1891–1899, 2013.

LOPES, T. F. R. d. S. et al. Estampagem incremental: compensação do retorno elástico e análise à rotura. 2013.

LOW, M. et al. *Determinação do estágio inicial da recristalização em ligas de alumínio por difração de raios-X*. [S.l.]: São Paulo: IPEN-CNEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2000.

LU, B.; CHEN, J.; OU, H.; CAO, J. Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 213, n. 7, p. 1221–1233, 2013.

LU, B.; FANG, Y.; XU, D.; CHEN J. AND OU, H. M. N.; CAO, J. Mechanism investigation of friction-related effects in simple point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. *International Journal of Machine Tools e manufacture*, Publisher, v. 85, p. 14–29, 2014.

MAGNUS, C. S. Joule heating of the forming zone in incremental sheet metal forming: Part 1. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 91, n. 1-4, p. 1309–1319, 2017.

MAGNUS, C. S. Joule heating of the forming zone in incremental sheet metal forming: Part 2. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 89, n. 1-4, p. 295–309, 2017.

MALHOTRA, R.; REDDY, N.; CAO, J. Automatic 3d spiral toolpath generation for single point incremental forming. *Journal of manufacturing science and engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 132, n. 6, p. 061003, 2010.

MALWAD, D.; NANDEDKAR, V. Deformation mechanism analysis of single point incremental sheet metal forming. *Procedia Materials Science*, Elsevier, v. 6, p. 1505–1510, 2014.

MARTINS, P.; BAY, N.; SKJØDT, M.; SILVA, M. Theory of single point incremental forming. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 57, n. 1, p. 247–252, 2008.

MCANULTY, T.; JESWIET, J.; DOOLAN, M. Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 16, n. Supplement C, p. 43 – 54, 2017. ISSN 1755-5817. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581716300384>).

MEIER, H.; MAGNUS, C.; SMUKALA, V. Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Elsevier, v. 60, n. 1, p. 327–330, 2011.

MICARI, F.; AMBROGIO, G.; FILICE, L. Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 191, n. 1, p. 390–395, 2007.

MOHAMMADI, A.; VANHOVE, H.; WEISE, D.; BAEL, A. V.; LANDGREBE, D.; DUFLOU, J. R. Influence of global forced-air warming on the bulge formation in shallow sloped spif parts. *Procedia Engineering*, v. 183, n. Supplement C, p. 149 – 154, 2017. ISSN 1877-7058. 17th International Conference on Sheet Metal, SHEMET17. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817315515>).

- MONTALVÃO, J. d. A. et al. Determinação da usinabilidade dos aços ferramentas n2711m e vpatlas no fresamento de topo. Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
- MUGENDIRAN, V.; GNANAVELBABU, A. Comparison of fld and thickness distribution on aa5052 aluminium alloy formed parts by incremental forming process. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 97, p. 1983–1990, 2014.
- MULAY, A.; BEN, S.; ISMAIL, S.; KOCANDA, A. Experimental investigations into the effects of spif forming conditions on surface roughness and formability by design of experiments. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer, p. 1–14, 2017.
- MUSIC, O.; ALLWOOD, J.; KAWAI, K. A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 210, n. 1, p. 3–23, 2010.
- NIMBALKAR, D.; NANDEDKAR, V. Review of incremental forming of sheet metal components. *Int J Eng Res Appl*, v. 3, n. 5, p. 39–51, 2013.
- NIMBALKAR, D. H.; M., N. V. Review of incremental forming of sheet metal components. *Journal of Engineering Research and Applications*, Publisher, v. 3, n. 5, p. 39–51, 2013.
- NSK. *NSK rolamentos*. 2017. Disponível em: (<http://www.nsk.com.br/upload/file/PARTE%20B%20%20234-243.pdf>).
- OTSU, M.; YASUNAGA, M.; MATSUDA, M.; TAKASHIMA, K. Friction stir incremental forming of a2017 aluminum sheets. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 81, p. 2318–2323, 2014.
- PARK, J.-J.; KIM, Y.-H. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 140, n. 1, p. 447–453, 2003.
- PAUNOIU, V.; EPUREANU, A.; NICOARA, D.; CIOCAN, O. A review of the sheet metal forming methods using reconfigurable dies. *Analele Universitatii "Dunarea de Jos" din Galati/The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building*, p. 45–50, 2006.
- PETEK, A.; KUZMAN, K.; KOPAC, J. Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming. *Archives of Materials science and Engineering*, v. 35, n. 2, p. 35–42, 2009.
- PETEK, A.; PODGOMIK, B.; KUZMAN, K.; CEKADA, M.; WALDHAUSER, W.; VIZINTIN, J. The analysis of complex tribological system of single point incremental sheet metal forming-spif. *Strojniški vestnik*, *Strojniski vestnik*, v. 54, n. 4, p. 266–273, 2008.
- PRADELLA, M. P. P. Estudo dos parâmetros de estampagem incremental para pvc. *Revista Matéria*, v. 21, n. 4, p. 1094–1104, 2017.
- PUZIK, A. Incremental sheet forming with a robot system for an industrial application. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier*, Springer, v. 1, p. 421–424, 2008.

QU, J.; XU, H.; FENG, Z.; FREDERICK, D. A.; AN, L.; HEINRICH, H. Improving the tribological characteristics of aluminum 6061 alloy by surface compositing with sub-micro-size ceramic particles via friction stir processing. *Wear*, v. 271, n. 9, p. 1940 – 1945, 2011. ISSN 0043-1648. 18th International Conference on Wear of Materials. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164811002390>).

QUEENSLAND. *Cutting speed*. 2017. Disponível em: <http://www.mechmining.uq.edu.au/advanced-forming>). Acesso em: 17-07-2017.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. Tecnologia mecânica. *Tecnologia da Deformação Plástica*, v. 1, 2005.

ROTH, J. *Single point incremental forming of metallic materials using applied direct current*. [S.l.]: Google Patents, 2011. US Patent 8,021,501.

SALEM, E.; SHIN, J.; NATH, M.; BANU, M.; TAUB, A. I. Investigation of thickness variation in single point incremental forming. *Procedia Manufacturing*, v. 5, n. Supplement C, p. 828 – 837, 2016. ISSN 2351-9789. 44th North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 44, June 27-July 1, 2016, Blacksburg, Virginia, United States. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916300804>).

SANDVIK. *Cutting speed*. 2017. Disponível em: [http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/formulas\\_and\\_definitions/the\\_milling\\_process/Pages/Cutting-speed.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/formulas_and_definitions/the_milling_process/Pages/Cutting-speed.aspx)). Acesso em: 17-07-2017.

SHI, P.; LI, Y.; YANG, M.; YAO, Z. A study on the warm incremental forming limit of az31b sheet. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, n. iceta, 2016.

SILVA, C. R. M.; SILVA, P. J.; LEODIDO, L. M. Analysis of incremental sheet forming parameters and tools aimed at rapid prototyping. *Trans Tech Publications*, v. 554, p. 2285–2292, 7 2013.

SILVA, M. B.; MARTINS, P. A. F. Two-point incremental forming with partial die: Theory and experimentation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 22, n. 4, p. 1018–1027, Apr 2013. ISSN 1544-1024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-012-0400-3>).

SILVA, P. J.; MARTINS, V.; DORNELLES, P. G.; SCHAEFFER, L. Influência da rotação, do avanço e do incremento no eixo z, nos parâmetros da estampagem incremental em chapas de aço sae 1008force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming. 13ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, n. 13, 2008.

SILVEIRA, F. D.; SCHAEFFER, L. *Diretrizes para projeto de ferramenta de estampagem Parte I*. [S.l.]: Ferramental, 2008.

SKJØDT, M.; BAY, N.; ENDELT, B.; INGARAO, G. Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup. *International Journal of Material Forming*, Springer, v. 1, p. 1199–1202, 2008.

SORNSUWIT, N.; SITTISAKULJAROEN, S. The effect of lubricants and material properties in surface roughness and formability for single point incremental forming process. In: TRANS TECH PUBL. *Advanced Materials Research*. [S.l.], 2014. v. 979, p. 359–362.

- SRIDHAR, R.; RAJENTHIRAKUMAR, D. Polymer sheet hot incremental forming-an innovative polymer forming approach. *Polymers & Polymer Composites*, Smithers Rapra Technology Limited, v. 24, n. 7, p. 447, 2016.
- SURESH K.AND KHAN, A.; REGALLA, S. P. The analysis of complex tribological system of single point incremental forming - spif. *Procedia Engineering*, Publisher, v. 64, p. 536–545, 2013.
- SURESH K.AND KHAN, A.; REGALLA, S. P. Threshold tool-radius condition maximizing the formability in spif considering a variety of materials: Experimental and fe investigations. *International Journal of Machine Tools e Manufacture*, Publisher, v. 88, p. 82–94, 2015.
- SURIYAPRAKAN, P. Single point incremental forming and multi-stage incremental forming on aluminium alloy 1050. , Publisher, 2013.
- SY, L. V.; NAM, N. T. Hot incremental forming of magnesium and aluminum alloy sheets by using direct heating system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 227, n. 8, p. 1099–1110, 2013.
- TUOMI, J.; LAMMINEN, L. Incremental sheet forming as a method for sheet metal component prototyping and manufacturing. *Assises Européennes de Prototypage Rapide*, 2004.
- VALLE, P. D. Investigação teórico-experimental dos esforços de conformação mecânica na estampagem incremental assimétrica por ponto único em centros de usinagem. 2016.
- VERBERT, J.; DUFLOU, J. R.; LAUWERS, B. Feature based approach for increasing the accuracy of the spif process. In: TRANS TECH PUBL. *Key Engineering Materials*. [S.l.], 2007. v. 344, p. 527–534.
- WANG, J.; NAIR, M.; ZHANG, Y. An efficient force prediction strategy in single point incremental sheet forming. *Procedia Manufacturing*, v. 5, n. Supplement C, p. 761 – 771, 2016. ISSN 2351-9789. 44th North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 44, June 27-July 1, 2016, Blacksburg, Virginia, United States. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916300713>).
- WANG, J.; NAIR, M.; ZHANG, Y. An efficient force prediction strategy for single point incremental sheet forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 92, n. 9-12, p. 3931–3939, 2017.
- XU, D.; LU, B.; CAO, T.; CHEN, J.; LONG, H.; CAO, J. A comparative study on process potentials for frictional stir-and electric hot-assisted incremental sheet forming. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 81, p. 2324–2329, 2014.
- XU, D.; WU, W.; MALHOTRA, R.; CHEN, J.; LU, B.; CAO, J. Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (lst) on formability in single point incremental forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 73, p. 37–46, 2013.
- ZHANG, Q.; XIAO, F.; GUO, H.; LI, C.; GAO, L.; GUO, X.; HAN, W.; BONDAREV, A. Warm negative incremental forming of magnesium alloy az31 sheet: New lubricating method. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 210, n. 2, p. 323–329, 2010.

ZHU, H.; LIU, Z.; FU, J. Spiral tool-path generation with constant scallop height for sheet metal cnc incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 54, n. 9, p. 911–919, 2011.

# APÊNDICES

## A. FLUXOGRAMA IDEF

O IDEF é um ferramenta computacional de modelagem funcional, disponibilizada como de domínio público pela Softech Inc., que apresenta cada atividade por meio de fluxo de processos.

O IDEF é largamente utilizado na engenharia para representação gráfica de processos na forma de diagramas hierarquizados, formalizando os *inputs*, *outputs*, controles e recursos necessários para a execução do processo e suas atividades.

Nessa ferramenta, o sistema IDEF0 é o primeiro conjunto de padrões do IDEF, o fluxograma inicia-se com a atividade A0, que descreve o sistema de produção de acordo com entradas, saídas, controles e mecanismos, como pode ser visto na Figura A.1. A Atividade A0 é a atividade mãe, ou atividade central, a partir dela se derivam as outras atividades que compõem o processo.

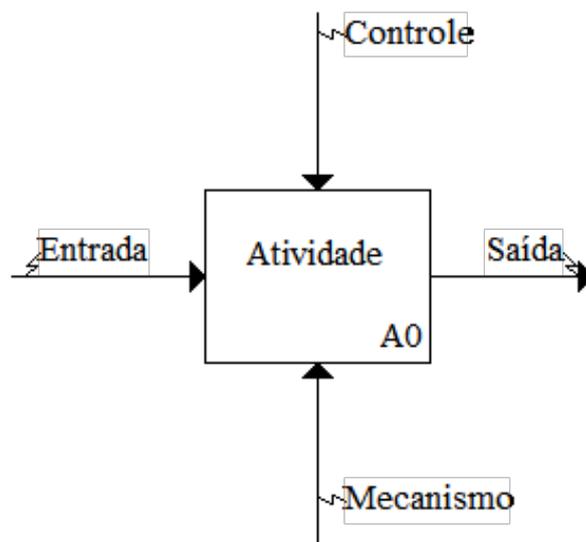


Figura A.1: Caixa de atividade IDEF0

- As entradas (I) são recursos consumidos ou transformados por atividades na produção de resultados. Uma entrada é representada por uma seta em anexo para o lado esquerdo de uma caixa de atividade.
- Uma saída (O) é produzida por uma atividade de acordo com os recursos utilizados pela atividade. Uma saída está representada por uma seta em anexo para o lado direito de uma caixa de atividade.

- Um controle (C) é um elemento que restringe ou orienta a produção de produtos de uma atividade (por exemplo, orientações de fabricação). Um controle é representado por uma seta ligada ao topo de uma caixa de atividade.
- Os mecanismos (M) são os recursos, tais como empregados ou máquinas, que são utilizados por atividades na produção de uma saída. Um mecanismo é representado por uma seta ligada ao fundo de uma caixa de atividade.

Os modelos são organizados a partir do diagrama A0 que é atividade principal como um todo, por meio da qual se derivam todas as outras atividades do processo. Assim, as próximas atividades a serem desenvolvidas A1 e A2 são filhas ou derivadas de A0 e aparecem na decomposição de A0 (Figura A.2) com uma sucessão de níveis de diagramas que fornecem informações mais detalhadas sobre o diagrama A1 ou A2 ou, até mesmo, da próxima atividade. Esses níveis são numerados em sequência, A1, A11, A111, etc.

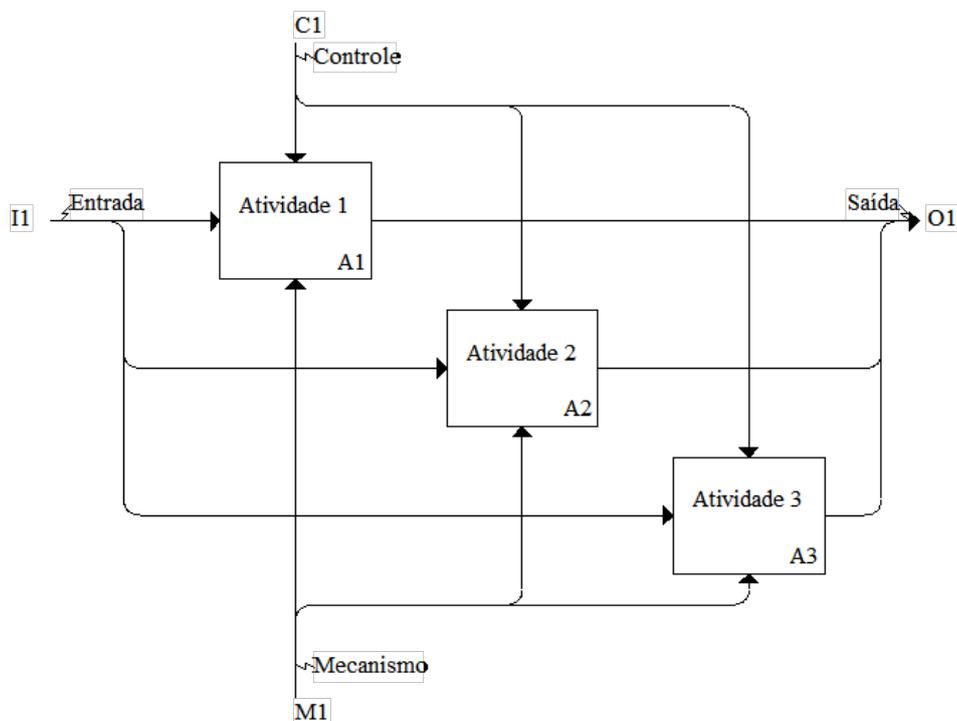


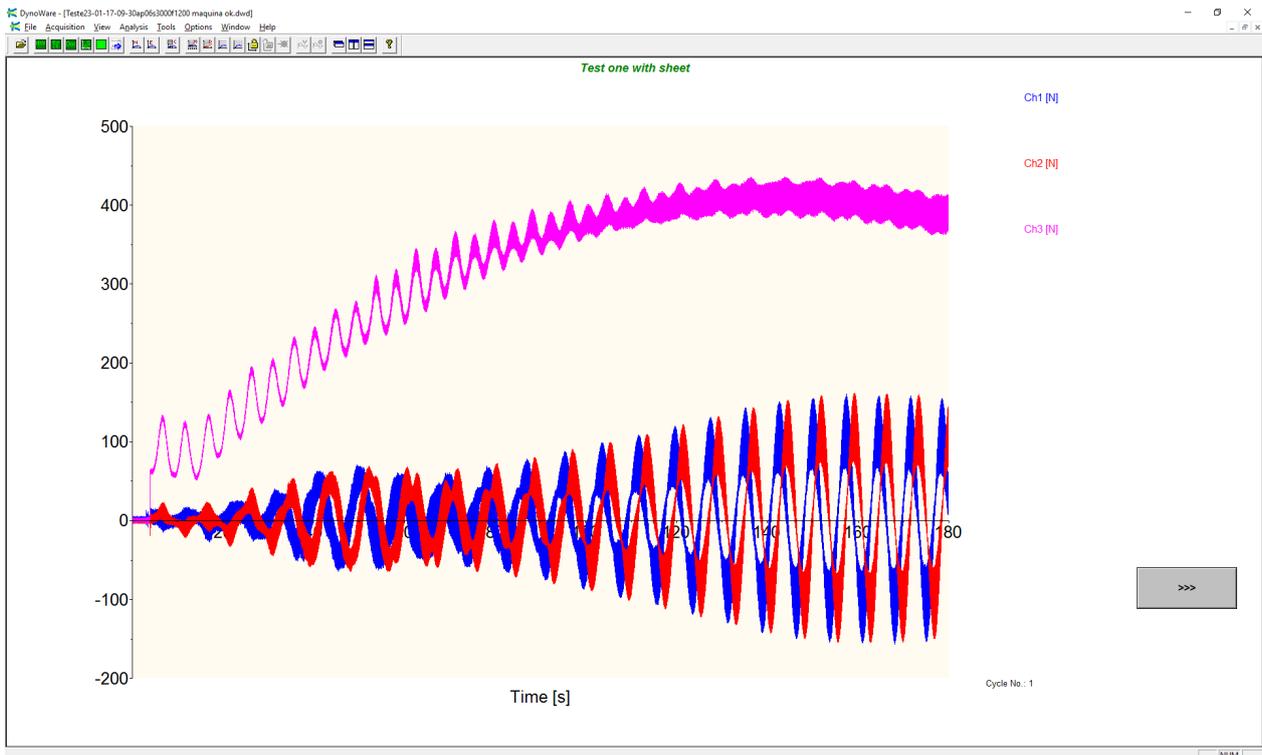
Figura A.2: Caixa de subatividades do IDEF0

## B. FORÇAS DE CONFORMAÇÃO

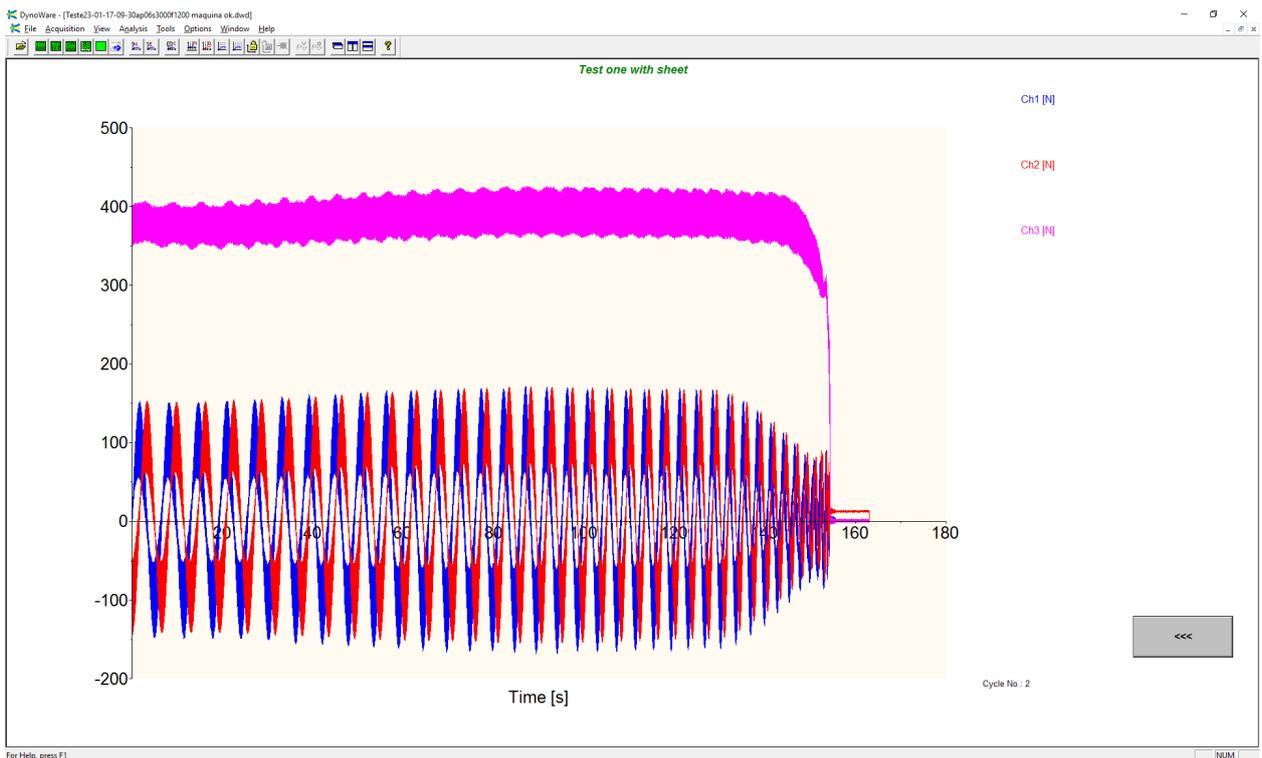
Neste apêndice se apresentam os principais gráficos de força gerado pelo dispositivo piezoelétrico durante a conformação do perfil simples em chapa de liga alumínio 1050. Para melhor aquisição dos dados processado foi adquirido os dado de força no tempo de 180 segundos porem irrelevante do tempo de processamento foi adquirido todos os dados do processo.

Onde nas figuras apresentadas o Canal 1 corresponde ao valores de eixo X, representado por Ch1, Canal 2 corresponde ao valores de eixo Y, representado por Ch2 e o Canal 3 corresponde ao valores de eixo Z, representado por Ch3, todos os valores são espessado em Newton.

A figura B.1 apresenta os valores de forças para os os eixos X Y e Z, onde cada eixo é representado por uma cor, azul, vermelho e magenta, respectivamente. A figura B.1 representa o teste 14 com  $A_p=0,6$  mm,  $S=3000$  RPM e  $f=1200$  mm/min, neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=144$ N,  $F_y=192$ N e  $F_z=436$ N.



(a)



(b)

Figura B.1: Teste 14 -  $A_p=0,6$  mm,  $S=3000$  RPM e  $f=1200$  mm/min

A figura B.2 representa o teste 15 executado com os parâmetros,  $A_p=0,6$ mm,  $S=3000$ RPM e

$f=2400\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=171\text{N}$ ,  $F_y=171\text{N}$  e  $F_z=447\text{N}$ .

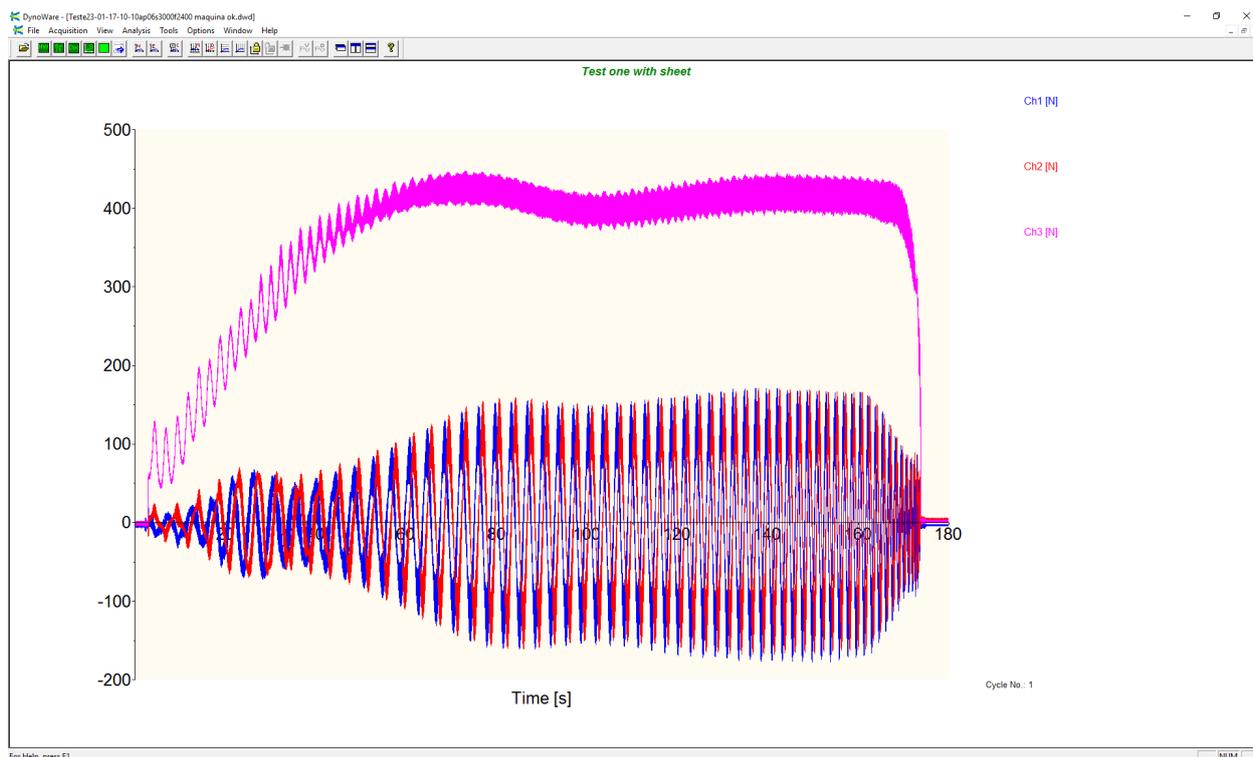


Figura B.2: Teste 15 executado com os parâmetros,  $A_p=0,6\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=2400\text{mm/min}$

A figura B.3 representa o teste 16 executado com os parâmetros,  $A_p=0,6\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=170\text{N}$ ,  $F_y=170\text{N}$  e  $F_z=456\text{N}$ .

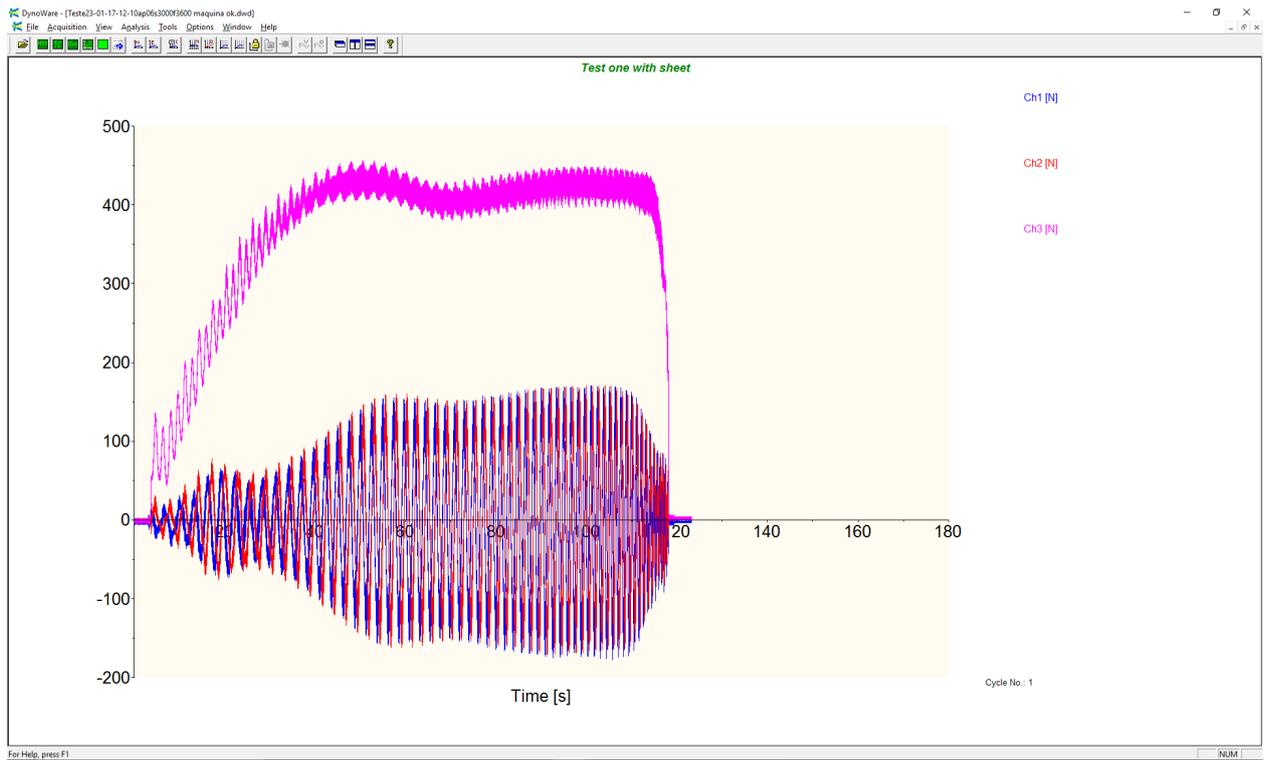


Figura B.3: Teste 16 executado com os parâmetros,  $A_p=0,6\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.4 representa o teste 17 executado com os parâmetros,  $A_p=0,6\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=158\text{N}$ ,  $F_y=185\text{N}$  e  $F_z=478\text{N}$ .

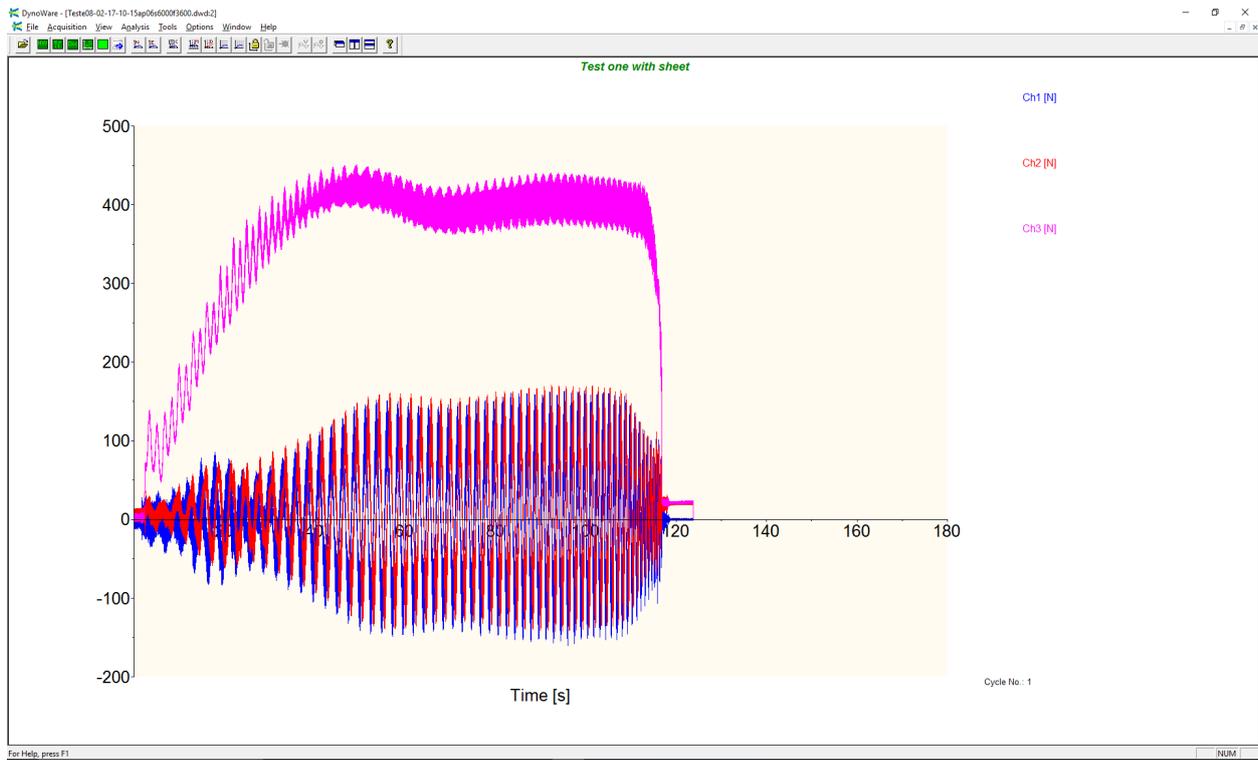


Figura B.4: Teste 17 executado com os parâmetros,  $A_p=0,6\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.5 representa o teste 19 executado com os parâmetros,  $A_p=1,0\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=189\text{N}$ ,  $F_y=219\text{N}$  e  $F_z=547\text{N}$ .

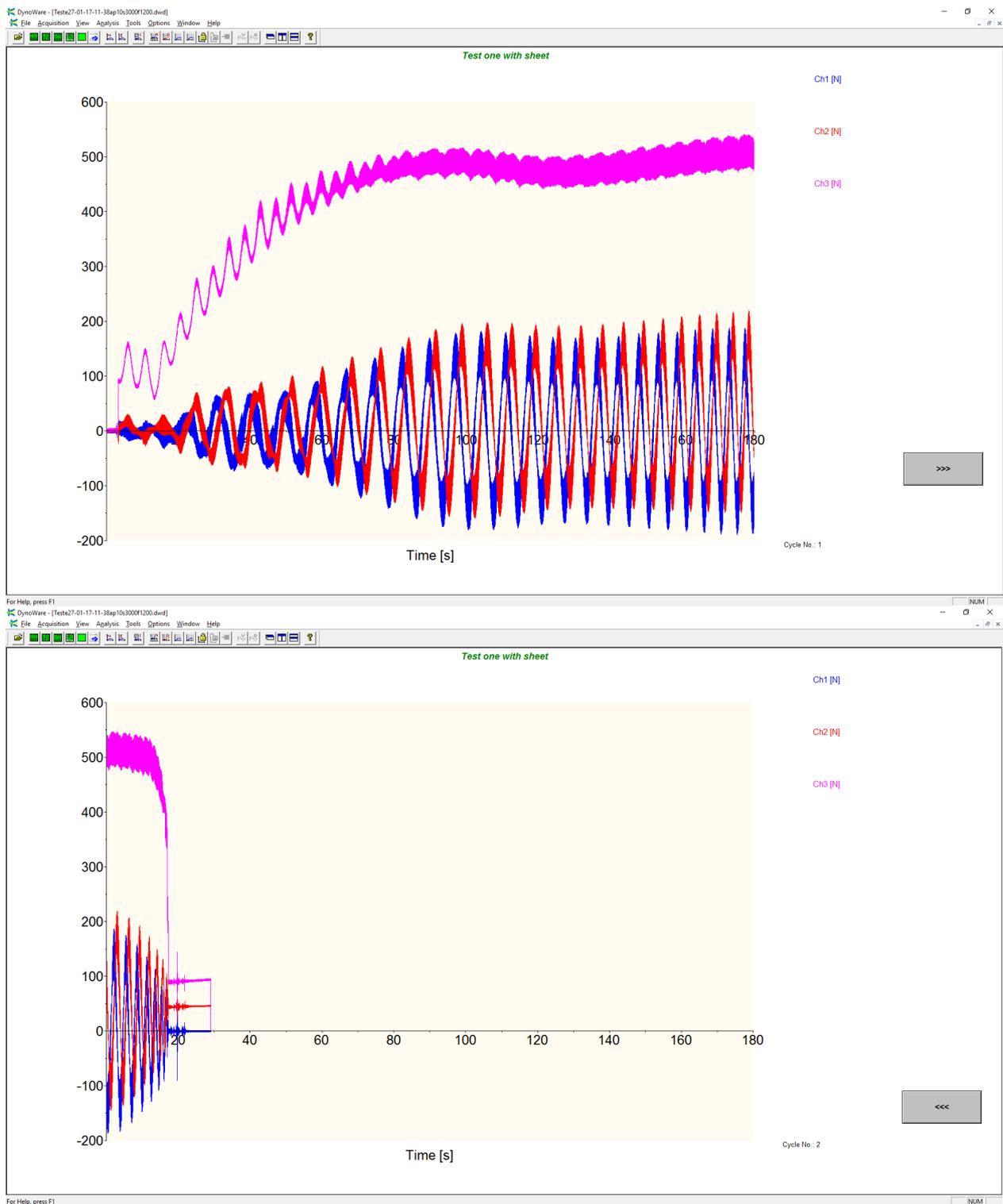


Figura B.5: Teste 19 executado com os parâmetros,  $A_p=1,0\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$

A figura B.6 representa o teste 20 executado com os parâmetros,  $A_p=1,0\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=197\text{N}$ ,  $F_y=197\text{N}$  e  $F_z=506\text{N}$ .

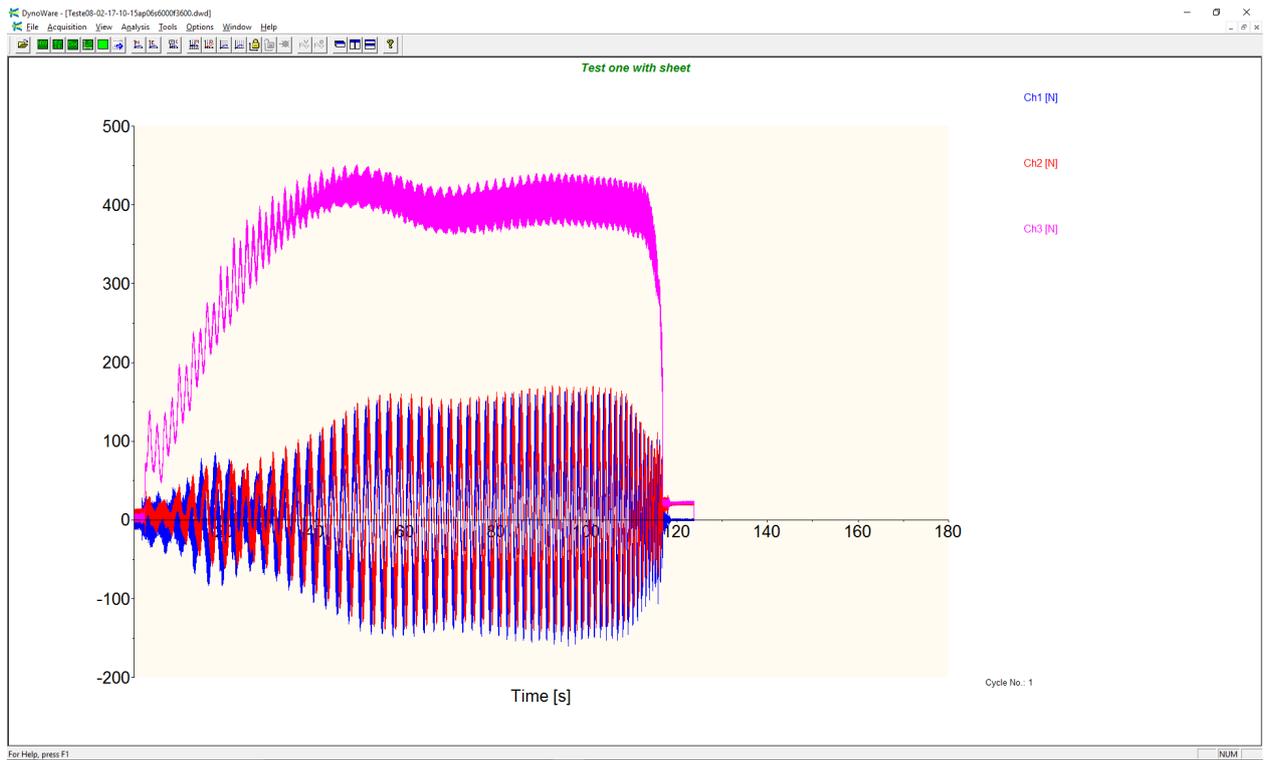


Figura B.6: Teste 20 executado com os parâmetros,  $A_p=1,0\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.7 representa o teste 21 executado com os parâmetros,  $A_p=1,0\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=173\text{N}$ ,  $F_y=171\text{N}$  e  $F_z=484\text{N}$ .

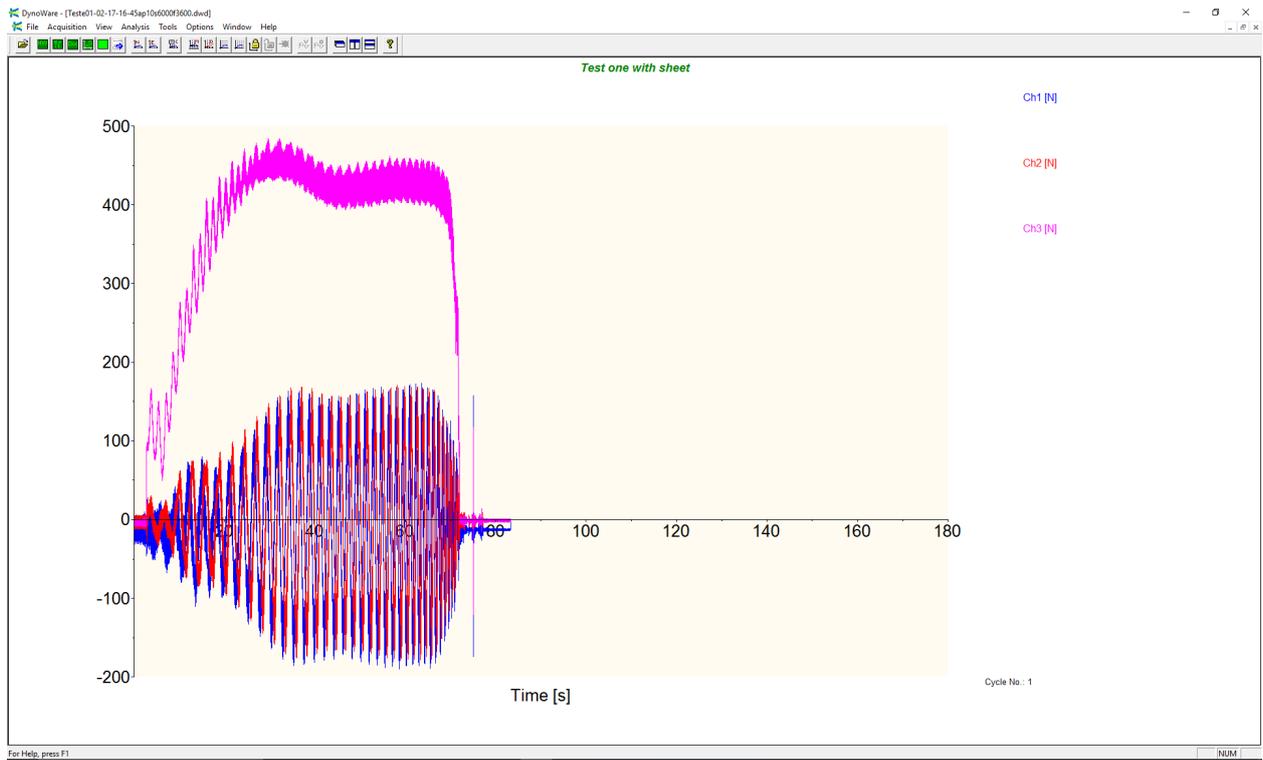


Figura B.7: Teste 21 executado com os parâmetros,  $A_p=1,0\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.8 representa o teste 23 executado com os parâmetros,  $A_p=1,4\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=244\text{N}$ ,  $F_y=221\text{N}$  e  $F_z=555\text{N}$ .

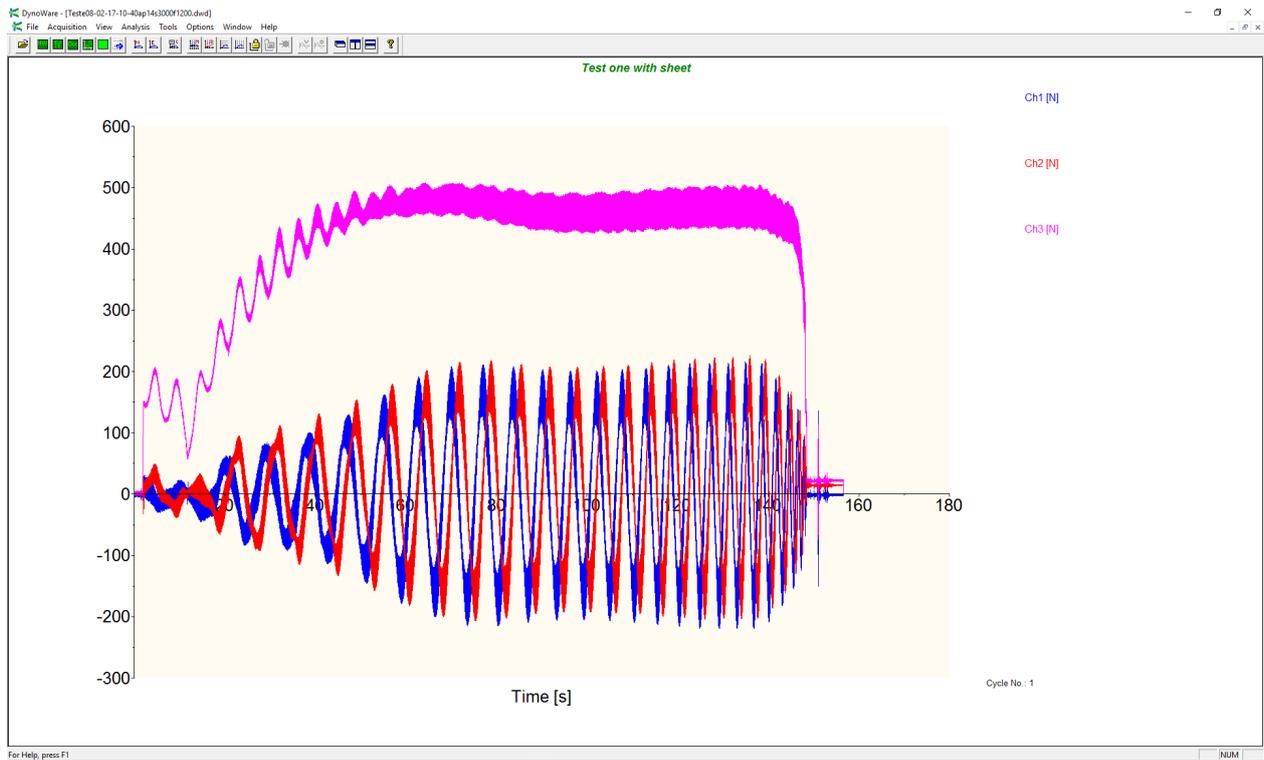


Figura B.8: Teste 23 executado com os parâmetros,  $A_p=1,4\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$

A figura B.9 representa o teste 24 executado com os parâmetros,  $A_p=1,4\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=228\text{N}$ ,  $F_y=227\text{N}$  e  $F_z=538\text{N}$ .

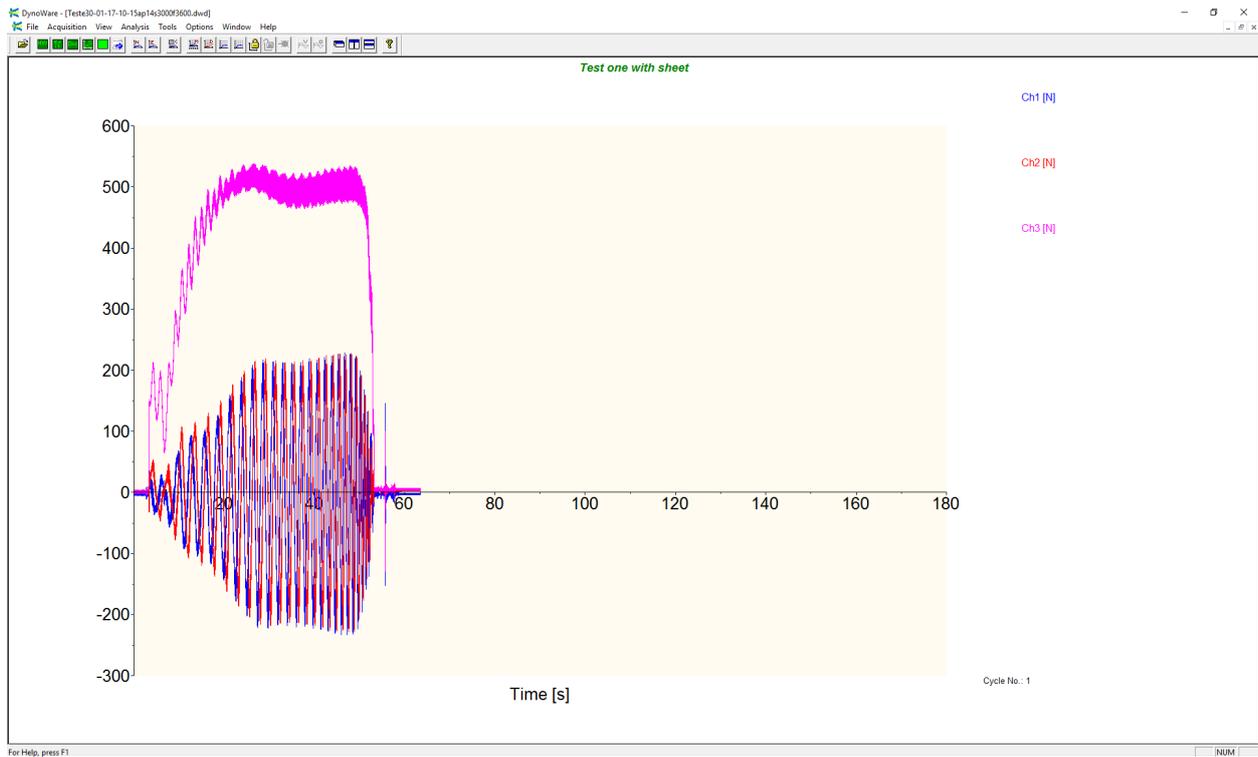


Figura B.9: Teste 24 executado com os parâmetros,  $A_p=1,4\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.10 representa o teste 25 executado com os parâmetros,  $A_p=1,4\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=216\text{N}$ ,  $F_y=212\text{N}$  e  $F_z=516\text{N}$ .

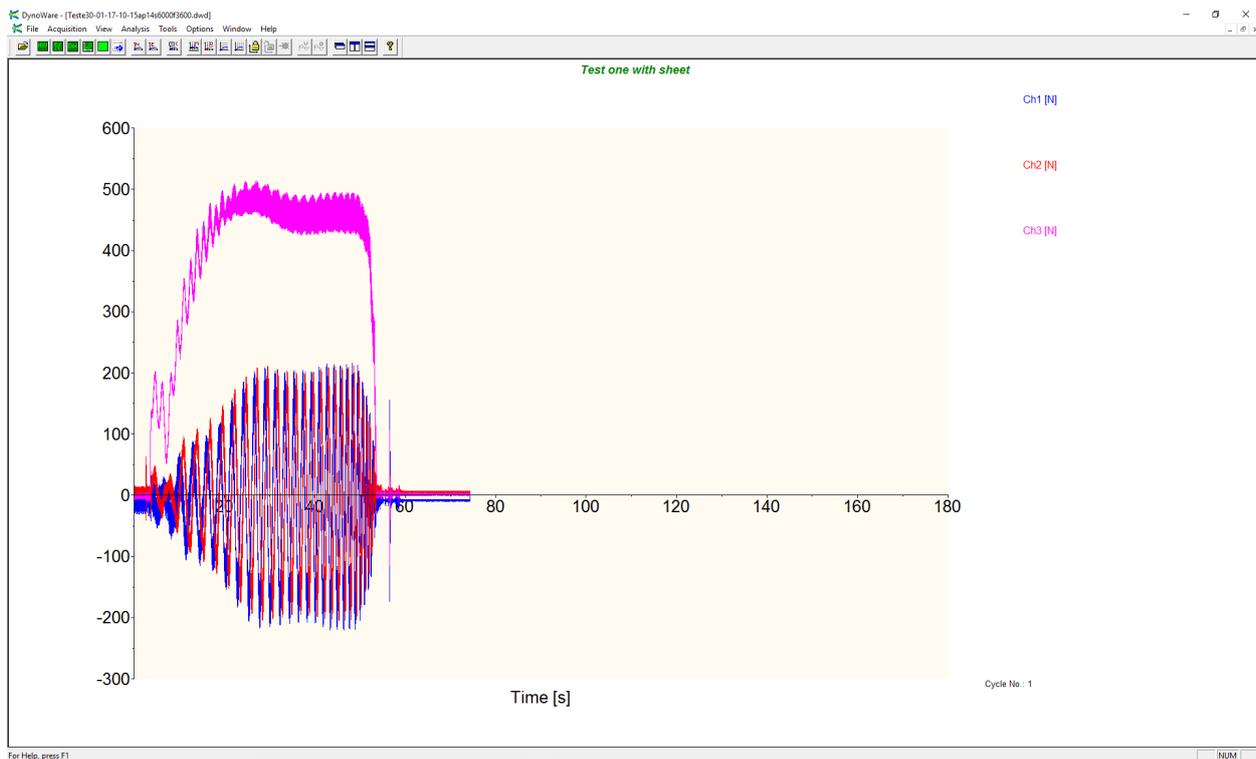


Figura B.10: Teste 25 executado com os parâmetros,  $A_p=1,4\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.11 representa o teste 27 executado com os parâmetros,  $A_p=1,8\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=253\text{N}$ ,  $F_y=248\text{N}$  e  $F_z=536\text{N}$ .

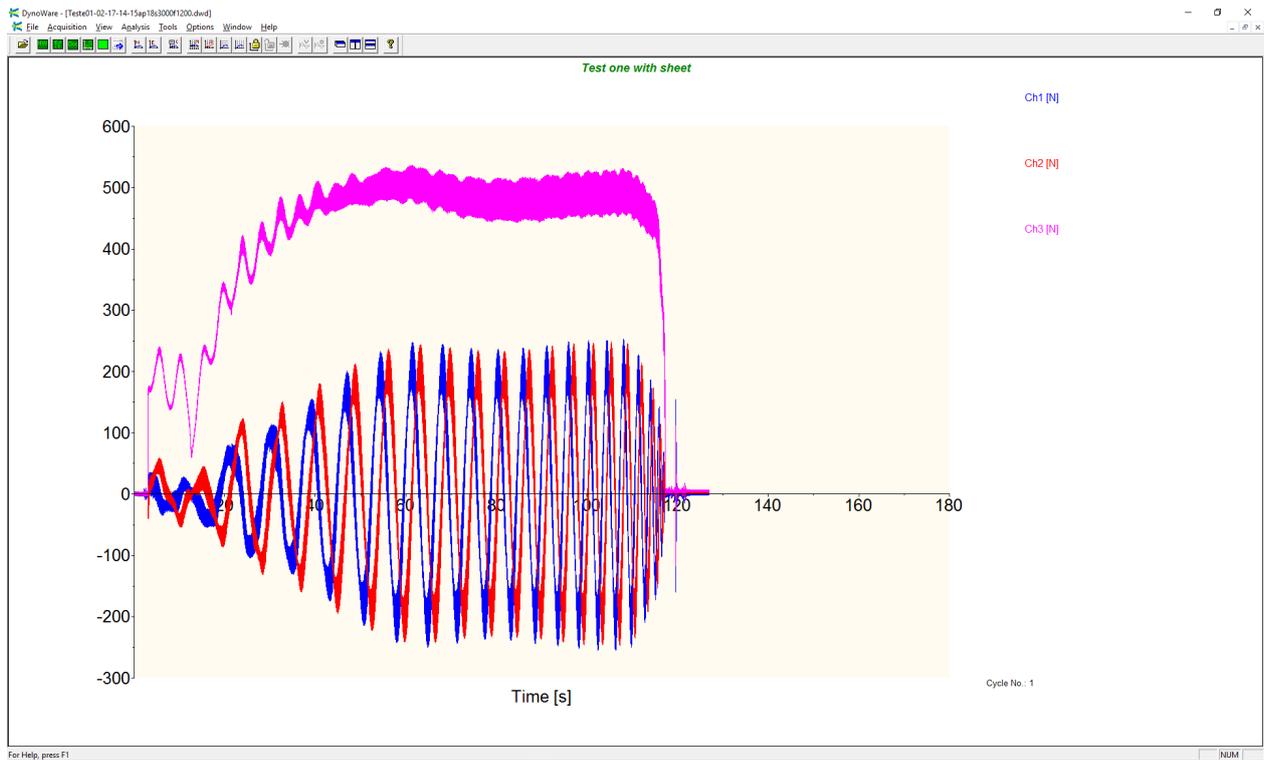


Figura B.11: Teste 27 executado com os parâmetros,  $A_p=1,8\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$

A figura B.12 representa o teste 28 executado com os parâmetros,  $A_p=1,8\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=261\text{N}$ ,  $F_y=259\text{N}$  e  $F_z=572\text{N}$ .

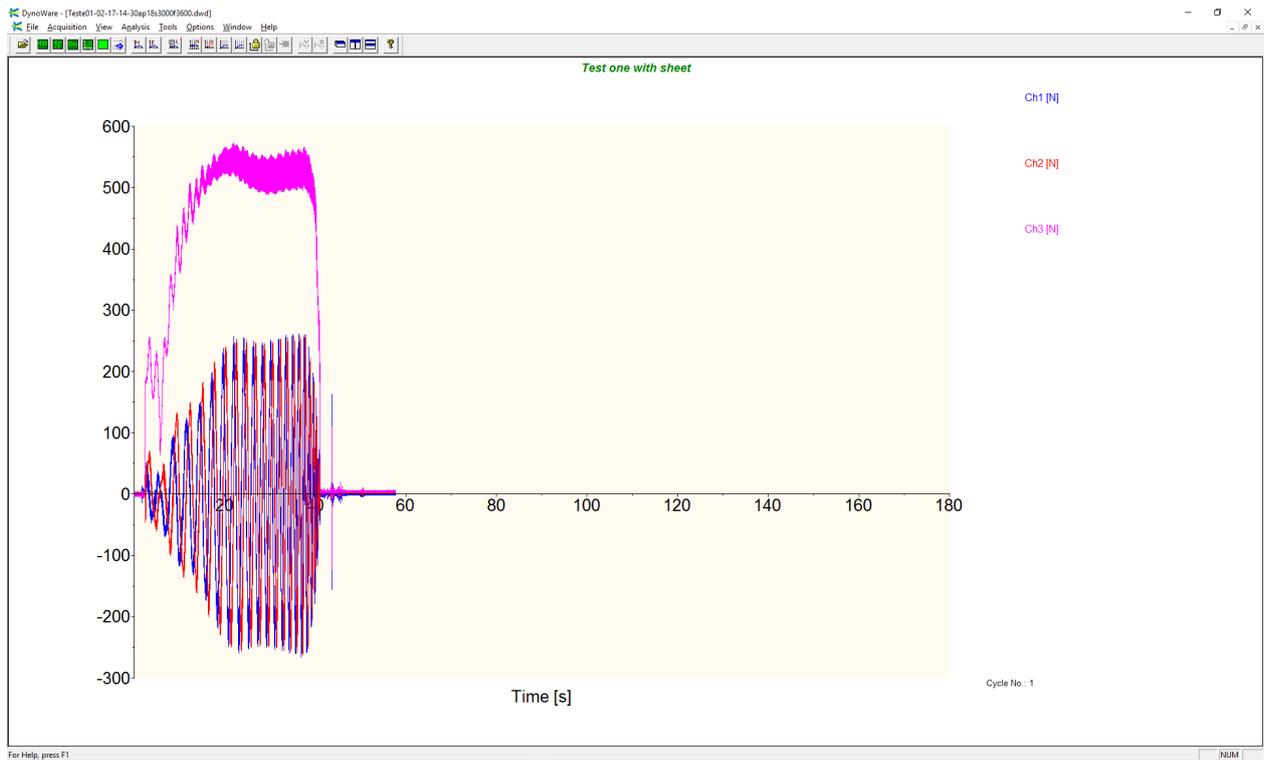


Figura B.12: Teste 28 executado com os parâmetros,  $A_p=1,8\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.13 representa o teste 29 executado com os parâmetros,  $A_p=1,8\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=260\text{N}$ ,  $F_y=235\text{N}$  e  $F_z=543\text{N}$ .

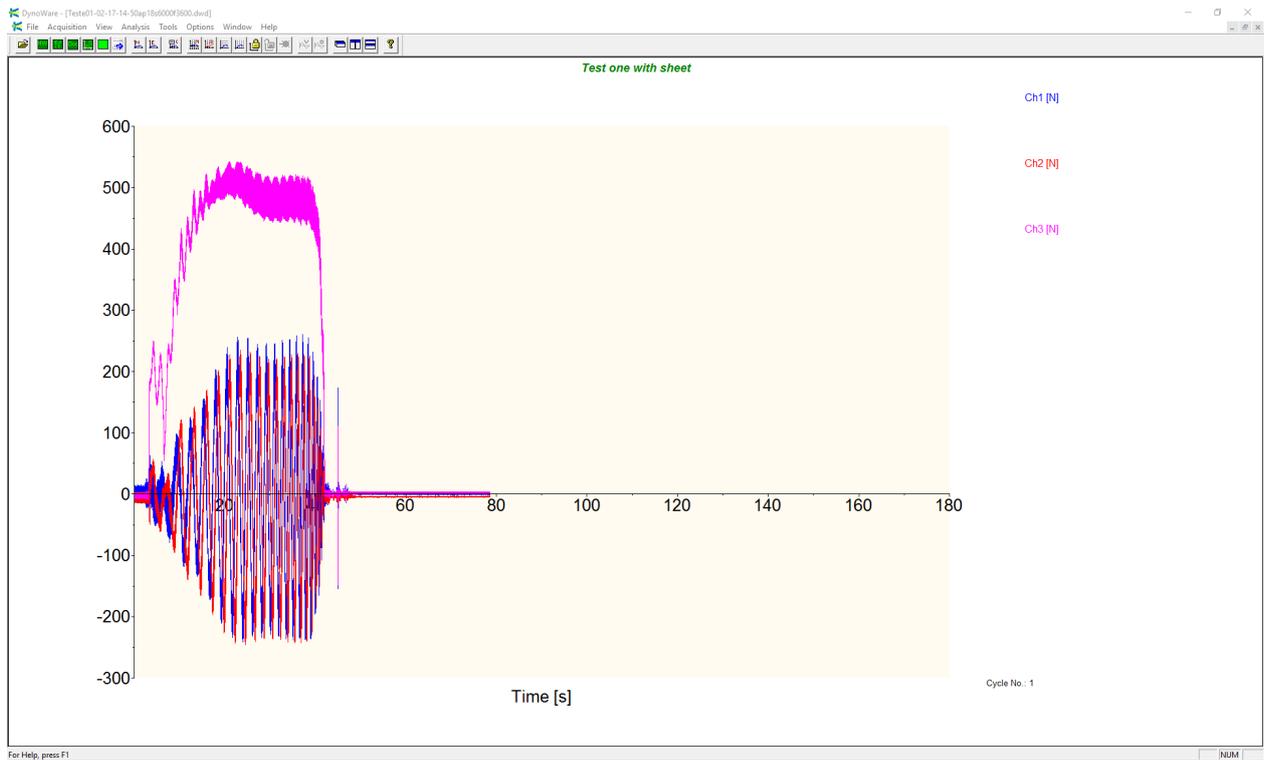


Figura B.13: Teste 29 executado com os parâmetros,  $A_p=1,8\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.14 representa o teste 30 executado com os parâmetros,  $A_p=2,2\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=282\text{N}$ ,  $F_y=276\text{N}$  e  $F_z=568\text{N}$ .

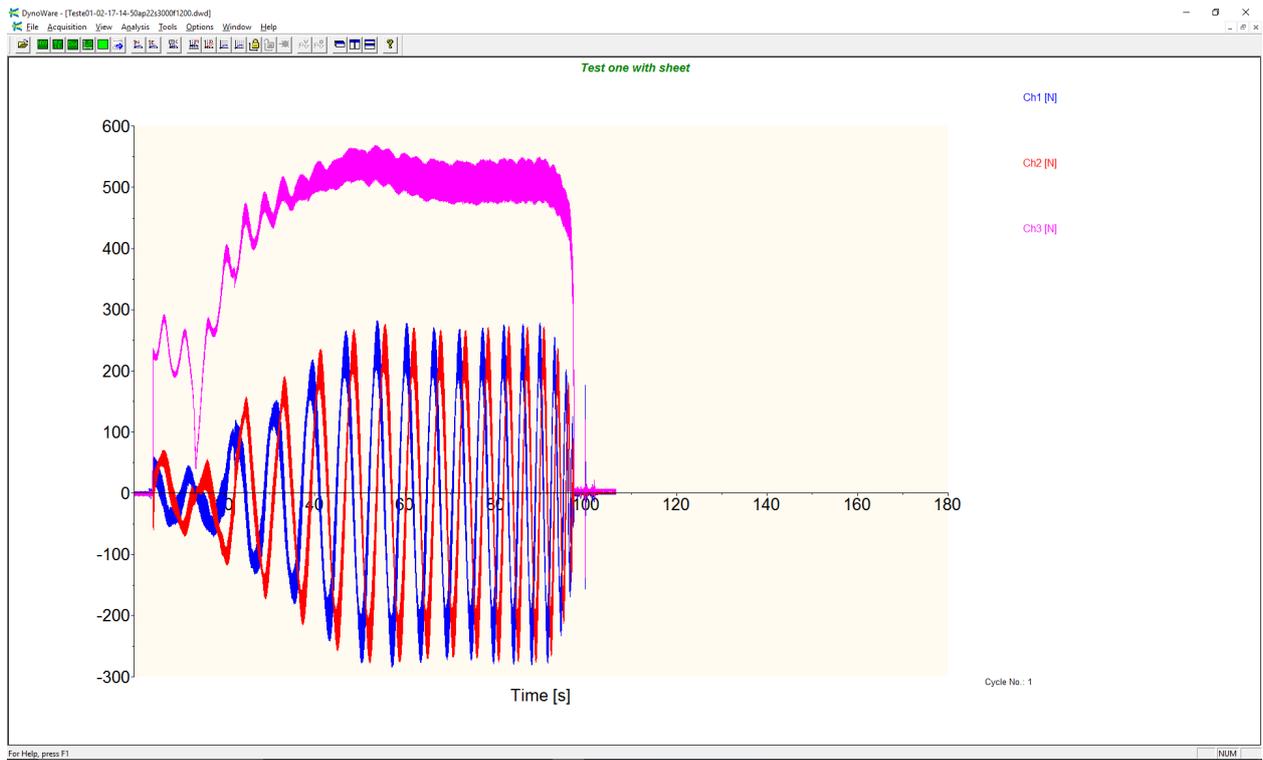


Figura B.14: Teste 30 executado com os parâmetros,  $A_p=2,2\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=1200\text{mm/min}$

A figura B.15 representa o teste 31 executado com os parâmetros,  $A_p=2,2\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=300\text{N}$ ,  $F_y=294\text{N}$  e  $F_z=609\text{N}$ .

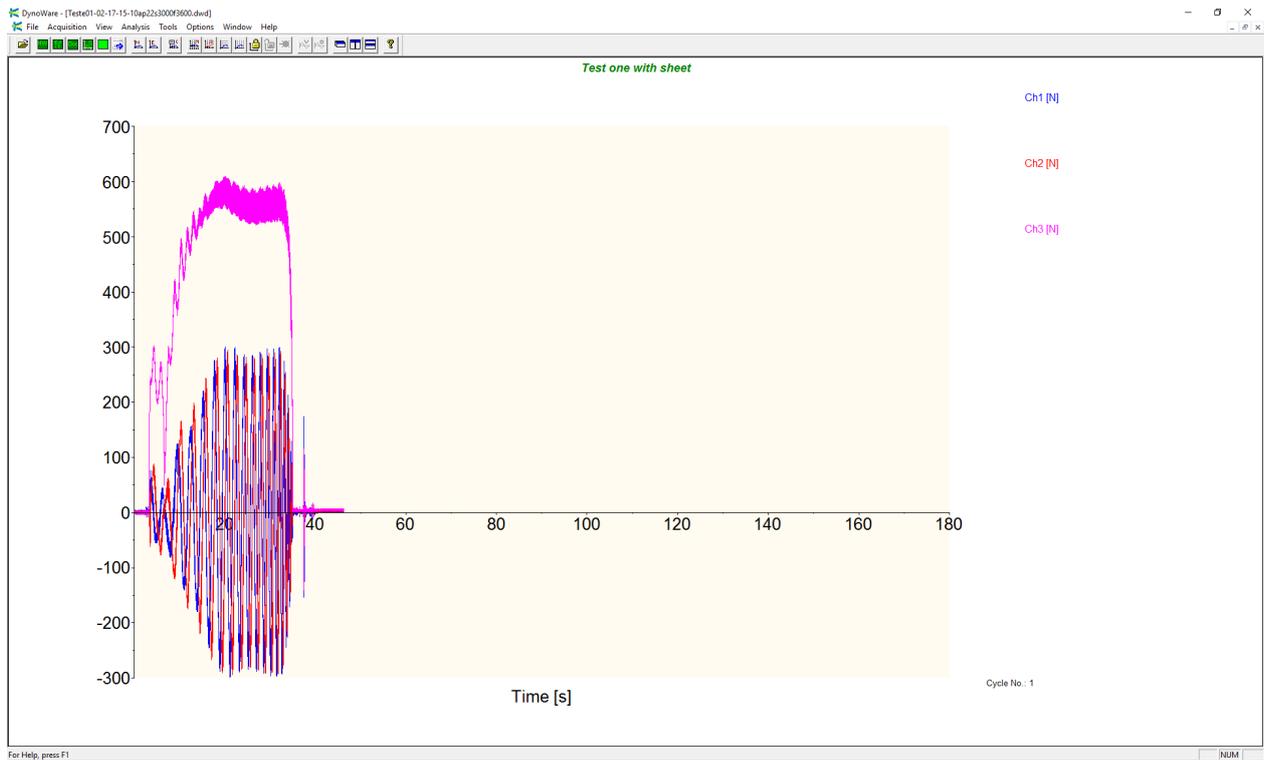


Figura B.15: Teste 31 executado com os parâmetros,  $A_p=2,2\text{mm}$ ,  $S=3000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

A figura B.16 representa o teste 32 executado com os parâmetros,  $A_p=2,2\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$ , neste processamento as forças máximas medidas foram:  $F_x=304\text{N}$ ,  $F_y=270\text{N}$  e  $F_z=584\text{N}$ .

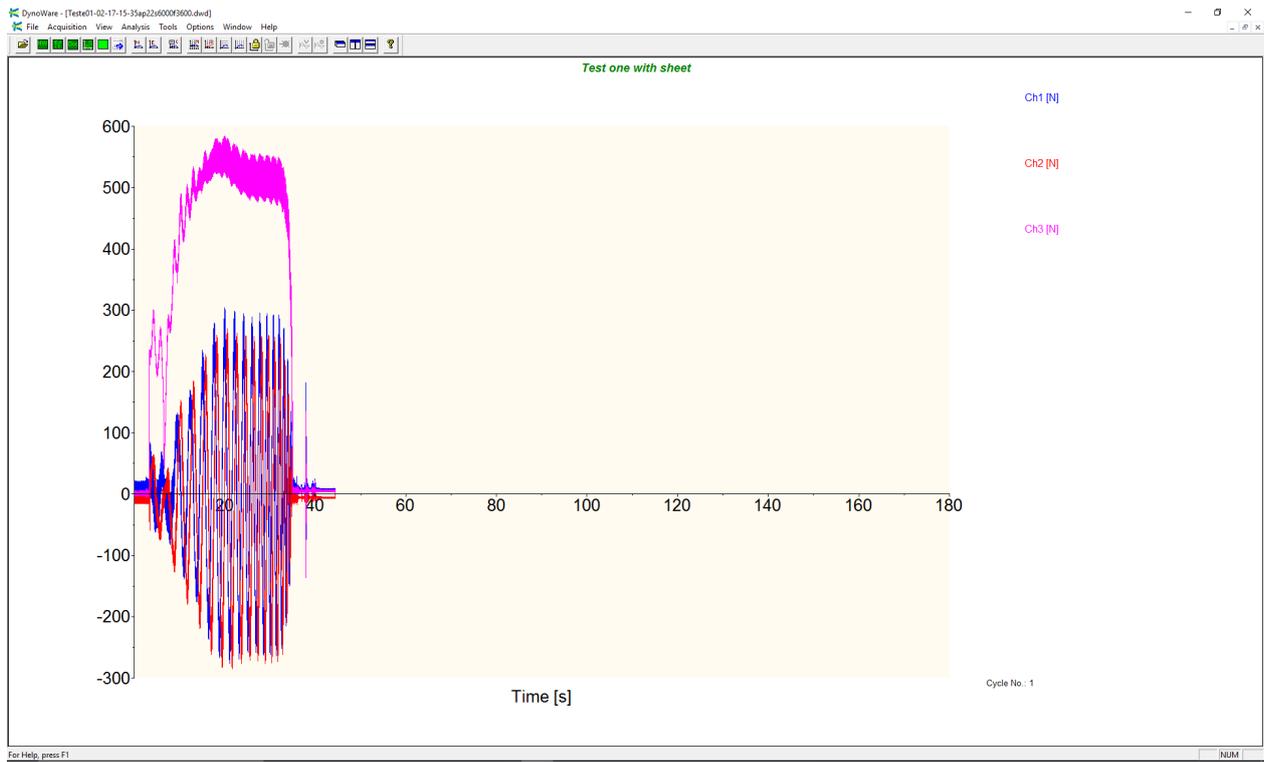


Figura B.16: Teste 32 executado com os parâmetros,  $A_p=2,2\text{mm}$ ,  $S=6000\text{RPM}$  e  $f=3600\text{mm/min}$

## **C. DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE FORÇAS PARA O PIEZOELÉTRICO**

Neste apêndice se apresenta o detalhamento do dispositivo de fixação para análise de força, onde este dispositivo juntamente com o dispositivo de medição de forças piezoelétrico. Todas as peças e conjuntos são detalhadas para facilitar a fabricação das mesmas.

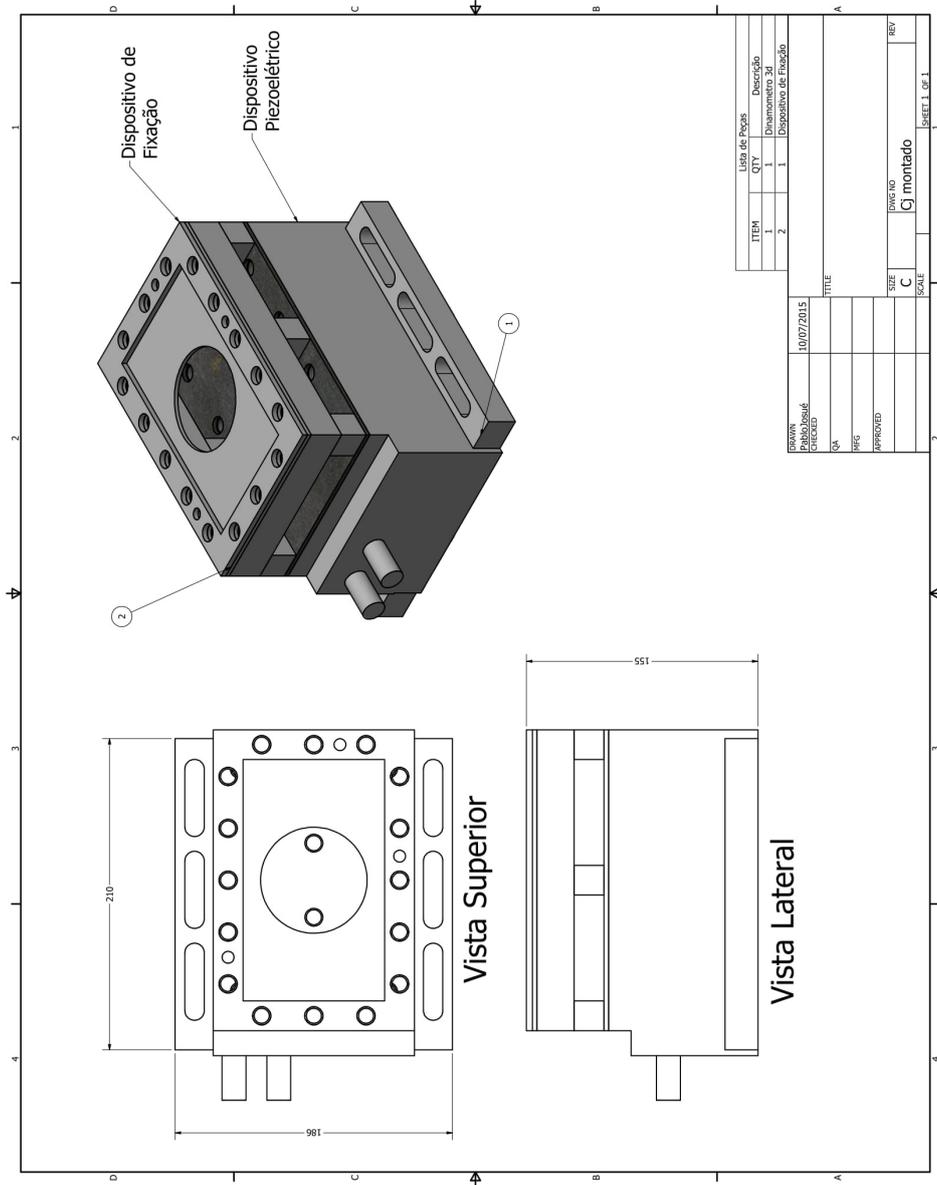


Figura C.1: Dispositivo de medição de força e piezoelétrico.

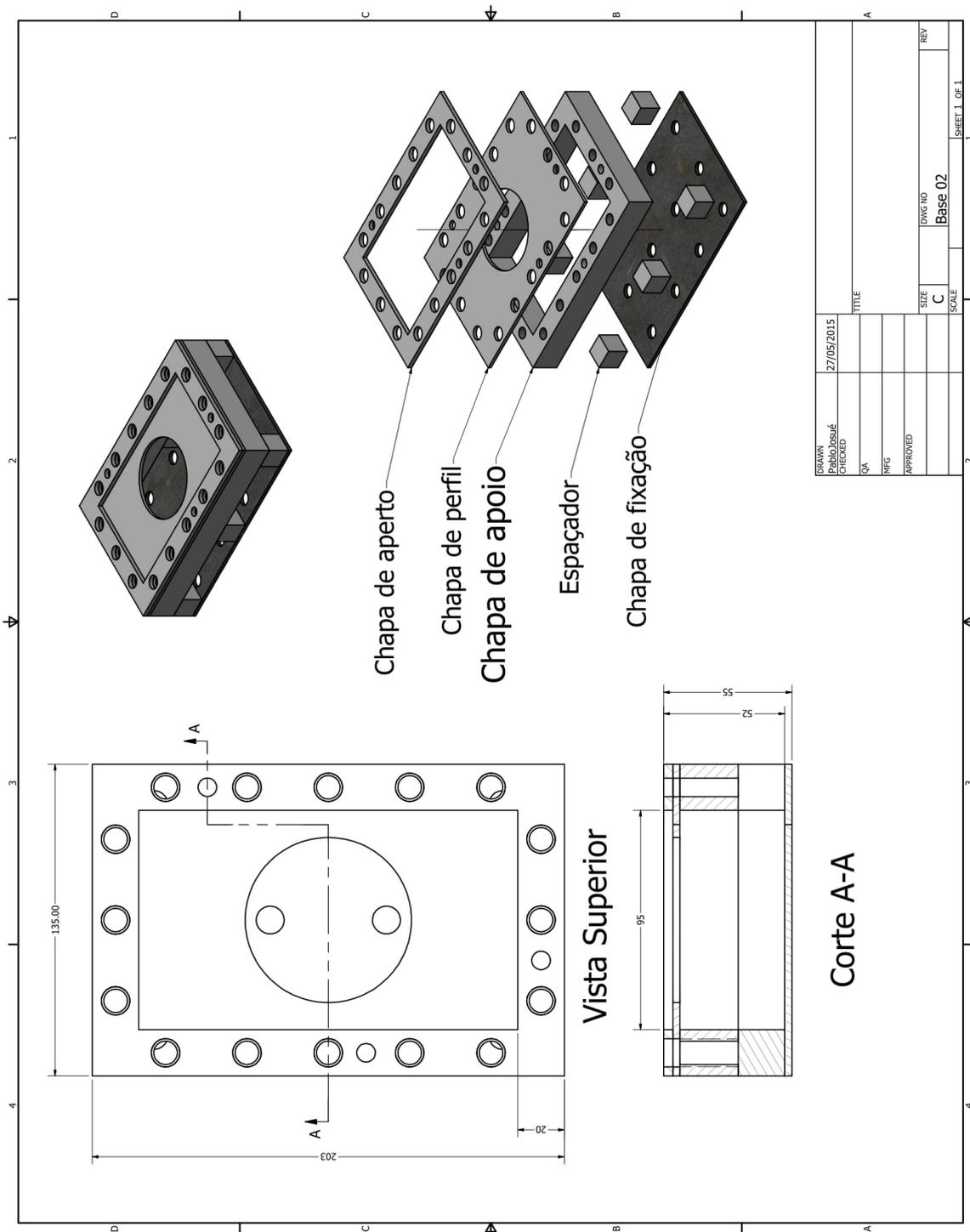


Figura C.2: Dispositivo de medição de força

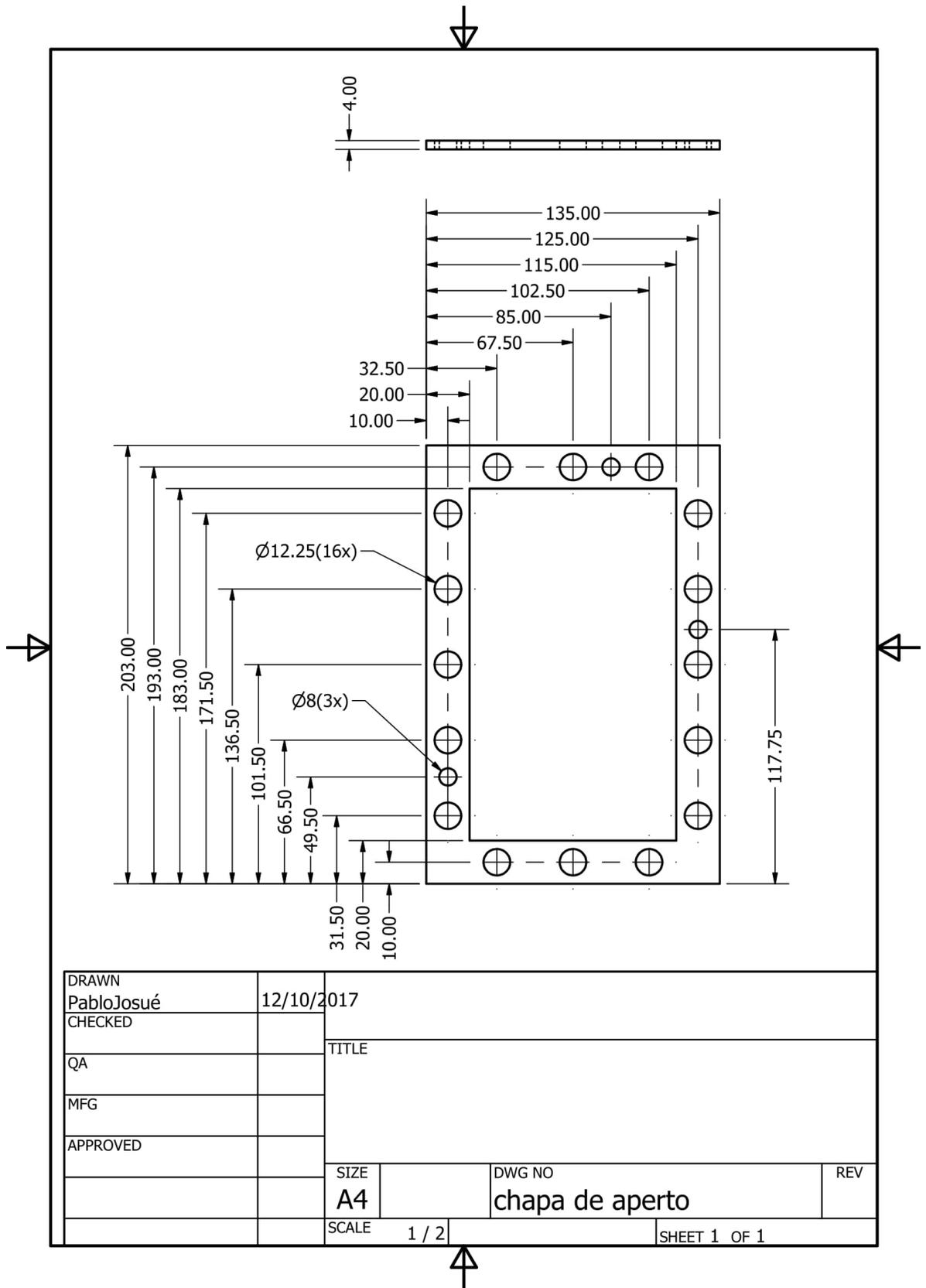


Figura C.3: Chapa de aperto

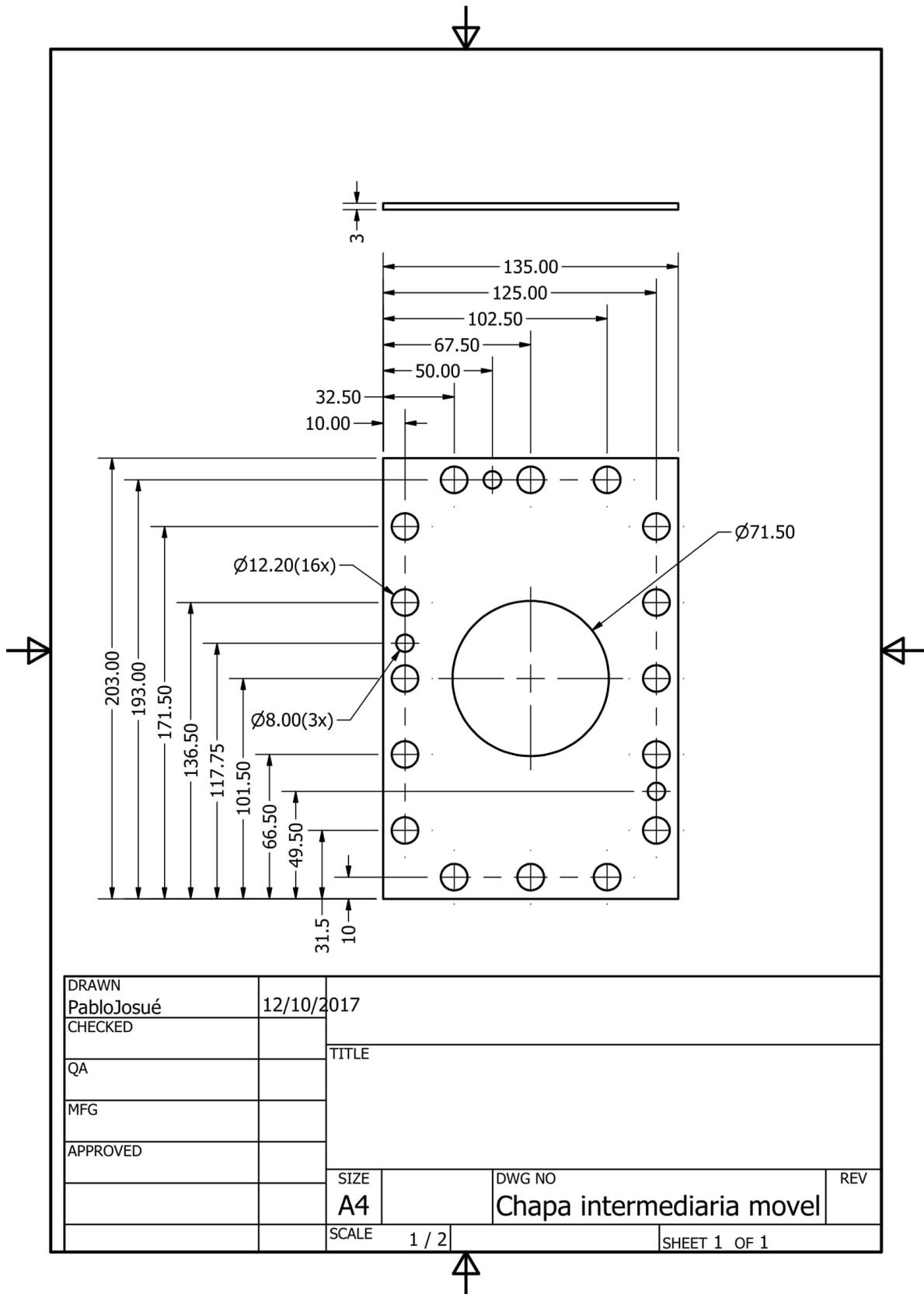


Figura C.4: Chapa de perfil

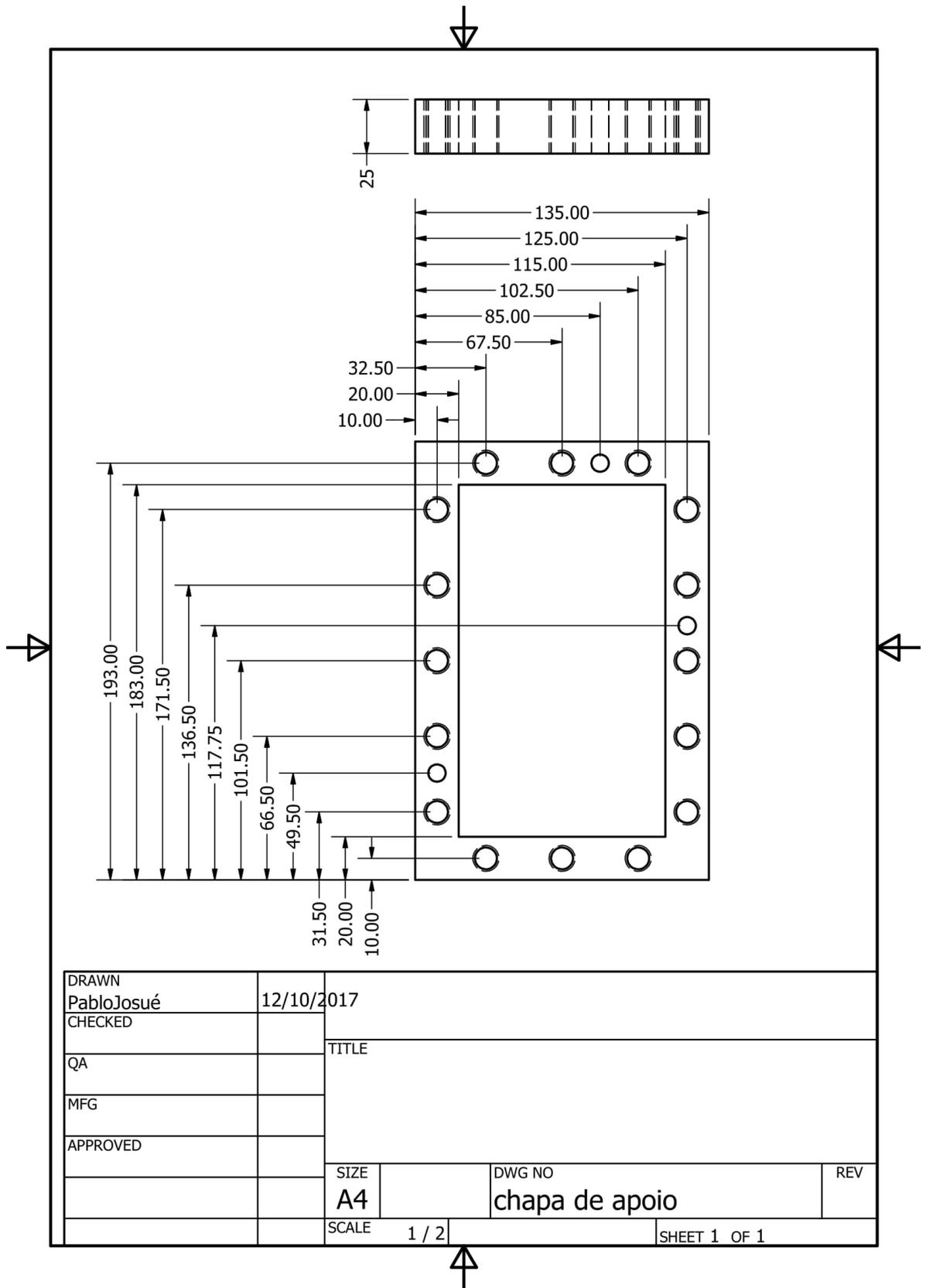


Figura C.5: Chapa de apoio

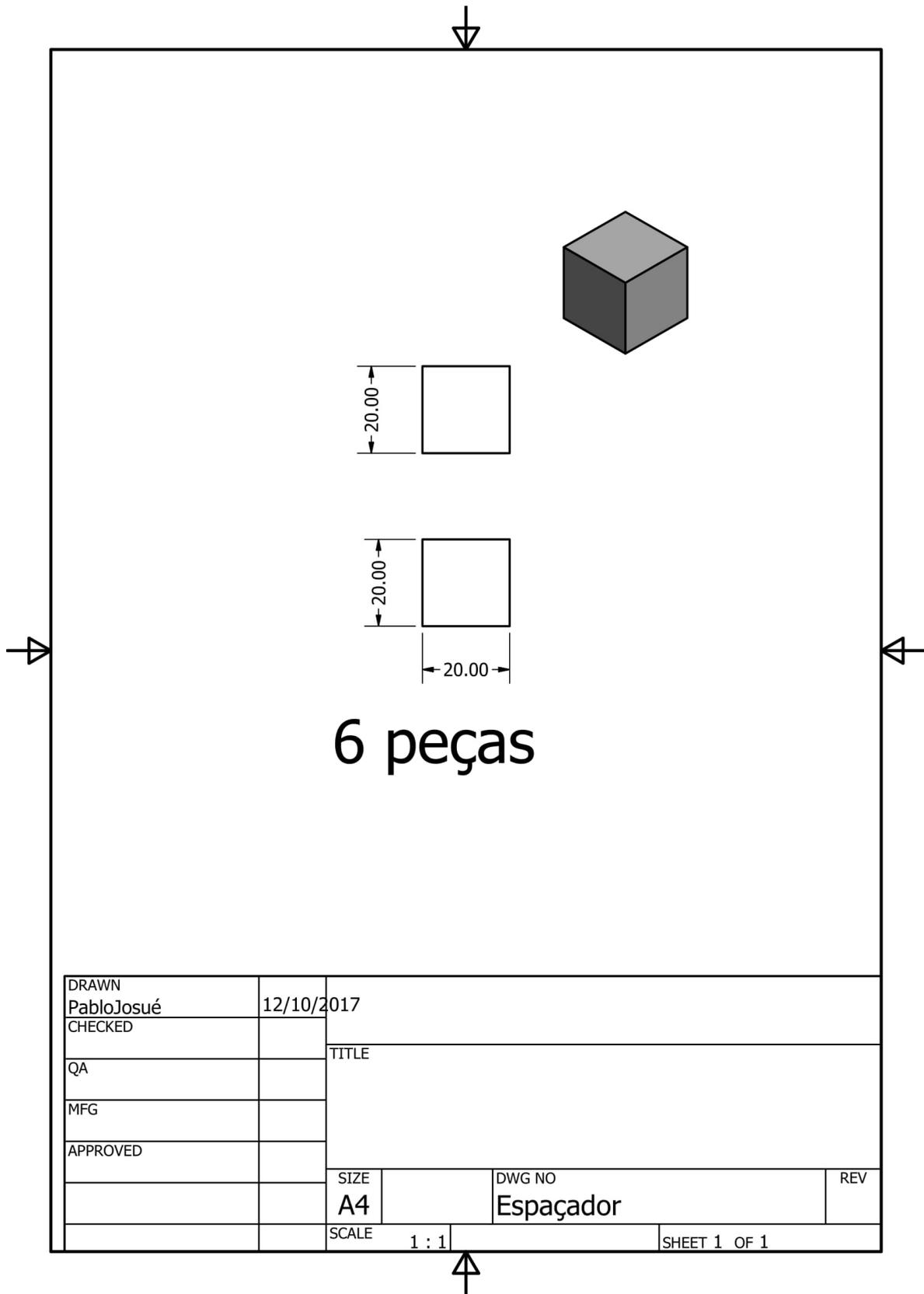


Figura C.6: Espaçador

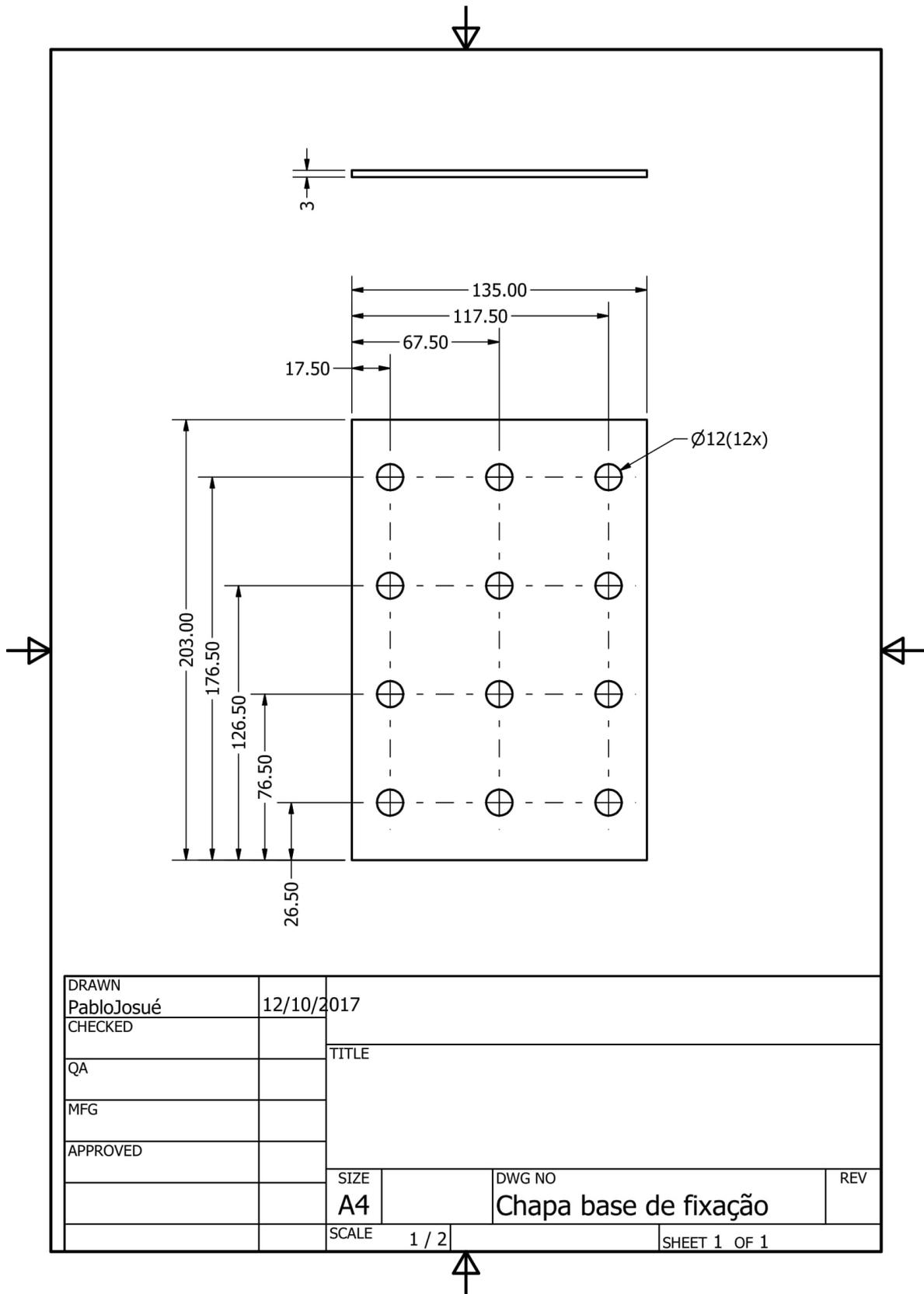


Figura C.7: Chapa de fixação

## **D. PROJETO DISPOSITIVO PARA TESTE COM AQUECIMENTO E PARA OS ENSAIO DE DESGASTE DE FERRAMENTA**

Neste apêndice se apresenta o projeto detalhado do dispositivo de fixação juntamente com o sistema de aquecimento, onde todas as peças são detalhadas em todos os detalhes necessário para a fabricação, este dispositivo foi utilizado tanto para ensaios de conformação com aquecimento e para ensaios de desgaste de ferramenta.





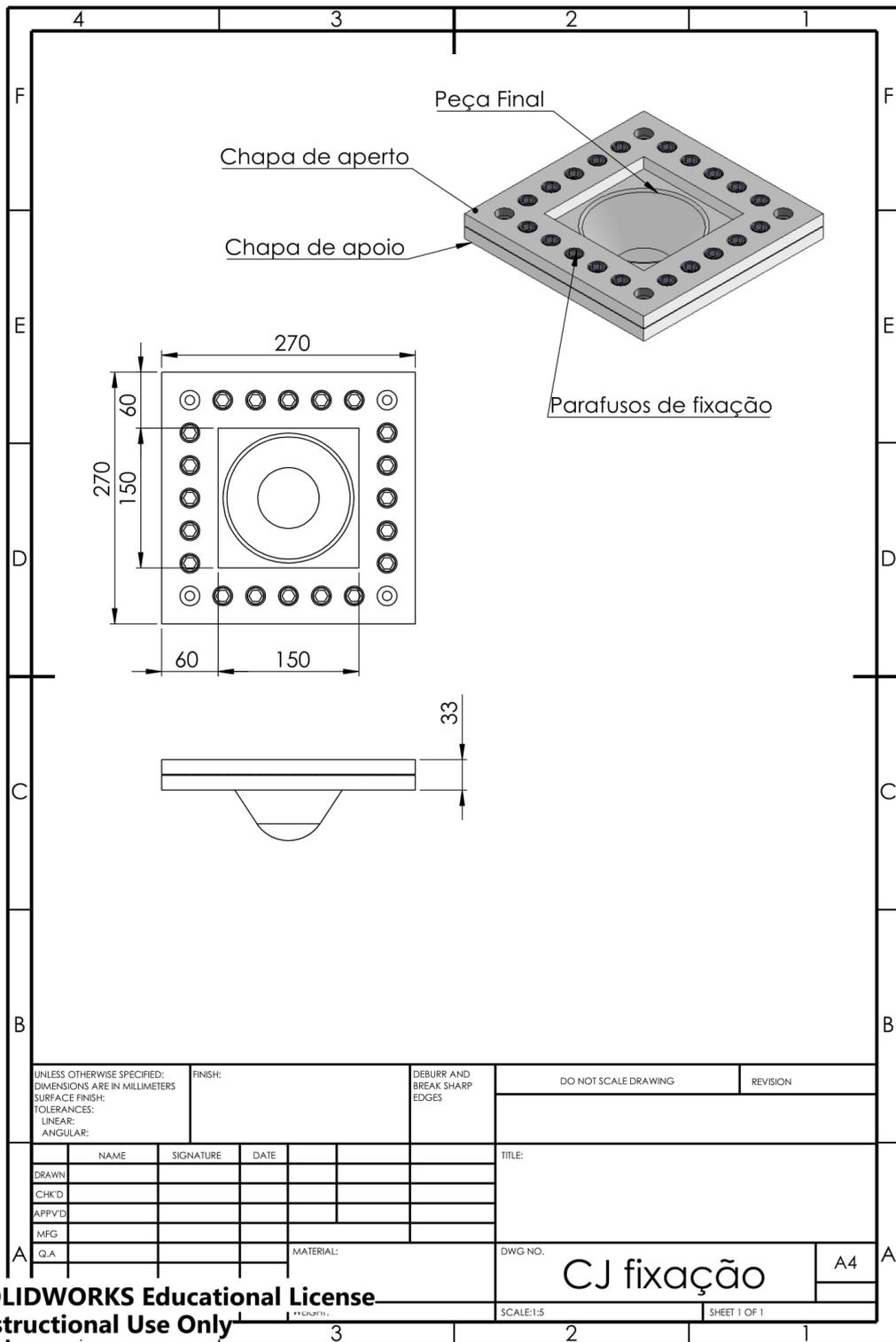


Figura D.3: Projeto do sistema de fixaçã

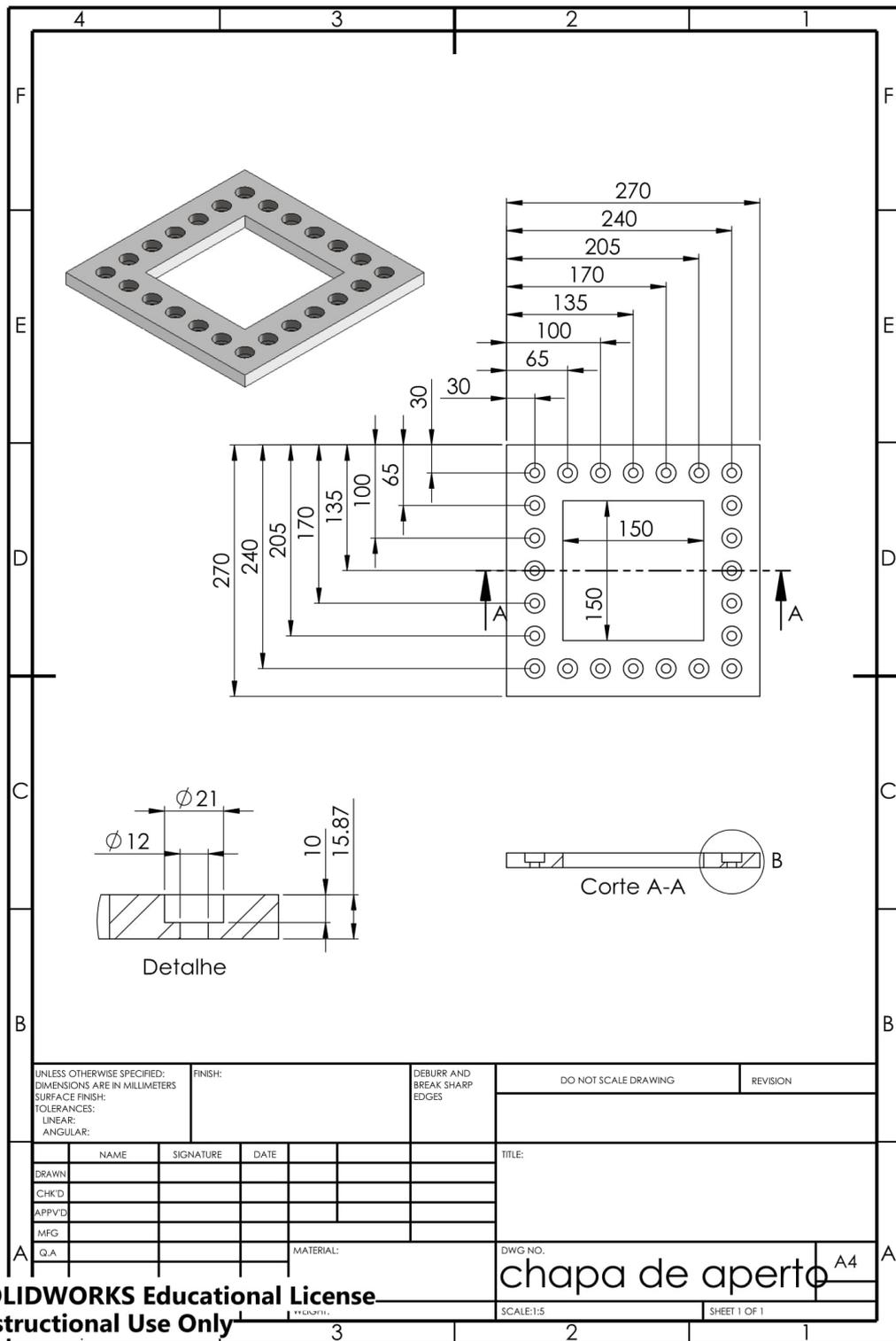


Figura D.4: Chapa de aperte do dispositivo de aquecimento

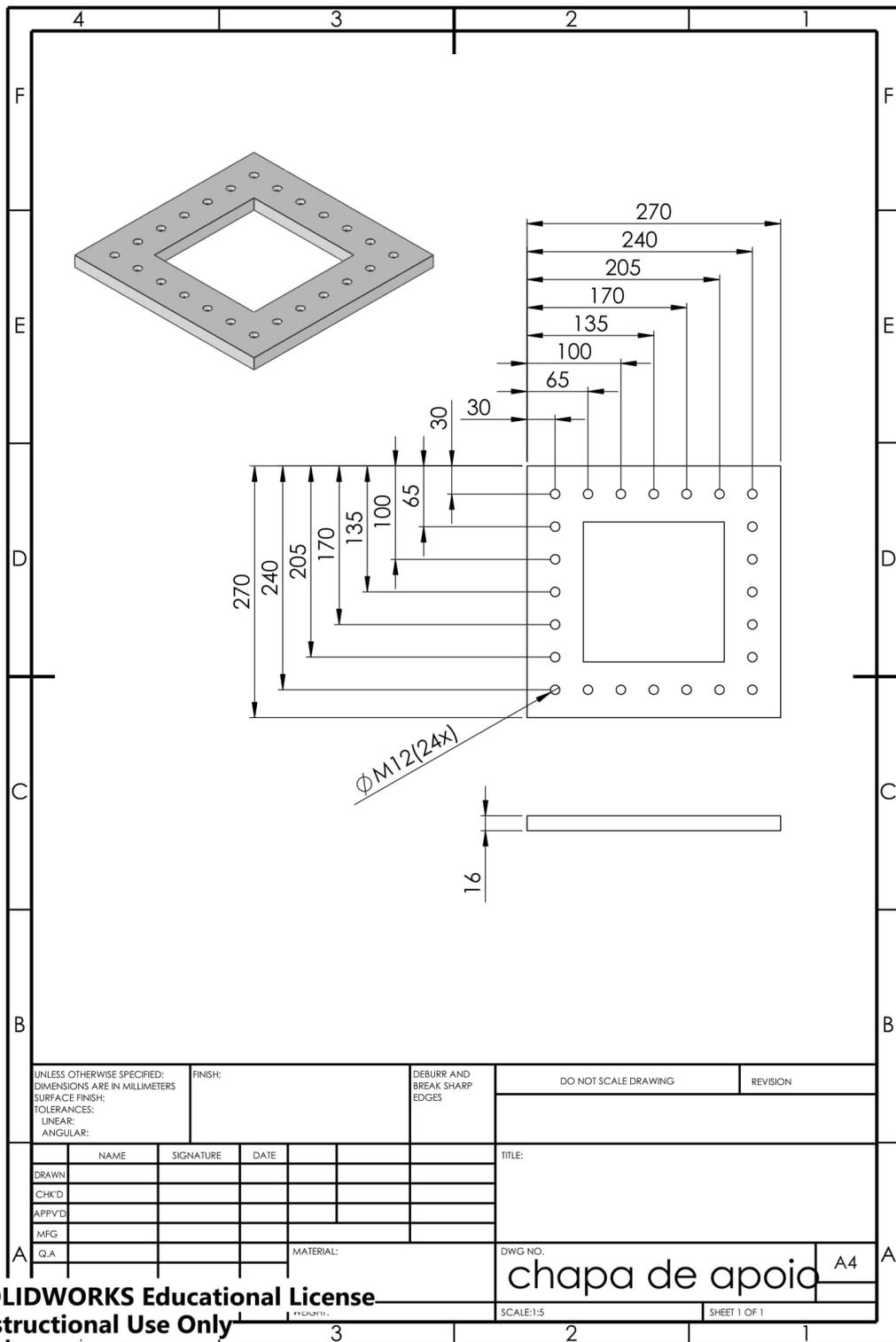


Figura D.5: Chapa de apoio do dispositivo de aquecimento

## E. PUBLICAÇÕES DURANTE O DOUTORADO

Neste apêndice se apresenta a Tabela E.1 e a Tabela E.2 que mostra as publicações em congressos intencionais e nacionais respectivamente.

Tabela E.1: Congressos internacionais

Publicações congresso internacional		
Congresso	Ano	Título
COBEM	2013	INCREMENTAL SHEET FORMING PARAMETERS AND TOOL
AIM	2015	INCREMENTAL SHEET FORMING OF ALUMINUM WITH WARM
COBEM	2015	A COMPARATIVE STUDY ON PROCESS INCREMENTAL SHEET FORMING AND PLUS FRICTIONAL STIR
XXI CNIM	2016	INCREMENTAL SHEET FORMING WITH TOOL STEEL SAE 1045 IN GALVANIZAD STEEL
COBEM	2017	INCREMENTAL SHEET FORMING OF ALUMINUM ALLOY 1050 AND 6063 FOR COMPLEX PIECE

Tabela E.2: Congressos internacionais

Publicações congresso nacional		
Congresso	Ano	Título
COBEF	2015	ESTADO DA ARTE E TESTES PRELIMINARES DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES A QUENTE
SENAFOR	2015	ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES (SPIF) COM AQUECIMENTO vs SPIF COM AQUECIMENTO E ALTA ROTAÇÃO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA
CONEM	2016	ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM FERRAMENTA DE AÇO SAE 1045
COBEF	2017	INCREMENTAL SHEET FORMING OF ALUMINUM WITH HEAT FOR COMPLEX PIECES

A Tabela E.3 apresenta os artigos que foram submetido a uma revista que ainda não foram aceitos.

Tabela E.3: Artigos submetidos a revista

Artigos Submetidos para Revista		
Revista	mês/ano	Título
Journal of Manufacturing Processes	9/2017	Analysis of Tool Wear in Single Point Incremental Sheet Forming

## F. DETALHES DA PROGRAMAÇÃO CAM

Neste apêndice se apresenta as telas de programação do CAM para a geração do código G, tanto para a peça de geometria complexa e como para simples se utiliza a mesma codificação de programa para geração do código G mudando apenas o parâmetros processamento.

A figura F.1 apresenta uma visão geral do software ESPRITCAM, ainda no canto esquerdo na figura podemos observar a árvore de programação onde foi configurado o tipo de ferramenta utilizada para a geração do caminho da ferramenta que é "molde Z Level", estas ferramenta vai realizar uma estratégia de acabamento na peça.

A linhas vermelhas mostradas na figura F.1 apresentam o caminho percorrido pela ferramenta de conformação, esta figura representa a conformação da peça de geometria complexa.

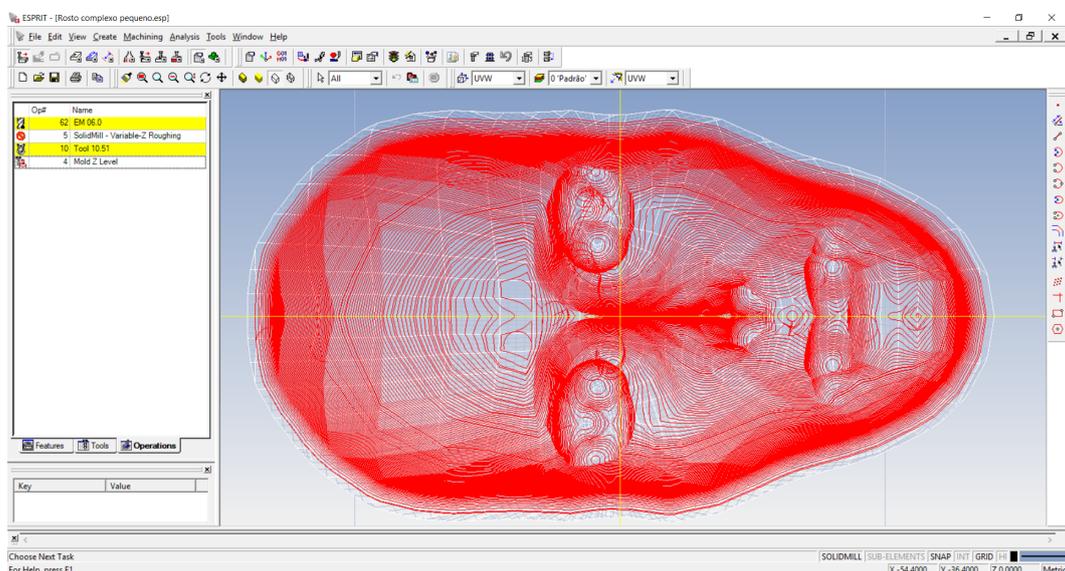


Figura F.1: Visão geral do CAM peça complexa

Figura F.2 representa o caminho da ferramenta, nas linhas vermelhas, para a conformação da peça de geometria simples.

Ao entrar na configuração da ferramenta "molde Z Level" aparece a caixa de dialogo apresentada na figura F.3, onde vai ser configurado os parâmetros de rotação e avanço, "cut Speed RPM" e Feedrate PM respectivamente.

Continuando a configuração da ferramenta "molde Z Level" agora modificando para a aba "ToolPath", conforme figura F.4, nesta aba vai ser configurada vários parâmetros importantes do processo:

- Tolerance - onde vai se informar a tolerância do caminho da ferramenta.

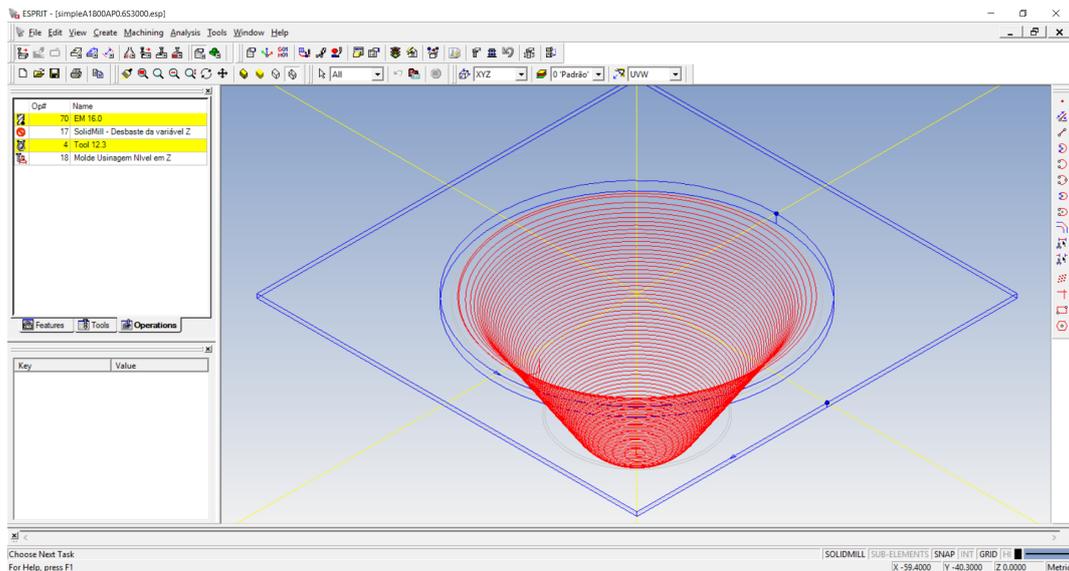


Figura F.2: Visão geral do CAM peça simple

- Stock Allowance Walls - como o processo só tem uma passe, nesta ferramenta se configura que não se deseja ter sobre metal nas paredes da peça.
- Stock Allowance Floors - como o processo só tem uma passe, nesta ferramenta se configura que não se deseja ter sobre metal no fundo da peça.
- Depth Calculation - Este ponto é de suma importância para o processo pois ele recalcula o valor de passo em Z,  $A_p$ , de acordo com a necessidade da peça em pequenos detalhes.
- Incremental Depth - Valor de  $A_p$  geral no processo
- cutting Strategy - Este item corresponde ao tipo e sentido de movimentação da ferramenta.
- Minimum Slope Angle - Este é o valor mínimo do ângulo de hélice atribuído para ao caminho da ferramenta
- Spiral Move - Esta ferramenta aciona o perfil do caminho de ferramenta em hélice, fazendo uma movimentação simultânea nos 3 eixos XYZ.

Na aba terceira aba "Links" é configurado os limites em Z, "Enable Z Limits, que fica configurado em "No" porque, os limites da peça é dado pelo modelo de CAD que foi inserido no CAM. Outro parâmetro muito importante é o limite das laterais que é definido com o comando "Inside" na caixa texto "Position on Boundary Profile". este comando limita a trajetória da ferramenta apenas dentro da cavidade delimitada pelo modelo CAD. Esta caixa de diálogo pode ser vista na figura F.5.

Na aba terceira aba "Links" é configurado os limites em Z, "Enable Z Limits, que fica configurado em "No" porque, os limites da peça é dado pelo modelo de CAD que foi inserido no

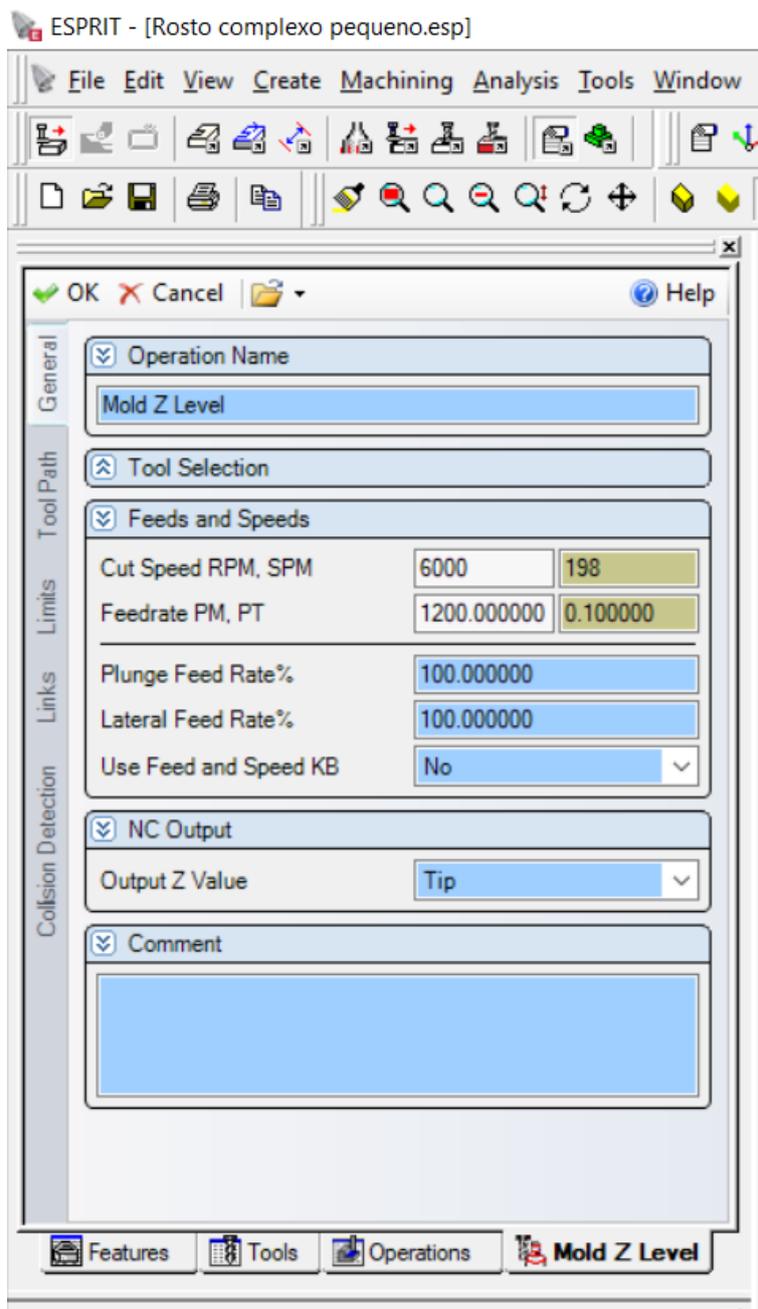


Figura F.3: Configuração aba "General"

CAM. Outro parâmetro muito importante é o limite das laterais que é definido com o comando "Inside" na caixa texto "Position on Boundary Profile". este comando limita a trajetória da ferramenta apenas dentro da cavidade delimita pelo modelo CAD. Esta caixa de diálogo pode ser vista na figura F.5.

Estas são as principais configurações que devem ser alteradas pois as outras não mencionadas ficam sempre no modo padrão do Software.

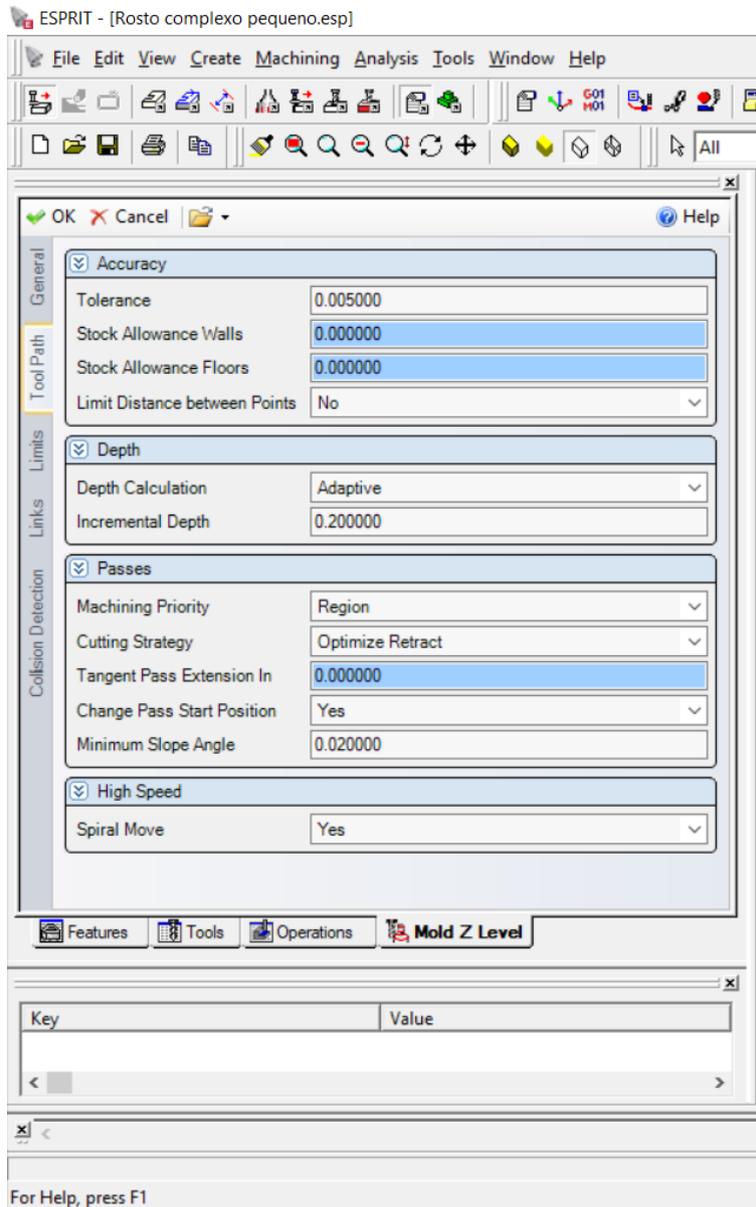


Figura F.4: Caminho da ferramenta

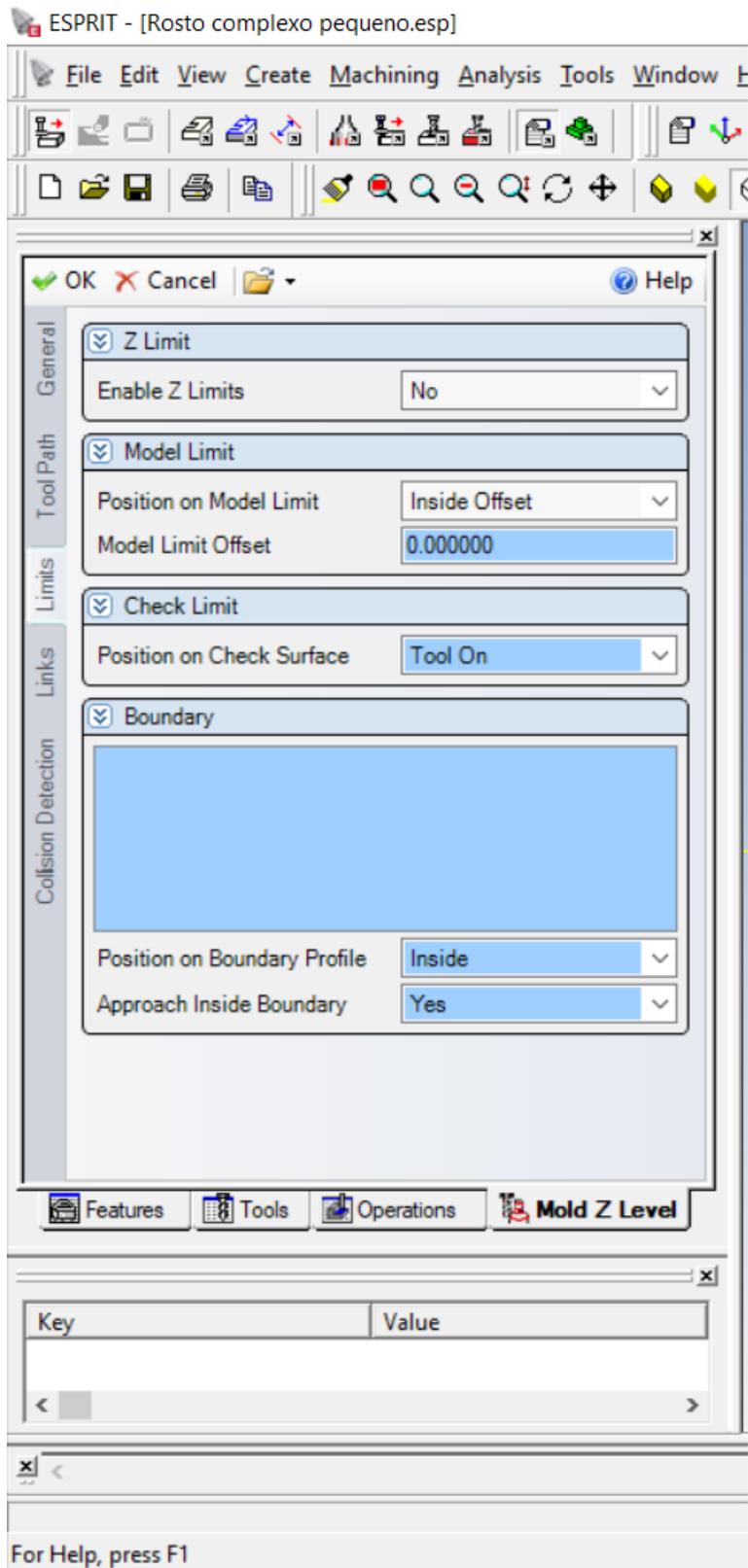


Figura F.5: Limites do caminho da ferramenta

## G. FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO COM DESGASTE

Neste apêndice se apresenta a análises das ferramentas de conformação, que foram analisadas no projetor de perfil e em seguidas foram enviadas para um arquivo de CAD para verificação e confirmação de resultados.

A figura G.1 representa o teste 01 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 26h06min e com um desgaste de ferramenta de 0,110mm.

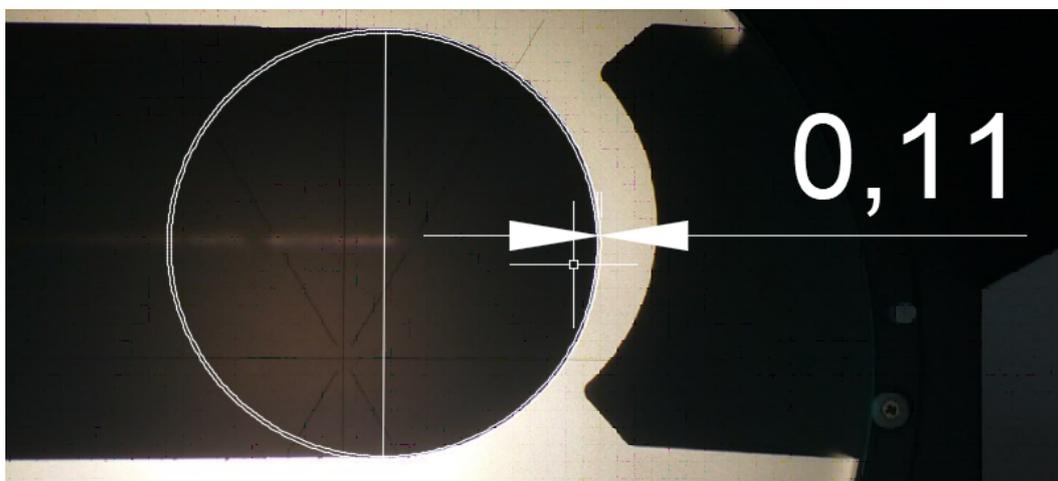


Figura G.1: Ferramenta utilizada teste 01, análises de desgaste

A figura G.2 representa o teste 02 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 26h06min e com um desgaste de ferramenta de 0,101mm.

A figura G.3 representa o teste 03 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 26h06min e com um desgaste de ferramenta de 0,168mm.

A figura G.4 representa o teste 04 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 12h13min e com um desgaste de ferramenta de 0,220mm.

A figura G.6 representa o teste 05 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 12h13min e com um desgaste de ferramenta de 0,159mm.

A figura G.6 representa o teste 06 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 01h09min e com um desgaste de ferramenta de 0,223mm.

A figura G.7 representa o teste 07 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 06h06min e com um desgaste de ferramenta de 0,133mm.

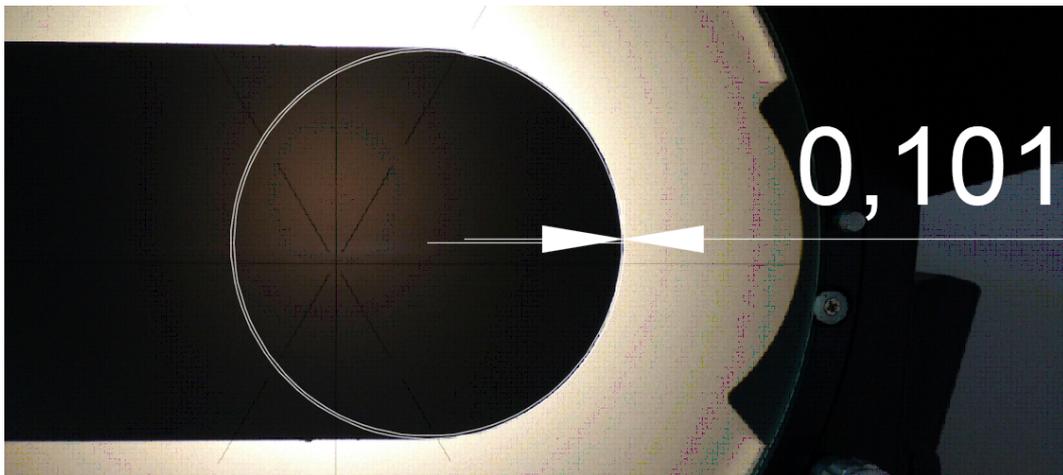


Figura G.2: Ferramenta utilizada teste 02, análises de desgaste

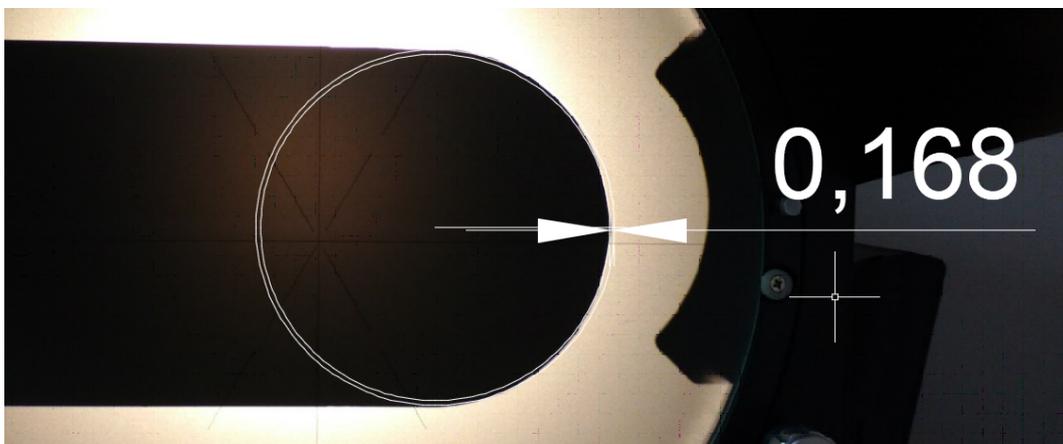


Figura G.3: Ferramenta utilizada teste 03, análises de desgaste

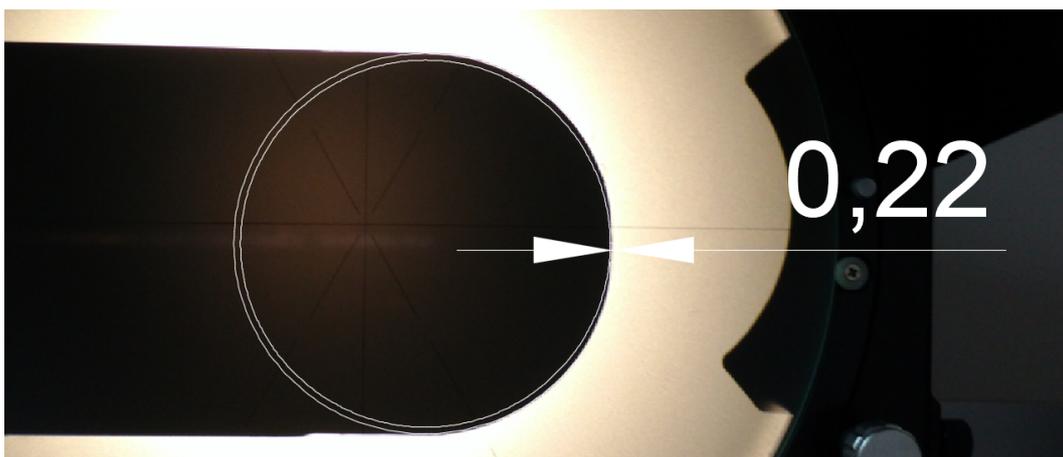


Figura G.4: Ferramenta utilizada teste 04, análises de desgaste

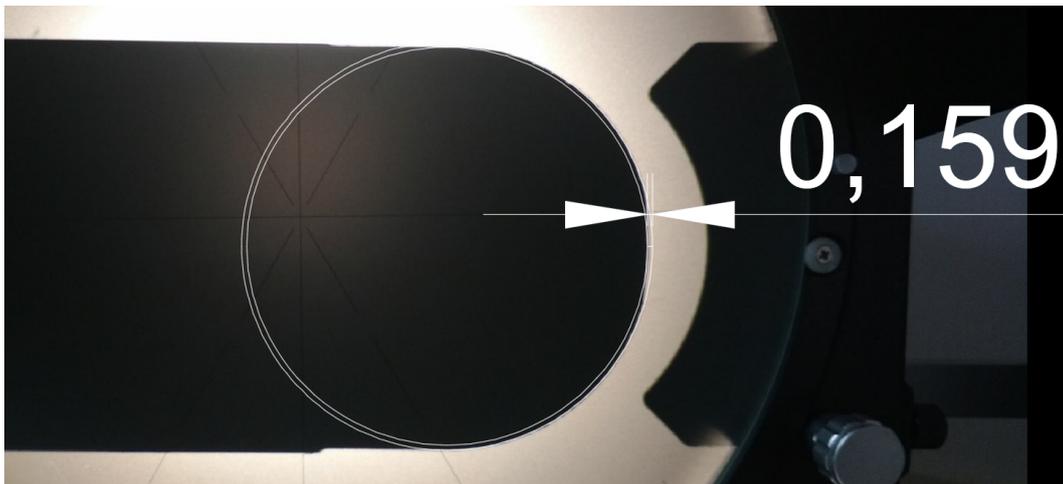


Figura G.5: Ferramenta utilizada teste 05, análises de desgaste

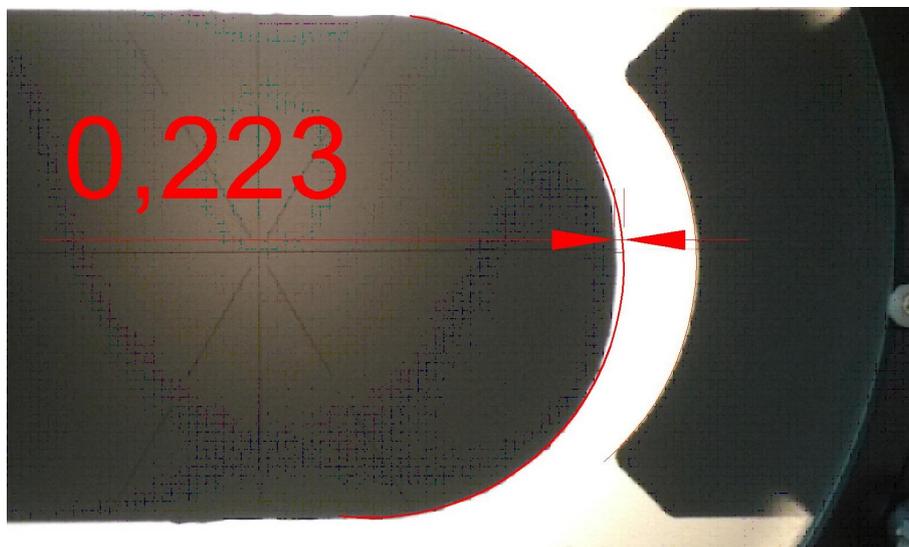


Figura G.6: Ferramenta utilizada teste 06, análises de desgaste

A figura G.8 representa o teste 08 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 04h16min e com um desgaste de ferramenta de 0,146mm.

A figura G.9 representa o teste 09 com os parâmetros de  $A_p=0,2$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 03h03min e com um desgaste de ferramenta de 0,204mm.

A figura G.10 representa o teste 10 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 12h13min e com um desgaste de ferramenta de 0,06mm.

A figura G.11 representa o teste 11 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 12h13min e com um desgaste de ferramenta de 0,03mm.

A figura G.12 representa o teste 12 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 01h13min e com um desgaste de ferramenta de 0,101mm.

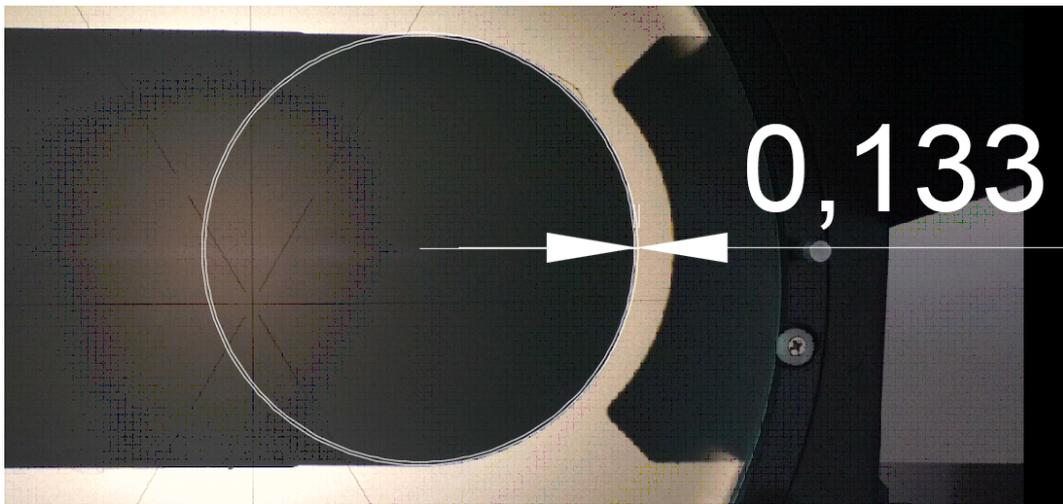


Figura G.7: Ferramenta utilizada teste 07, análises de desgaste

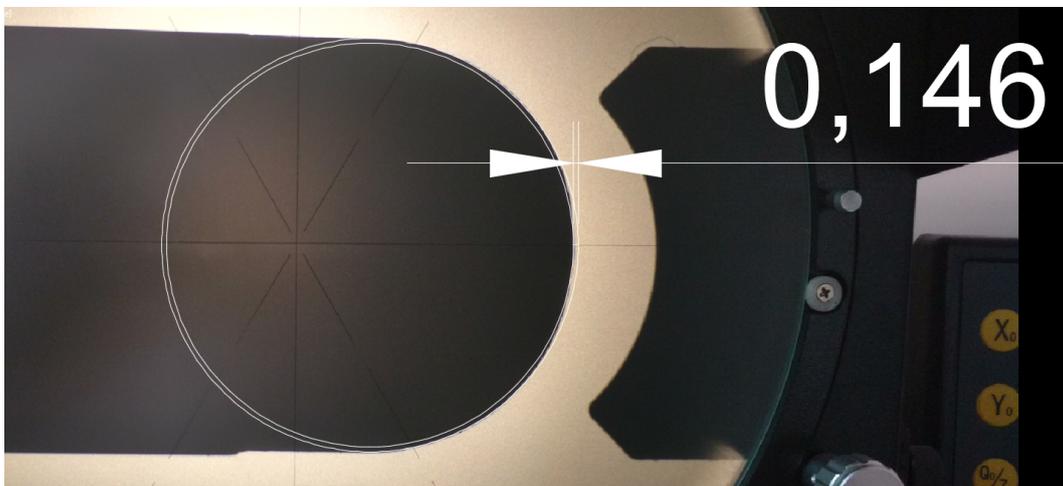


Figura G.8: Ferramenta utilizada teste 08, análises de desgaste

A figura G.13 representa o teste 13 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 06h06min e com um desgaste de ferramenta de 0,053mm.

A figura G.14 representa o teste 14 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 04h16min e com um desgaste de ferramenta de 0,078mm.

A figura G.15 representa o teste 15 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 00h36min e com um desgaste de ferramenta de 0,105mm.

A figura G.16 representa o teste 16 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 03h03min e com um desgaste de ferramenta de 0,173mm.

A figura G.17 representa o teste 17 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 01h50min e com um desgaste de ferramenta de 0,131mm.

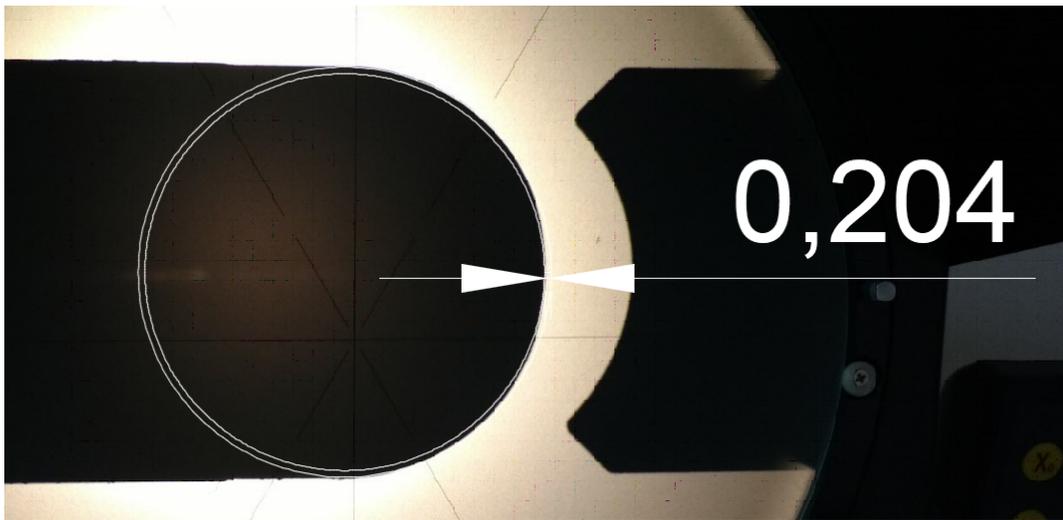


Figura G.9: Ferramenta utilizada teste 09, análises de desgaste

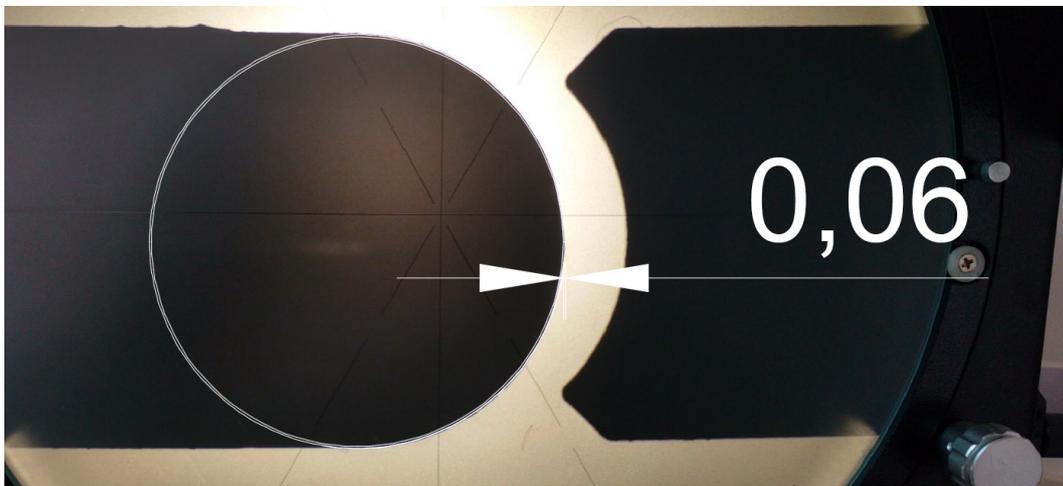


Figura G.10: Ferramenta utilizada teste 10, análises de desgaste

A figura G.18 representa o teste 18 com os parâmetros de  $A_p=0,4$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 00h18min e com um desgaste de ferramenta de 0,162mm.

A figura G.19 representa o teste 19 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 06h31min e com um desgaste de ferramenta de 0,141mm.

A figura G.20 representa o teste 20 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 08h09min e com um desgaste de ferramenta de 0,082mm.

A figura G.21 representa o teste 21 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=600$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 00h48min e com um desgaste de ferramenta de 0,106mm.

A figura G.22 representa o teste 22 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 04h04min e com um desgaste de ferramenta de 0,068mm.

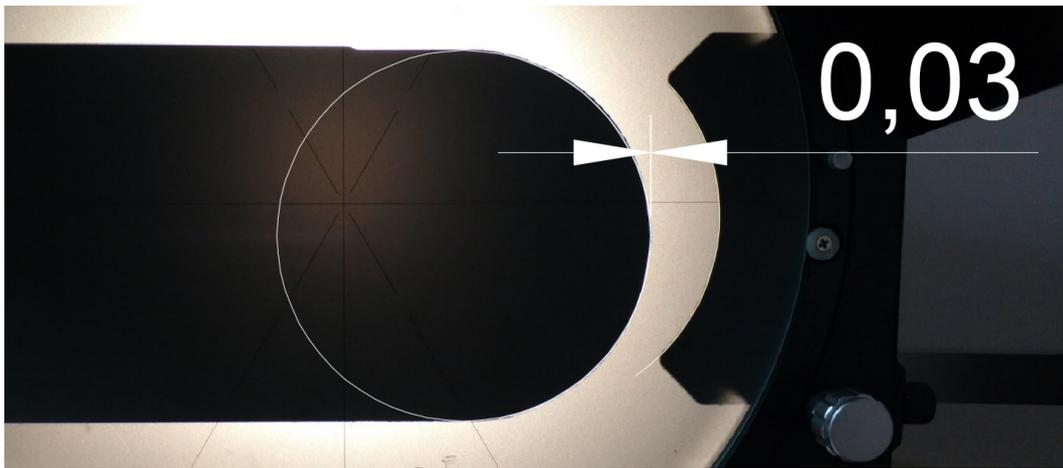


Figura G.11: Ferramenta utilizada teste 11, análises de desgaste

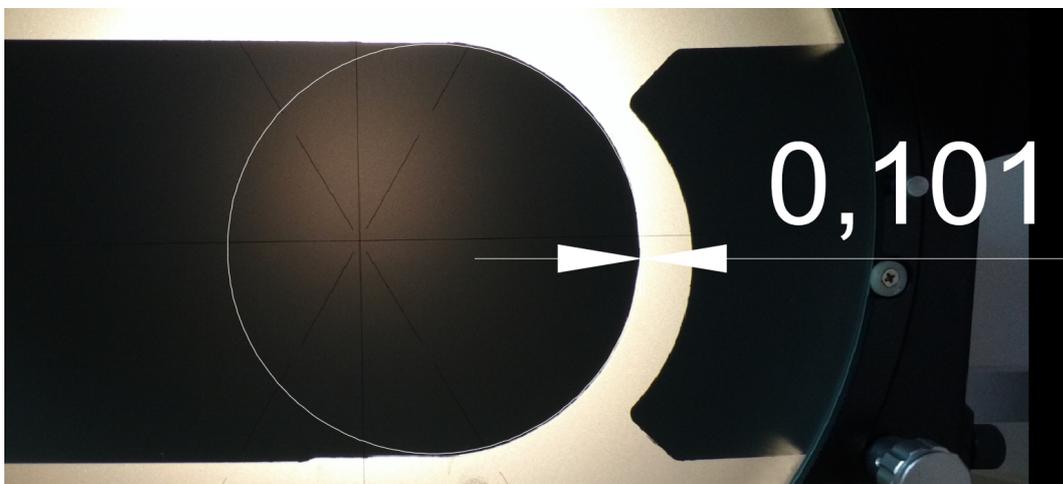


Figura G.12: Ferramenta utilizada teste 12, análises de desgaste

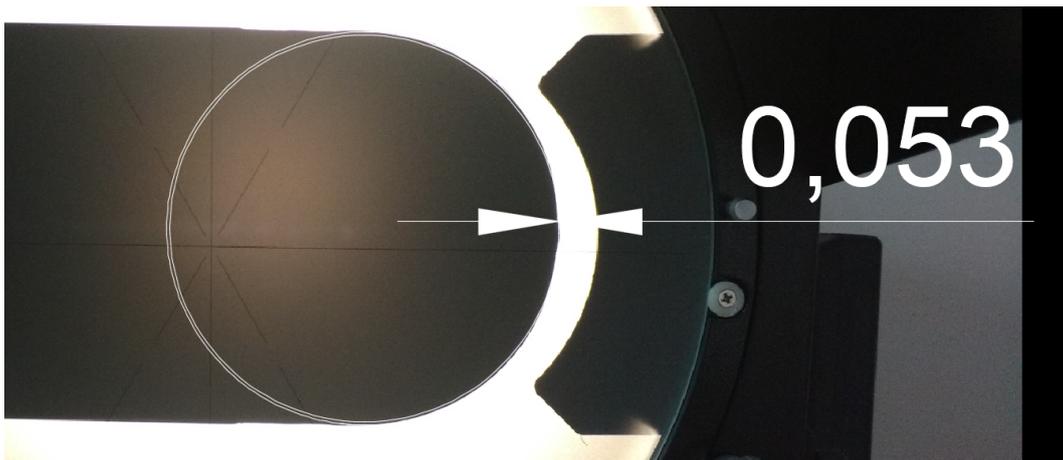


Figura G.13: Ferramenta utilizada teste 13, análises de desgaste

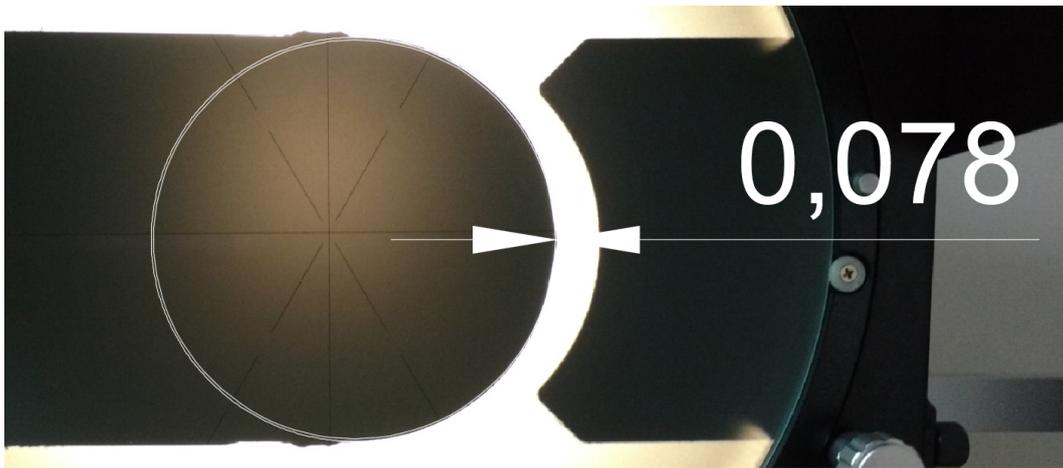


Figura G.14: Ferramenta utilizada teste 14, análises de desgaste

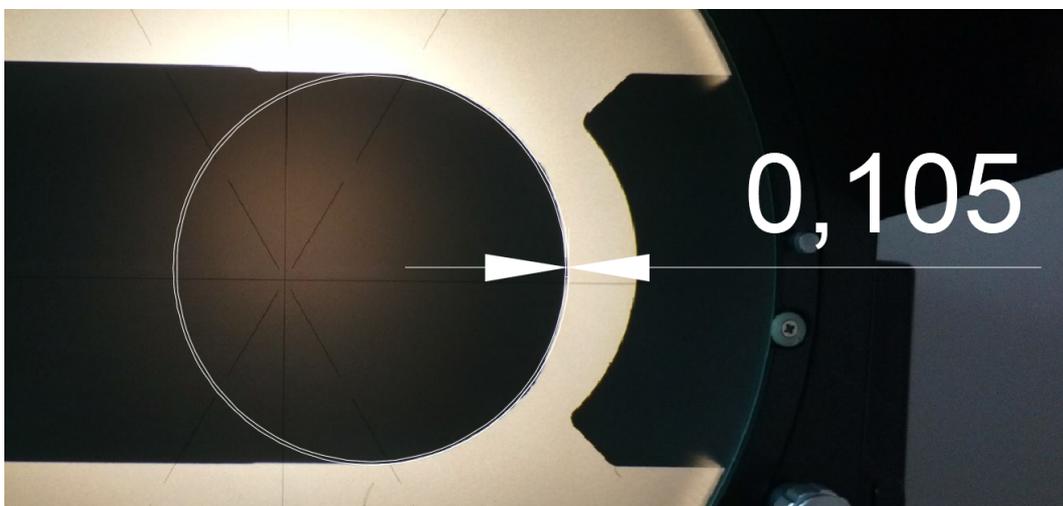


Figura G.15: Ferramenta utilizada teste 15, análises de desgaste

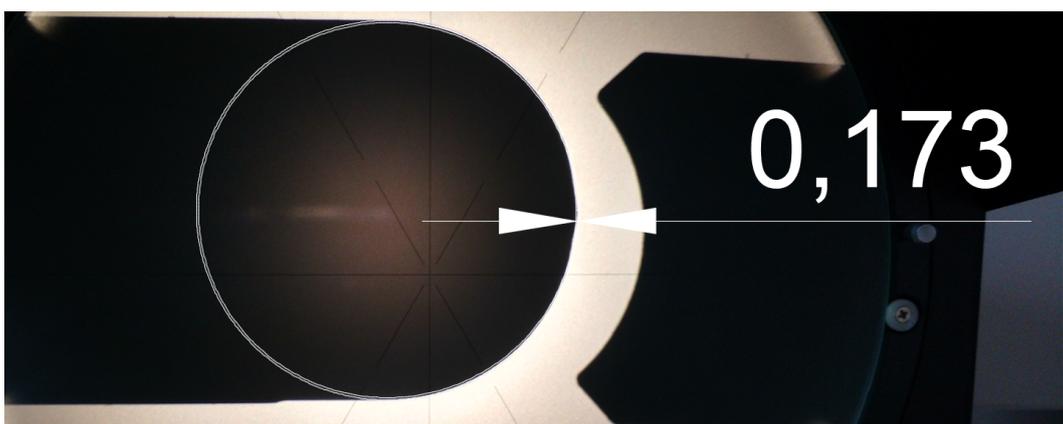


Figura G.16: Ferramenta utilizada teste 16, análises de desgaste

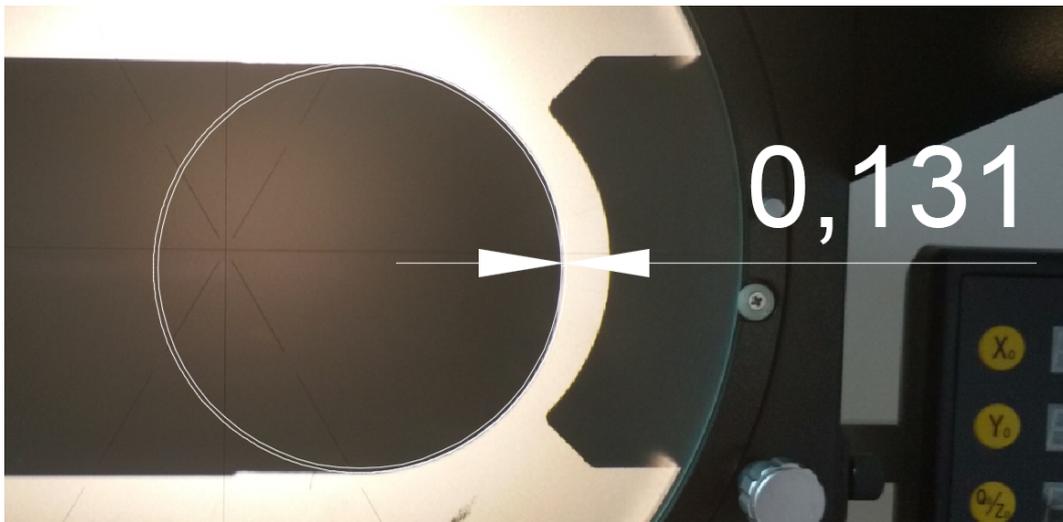


Figura G.17: Ferramenta utilizada teste 17, análises de desgaste

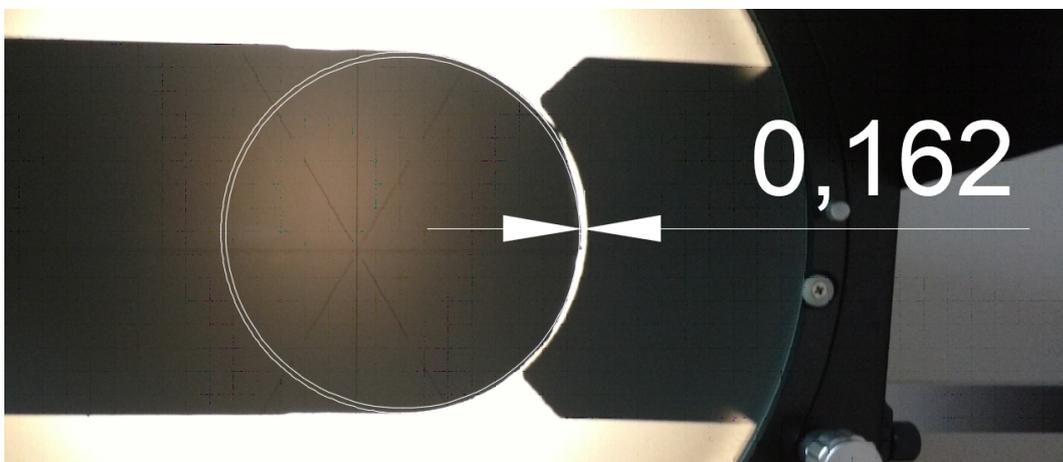


Figura G.18: Ferramenta utilizada teste 18, análises de desgaste

A figura G.23 representa o teste 23 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 04h04min e com um desgaste de ferramenta de 0,056mm.

A figura G.24 representa o teste 24 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=1200$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 00h22min e com um desgaste de ferramenta de 0,349mm.

A figura G.25 representa o teste 25 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=600$ , tempo de conformação de 01h01min e com um desgaste de ferramenta de 0,168mm.

A figura G.26 representa o teste 26 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=1200$ , tempo de conformação de 02h02min e com um desgaste de ferramenta de 0,098mm.

A figura G.27 representa o teste 27 com os parâmetros de  $A_p=0,6$  mm,  $f=2400$ mm/min,  $S=2400$ , tempo de conformação de 00h36min e com um desgaste de ferramenta de 0,174mm.

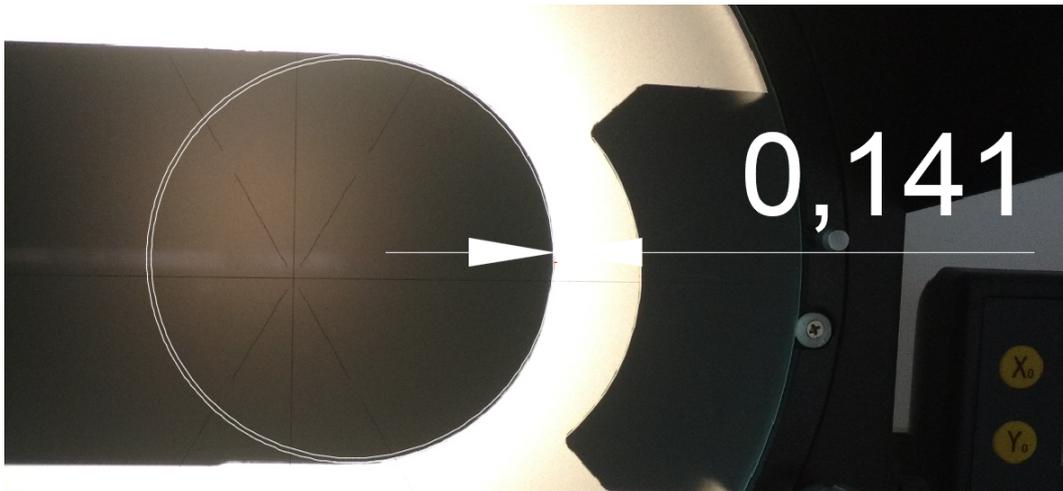


Figura G.19: Ferramenta utilizada teste 19, análises de desgaste

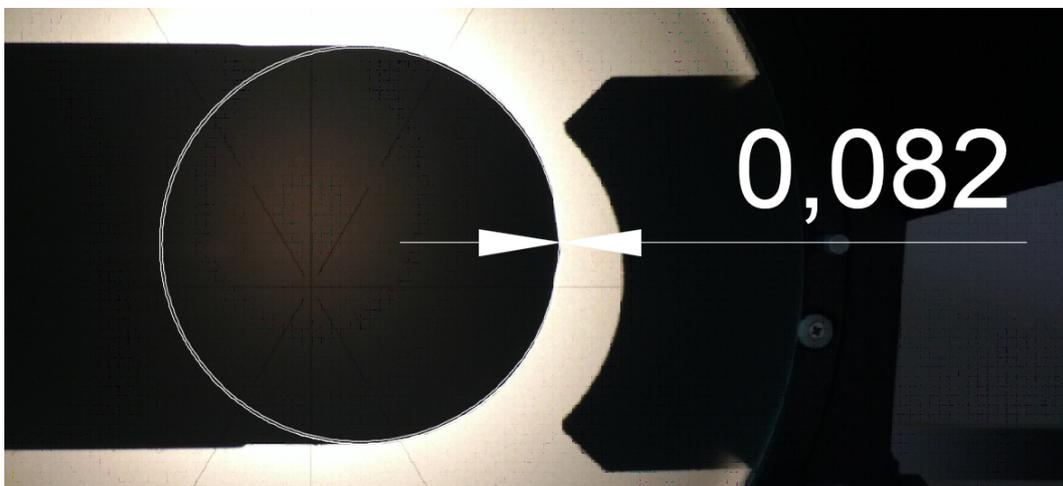


Figura G.20: Ferramenta utilizada teste 20, análises de desgaste

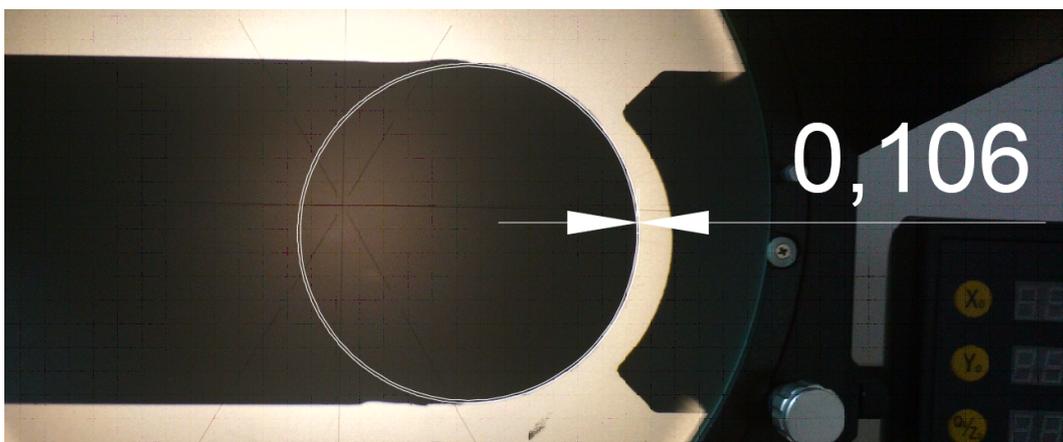


Figura G.21: Ferramenta utilizada teste 21, análises de desgaste

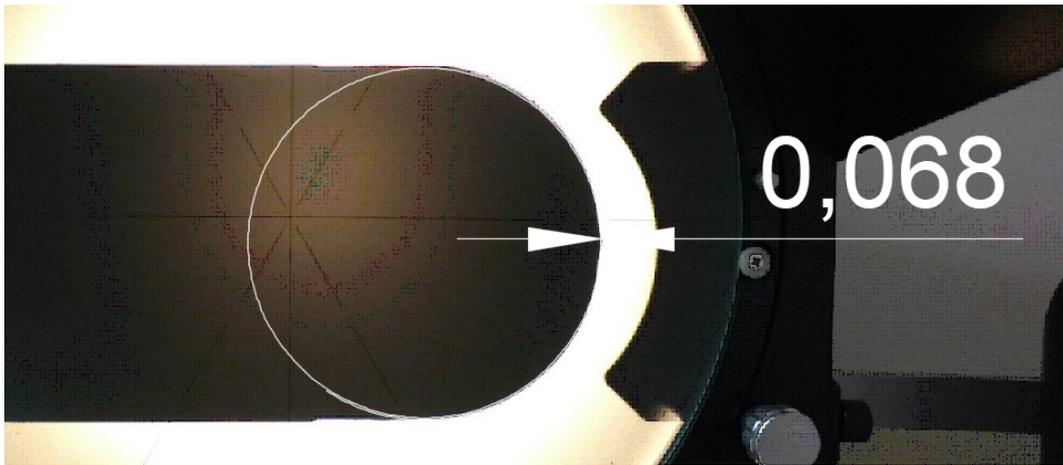


Figura G.22: Ferramenta utilizada teste 22, análises de desgaste

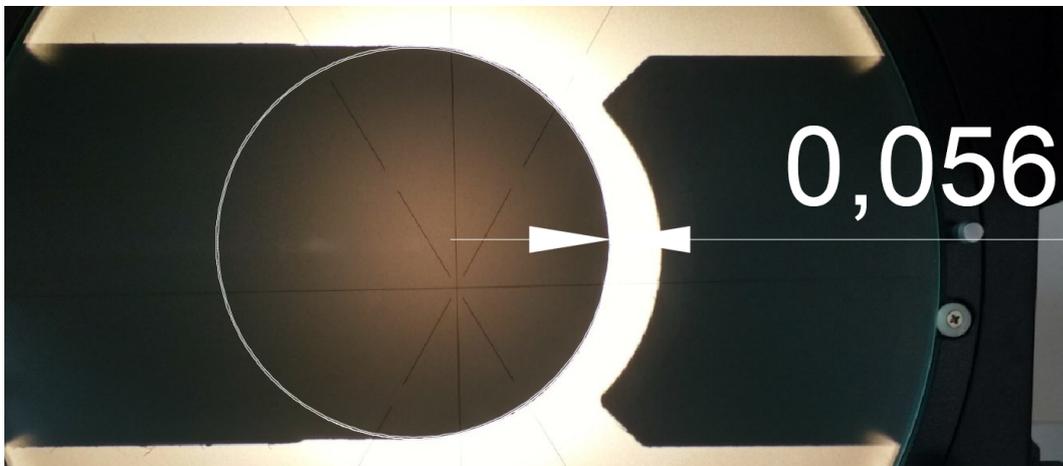


Figura G.23: Ferramenta utilizada teste 23, análises de desgaste

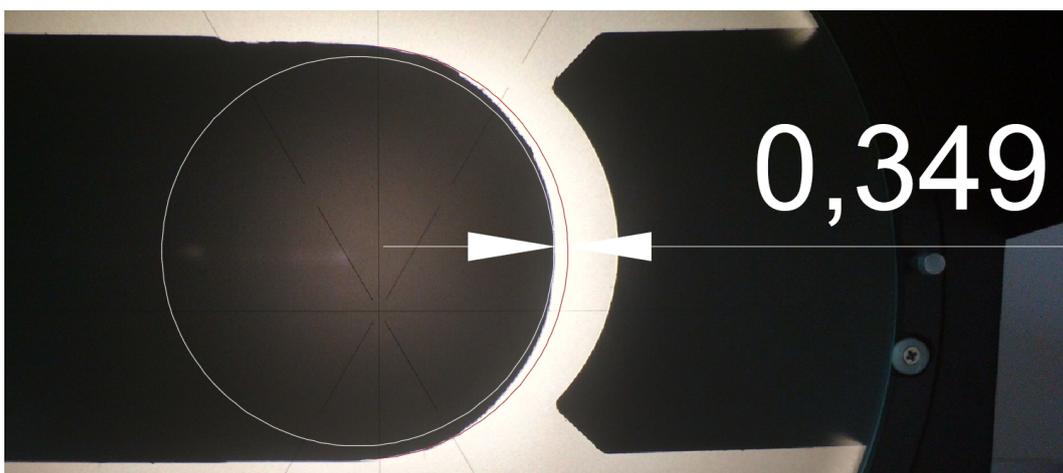


Figura G.24: Ferramenta utilizada teste 24, análises de desgaste

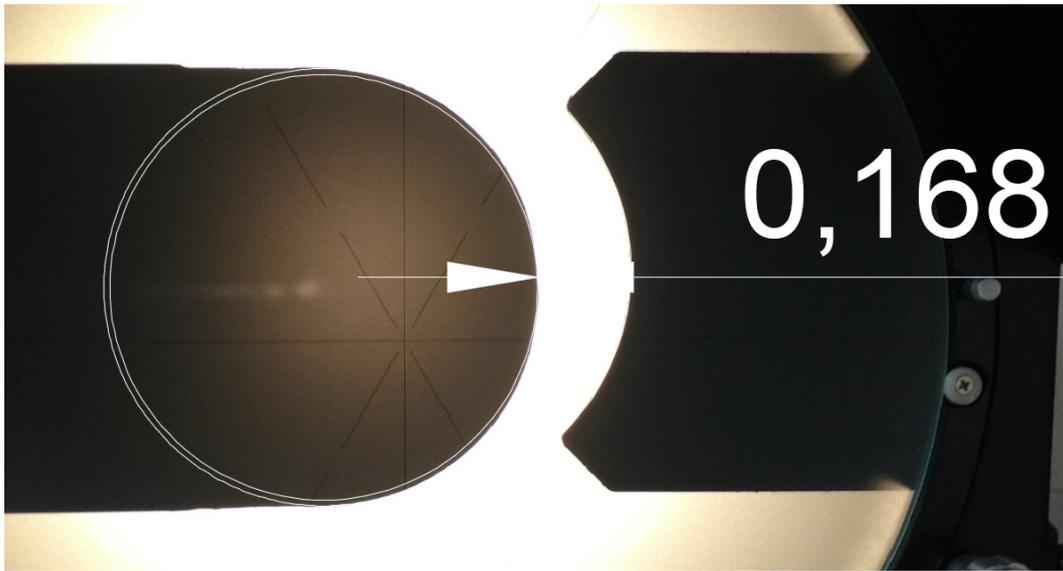


Figura G.25: Ferramenta utilizada teste 25, análises de desgaste

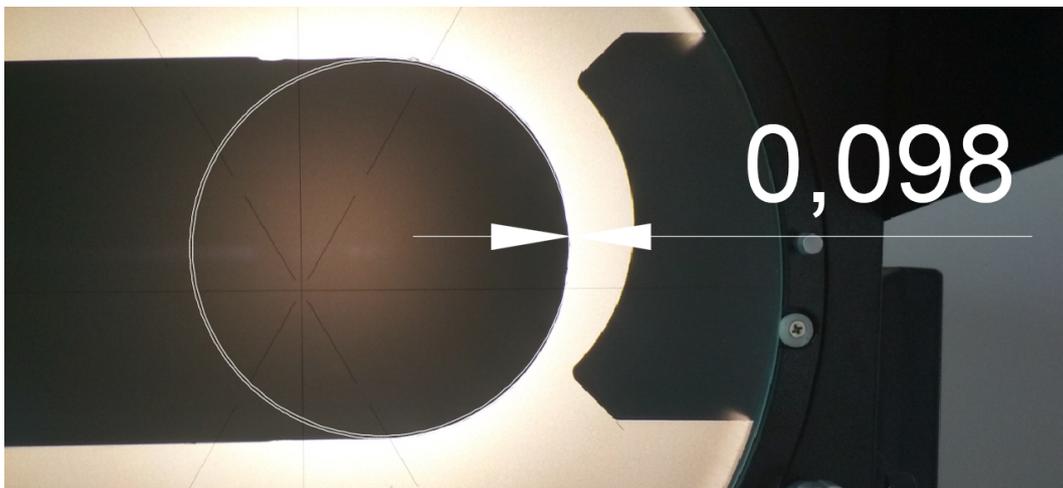


Figura G.26: Ferramenta utilizada teste 26, análises de desgaste

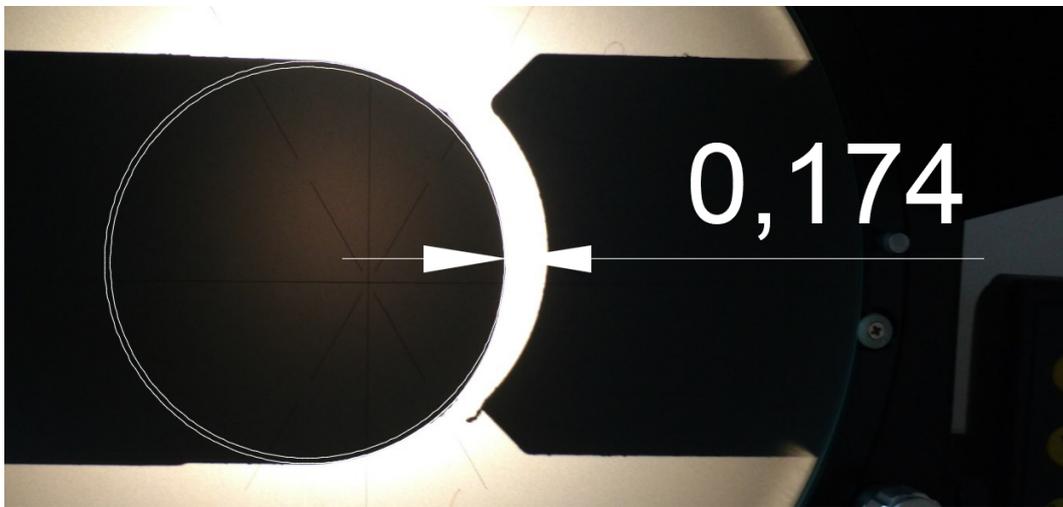


Figura G.27: Ferramenta utilizada teste 27, análises de desgaste

## **H. ANÁLISE TOTAL DO TEMPO DE VIDA DE FERRAMENTA SPSS**

Neste apêndice se apresenta o relatório geral de análise do Software SPSS para o tempo de vida da ferramenta.

# Regression

## Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
Tempo1	5.3408669	1.301779876	27
Avanco	7.0900768	.576733316	27
Desgaste	-2.141241	.531921216	27
Rotacao	7.0900768	.576733316	27
Ap	-1.012185	.462244182	27

## Correlations

		Tempo1	Avanco	Desgaste	Rotacao	Ap
Pearson Correlation	Tempo1	1.000	-.483	-.365	-.531	-.499
	Avanco	-.483	1.000	.400	.000	.000
	Desgaste	-.365	.400	1.000	.295	-.277
	Rotacao	-.531	.000	.295	1.000	.000
	Ap	-.499	.000	-.277	.000	1.000
Sig. (1-tailed)	Tempo1	.	.005	.031	.002	.004
	Avanco	.005	.	.019	.500	.500
	Desgaste	.031	.019	.	.068	.081
	Rotacao	.002	.500	.068	.	.500
	Ap	.004	.500	.081	.500	.
N	Tempo1	27	27	27	27	27
	Avanco	27	27	27	27	27
	Desgaste	27	27	27	27	27
	Rotacao	27	27	27	27	27
	Ap	27	27	27	27	27

## Variables Entered/Removed<sup>b</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Ap, Rotacao, Avanco, Desgaste <sup>a</sup>	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: Tempo1

## Model Summary<sup>b</sup>

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.894 <sup>a</sup>	.799	.763	.634378467

a. Predictors: (Constant), Ap, Rotacao, Avanco, Desgaste

b. Dependent Variable: Tempo1

**ANOVA<sup>b</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	35.207	4	8.802	21.871	.000 <sup>a</sup>
	Residual	8.854	22	.402		
	Total	44.060	26			

a. Predictors: (Constant), Ap, Rotacao, Avanco, Desgaste

b. Dependent Variable: Tempo1

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	16.267	2.956		5.503	.000
	Avanco	-.886	.240	-.393	-3.693	.001
	Desgaste	-.554	.284	-.226	-1.948	.064
	Rotacao	-1.048	.229	-.464	-4.574	.000
	Ap	-1.582	.284	-.562	-5.570	.000

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	95% Confidence Interval for B	
	Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	10.137	22.398
Avanco	-1.384	-.388
Desgaste	-1.144	.036
Rotacao	-1.523	-.573
Ap	-2.171	-.993

### Coefficients<sup>a</sup>

Model		Correlations			Collinearity Statistics	
		Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)					
	Avanco	-.483	-.619	-.353	.808	1.237
	Desgaste	-.365	-.384	-.186	.676	1.478
	Rotacao	-.531	-.698	-.437	.886	1.128
	Ap	-.499	-.765	-.532	.898	1.113

a. Dependent Variable: Tempo1

### Collinearity Diagnostics<sup>a</sup>

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions				
				(Constant)	Avanco	Desgaste	Rotacao	Ap
1	1	4.792	1.000	.00	.00	.00	.00	.01
	2	.157	5.524	.00	.00	.04	.00	.73
	3	.043	10.539	.00	.02	.53	.02	.19
	4	.006	27.577	.00	.38	.00	.47	.00
	5	.001	62.088	1.00	.60	.42	.51	.07

a. Dependent Variable: Tempo1

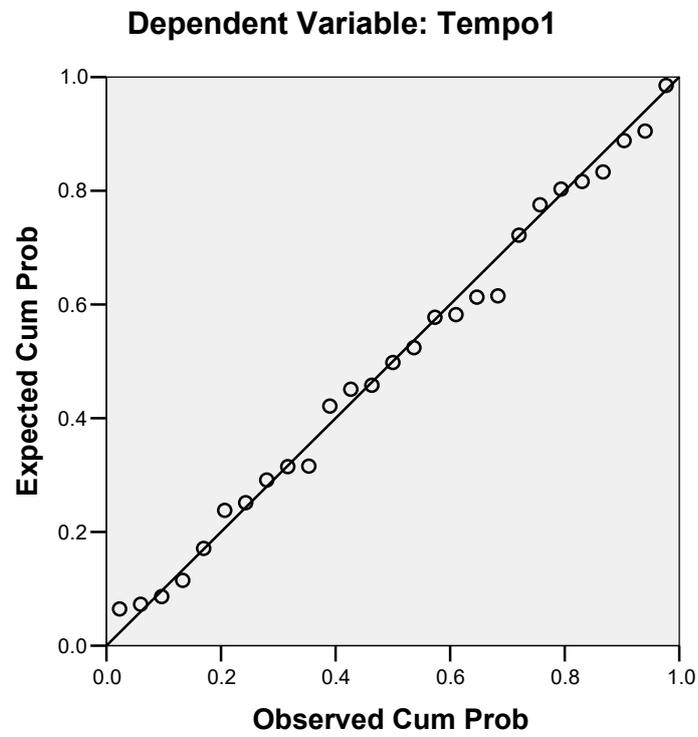
### Residuals Statistics<sup>a</sup>

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	2.9898410	7.6627150	5.3408669	1.163661481	27
Residual	-.9623116	1.3816390	.00000000	.583543317	27
Std. Predicted Value	-2.020	1.995	.000	1.000	27
Std. Residual	-1.517	2.178	.000	.920	27

a. Dependent Variable: Tempo1

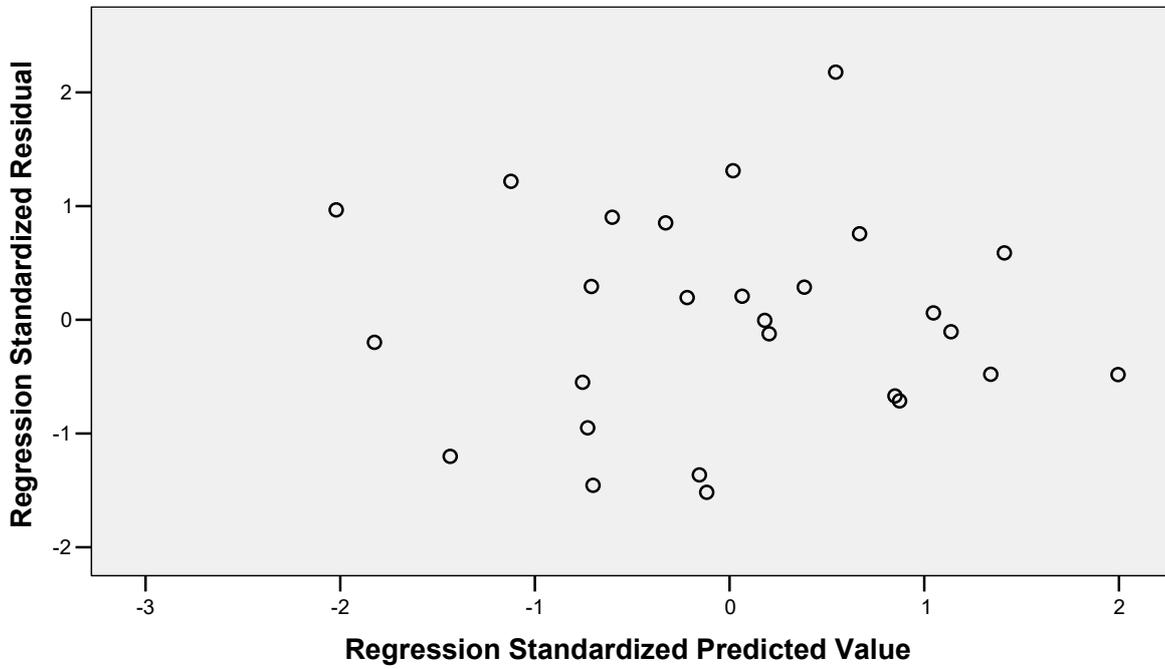
## Charts

## Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual



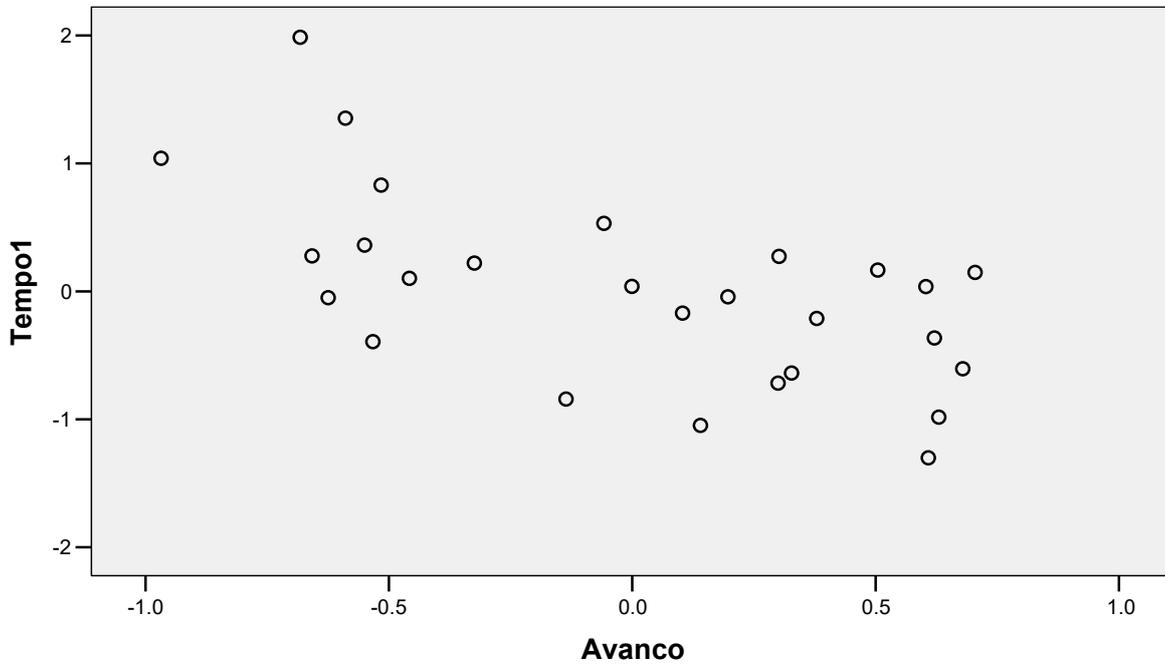
### Scatterplot

Dependent Variable: Tempo1



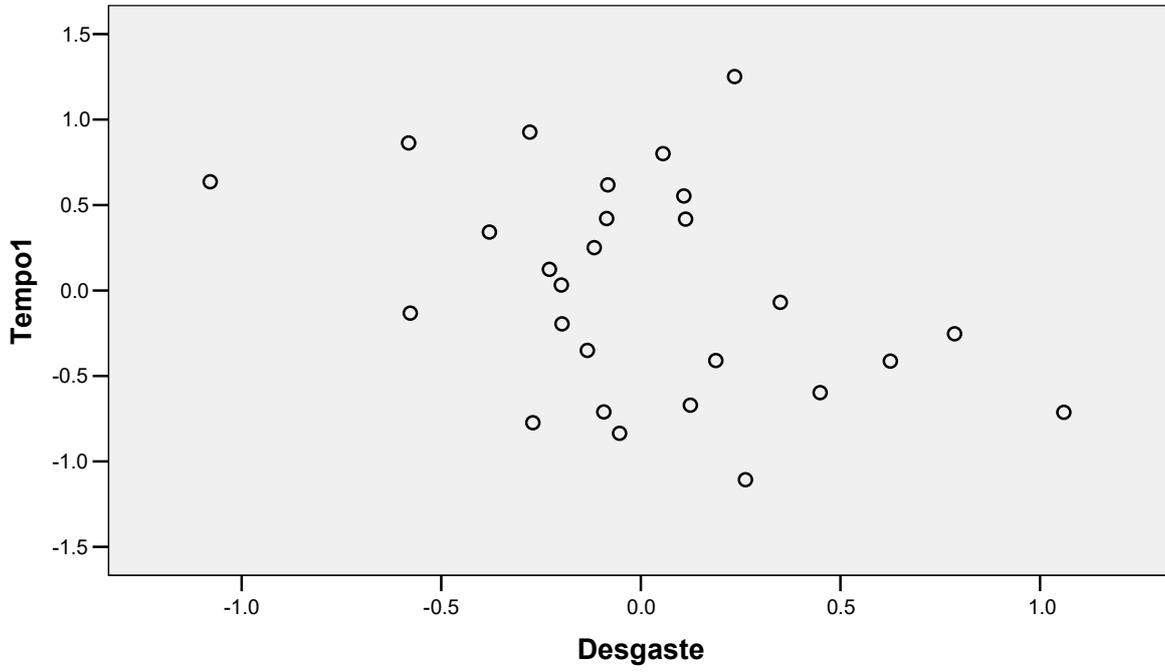
## Partial Regression Plot

Dependent Variable: Tempo1



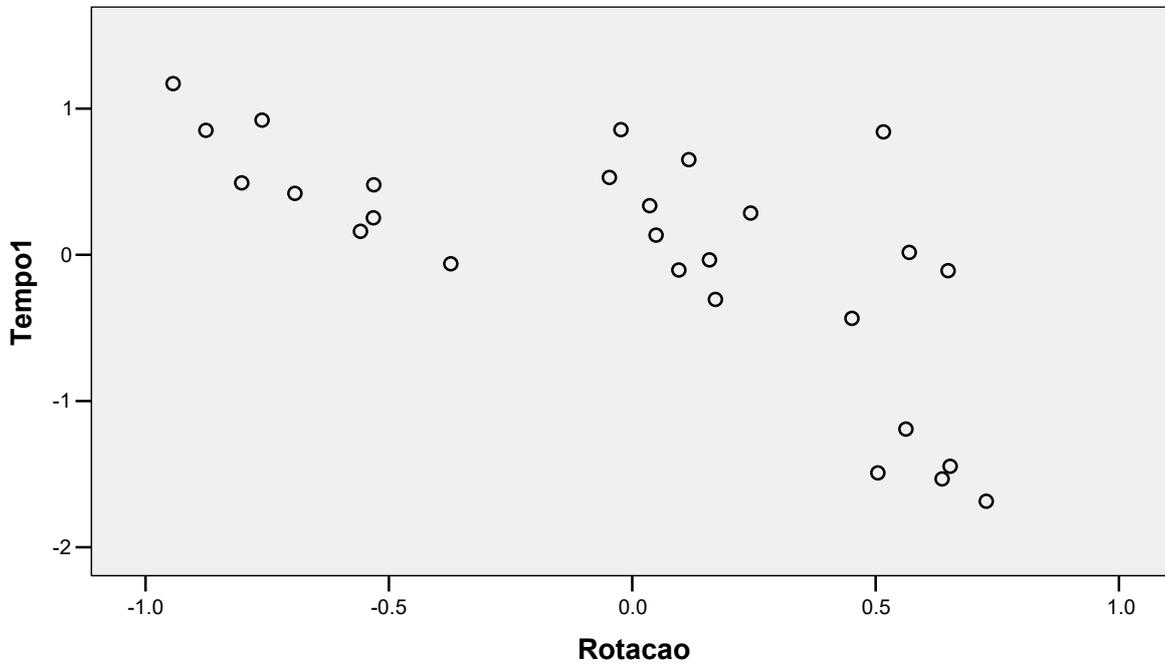
### Partial Regression Plot

Dependent Variable: Tempo1



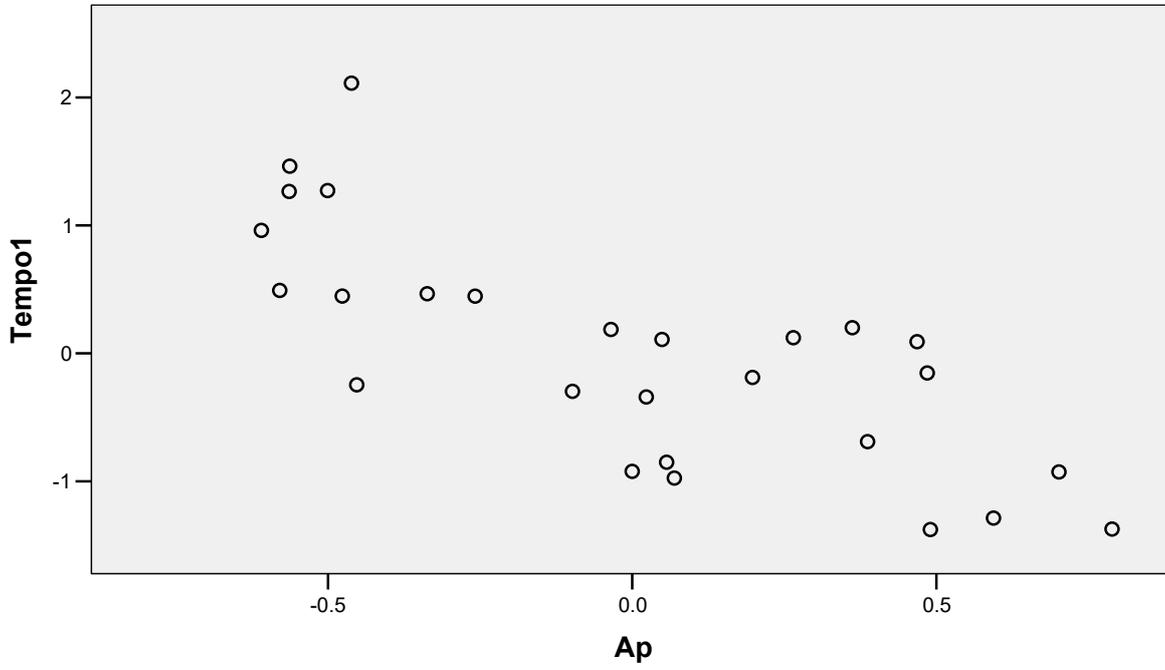
### Partial Regression Plot

Dependent Variable: Tempo1



## Partial Regression Plot

Dependent Variable: Tempo1



# **I. ANÁLISE DESGASTE DA FERRAMENTA SPSS**

Neste apêndice se apresenta o relatório geral de análise do Software SPSS possuindo com variável dependente o desgaste da ferramenta de conformação.

# Regression

## Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
Desgaste	-2.141241	.531921216	27
Avanco	7.0900768	.576733316	27
tempo	5.3408669	1.301779876	27
Rotacao	7.0900768	.576733316	27
Ap	-1.012185	.462244182	27

## Correlations

		Desgaste	Avanco	tempo	Rotacao	Ap
Pearson Correlation	Desgaste	1.000	.400	-.365	.295	-.277
	Avanco	.400	1.000	-.483	.000	.000
	tempo	-.365	-.483	1.000	-.531	-.499
	Rotacao	.295	.000	-.531	1.000	.000
	Ap	-.277	.000	-.499	.000	1.000
Sig. (1-tailed)	Desgaste	.	.019	.031	.068	.081
	Avanco	.019	.	.005	.500	.500
	tempo	.031	.005	.	.002	.004
	Rotacao	.068	.500	.002	.	.500
	Ap	.081	.500	.004	.500	.
N	Desgaste	27	27	27	27	27
	Avanco	27	27	27	27	27
	tempo	27	27	27	27	27
	Rotacao	27	27	27	27	27
	Ap	27	27	27	27	27

## Variables Entered/Removed<sup>b</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Ap, Rotacao, Avanco, tempo <sup>a</sup>	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: Desgaste

## Model Summary<sup>b</sup>

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.650 <sup>a</sup>	.423	.318	.439240877

a. Predictors: (Constant), Ap, Rotacao, Avanco, tempo

b. Dependent Variable: Desgaste

**ANOVA<sup>b</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	3.112	4	.778	4.032	.013 <sup>a</sup>
	Residual	4.245	22	.193		
	Total	7.356	26			

a. Predictors: (Constant), Ap, Rotacao, Avanco, tempo

b. Dependent Variable: Desgaste

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-1.657	3.135		-.529	.602
	Avanco	.080	.211	.086	.378	.709
	tempo	-.266	.136	-.650	-1.948	.064
	Rotacao	-.047	.221	-.051	-.211	.835
	Ap	-.691	.267	-.601	-2.587	.017

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model	95% Confidence Interval for B	
	Lower Bound	Upper Bound
1 (Constant)	-8.160	4.845
Avanco	-.357	.517
tempo	-.548	.017
Rotacao	-.506	.412
Ap	-1.246	-.137

### Coefficients<sup>a</sup>

Model		Correlations			Collinearity Statistics	
		Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)					
	Avanco	.400	.080	.061	.502	1.991
	tempo	-.365	-.384	-.315	.236	4.245
	Rotacao	.295	-.045	-.034	.455	2.197
	Ap	-.277	-.483	-.419	.486	2.057

a. Dependent Variable: Desgaste

### Collinearity Diagnostics<sup>a</sup>

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions				
				(Constant)	Avanco	tempo	Rotacao	Ap
1	1	4.820	1.000	.00	.00	.00	.00	.00
	2	.132	6.045	.00	.00	.00	.00	.44
	3	.041	10.818	.00	.00	.23	.01	.20
	4	.006	27.606	.00	.26	.00	.22	.00
	5	.001	96.645	1.00	.73	.76	.77	.36

a. Dependent Variable: Desgaste

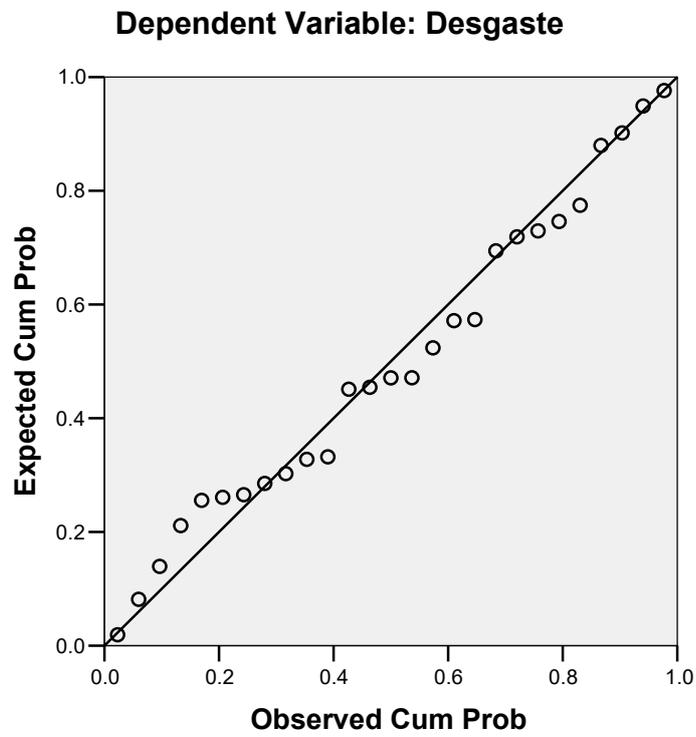
### Residuals Statistics<sup>a</sup>

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	-2.769327	-1.468759	-2.141241	.345961793	27
Residual	-.9100204	.87053257	.00000000	.404042841	27
Std. Predicted Value	-1.815	1.944	.000	1.000	27
Std. Residual	-2.072	1.982	.000	.920	27

a. Dependent Variable: Desgaste

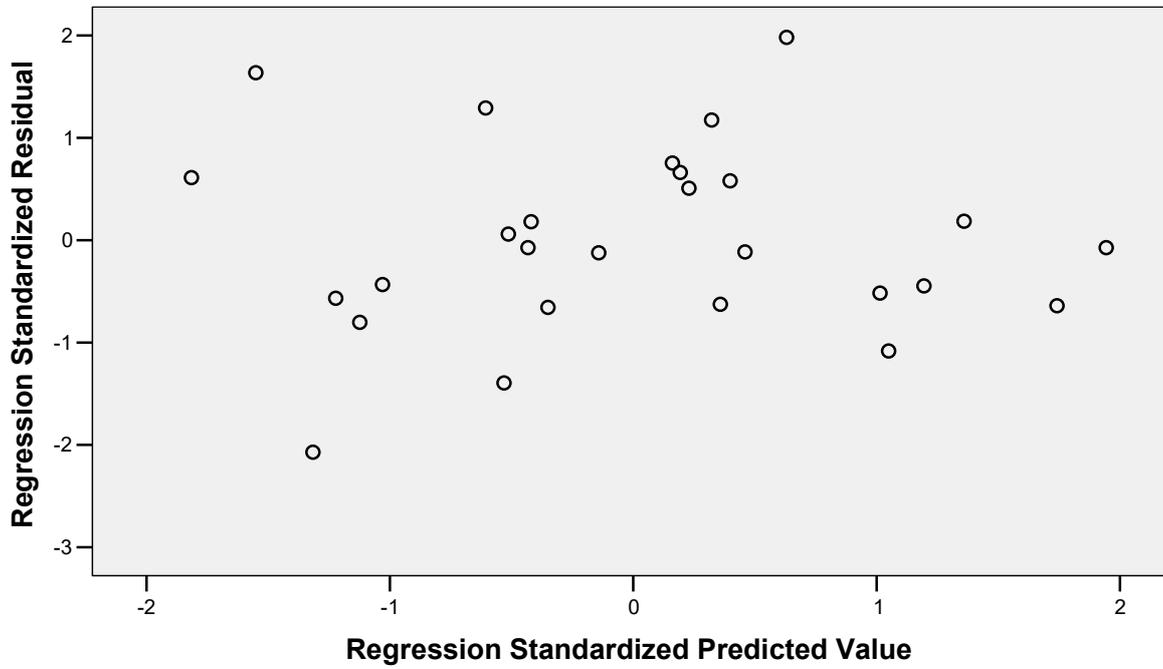
## Charts

## Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual



### Scatterplot

Dependent Variable: Desgaste



# J. DOE PARA ENSAIOS DE DESGASTE DE FERRAMENTA

Neste apêndice se apresenta a configuração do Software DOE++ para os ensaios de desgaste de ferramenta, onde primeiramente se define qual o fatorial vai se utilizar, no caso de desgaste de ferramenta, se utilizou o conforme figura J.1.

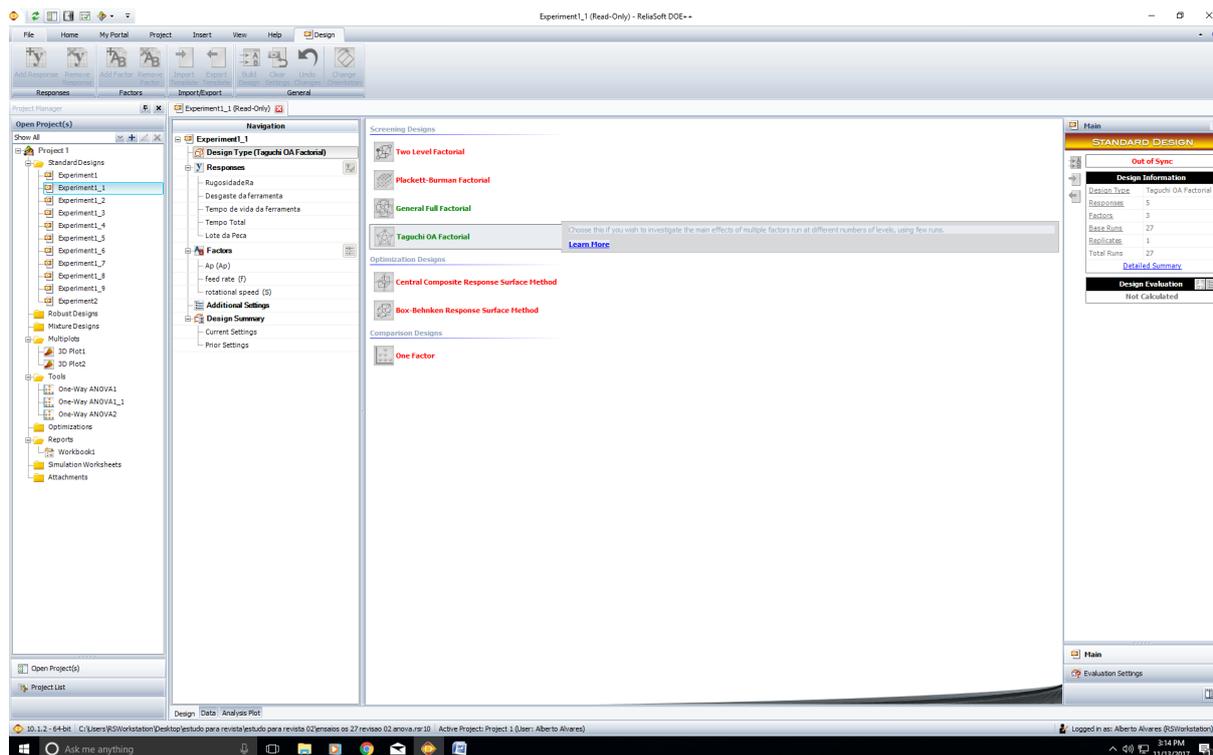


Figura J.1: Fatorial utilizada para desgaste de ferramenta

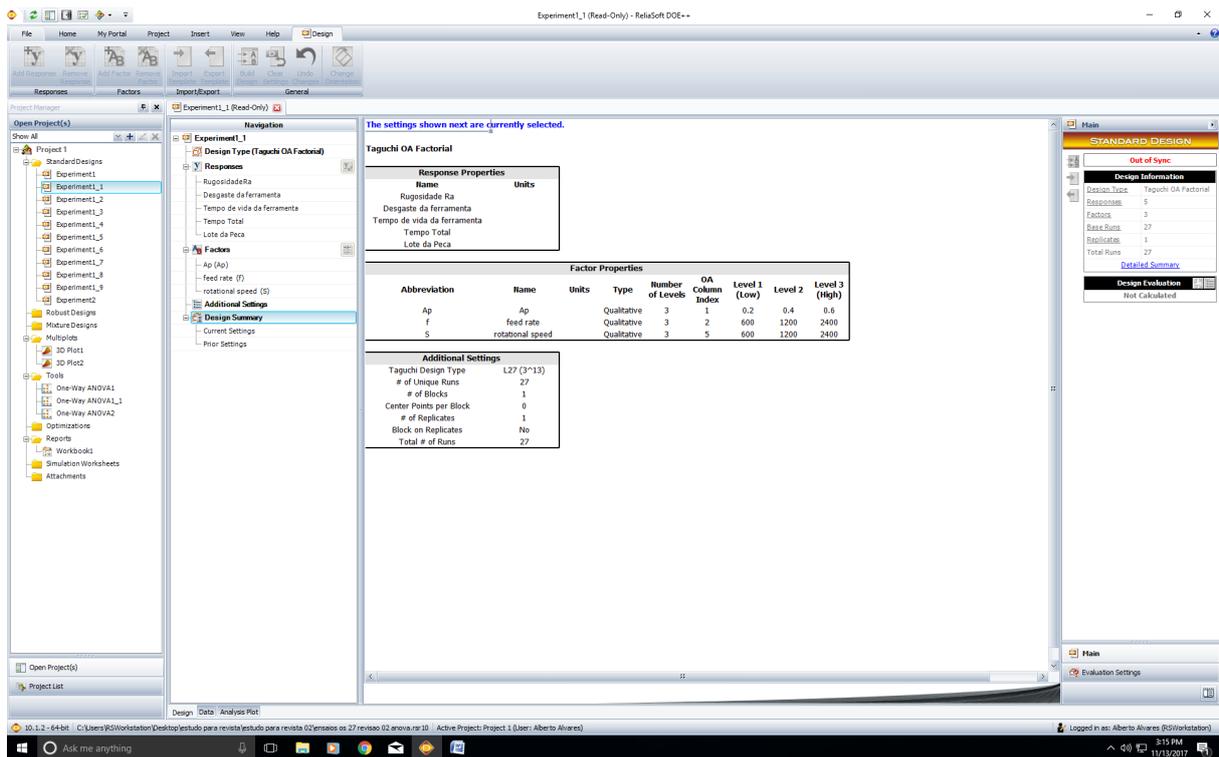


Figura J.2: Resumo geral de dados de entrada para desgaste de ferramenta

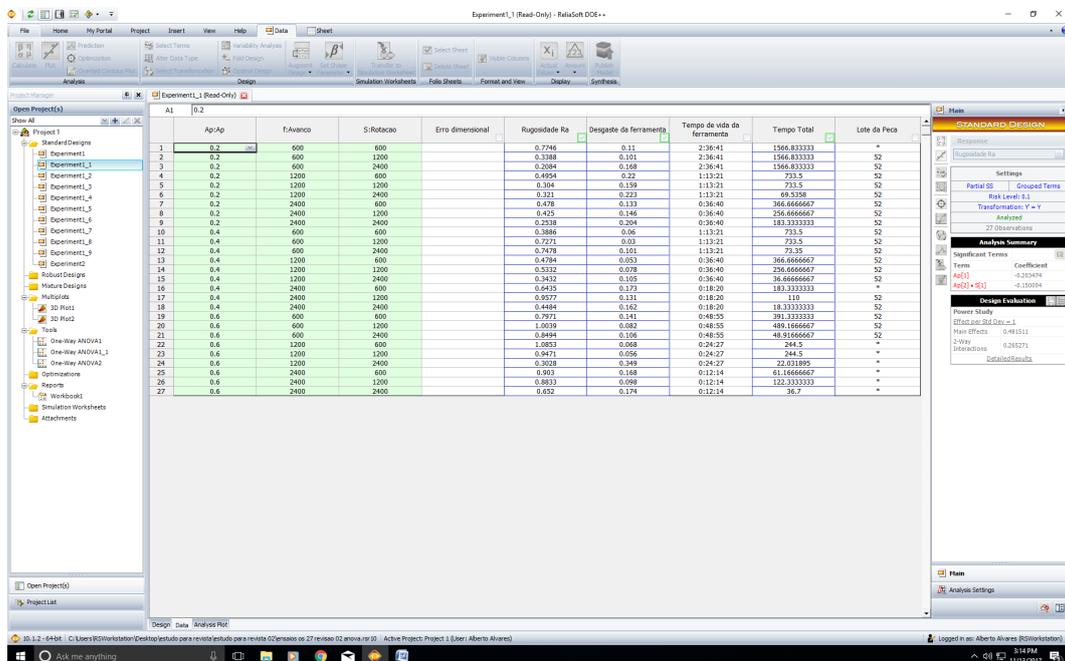


Figura J.3: Tabela geral de variáveis de entrada e saída para desgaste de ferramenta

# K. DOE PARA ENSAIOS DE FORÇA

Neste apêndice se apresenta a configuração do Software DOE++ para os ensaios de força, onde primeiramente se define qual o fatorial vai se utilizar, no caso de força, por não possuir o menos numero de incógnitas para todos os parâmetros de entrada, utilizou-se o fatorial total, conforme figura K.1.

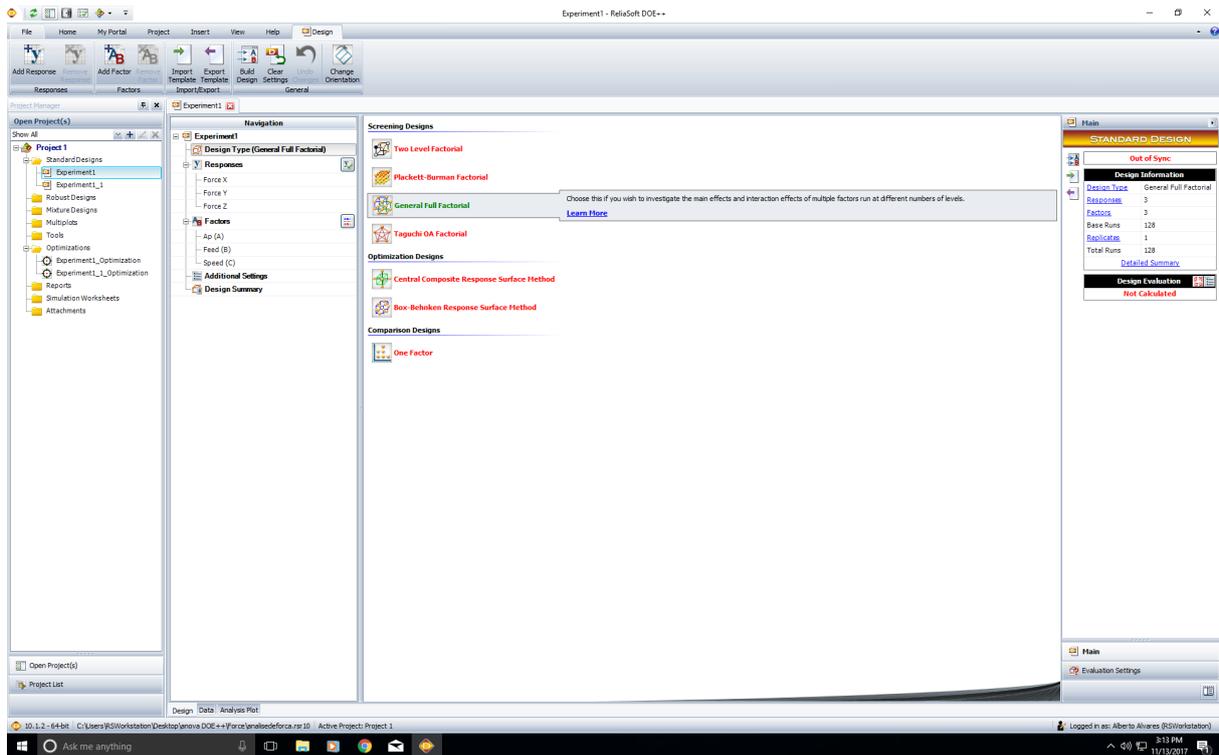


Figura K.1: Fatorial utilizada

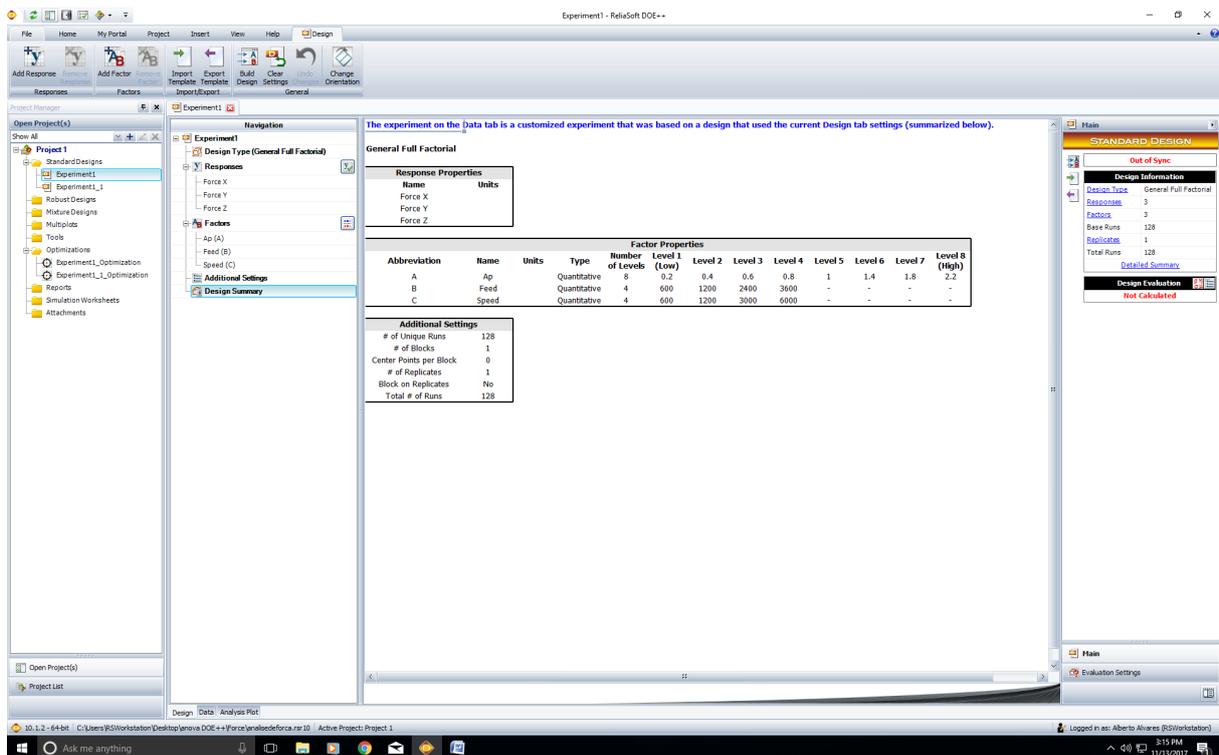


Figura K.2: Resumo geral de dados de entrada

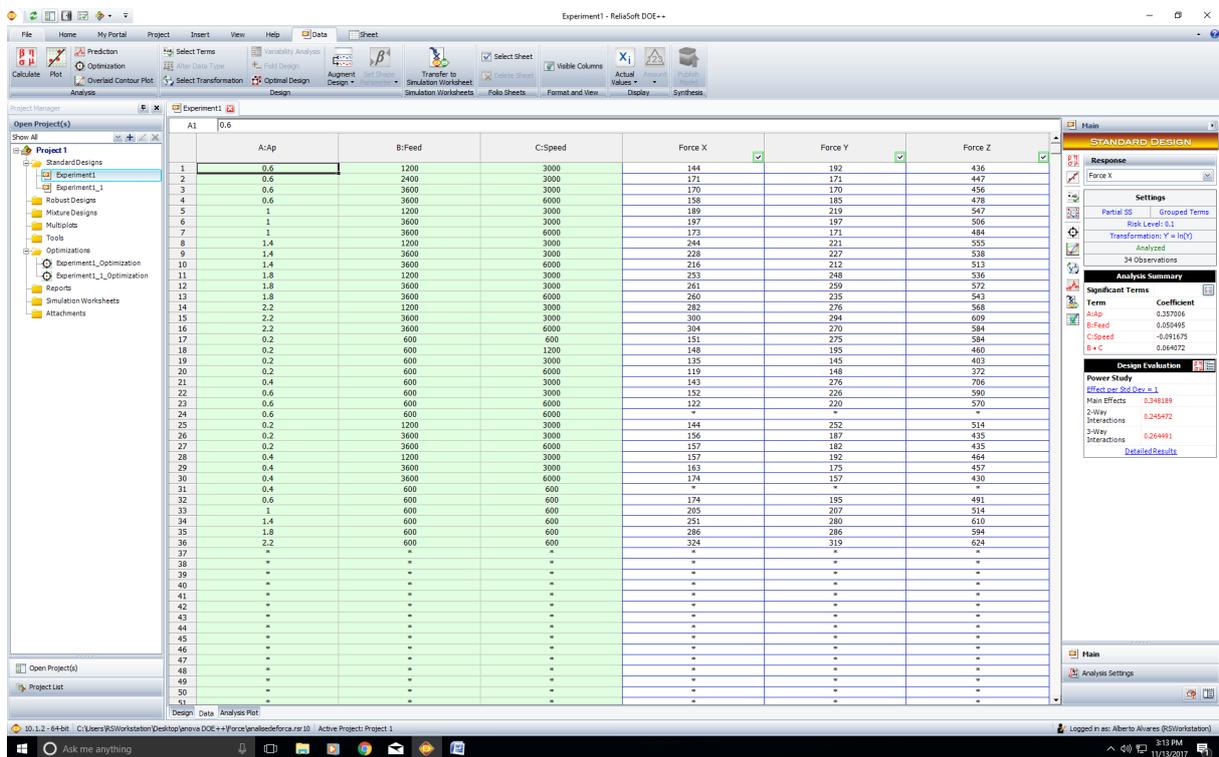


Figura K.3: Tabela geral de variáveis de entrada e saída