

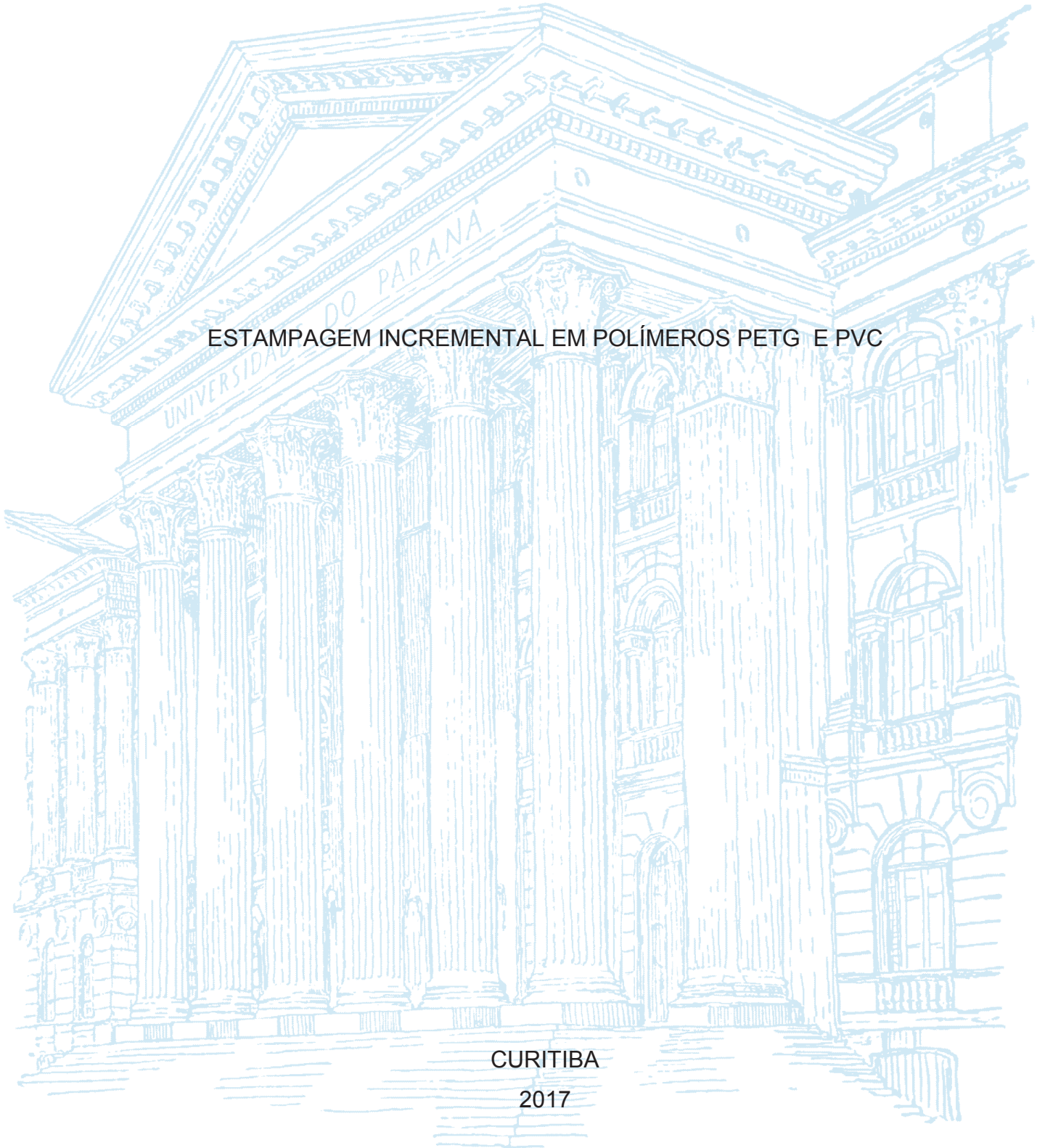
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CHENG TE HUNG

ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM POLÍMEROS PETG E PVC

CURITIBA

2017



CHENG TE HUNG

ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM POLÍMEROS PETG E PVC

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Manolo Lutero Gipiela

CURITIBA  
2017

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

H936e

Hung, Cheng Te  
Estampagem incremental em polímeros PETG e PVC / Cheng Te Hung. –  
Curitiba, 2017.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes – Coorientador: Manolo  
Lutero Gipiela.

1. Estampagem (Metais). 2. Polímeros. 3. Cloreto de polivinila. 4.  
Polietileno. . I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor  
Prestes. III. Gipiela, Manolo Lutero . IV. Título.

CDD: 671.33

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



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

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CHENG TE HUNG**, intitulada: "**ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM POLÍMEROS PETG E PVC**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.  
A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 15 de Dezembro de 2017.

MANOEL LUTERO GIABELA  
Presidente da Banca Examinadora, Avaliador Externo (FATEC SENAI)

MARCIO MAFRA  
Avaliador Externo (UTFPR)

JEFERSON GIL FURHMANN  
Avaliador Externo (UTFPR)



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

ATA Nº 209

### ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

No dia quinze de Dezembro de dois mil e dezessete às 09:00 horas, na sala Processos de Fabricação, Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, do Setor de TECNOLOGIA da Universidade Federal do Paraná, foram instalados os trabalhos de arguição do mestrando **CHENG TE HUNG** para a Defesa Pública de sua Dissertação intitulada: "**ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM POLÍMEROS PETG E PVC**". A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: MANOLO LUTERO GIPIELA (FATEC SENAI), JEFERSON GIL FURHMANN (UTFPR), MARCIO MAFRA (UTFPR). Dando início à sessão, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. O aluno respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais. A Banca Examinadora, então, e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela APROVADO do aluno. O mestrando foi convidado a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. A aprovação no rito de defesa deverá ser homologada pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais do programa. A outorga do título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, MANOLO LUTERO GIPIELA, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

Observações: A APROVAÇÃO DO ALUNO ESTÁ CONDICIONADA A REVISÃO E CORREÇÕES DE SUA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO CONFORME RECOMENDADO PELA BANCA.

Curitiba, 15 de Dezembro de 2017.

MANOLO LUTERO GIPIELA  
Presidente da Banca Examinadora Avaliador Externo (FATEC SENAI)

MARCIO MAFRA  
Avaliador Externo (UTFPR)

JEFERSON GIL FURHMANN  
Avaliador Externo (UTFPR)

Dedico este trabalho a meus pais, Juei Yu e Fan Pau Mei. Meus irmãos, Tsu Mei, Te Huei, Tsu Yun, Mei Chuan e Te Chuan. Meus filhos Mateus, Luciana e Natanael e a minha esposa Marli, pelo apoio e pela compreensão de todos que me ajudaram indiretamente ou diretamente.

Também dedico ao meu ``mestre`` e orientador Paulo Victor Prestes Marcondes e coorientador Manolo Lutero Gipiela, pela paciência, competência e atenção.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela benção, vida e esta oportunidade.

Ao Professor Paulo Victor Prestes Marcondes e Coorientador Manolo Lutero Gipiela , pela orientação, apoio e confiança.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao Prof. Amauri, Prof. Te Chuan, Prof. Maurílio pela confecção dos acessórios para os ensaios.

"Um dos mais elevados deveres humanos é o dever do encorajamento... É fácil rir dos ideais dos homens; é fácil despejar água fria no seu entusiasmo; é fácil desencorajar os outros. O mundo está cheio de desencorajados. Temos o dever de encorajar-nos uns aos outros. Muitas vezes uma palavra de reconhecimento, ou de agradecimento ou de apreço, ou ânimo tem mantido um homem em pé." ( William Barclay )

## RESUMO

Os polímeros tipo termoplásticos são submetidos a moldagem por injeção, extrusão, sopro, moldagem por vácuo, técnicas utilizando espuma e fundição para se chegar a um produto moldado com determinado formato desejado. Porém surge uma forma diferente de moldagem de termoplásticos que pode fazer sem a necessidade de moldes, denominada 'Estampagem Incremental' que consiste em desenhar o formato da peça e cria dimensões, em uma fresadora CNC através de um punção cilíndrico com ponta arredondada. O objetivo do trabalho da estampagem é fazer um estudo sobre o processo de Estampagem Incremental de Polímeros sendo um novo tipo de tecnologia de Manufatura Aditiva que é baseada no processo de conformação de material, diferente dos processos já existentes de remoção ou adição de material. Os materiais escolhidos para o estudo foram o PVC e o PETG com 2mm de espessura, por estarem presente em todos os estudos anteriores. Foi usado dois parâmetros nesse trabalho, ângulo de estampagem que chega 45° e profundidade que atinge até 38,5mm. Os testes demonstraram que o PETG tem características melhores que o PVC nos ensaios de Estampagem Incremental ( EI ), ensaio de tração e ensaio de Erichsen.

**Palavras-chave:** Estampagem Incremental de Polímeros- PETG, PVC; Curva Limite de Conformação – CLC; Ângulo de Estampagem.

## **ABSTRACT**

The thermoplastic type polymers are subjected to injection molding, extrusion, blowing, vacuum molding, techniques using foam and casting to arrive at a molded product of desired shape. However, a different form of molding of thermoplastics can be made without the need for molds called 'Incremental Stamping', which consists of drawing the shape of the part and creating dimensions on a CNC milling machine through a cylindrical punch with a rounded tip. The purpose of the stamping work is to do a study on the process of Incremental Stamping of Polymers being a new type of Additive Manufacturing technology that is based on the process of forming of material, different from the existing processes of removal or addition of material. The materials chosen for the study were PVC and PETG 2 mm thick, because they were present in all previous studies. It was used two parameters in this work, stamping angle that arrives  $45^\circ$  and depth that reaches up to 38,5mm. Tests have shown that PETG has better characteristics than PVC in the Incremental Stamping (EI), tensile test and Erichsen tests.

**Keywords:** Incremental Polymer Stamping – PETG, PVC; Curve Limit of Conformation - CLC; Angle of Stamping.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- ESTAMPAGEM INCREMENTAL POR ÚNICO PONTO.....	16
FIGURA 2 – ETAPAS DE CONFORMAÇÃO DO “SPINNING” E DO “SHEAR FORMING” NA FORMAÇÃO DE GEOMETRIA CÔNICA.....	17
FIGURA 3 – PRENSA HIDRÁULICA DE ESTAMPAGEM CONVENCIONAL DE CHAPA .....	18
FIGURA 4 - PRINCÍPIO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	19
FIGURA 5 - MODALIDADES DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	20
FIGURA 6 MODALIDADES DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM SUPORTE.....	21
FIGURA 7 – MODELOS DE FERRAMENTAS USADAS NA SPIF .....	22
FIGURA 8 - PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMLES (SPIF).....	23
FIGURA 9A - MÁQUINA DEDICADA A ISF                      9B - CENTRO DE USINAGEM USADO EM ISF.....	24
FIGURA 10 – ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM PONTO DUPLO.....	25
FIGURA 11- ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TPIF COM MATRIZ (SUPORTE ESPECÍFICO).....	26
FIGURA 12 - ESQUEMA DE PEÇAS FORMADAS DE CONE E FUNIL .....	28
FIGURA 13 – ROBÔ USADO NA ISF.....	29
FIGURA 14 – DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO MÁXIMO DE ESTAMPAGEM POR .....	30
FIGURA 15 - REDUÇÃO DA ESPESSURA DE PAREDE .....	32
FIGURA 16 - ESTRATÉGIAS DIFERENCIADAS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	33
FIGURA 17 – SUPERFÍCIE CONFORMADA COM PASSO ( $\Delta Z$ ).....	34
FIGURA 18 – DIMENSÕES ESQUEMÁTICAS NUM ENSAIO DE TRAÇÃO .....	37
FIGURA 19 – TÉCNICA DE ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA.....	38
FIGURA 20 – EXEMPLO DE DEFORMAÇÕES EM UM COMPOENETE ESTAMPADO.....	39
FIGURA 21 – PRICÍPIO DA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES .....	39
FIGURA 22 – TIPOS DE DEFORMAÇÃO EM CHAPA METÀLICA.....	41
FIGURA 23 – DIFERENTES TIPOS DE DEFORMAÇÕES REPRESENTADAS .....	42
FIGURA 24- PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	44
FIGURA 25- EXEMPLOS DE ALGUMAS GEOMETRIAS POSSÍVEIS NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE POLIPROPILENO..	44
FIGURA 26- COMPONENTES DE MICROONDAS REALIZADOS ATRAVÉS DO PROCESSO .....	45
FIGURA -27 ESTRUTURA MOLECULAR DO PETG .....	48
FIGURA -28 ESTRUTURA MOLECULAR DO PVC.....	50
FIGURA -29 FLUXOGRAMA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	52
FIGURA -30 – MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL - EMIC .....	53
FIGURA -31 CORPO DE PROVA TIPO I ( mm ). .....	54
FIGURA -32 CP`s DE POLÍMERO PETG .....	54
FIGURA -33 CP`s DE POLÍMERO PVC .....	55
FIGURA -34 ENSAIO ERICHSEN.....	55
FIGURA -35 EQUIPAMENTO DE BANCADA ENSAIO ERICHSEN.....	56

FIGURA -36	DESENHO ESQUEMÁTICO DE MALHA IMPRESSA.....	56
FIGURA -37	IMAGEM DA TÉCNICA DE IMPRESSÃO SERIGRÁFICA DE MALHAS .....	57
FIGURA -38	CP's UTILIZADOS PARA O LEVANTAMENTO .....	59
FIGURA -39	SUPERÍCIE POLIMÉRICA PETG CONVEXA ILUSTRANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIOR E MENOR, PARA LEVANTAMENTO DA CLF.....	60
FIGURA -40	SUPERÍCIE POLIMÉRICA PVC CONVEXA ILUSTRANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIOR E MENOR, PARA LEVANTAMENTO DA CLF.....	60
FIGURA -41	ESTAMPAGEM INCREMENTAL CONVENCIONAL (PARALELA) .....	61
FIGURA -42	DESENHO DO FERRAMENTAL UTILIZADO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL PONTO ÚNICO .....	63
FIGURA -43	CENTRO DE USINAGEM E FERRAMENTAL UTILIZADO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO. ....	64
FIGURA -44	SOFTWARE EDGECAM, SIMULAÇÃO DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	65
FIGURA -45	GRÁFICO TENSÃO E DEFORMAÇÃO – PETG .....	66
FIGURA -46	GRÁFICO FORÇA E ALONGAMENTO – PETG .....	67
FIGURA -47	GRÁFICO TENSÃO E DEFORMAÇÃO – PVC .....	67
FIGURA -48	GRÁFICO FORÇA E ALONGAMENTO – PVC .....	68
FIGURA -49	GRÁFICO TENSÃO E DEFORMAÇÃO – PETG E PVC ( COMPARAÇÃO ) .....	69
FIGURA -50	GRÁFICO FORÇA E ALONGAMENTO – PETG E PVC ( COMPARAÇÃO ) .....	69
FIGURA -51	FRATURA DO CORPO DE PROVA –ENSAIO DE TRAÇÃO.....	70
FIGURA -52	ESTAMPAGEMMM INCREMENTAL – PETG (CONTINUA).....	71
FIGURA -52	ESTAMPAGEMMM INCREMENTAL – PETG (CONTINUAÇÃO) .....	72
FIGURA -52	ESTAMPAGEMMM INCREMENTAL – PETG (CONCLUSÃO).....	73
FIGURA -53	ESTAMPAGEMMM INCREMENTAL – PVC (CONTINUA).....	74
FIGURA -53	ESTAMPAGEMMM INCREMENTAL – PVC (CONCLUSÃO).....	75
FIGURA -54	DEFEITO NA ETAMPAGEM INCREMENTAL.....	76
FIGURA -55	- TENSÃO DE TRAÇÃO.....	77
FIGURA -56	- DEFEITO NA ETAMPAGEM INCREMENTAL.....	77
FIGURA -57	- DEFEITO NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL -PETG .....	78
FIGURA -58	DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA- PETG.....	79
FIGURA-59	DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PETG COM CURVA CLF .....	80
FIGURA -60	DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PVC59 .....	81
FIGURA -61	DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PVC COM CURVA CLF .....	82
FIGURA -62	COMPARAÇÃO DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PETG E.....	83
FIGURA -63	VARIAÇÃO DA ESPESSURA NA CHAPA PVC - 45° ( PONTOS A, B e C ).....	85
FIGURA -64	VARIAÇÃO DA ESPESSURA NA CHAPA PETG - 70° ( PONTOS A, B, C e D).....	86

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS PETG .....	49
TABELA 2- ALGUMAS PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE COMPOSTOS DE PVC COM DIFERENTES GRAUS DE PLASTIFICAÇÃO. ....	51
TABELA 3 - QUANTIDADE DE CP'S NECESSÁRIOS PARA OS ENSAIOS DE ERICHSEN.....	59
TABELA 4- MATRIZ DE PLANEJAMENTO DO PROCEDIMENTO.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANSYS	- Swanson Analysis Systems, Inc. ( software de simulação de elementos finitos )
ASTM D638-03	- Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
CAD	- Computer-Aided Design
CAM	- Computer Aided Manufacturing
CLF	- Curva Limite de Falha
CLC	- Curva Limite de Conformação
CLE	- Curva limite à Estricção
DLC	- Diagrama Limite de Conformação
CNC	- Comandado por Controle Numérico
CP	- Corpo de Prova
DSIF	- Estampagem Incremental de Dupla Face
EI	- Estampagem Incremental
ISF	- Incremental Sheet Forming
KN	- Kilo Newton ( 1000 N )
N	- Newton ( unidade de força )
PC	- Policarbonato
PA	- Poliamida ( Nylon )
POM	- Polioximetileno ( Poliacetal )
PEAD	- Polietileno de Alta densidade
PLA	- Poliático ácido
PP	- Polipropileno
PE	- Polietileno
PET	- Polietileno tereftalato
PETG	- Polietileno Tereftalato de etileno
PLA	- Poliácido láctico ou ácido poliláctico
PTFE	- Politetrafluoretileno ( conhecido como Teflon )
PVC	- Policloreto de vinilo
SPIF	- Single Point Incremental Forming
TPIF	- Two Points Incremental Forming
UV	- Ultra Violeta

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{fh}$	- velocidade de avanço da ferramenta
$\Delta Z$	- passo vertical
$V_c$	- velocidade de corte da ferramenta
$\Delta l$	- deformação absoluta no comprimento
$\Delta b$	- deformação absoluta na largura
$\Delta s$	- deformação absoluta na espessura
$\epsilon l (\epsilon_1)$	- deformação relativa no comprimento
$\epsilon b (\epsilon_2)$	- deformação relativa na largura
$\epsilon s (\epsilon_3)$	- deformação relativa na espessura
$\phi_l$	- deformação verdadeira no comprimento
$\phi_b$	- deformação verdadeira na largura
$\phi_s$	- deformação verdadeira na espessura
$l_0$	- comprimento inicial;
$l_1$	- comprimento final;
$b_0$	- largura inicial;
$s_0$	- espessura inicial;
$b_1$	- largura final;
$s_1$	- espessura final;
$\phi_1$	- deformação verdadeira na direção do comprimento da elipse (maior deformação)
$\phi_2$	- deformação verdadeira na direção da largura da elipse (menor deformação)
$\phi_3$	- deformação verdadeira na espessura
$\square_{m\acute{a}x}$	- ângulo máximo
$\Psi$	- ângulo de inclinação da parede da chapa
$\sigma_0$	- tensão de tração

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.2.1	Objetivo Geral .....	15
1.2.2	Objetivos Específicos .....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1	ESTAMPAGEM INCREMENTAL .....	20
2.2	ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES – SPIF .....	21
2.3	ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM DOIS PONTOS DE APOIO - TPIF ..	25
2.4	ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE DUPLA FACE – DSIF .....	27
2.5	ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS POR MEIO DE ROBÔS .....	28
2.6.	PARÂMETROS DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.....	29
2.6.1	Ferramenta de Estampar.....	29
2.6.2	Parâmetros do Material e a Espessura da Chapa.....	30
2.6.3	Estratégia de Trajetória da Ferramenta.....	32
2.6.4	Passo Vertical - $\Delta Z$ .....	34
2.6.5	Rotação da Ferramenta.....	35
2.6.6	Velocidade de Avanço - $V_{fh}$ .....	36
2.7	ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES .....	36
2.8	CONFORMABILIDADE .....	42
2.9	APLICAÇÕES .....	43
2.10	ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM POLÍMEROS .....	44
2.11	CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS PETG E PVC .....	47
2.11.1	Petg.....	47
2.11.2	Pvc .....	49
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	51
3.2.	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO POLÍMERO PETG E PVC .....	52
3.2.1	Ensaio de Tração.....	53
3.2.2	Curvas Limite de Conformação (CLC).....	55

3.2.3	Impressão serigráfica de malhas.....	56
3.2.4	Ensaio de Erichsen - Curva Limite de Falha (CLF) .....	58
3.3	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS COM ESTAMPAGEM INCREMENTAL...60	
3.3.1.	Ensaio de estampagem incremental com ferramental e máquina CNC .....	63
3.3.2.	Estratégias de estampagem convencional (paralela) de contorno com edgecam 2014 R2 e pós-processamento .....	64
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>66</b>
4.1	RESULTADOS DE TRAÇÃO .....	66
4.2	RESULTADOS DE ESTAMPAGEM.....	71
4.2.1	Resultados das Falhas nos polímeros PETG e PVC .....	76
4.2.2	Resultados de Estampagem – DLF e CLF .....	78
4.2.2.1	Resultados Experimentais dos Ensaio - PETG .....	79
4.2.2.2	Resultados Experimentais dos Ensaio – PVC.....	81
4.2.2.3	Comparação dos Resultados Experimentais dos Ensaio: PETG e PVC .....	83
4.2.2.4	Resultados da Variação de Espessura dos Polímeros: PETG e PVC.....	85
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>87</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	88
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os polímeros tipo termoplásticos são submetidos a moldagem por injeção, extrusão, sopro, moldagem por vácuo, técnicas utilizando espuma e fundição para se chegar a um produto moldado com determinado formato desejado. Porém surge uma forma diferente de moldagem de termoplásticos que pode fazer sem a necessidade de moldes, denominada 'Estampagem Incremental' que consiste em desenhar o formato da peça e criar dimensões, em uma fresadora CNC através de um punção cilíndrico com ponta arredondada.

Cada produto novo que é moldado no processamento de polímeros tem problemas de ajustes e correções. Como é incessante a produção de novos produtos pela indústria, há também uma necessidade constante de desenvolver protótipos. Os protótipos são feitos a fim de experimentar uma nova peça ou a sua funcionalidade (KOPAC e KAMPUS, 2005). Os protótipos são frequentemente utilizados como parte do processo de design de produto para permitir que engenheiros e designers tenham a capacidade de explorar alternativas de projeto, fazer testes e confirmar o desempenho antes da produção de um novo produto.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Nesse sentido, os protótipos servem para adaptar as incógnitas específicas, tolerâncias dimensionais e geométricas, ainda presentes no desenho pretendido. No entanto, existem diversas formas de se obter um protótipo e isso é estudado por um ramo da produção automatizada chamada de "Manufatura Aditiva". A manufatura Aditiva têm limitações, é usada apenas com materiais aos quais a tecnologia foi projetada, não sendo usada, por vezes, para materiais de interesse da indústria.

Existe, no entanto, um novo grupo que está sendo estudado para aplicações industriais, chamada de "Estampagem Incremental (EI)" que é baseada em um processo de fabricação de mesmo nome. Essas tecnologias formariam um terceiro grupo de Manufatura Aditiva, chamada de "Conformação de Material" ou também chamada de Tecnologias Formativas.

As possíveis situações em que a sua aplicação apresenta grande vantagem são: produção de peças complexas, redução de tempo, uma tecnologia alternativa e competitiva, a produção de componentes em que a quantidade não justifica o recurso à estampagem convencional, pois tal seria inviável economicamente devido ao custo final do produto. Outra situação é quando um determinado produto está em desenvolvimento e é necessário o fabricar um protótipo para a realização de análises funcionais e de *design*.

A fim de minimizar o uso de ferramentas dedicadas para a estampagem de chapas, no que diz respeito à fabricação de pequenos lotes ou modelos únicos, a estampagem incremental de chapas surge como uma boa alternativa na indústria. O processo de Estampagem Incremental (Incremental Sheet Forming – ISF) é uma inovação tecnológica na área de deformação de chapas. Consiste na conformação de uma geratriz, empregando um pequeno punção, comandado por controle numérico (CNC), que vai deformando aos poucos a peça através de pequenas deformações (SCHAEFFER, 2004; BAMBACH, HIRT e AMES, 2004).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo é comparar PETG com PVC através do processo de Estampagem Incremental de polímeros, ensaio de tração e ensaio Erichsen.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

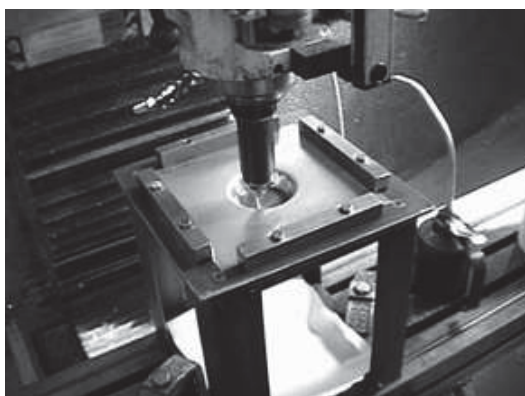
- Plotar a curva CLF – Curva Limite de Falha do PETG e PVC;
- Determinar o limite de conformabilidade do material PETG e PVC;
- Identificar defeitos de estampagem do PETG e PVC;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A técnica de deformar plasticamente chapa metálica por sucessivos incrementos com uma única ferramenta ( FIGURA 1), com movimento nos três eixos cartesianos, foi patenteada por Leszak em 1967 ( LESZAK, 1967 ).

Com essa técnica de deformação plástica pode-se criar um produto com um determinado formato de moldagem sem a utilização de punção e matriz, com geometrias complexas.

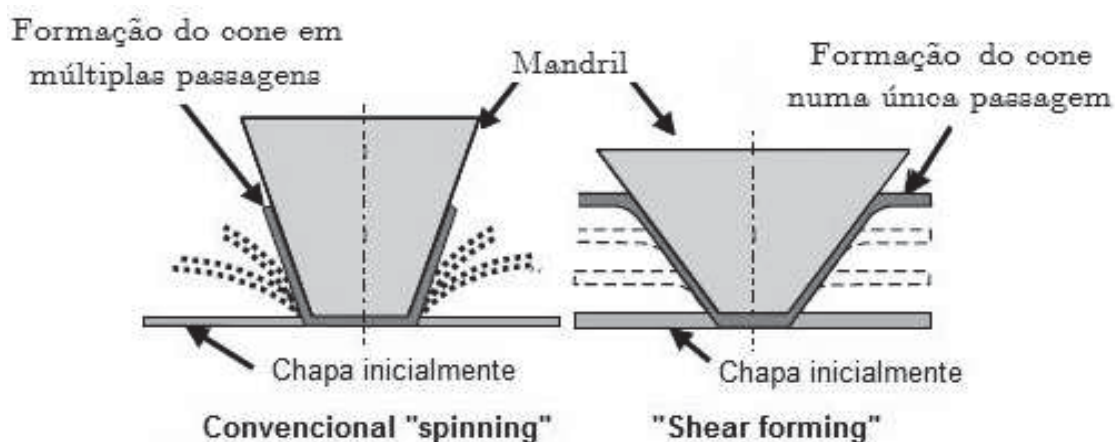
FIGURA 1- ESTAMPAGEM INCREMENTAL POR ÚNICO PONTO



FONTE: LESZAK (1967).

O método de deformação por sucessivos incrementos abrange diversas técnicas que possuem características em comum, incluindo o spinning (rotação) e o shear forming (estampagem de chapas), que são usadas unicamente no caso de produção de peças assimétricas (FIGURA 2).

FIGURA 2 – ETAPAS DE CONFORMAÇÃO DO “SPINNING” E DO “SHEAR FORMING” NA FORMAÇÃO DE GEOMETRIA CÓNICA



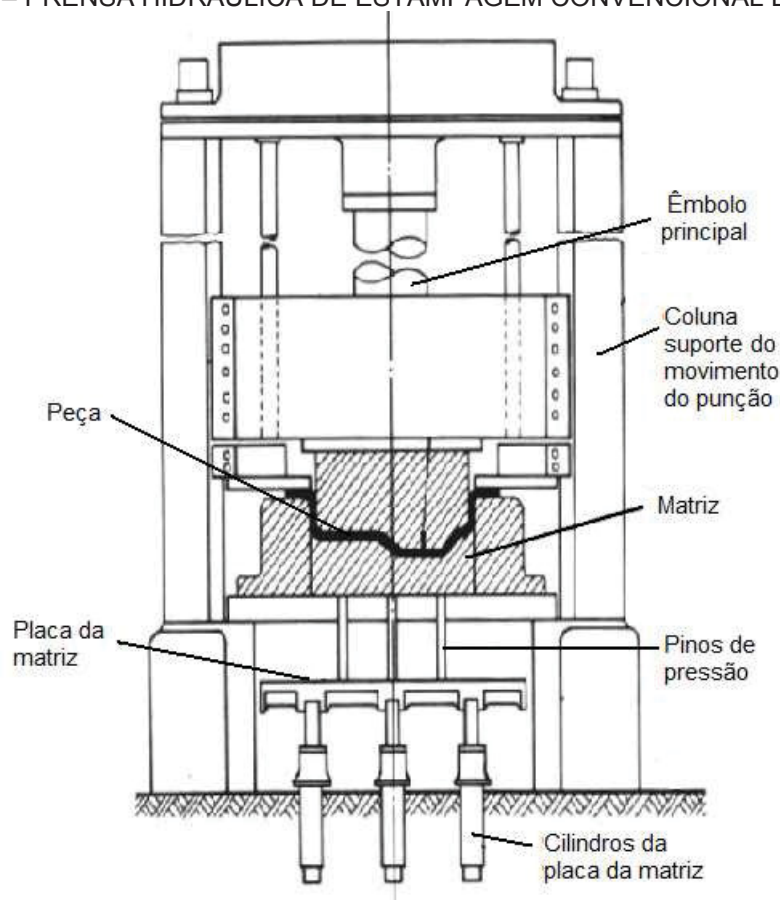
FONTE: JESWIET et al., ( 2005 ).

O modo de deformação de chapa durante a conformação incremental foi iniciado o estudo cientificamente no Japão, e mais tarde, voltou novamente a ser investigado, avaliado e discutido extensamente em artigos científicos, por autores ( EMMENS W.C., A.H. VAN DEN BOOGAARD, 2008).

A alternativa para fabricar um pequeno lote de peças, pela estampagem incremental (ISF, do inglês *“Incremental Sheet Forming”*), assume uma posição nos processos de conformação plástica de peças em chapa, de ser econômico com uma aplicação para baixa produção (SENA, 2009).

Diferenciando-se da estampagem convencional (FIGURA 3), onde a transformação da chapa é feita até em três etapas: corte, dobra ou encurvamento e estampagem profunda, que basicamente é realizada através de uma punção e uma matriz acionados pela força da prensa resultando no formato desejado, a estampagem incremental executa a conformação do componente em múltiplos passos, usando apenas uma ferramenta de geometria simples, podendo produzir formatos simples ou mesmo complexos ( SENA, 2009 ).

FIGURA 3 – PRENSA HIDRÁULICA DE ESTAMPAGEM CONVENCIONAL DE CHAPA



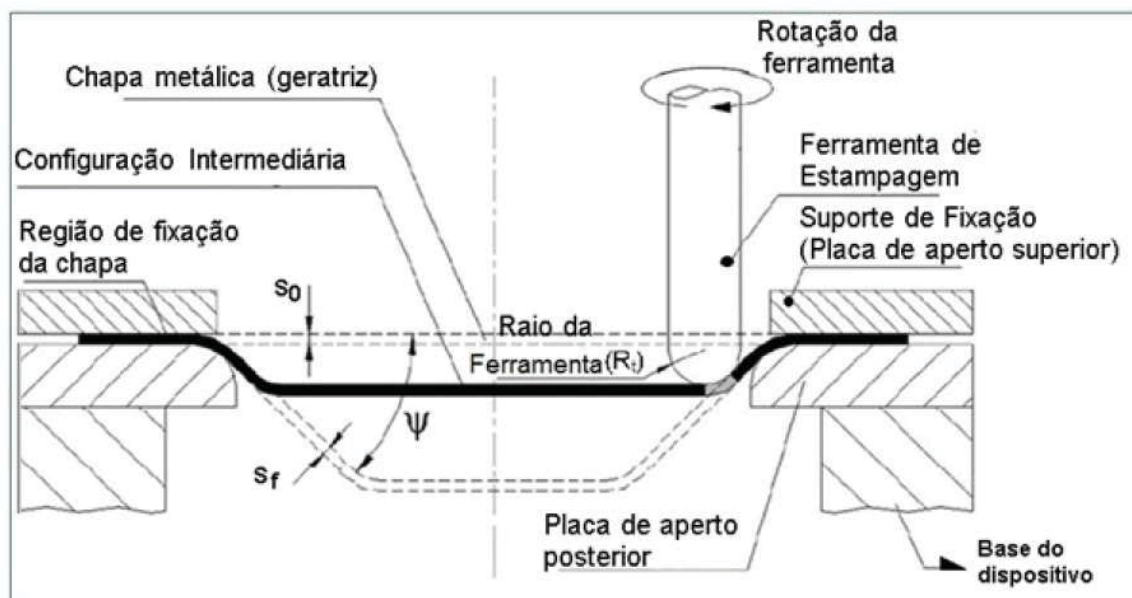
FONTE: SENA ( 2009 ).

A adaptação deste processo a uma máquina CNC consiste em montar um pequeno punção cilíndrico no porta ferramentas rotativo, que vai conformar uma chapa que se encontra encaixada nos bordos. Designado por método de conformação por um único ponto (SPIF, do inglês “*Single Point Incremental Forming*”) ( JESWIET et al., 2005 ).

Na ISF, a chapa a ser conformada (*blank*) é presa em um suporte retangular móvel, independente do formato final da chapa, que pode efetuar movimentos controlados na direção vertical, ou seja, paralelamente ao eixo Z, e nas direções horizontais de X e Y de um sistema CNC. Enquanto a estampagem estiver acontecendo, elementos de fixação distribuídos em torno da chapa evitam que a mesma se movimente, criando assim uma deformação plástica na chapa. Acoplada ao eixo árvore (*spindle*) de um dispositivo CNC, uma ferramenta de cabeça esférica dá o início ao processo de ISF (FIGURA 4) por meio do movimento contínuo sobre a

superfície da chapa e vai, gradativamente, através de incrementos verticais negativos, realizando a conformação (HIRT *et al.*, 2005).

FIGURA 4 - PRINCÍPIO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL



FONTE: MARTINS *et al.*, ( 2008).

A trajetória de deformação da ferramenta é baseada em tecnologia de CNC, que é gerada a partir do sistema CAM. O produto deste processo pode ser feito diretamente de um modelo de CAD de produto acabado, sem qualquer tipo matriz. (SY, 2009).

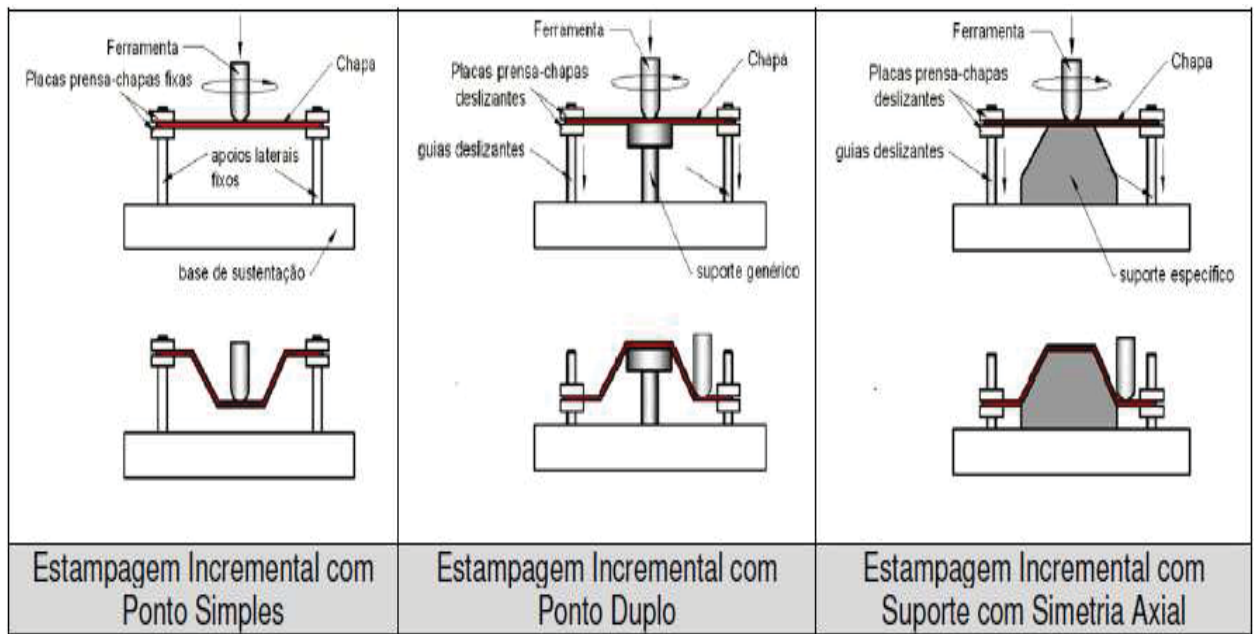
O processo desenvolve-se à temperatura ambiente e requer um centro de usinagem CNC, uma ferramenta de ponta esférica e uma estrutura simples para suporte e fixação da chapa (Marques, 2010).

Comparado com outros processos de estampagem convencionais, a ISF não necessita de matrizes e punções feitos à medida, no qual a fabricação é dispendioso e demorado. E ainda podem ser produzidas as partes ( características especiais do processo ) diretamente a partir dos desenhos CAD e ainda é possível a mudança de geometrias rápidas e de um modo flexível (DA SILVA LOPES, 2013).

## 2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

O processo de estampagem incremental pode ser dividido essencialmente em duas famílias, dependendo do número de pontos de contato entre ferramenta, chapa, e matriz (quando presente). Por isso (FIGURA 5) é possível distinguir a estampagem incremental de ponto simples (*SPIF - Single-point Incremental Forming*), e de ponto duplo (*TPIF- Two Points Incremental Forming*) (ATTANASIO, CERETTI AND GIARDINI 2006).

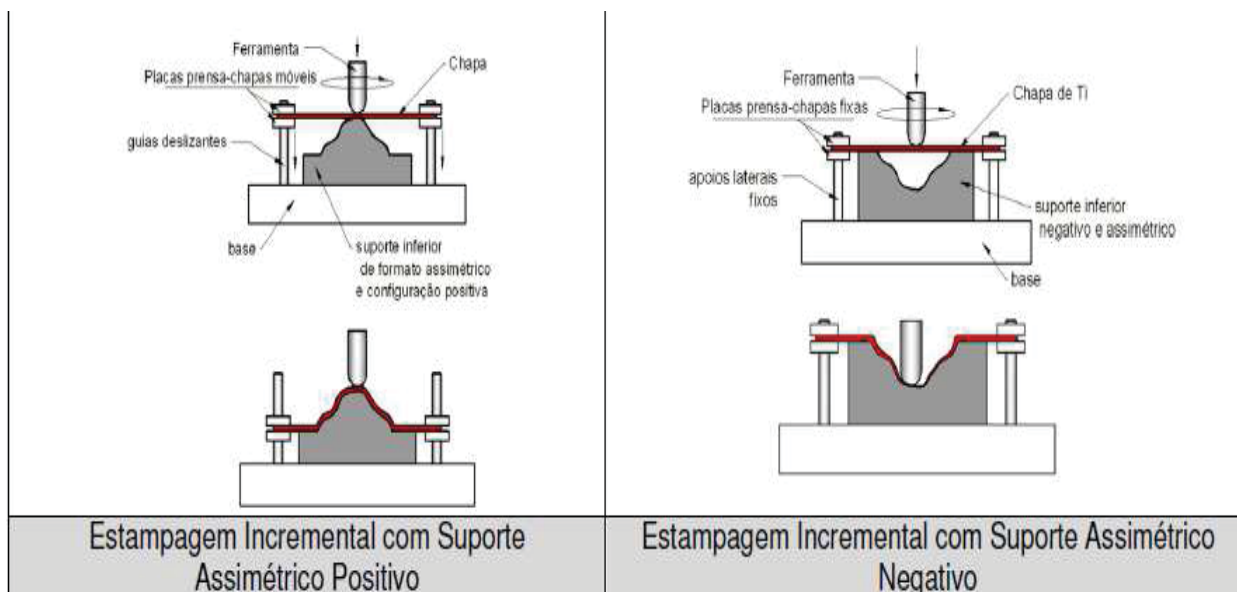
FIGURA 5 - MODALIDADES DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL.



FONTE: ADAPTADO DE CASTELAN ( 2010).

Contudo, para alcançar formas precisas na estampagem incremental, se utiliza suporte inferior específico no formato desejado, podendo ser com simetria axial ou assimétrico, indicado para obtenção de superfícies complexas e protótipos. Este suporte, por sua vez ( FIGURA 6) pode ser positivo (ressalto) ou negativo (cavidade) ( ALLWOOD *et al.*, 2005; HIRT *et al.*, 2005).

FIGURA 6 MODALIDADES DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM SUPORTE



. FONTE: ADAPTADO DE CASTELAN ( 2010).

Palavras e expressões como diferenciação, redução de custos, minimização do ciclo concepção-produção, encurtamento do ciclo de vida (mas também manufatura sustentável) permeiam as estratégias corporativas atuais (MICARI, AMBROGIO, & FILIC, 2007).

Nos últimos cinco anos o processo de estampagem incremental tem tido um grande número de pesquisas relacionadas principalmente ao entendimento dos mecanismos de deformação, da resposta de novos materiais ao processo, da configuração multi-estágio para obtenção de geometrias com maiores ângulos de trabalho e a ampliação da sua gama de aplicações (PATRÍCIO, 2012).

## 2.2 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMPLES – SPIF

A estampagem incremental de ponto simples (ou de ponto único), definida pela sigla em inglês SPIF - *Single-point Incremental Forming*, provou ser viável para a produção de pequenos lotes de peças de chapa, em uma ampla gama de materiais e formas geométricas ( JESWIET *et al.*, 2005).

Os trabalhos de Hussain *et al.*(2009) e Duflou *et al.* (2008), definem o processo SPIF como uma chapa plana de metal, presa num dispositivo móvel, que

desliza paralelamente ao eixo Z, onde é conformado através de uma ferramenta que é um pequeno punção cilíndrico de vários tamanhos: 6mm, 10 e 30mm de diâmetro, podendo ser revestida ou mesmo feita de metal duro (carboneto cementado), Em alguns casos específicos, são necessárias ferramentas plásticas para evitar reações químicas com o material da chapa metálica de modo a melhorar a qualidade da superfície (FIGURA 7).

Pelo fato de não utilizar suporte inferior, esta modalidade é comumente chamada de *dieless* – “sem ferramenta”, como previsto por Leszak em 1967. Por conta dessa característica de conformação “*dieless*”, Hussain *et al.* (2009) e Duflou *et al.* (2008) afirmam em seus trabalhos, que esta modalidade tem potencial para reduzir significativamente o custo de pequenos lotes e protótipos, citado por Jeswiet *et al.* (2005), haja vista que o tempo de espera e custo de ferramentas pode ser evitado.

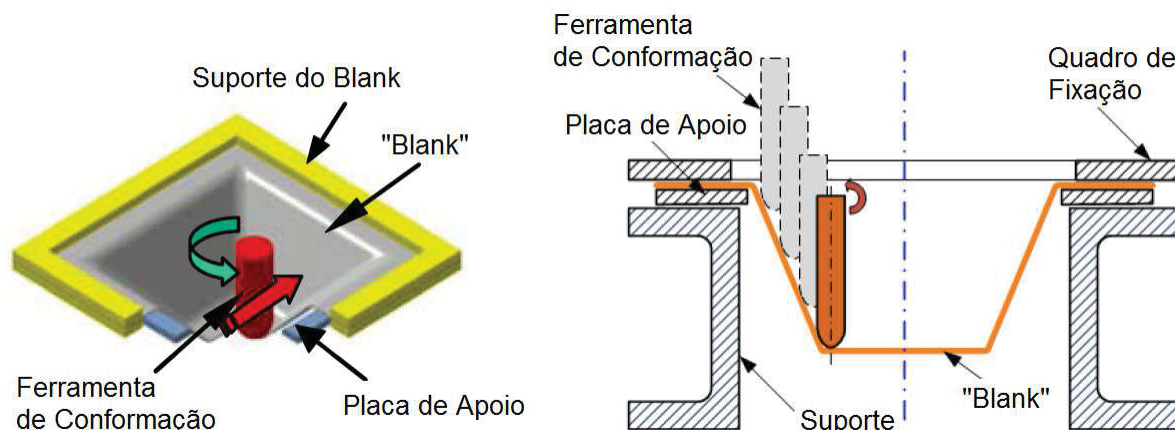
FIGURA 7 – MODELOS DE FERRAMENTAS USADAS NA SPIF



FONTE: JESWIET ET AL., (2005).

Castelan (2010), acrescenta que por não haver ponto de apoio inferior, o formato da peça final é determinado somente pelo deslocamento da ferramenta nos 3 eixos (X, Y e Z). A chapa é fixada em suportes laterais que mantêm altura constante em relação à base. Hussain *et al.* (2007), cita em seus estudos, que estes elementos de fixação, evitam o movimento da chapa durante o processo, culminando na sua deformação plástica. A FIGURA 8 ilustra as características do processo descrito pelos autores citados.

FIGURA 8 - PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO SIMLES (SPIF).



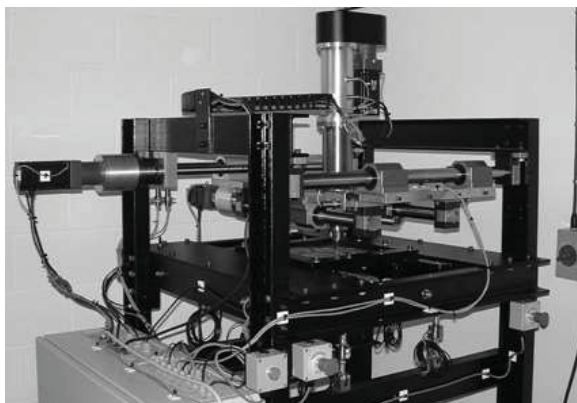
FONTE A: Adaptado de JESWIET et al. ( 2005 ).

FONTE B: SY ( 2009 ).

O desenvolvimento do processo ISF foi facilitado pela introdução de centros de comando numéricos computadorizados – Computer Numerical Control (CNC) – e do desenho auxiliado por computador – Computer-Aided Design (CAD). O centro de usinagem CNC permite a materialização de uma imagem tridimensional através de uma ferramenta e de uma mesa onde se encontra fixo o suporte da chapa. O movimento relativo entre a ferramenta e a chapa dá-se sobretudo de fora para dentro, seguindo uma trajetória pré-definida e provocando, de forma incremental, deformações plásticas localizadas, obtendo como resultado a geometria pretendida (RODRIGUES, 2013).

Fato da ferramenta de deformação ser controlada por CNC, inspirou a criação de máquinas dedicadas, como a desenvolvida por Allwood *et al.* (2005) (FIGURA 9A) na Universidade de Cambridge, e pela empresa japonesa *Amino Corporation*, que atualmente comercializada tal tecnologia. Entretanto, devido a praticidade, estudos a respeito, Cavaler (2010), Castelan (2010) e Daleffe (2008) apontam a utilização de máquinas CNC (FIGURA 9B) na aplicação da estampagem incremental de chapas, enquanto Franzen *et al.* (2009) e Marques (2010) utilizaram a máquina CNC na aplicação da estampagem incremental em polímeros.

FIGURA 9A - MÁQUINA DEDICADA A ISF



FONTE A: ALLWOOD et al. (2005).

9B - CENTRO DE USINAGEM USADO EM ISF



FONTE B: CAVALER (2010).

Em SPIF, o fato de a maior parte do material ser deformado sem qualquer apoio na face oposta, ocasiona problemas de tolerâncias dimensionais relevantes relacionados à precisão no produto final, comparando-o com o modelo CAD projetado. Devido a essa importante observação, estudos foram feitos a respeito (AMBROGIO *et al.*, 2007).

Em face dos estudos sobre SPIF, Câmara (2009) *apud* Jeswiet *et al.* (2005) as principais vantagens do processo: produção de peças diretamente do arquivo CAD; as alterações de projeto podem ser fáceis e rapidamente executadas; aumento da conformabilidade do material; pode ser executado em uma máquina CNC convencional; devido à natureza incremental do processo, as forças de deformação são pequenas; boa qualidade de acabamento de superfície pode ser alcançado; o ferramental (punção/matriz) é de baixo custo e facilmente fabricáveis (ARRUDA, 2009). Além disso, por utilizar menos materiais para construção das ferramentas, os gastos com produtos siderúrgicos, como por exemplo, matrizes, são também reduzidos (HIRT e BAMBACH, 2003; INGARAO *et al.*, 2012);

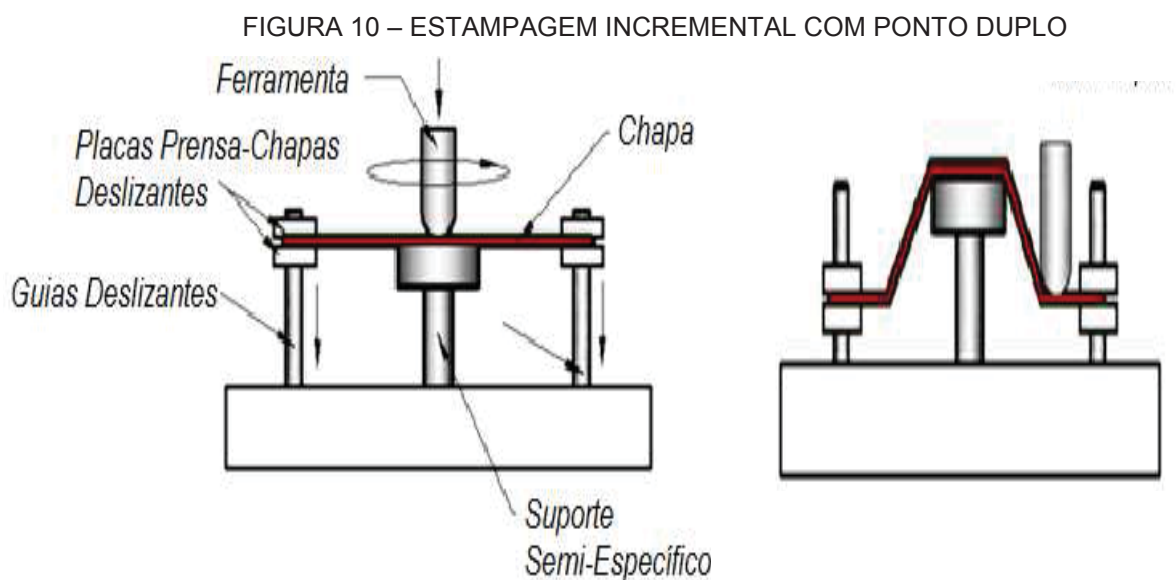
Do mesmo modo, as principais desvantagens do processo de SPIF são listadas por Câmara (2009) *apud* Hirt, Ames and Bambach (2006): maior tempo de conformação, comparado com processo convencional de estampagem profunda; processo limitado a pequenos lotes de produção; a formação de ângulos retos deve ser alcançada através de estratégias multiestágio; menor precisão na geometria, particularmente em raios convexos e em áreas com dobra de arestas; máquinas fresadoras geralmente não são projetadas para grandes carregamentos no eixo

árvore ( spindle), então há perigo da máquina vir a se danificar durante as operações de Estampagem Incremental (CAVALER, 2010).

### 2.3 ESTAMPAGEM INCREMENTAL COM DOIS PONTOS DE APOIO - TPIF

A estampagem incremental de dois pontos de apoio, designada pela sigla inglesa *TPIF – Two Points Incremental Forming*, utiliza além da ferramenta de conformação, um suporte inferior rígido, localizado sob a chapa. Este suporte específico ( quando o suporte tem exatamente o perfil da peça ) e de suporte semi-específico ou chamado de estático ( genérico ), é utilizado para expandir as possibilidades geométricas e também melhorar a precisão das peças, ou seja, a correspondência entre peça virtual e peça real (ATTANASIO et al., 2006).

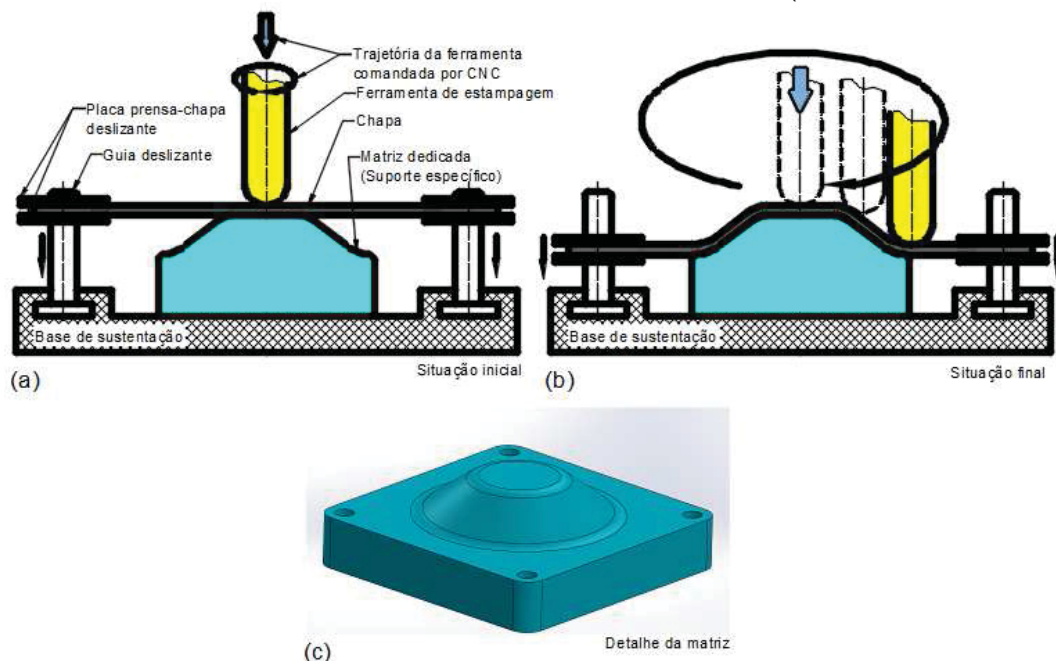
O suporte inferior é particularmente importante para geometrias de forma livre e assimétricas, veja na FIGURA 10, mostra a TPIF utilizando suporte inferior semi-específico ( CASTELAN, 2010 ).



FONTE: CASTELAN ( 2010 ).

A TPIF com Suporte ( matriz ), utiliza os mesmos componentes do processo descrito anteriormente, com exceção do tipo de suporte usado no contato com a superfície inferior da chapa. Em lugar do suporte semi-específico, utiliza-se uma matriz fabricada ( FIGURA 11 ) em materiais maciços de baixo custo, como por exemplo em resina ou em material polimérico. Pode-se dizer que esta técnica de estampagem incremental não é verdadeiramente livre de matriz em comparação com a estampagem incremental de ponto simples (SENA, 2009).

FIGURA 11- ESQUEMA REPRESENTATIVO DA TPIF COM MATRIZ (SUPORTE ESPECÍFICO)



FONTE: SENA ( 2009).

LEGENDA: a) Situação inicial.  
b) situação final.  
c) detalhe da matriz.

Segundo Castelan (2010), outra variação da TPIF é a que utiliza suporte inferior específico e de formato assimétrico, indicado para obtenção de superfícies complexas. Este suporte, por sua vez, pode ser positivo (protuberância), ou negativo (cavidade). O suporte negativo tem a vantagem de tornar o dispositivo mais simples de ser fabricado e utilizado e não há partes móveis (colunas-guia e talas deslizantes). Por outro lado, o suporte positivo apresenta menor retorno elástico do material, contribuindo para sua estabilidade dimensional.

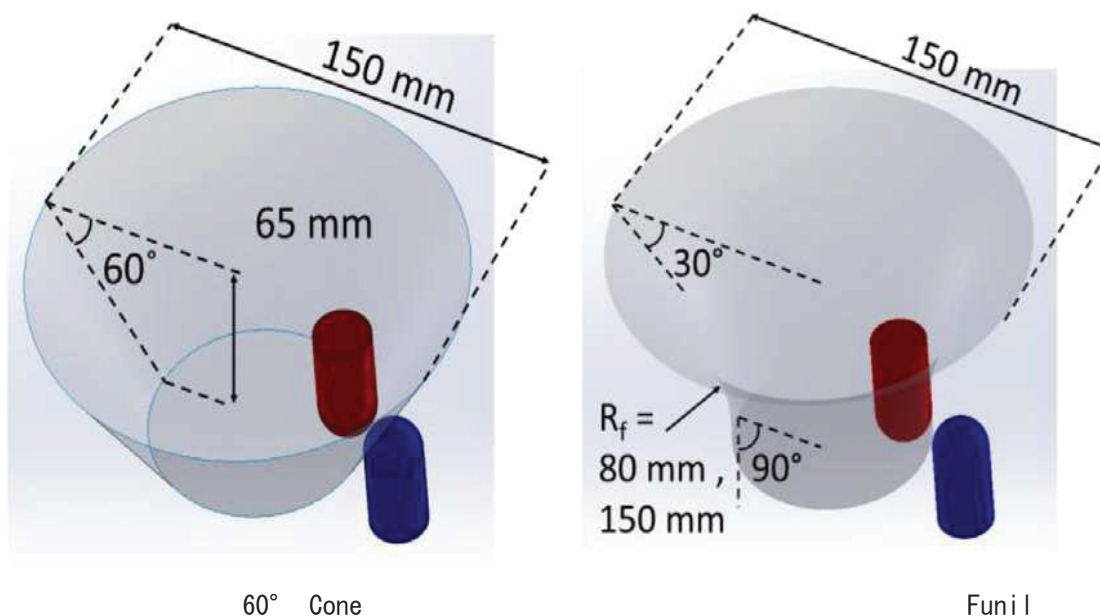
Os métodos tradicionais ( como repuxagem e martelamento ) são limitados a produtos simples ou simétricos e não são capazes de produzirem geometrias complexas. Nas técnicas modernas ( como laser e estampagem incremental assimétrica TPIF), aplicações de CAD/CAM são usadas com frequência, produtos assimétricos com geometria mais complexa podem ser produzidos (ESSA, 2011).

#### 2.4 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE DUPLA FACE – DSIF

A estampagem incremental de dupla face (DSIF) utiliza duas ferramentas em ambos os lados da chapa, uma ferramenta dá o formato na chapa e a outra ferramenta suporta ou aperta a chapa localmente. Segundo Zhang, Moser et al. (2015), Xu et al. (2014), Malhotra et al. (2012), o DSFI apresenta vantagens significativas em relação ao SPIF, que é a conformabilidade e a precisão geométrica melhorada. Atualmente, superfícies termoplásticas para a prototipagem e substituição em interiores de automóveis, fabricação de baixo volume em interiores de aeronaves Digges et al. (2008), e embalagens são tipicamente fabricados através de moldagem por injeção. O custo reduzido de energia térmica e ferramentas em estampagem incremental de polímero pode reduzir o custo nestas aplicações.

Zhang et al. (2015), Xu et al. ( 2014 ), Malhotra et al. ( 2011), uma máquina DSIF com uma área de 250 mm<sup>2</sup> e duas células de carga montadas em ferramentas para conformação da chapa, foi utilizado para formar PVC de 1,6 mm de espessura da chapa com ferramentas de 10 mm de diâmetro. Uma graxa à base de PTFE foi usado como lubrificante na interface folha-ferramenta com uma taxa de alimentação da ferramenta de 10 mm / s. Inicia o DSFI com um cone de ângulo de 60° de parede e vai chegando até a forma de funil, com raio de curvatura  $R_f = 80\text{mm}$  e  $R_f = 150\text{mm}$  e mudando continuamente ângulo de parede de 30° a 90° (FIGURA 12), fora formados com DSIF utilizando  $\Delta z = 1,2\text{ mm}$  e 1,8 mm.

FIGURA 12 - ESQUEMA DE PEÇAS FORMADAS DE CONE E FUNIL

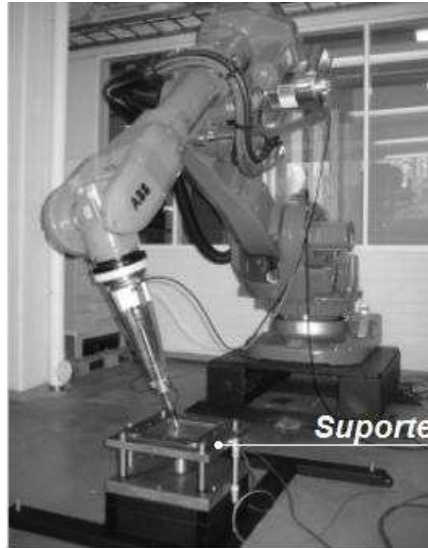


FONTE: MALHOTRA et al. (2010).

## 2.5 ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS POR MEIO DE ROBÔS

Lamminen (2005) descreve um estudo de estampagem incremental com robô industrial em uma superfície convexa, usando um braço alcance de 2,55 m e força máxima de 1750 N, um suporte para a fixação da chapa (FIGURA 13). Conforme há a deformação da chapa causada pelo movimento do braço, o suporte se movimenta verticalmente para baixo impulsionado apenas pela gravidade. Todo o movimento do robô é controlado por um dispositivo de controle CNC. O programa contém instruções predeterminadas para controlar o robô, aproveitando os seis graus de liberdade, que são necessários para colocar a ferramenta em um ângulo adequado em cada ponto. A ferramenta é colocada de tal forma que a força de deformação é dirigida perpendicularmente contra a direção normal da espessura da chapa de metal. As instruções para controlar o caminho do movimento do dispositivo de prensagem são geradas com base no modelo CAD 3D que define a forma tridimensional da peça (LAMMINEN et al., 2005).

FIGURA 13 – ROBÔ USADO NA ISF



FONTE: LAMMINEN et al. ( 2005 ).

## 2.6. PARÂMETROS DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Dos parâmetros a serem ajustados na Estampagem Incremental de Chapas, Hirt *et al.* ( 2005) cita em seu trabalho como sendo os mais importantes:

- a) Ferramenta de estampar;
- b) Parâmetros do material e a espessura da chapa;
- c) Estratégia de trajetória da ferramenta;
- d) Passo vertical ( $\Delta Z$ );
- e) Rotação da ferramenta;
- f) Velocidade de avanço da ferramenta ( $V_{fh}$ );

### 2.6.1 Ferramenta de Estampar

A ferramenta deve ser fabricada com material rígido e com propriedades tribológicas apropriadas, já que estará em contato com a chapa a ser deformada (DUFLOU et al., 2007). As ferramentas utilizadas na estampagem incremental podem ter as pontas hemisféricas ou esféricas. O diâmetro da ponta da ferramenta pode variar e é parâmetro fundamental do processo, pois está diretamente relacionado com a força atuante e com a geometria a ser obtida (DUFLOU et al., 2007).

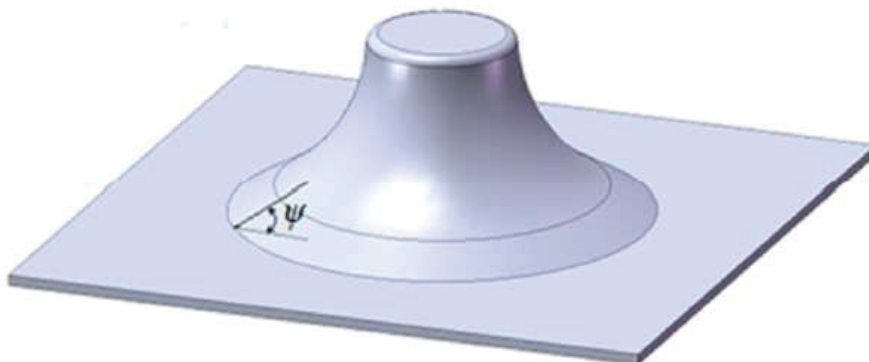
O diâmetro da ferramenta também afeta o acabamento e o tempo de fabricação. Segundo Silva et al. (2011), a diminuição do raio da ferramenta também resulta na diminuição do razão de triaxialidade de tensões. A escolha do diâmetro da ferramenta deve estar de acordo com os detalhes da geometria da peça a ser fabricada.

## 2.6.2 Parâmetros do Material e a Espessura da Chapa

Os parâmetros do material que mais influenciam a estampagem incremental são o ângulo máximo ( $\psi_{\text{máx}}$ ) de estampagem, a curva limite à estrição (CLE), e a curva limite à falha (CLF), os quais permitem quantificar o nível de deformação na estampagem.

O ângulo máximo ( $\psi_{\text{máx}}$ ) de estampagem, é o maior ângulo obtido sem que ocorra o fenômeno de fratura na peça. O valor do ângulo máximo ( $\psi_{\text{máx}}$ ) de estampagem depende do material da chapa. O  $\psi_{\text{máx}}$  é determinado através de geometrias cônicas truncadas. Normalmente, o ângulo inicial de estampagem é  $\psi = 30^\circ$  e aumenta progressivamente em função da profundidade  $\psi(h)$ , até atingir o ângulo máximo ( $\psi_{\text{máx}}$ ) de estampagem, onde ocorre o início da fratura (Figura 14).

FIGURA 14 – DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO MÁXIMO DE ESTAMPAGEM POR TRAJETÓRIA VARIÁVEL



FONTE: CENTENO et al. ( 2012).

Em publicações, (KOPAC E KAMPUS, 2005) *apud* (SILVA, 2011) descrevem que 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, estudos recentes apontam para um ângulo máximo de parede de chapa de 65°. Ultrapassando este valor, se torna muito frequente a ruptura ou, no mínimo, uma diminuição drástica da espessura da chapa, causando uma baixa resistência mecânica localizada.

O ângulo da superfície da chapa deformada é também importante na conformação incremental assimétrica. Um dos pontos que se deve ter em atenção ao conceber a peça no software CAD é a obrigatoriedade do ângulo de parede da peça desenhada ser inferior ao ângulo de conformação permitido pelas características do material da chapa durante a deformação (JESWIET, 2005) *apud* (SENA, 2009).

O ângulo máximo de estampagem é determinado por uma relação entre a espessura da chapa e seu ângulo de conformação, que é expresso pela equação (1) matemática chamada de lei dos senos ( FIGURA 15 ):

$$s_1 = s_0 * \text{sen} (90 - \psi) \quad (1)$$

Onde:

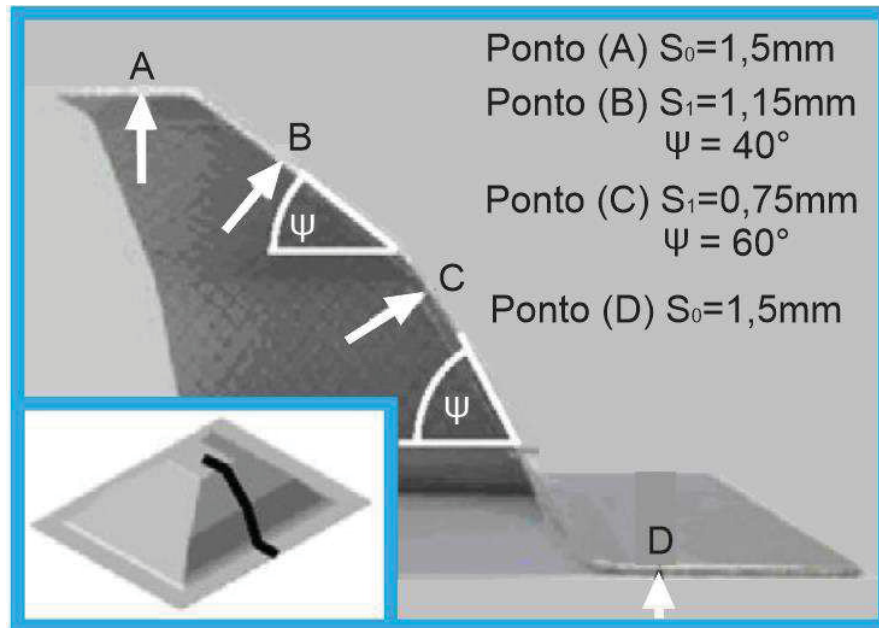
$s_0$ : Espessura original da chapa;

$s_1$ : Espessura da chapa medida em um determinado estágio do processo de conformação;

$\psi$ : Ângulo de inclinação da parede da chapa neste mesmo ponto;

Entretanto, a lei de senos não prevê como ocorre a variação de espessura ao longo de processo de estampagem.

FIGURA 15 - REDUÇÃO DA ESPESSURA DE PAREDE



.FONTE: (Editado de JUNK et al., 2003), apud (SILVA, 2011)

A espessura da chapa a ser empregada na estampagem incremental é limitada pela capacidade da máquina. À medida que a espessura aumenta, a força de contato entre ferramenta e peça sobe e o consequente esforço sobre os mancais da máquina-ferramenta também aumenta. Quanto maior for a espessura inicial da chapa maior será o ângulo máximo ( $\psi_{\text{máx}}$ ) de estampagem e, conseqüentemente, maior será a conformabilidade, uma vez que existe maior quantidade de material para deformar (JESWIET, 2005a; HAM e JESWIET, 2006).

### 2.6.3 Estratégia de Trajetória da Ferramenta

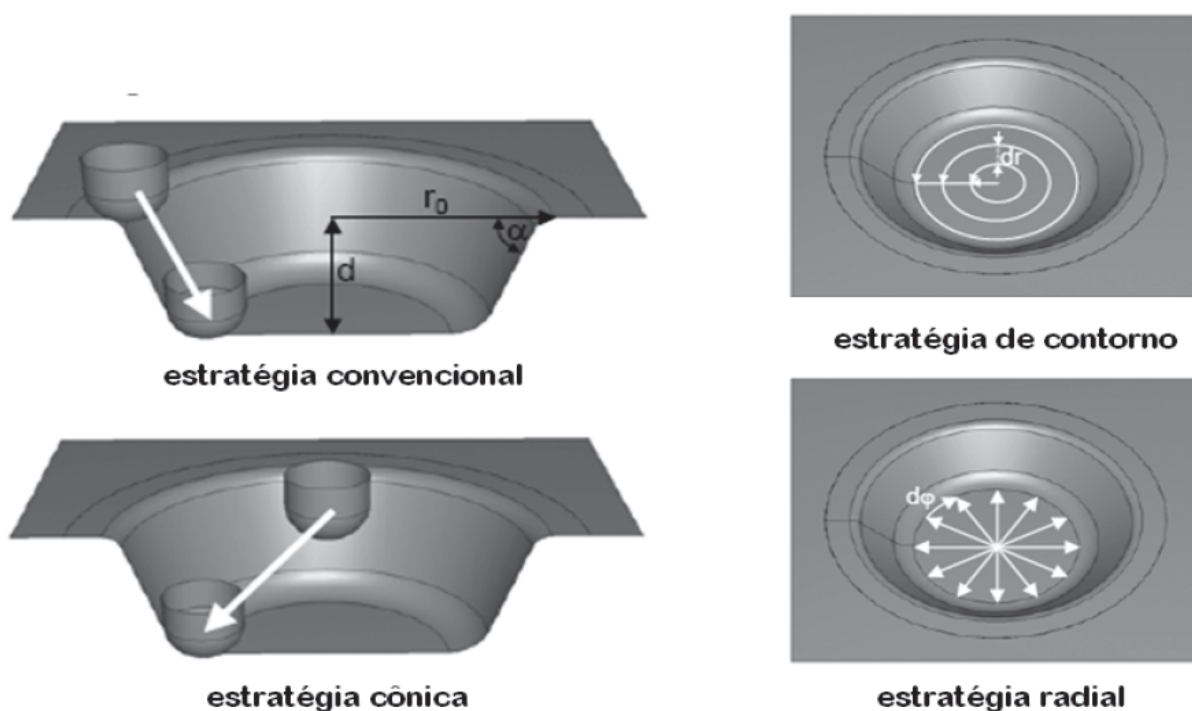
Foram investigadas em literatura diferentes estratégias de trajetória da ferramenta, que combinada com outros parâmetros, pode melhorar a distribuição da espessura da chapa e evitar o rompimento da chapa em ângulos de parede iguais ou próximos a  $90^\circ$ , além diminuir o retorno elástico (*spring back*). Kopac et al. (2005) observou-se que a direção da trajetória da ferramenta influencia a

conformidade geométrica, semelhança ao modelo CAD original e rugosidade superficial.

As trajetórias usadas pelos sistemas CAM são específicas para a estampagem, e que ainda não existem trajetórias definidas especificamente para estampagem incremental (RAUCH *et al.*, 2009; ROBERT *et al.*, 2012). Nos trabalhos de Bambach *et al.* (2003, *apud* CASTELAN, 2010), são apresentados quatro estratégias de trajetória da ferramenta (FIGURA 16):

- a) *Convencional (paralela) de contorno*: estratégia em que a movimentação da ferramenta é feita de fora para dentro, ou seja, do maior para o menor diâmetro do cone, descrevendo círculos paralelos decrescentes;
- b) *Cônica de contorno*: a ferramenta move-se do centro para fora, através de incrementos de diâmetro e de passo de profundidade;
- c) *Convencional radial*: de fora para dentro, em direções radiais até o centro da chapa;
- d) *Cônica radial*: de dentro para fora, em direções radiais até a extremidade do desenho da peça.

FIGURA 16 - ESTRATÉGIAS DIFERENCIADAS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL



FONTE: BAMBACH *et al.* (2003).

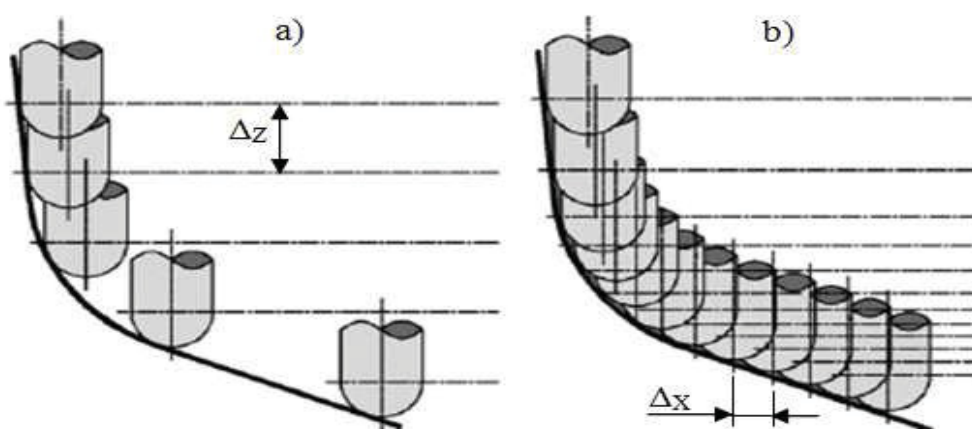
De acordo com Castelan (2010), as estratégias radiais provocam uma considerável redução de espessura no centro da peça além de levar tempo bem maior para serem executadas em relação a estratégia convencional de contorno. Já a estratégia cônica de contorno, que é muito rápida na execução, apresenta um alto efeito de retorno elástico (*spring back*), causando discrepância geométrica entre modelo digital e peça acabada. Para o Attanasio et al. (2006), além dos dados descritos acima, a determinação do tipo de estratégia depende da geometria do produto final, das opções disponíveis no *software* CAM e do tipo de máquina CNC utilizada.

#### 2.6.4 Passo Vertical - $\Delta Z$

A profundidade de passo vertical se refere à distância entre cada passe realizado pela ferramenta na direção do eixo Z da máquina CNC, ou seja, na direção da profundidade da peça. É um parâmetro que influencia significativamente a moldabilidade da chapa segundo Castelan (2010).

Uma consequência do passo ( $\Delta Z$ ) é o surgimento de irregularidades na superfície da chapa, resultado do movimento da ferramenta. Para reduzir os efeitos dos picos e vales e também reduzir o tempo de execução do processo, usa-se um passo ( $\Delta Z$ ) variável, ilustrado na FIGURA 17. Segundo Duflou et al. (2007) quando aumenta o passo ( $\Delta Z$ ) aumenta a força da ferramenta sobre a chapa.

FIGURA 17 – SUPERFÍCIE CONFORMADA COM PASSO ( $\Delta Z$ )



FONTE: ATTANASIO et al. (2006).

LEGENDA: a) Passo ( $\Delta Z$ ) constante.

b) Passo ( $\Delta Z$ ) variável, mantendo a mesma distância entre os pontos de contato ( $\Delta x$ ) com a chapa.

Este controle do passo ( $\Delta Z$ ) variável é chamado *Constant Cusp Finishing*, que é continuamente calculado para compensar a inclinação da geometria e manter a rugosidade (altura da crista) constante. Isto produz um acabamento uniforme em toda a superfície estampada (CASTELAN, 2010).

Do ponto de vista de tensões, foi observada uma distribuição média de tensões negativas debaixo da ferramenta e nos elementos próximos. Concluíram que ao diminuir  $\Delta Z$ , o valor de tensões ao longo da parede também diminui, o que permite uma maior deformação sem ocorrer fratura (DA SILVA LOPES, 2013).

#### 2.6.5 Rotação da Ferramenta

Dentro dos parâmetros que envolvem a estampagem incremental, Jeswit *et al.* (2005) ressaltam uma importante diferença na forma como a ferramenta se move enquanto há deformação da chapa.

a) Deslocamento da ferramenta sem rotação ( $v_c = 0$  rpm) do eixo árvore.

A operação em condição de rotação zero no eixo-árvore, dependendo da máquina, pode ocasionar esforços no cabeçote, já que a sua natureza é voltada à usinagem.

b) Deslocamento da ferramenta com rotação do eixo árvore, variando a velocidade da ferramenta ( $v_c$ ). Controlando a velocidade da ferramenta ( $v_c$ ), se controla o aquecimento da chapa durante a deformação. Com o aumento da temperatura da chapa, devido ao atrito entre a ferramenta e a chapa, se consegue aumentar a conformabilidade da chapa. Contudo, o aumento da ferramenta resulta em um desgaste maior das superfícies, interferindo na rugosidade da chapa, além de queimar o lubrificante utilizado (JESWIET *et al.*, 2005).

c) Deslocamento da ferramenta com rotação do eixo árvore livre, pode-se adaptar um suporte com rolamentos para a ferramenta ao eixo-árvore. Esta técnica foi adotada nos estudos da estampagem incremental em chapas de PVC (Franzen *et al.*, 2009), justamente para evitar o atrito entre a ferramenta e a chapa de PVC dos testes.

### 2.6.6 Velocidade de Avanço - $V_{fh}$

Os valores de velocidade de avanço da ferramenta ( $V_{fh}$ ) encontrados na literatura variam de 500 a 2000 mm/min (DUFLOU *et al.*, 2008; ATTANASIO *et al.*, 2006; HUSSAIN *et al.*, 2009; INGARAO, 2012; AMBROGIO *et al.*, 2012). Rauch *et al.* (2009) comprovaram que quanto maior o avanço ( $V_{fh}$ ), maior será o erro de profundidade (retorno elástico) da chapa conformada, em relação ao modelo CAD correspondente.

## 2.7 ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES

Segundo Schaeffer (2004), as deformações podem ser caracterizadas por diversas formas:

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

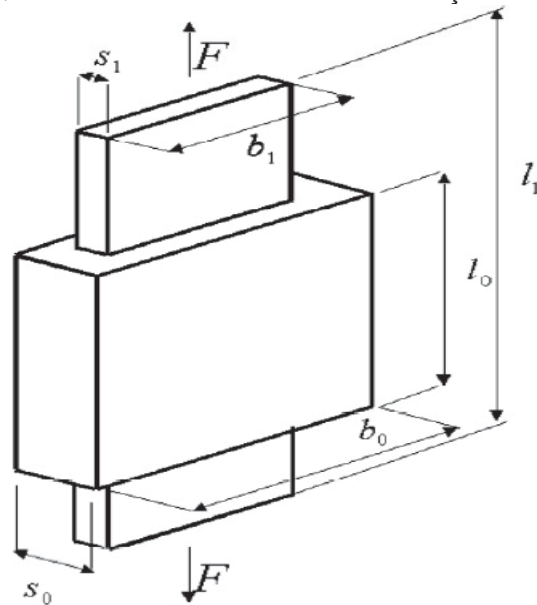
As deformações absolutas ou deformações normais, são medidas pela alterações da distância linear entre dois pontos, como uma fração de sua distância original.

As deformações relativas ou percentagens de deformações, são deslocamentos relativos de um ponto no material, por unidade de comprimento.

As deformações verdadeiras são os parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação, pode fornecer informações importantes, como situação das tensões internas, possibilidades de reduzir etapas de processo, conhecimento sobre o limite máximo de deformações etc (SCHAEFFER, 2004).

Na FIGURA 18, mostra as principais geometrias em uma peça que sofre tração convencional e que serve de base para o esclarecimento das principais deformações.

FIGURA 18 – DIMENSÕES ESQUEMÁTICAS NUM ENSAIO DE TRAÇÃO



FONTE: SCHAEFFER ( 2004).

LEGENDA:  $l_0$  [mm]= Comprimento inicial.  $l_1$  [mm]= Comprimento final.  
 $b_0$  [mm]= Largura inicial.  $b_1$  [mm]= largura final.  
 $s_0$  [mm]= Espessura inicial.  $s_1$  [mm]= Espessura final.

A deformação absoluta no comprimento =  $\Delta l$  ( 2 ) é definida por:

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad [mm] \quad (2)$$

A deformação absoluta na largura =  $\Delta b$  ( 3 ) é definida por:

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad [mm] \quad (3)$$

A deformação absoluta na espessura =  $\Delta s$  ( 4 ) é definida por:

$$\Delta s = s_1 - s_0 \quad [mm] \quad (4)$$

A deformação relativa no comprimento =  $\epsilon_l$  (  $\epsilon_1$  ) - ( 5 ) é definida por:

$$\epsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

A deformação relativa na largura =  $\epsilon_b$  (  $\epsilon_2$  ) - ( 6 ) é definida por:

$$\epsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

A deformação relativa na espessura =  $\epsilon_s$  (  $\epsilon_3$  ) - ( 7 ) é definida por:

$$\epsilon_s = \frac{s_1 - s_0}{s_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

A deformação verdadeira no comprimento =  $\varphi_l$  ( 8 ) é calculada por:

$$\varphi_l = \ln \left( \frac{l_1}{l_0} \right) \quad (8)$$

A deformação verdadeira na largura =  $\varphi_b$  ( 9 ) é calculada por:

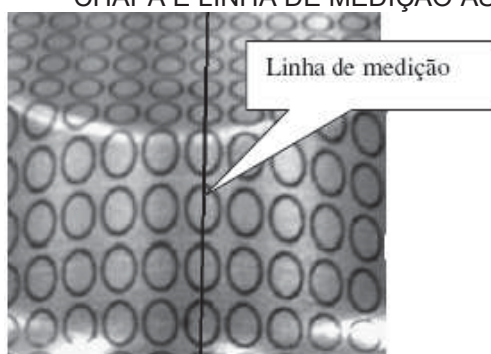
$$\varphi_b = \ln \left( \frac{b_1}{b_0} \right) \quad (9)$$

A deformação verdadeira na espessura =  $\varphi_s$  ( 10 ) é calculada por:

$$\varphi_s = \ln \left( \frac{s_1}{s_0} \right) \quad (10)$$

O método mais utilizado na determinação dos pontos de deformação no diagrama limite de conformação, consiste na técnica de impressão de círculos na superfície da chapa. Após a deformação da chapa com uma determinada forma geométrica, traça-se uma linha de medição sobre a superfície deformada, e a partir das dimensões dos círculos ao longo da linha de medição e com base na expressão que define a deformação, calculam-se os pontos para o diagrama limite de conformação. A FIGURA 19 mostra uma chapa deformada com círculos impressos e a linha de medição.

FIGURA 19 – TÉCNICA DE ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA CHAPA E LINHA DE MEDIÇÃO ASSINADA



FONTE: AMBROGIO et al. ( 2008 ).

As deformações verdadeiras que ocorrem na chapa podem ser medidas através do exame de visioelasticidade, através dos pequenos círculos alinhados sobre a chapa (FIGURA 20).

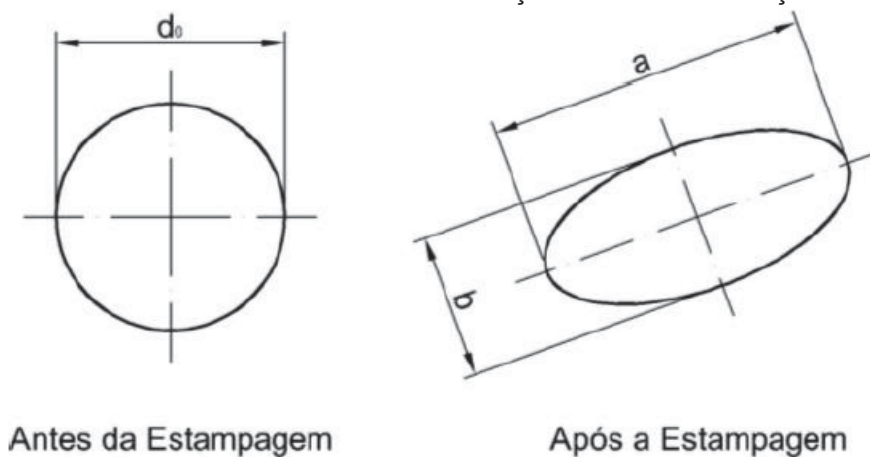
FIGURA 20 – EXEMPLO DE DEFORMAÇÕES EM UM COMPOENETE ESTAMPADO



FONTE: CAVALER ( 2010 ).

Depois de realizado o processo de estampagem avalia-se as deformações desta rede, sendo a elipse (FIGURA 21) a geometria a ser medida após a estampagem (CASTELAN, 2010).

FIGURA 21 – PRICÍPIO DA DETERMINAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES



FONTE: SCHAEFFER ( 2004 ).

Deste modo, as três deformações principais são calculadas por:

a)  $\varphi_1$  (11) é a deformação verdadeira na direção do comprimento da elipse (maior deformação - Figura 21)

$$\varphi_1 = \ln \left( \frac{a}{d_0} \right) \quad (11)$$

b)  $\varphi_2$  (12) é a deformação verdadeira na direção da largura da elipse (menor deformação - Figura 21):

$$\varphi_2 = \ln \left( \frac{b}{d_0} \right) \quad (12)$$

c)  $\varphi_3$  (13) é a deformação verdadeira na espessura:

$$\varphi_3 = \ln \left( \frac{S_1}{S_0} \right) \quad (13)$$

Segundo as condições de incompressibilidade, que estabelece que as deformações plásticas ocorrem a volume constante Marciniak et al ( 2002 ), ou seja, o somatório das deformações principais nas três direções é igual a zero ( $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$ ), chama-se essa definição de Lei da Constância de Volume, no qual é provada matematicamente pelas equações 14 a

$$V_f = V_0 \quad (14)$$

$$l_1 \cdot b_1 \cdot s_1 = l_0 \cdot b_0 \cdot s_0 \quad (15)$$

$$\ln \left( \frac{l_1}{l_0} \right) + \ln \left( \frac{b_1}{b_0} \right) + \ln \left( \frac{s_1}{s_0} \right) = \ln (1) \quad (16)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (17)$$

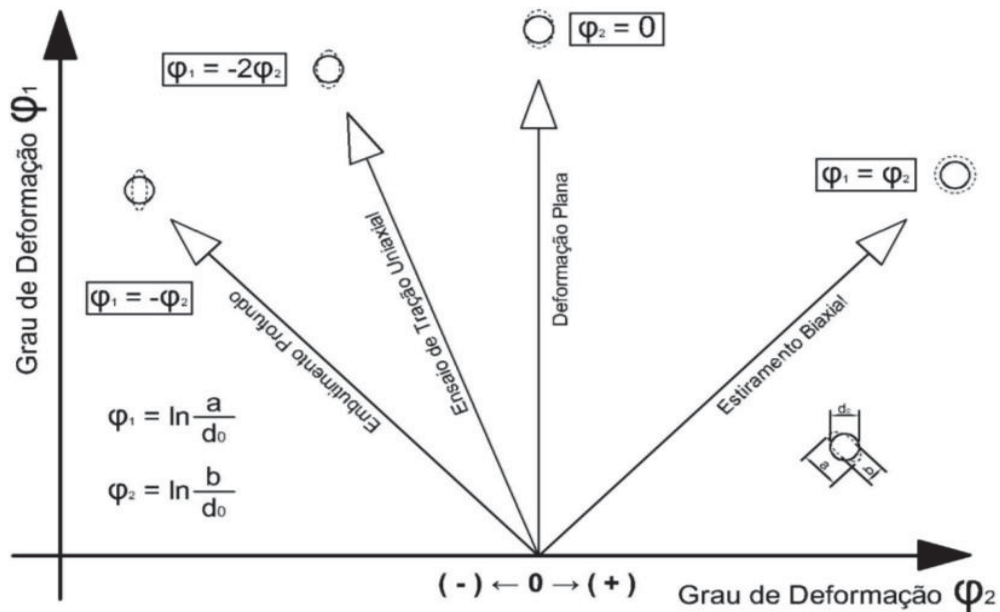
Ou:

$$\varphi_3 = - (\varphi_1 + \varphi_2) \quad (18)$$

Essas deformações principais caracterizam a zona plástica de deformações, ou zona própria para conformação e definem a capacidade de uma chapa sofrer deformação sem que haja falha durante o processo de conformação.

As medições na rede deformada levam a uma relação entre as deformações principais. Na FIGURA 22, observa-se como podem ser classificadas as deformações em função das solicitações que ocorreram durante a estampagem.

FIGURA 22 – TIPOS DE DEFORMAÇÃO EM CHAPA METÁLICA



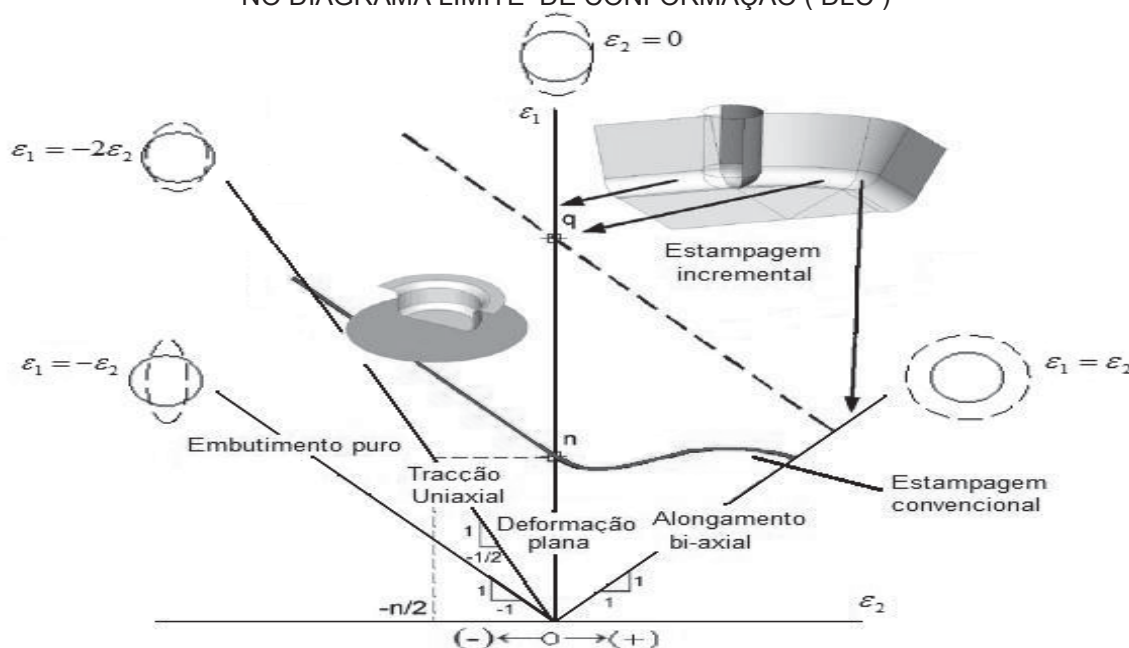
FONTE: SCHAEFFER ( 2004 ).

Para cada modo de deformação, seja ele alongamento biaxial, deformação plana, tração ou embutimento profundo existe uma relação entre as componentes principais de deformação. No embutimento profundo é verificado que a deformação é positiva na direção do comprimento ( $\varphi_1$ ) e negativa no sentido da largura ( $\varphi_2$ ), e na direção da espessura ( $\varphi_3$ ). A tração é caracterizada por ser uniaxial, apresenta alongamento na direção do comprimento e compressão no sentido da largura e espessura. No caso da deformação plana, a deformação principal na direção da largura é igual a zero ( $\varphi_2 = 0$ ), ocorre tração na direção do comprimento e compressão no sentido da espessura. Por fim, no alongamento biaxial, as deformações na direção do comprimento e da largura, são de tração e compressão na espessura, com o dobro da intensidade em relação à tração.

A deformação da chapa, reduz (afina) a espessura do material até aparecer a fratura e sendo que cada material tem um nível máximo de deformação. Através da curva limite de conformação (CLC) é possível verificar qual é a combinação das deformações principais que causarão o ruído. A FIGURA 23, mostra uma curva típica de estampagem convencional para uma chapa metálica. A

área abaixo da curva de estampagem convencional e curva de estampagem incremental corresponde à zona de segurança onde não ocorre fratura, a área acima da curva representa a zona de ruptura do material.

FIGURA 23 – DIFERENTES TIPOS DE DEFORMAÇÕES REPRESENTADAS NO DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO ( DLC )



FONTE: MARTINS et al. ( 2008 ).

Legenda:  $\varphi_1 = \epsilon_1$ ;  $\varphi_2 = \epsilon_2$ ;  $\varphi_3 = \epsilon_3$ ;

Jeswiet et al. ( 2005 ) realizaram ensaios para determinar a curva limite de conformação ( CLC ) para a estampagem incremental assimétrica por único ponto, e constataram que as deformações máximas antes da ocorrência de rompimento estão localizadas na zona considerada de fratura ( acima da curva ) da estampagem convencional.

## 2.8 CONFORMABILIDADE

A conformabilidade de um material caracteriza o seu nível máximo de deformação, durante um processo estampagem, sem que ocorra estricção ou fratura (Rodrigues et al 2010). Este parâmetro pode ser quantificado, em estampagem incremental de chapa, através do ângulo máximo de estampagem e dos limites de conformabilidade.

Nos processos de deformação plástica o limite de conformabilidade pode ser caracterizado pelo aparecimento da fratura através da curva limite de falha (CLF), ou

da estrição através da curva limite de estampagem à estrição (CLE), respetivamente (DA SILVA LOPES, 2013).

O ângulo máximo de estampagem ( $\psi_{\text{máx}}$ ) é o maior ângulo que é possível atingir sem que ocorra estrição ou fratura na peça a ser fabricada. Os limites de conformabilidade podem ser definidos e esboçados à estrição e à fratura, e permitem quantificar a conformabilidade da chapa. A representação destes limites no plano das extensões principais tem o nome de diagrama limite de conformabilidade.

Neste diagrama encontra-se a curva limite de conformação (CLC), que define a deformação admissível a partir da qual surge o fenómeno de estrição, a curva limite de falha (CLF) que definem a deformação plástica a partir da qual surge fratura na chapa. A curva limite de falha (CLF) define, no plano das deformações principais, a deformação limite admissível a partir da qual se dá a ruptura da chapa (MARTINS et al., 2014).

## 2.9 APLICAÇÕES

A utilização do processo na fabricação de componentes em chapa por estampagem incremental apresenta as seguintes aplicações:

- Na criação de protótipo e também para reconstruir peças antigas, como, por exemplo, peças automotivas e até mesmo para obter próteses.
- Na fabricação de peças para reposição ou produção de pequenos lotes de componentes, isto quando as peças já não são produzidas pelos fabricantes de origem, ou então a fabricação pelo processo convencional de estampagem apresenta um custo elevado.
- Na manufatura aditiva, nas etapas de desenvolvimento e concepção de novos produtos quando não é suficiente a simulação computacional e então o fabrico de um protótipo auxilia a análise funcional e de forma do produto.
- Em aplicações da medicina, em que este método permite o fabrico de próteses com as características exclusivas de cada paciente.

## 2.10 ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM POLÍMEROS

Shaw ( 1980 ), demonstrou as aplicações de polímeros em componentes com o objetivo de analisar o potencial da conformabilidade dos vários polímeros.

Neves (2008), processo de estampagem incremental com matriz total um capacete utilizando chapa de PC, demonstrando assim uma aplicação deste processo em polímeros veja na FIGURA 24.

FIGURA 24- PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL



FONTE: NEVES ( 2008 ).

LEGENDA: a) Com Matriz Total numa Chapa de PC.  
b) Capacete em PC.

Le et al. (2008), através do processo de estampagem incremental de chapas de polipropileno, peças com diferentes geometrias, demonstrando o potencial do polipropileno neste tipo de deformação plástica, veja na FIGURA 25.

FIGURA 25- EXEMPLOS DE ALGUMAS GEOMETRIAS POSSÍVEIS NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE POLIPROPILENO



FONTE: LE ( 2008 ).

Franzen et al. ( 2008 ) executou com sucesso os ensaios de estampagem incremental em chapas poliméricas de PVC.

Martins et al. ( 2009 ) estudou cinco tipos de polímeros, Polioximetileno (POM), polietileno (PE), poliamida (PA), policloreto de vinila (PVC) e policarbonato (PC), cada material apresentou um tipo de falha e com um limite de estampabilidade que cada material pode ser conformado.

Franzen et al. ( 2009 ) e Silva et al. ( 2010 ), analisou o PVC, analisou as possibilidades do uso de EI de PVC para produção de pequenos lotes de produtos.

Silva et. Al. ( 2010 ), efetuou a primeira tentativa para descrever analiticamente o comportamento material de polímeros durante a formação incremental de ponto único, usando uma abordagem modificada, com base na teoria da membrana.

Marques ( 2010 ), caracterizou quatro materiais poliméricos de 2mm de espessura: PA, PC, PET e PVC e determinou os seus limites de conformabilidade, as curvas limite de estampagem e curvas de limite de falha; efetuou os ensaios de estampagem incremental de uma geometria cônica. O PET foi o polímero que demonstrou maior potencial na realização de peças através do processo de estampagem incremental, pois obteve-se sem falhar o ângulo máximo da geometria cônica, veja na FIGURA 26.

FIGURA 26- COMPONENTES DE MICROONDAS REALIZADOS ATRAVÉS DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL NUMA CHAPA METÁLICA DE AÇO INOXIDÁVEL ( À ESQUERDA ) E NUMA CHAPA DE PC ( À DIREITA ).



FONTE: MARQUES (2010 )

Alkas Yonan et al. ( 2013 ) pesquisou o PVC com alguns parâmetros específicos, usando a uma simulação numérica para prever o formato que a chapa obterá e constatou que os modelos de descrição do material precisam ser melhorados.

Bagudanch et al. ( 2014 ) identificou uma combinação mais adequada de alguns parâmetros de processo para minimizar o consumo de energia e os custos na estampagem incremental do PC e PVC.

Davarpanah et al. ( 2015 ) fez um estudo do PLA e PVC sobre a influência do valor do incremento em profundidade e rotação da ferramenta no modo de falha da chapa polimérica.

Bagudanch et al. ( 2015 ) testou diversos modelos matemáticos de materiais para prever os dados experimentais de amostras de PVC e PC, realizadas em teste uniaxial simples com inúmeras temperaturas e velocidades.

Pradella ( 2015 ), verificou o potencial do uso da tecnologia de Estampagem Incremental (EI) no design de embalagens para fazer modelos e até mesmo protótipos de embalagens. Testes com PVC indicaram que alguns parâmetros como a temperatura de trabalho, lubrificação, rotação e trajetória do punção tem uma influência muito grande no processo e resultado final do protótipo. A variação na temperatura de trabalho do material PVC de 20°C resultou em um aumento significativo nos resultados de deformação, submetido ao ensaio de tração.

Bagudanch et al. ( 2016 ) avaliou a influência do incremento em profundidade, rotação da ferramenta, velocidade linear da ferramenta, diâmetro da ferramenta e espessura da chapa, sobre a força máxima de conformação do PVC, ainda verificou a temperatura de 74°C que foi gerada pela ferramenta na chapa ao atingir maior rotação.

Pradella e Folle ( 2016 ) testou com uma geometria em formato de tronco de pirâmide, em três estágios subsequentes e avaliou alguns parâmetros como a temperatura de trabalho e o diâmetro do punção. Verificou com chapa de PVC variando a temperatura de trabalho do material de 20°C e resultou em um aumento significativo nos resultados de deformação.

Landell ( 2016 ), comprovou que a utilização de análise por elementos finitos, software ANSYS, é adequada para a simulação do processo na variação da

espessura da peça ao longo da manufatura, ponto de atenção para determinar falha ou não do material.

Kulkarni ( 2016 ), estudou a conformabilidade dos termoplásticos usando estampagem incremental de ponto único assistido por calor e testou a eficácia do ar quente para esta aplicação. Os resultados das experiências indicaram que o uso de formação assistida por calor acarretou um aumento na conformabilidade quando se compara a formação de temperatura elevada, houve a redução das forças para conformar a chapa, e não houve diferença visível no acabamento superficial nas peças formadas. É um método econômico para fabricação de baixo volume de chapas de polímero termoplástico.

## 2.11 CARACTERÍSTICAS DOS POLÍMEROS PETG E PVC

### 2.11.1 Petg

O PET é tradicionalmente produzido a partir do etileno glicol com ácido tereftalático. Já o PETG - um poliéster modificado, obtido quando se adiciona outro comonômero o CHDM (1,4 ciclohexanodimetanol), no qual com a adição deste novo glicol reduz a cristalinidade da resina final e aumenta a ductibilidade e resistência ao impacto. O polímero resultante – o PETG - é amorfo e apresenta um balanço de propriedades especiais que o direciona para aplicações específicas, principalmente no mercado de chapas extrudadas ( WIEBECK, 2005 ).

#### Vantagens do PETG

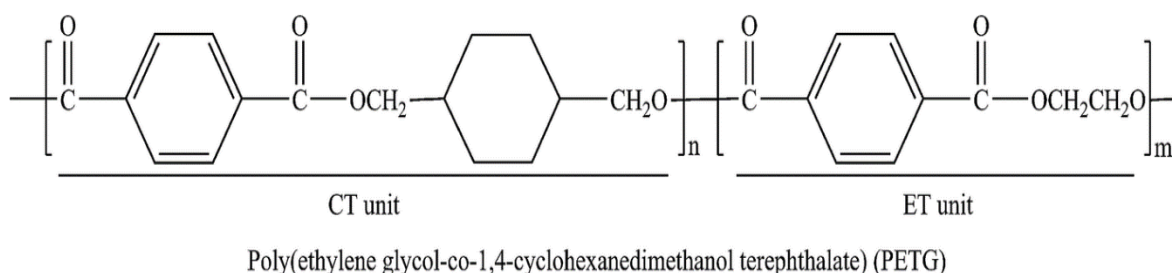
O material pode, literalmente, ser usado em diversas aplicações. Muito dessa versatilidade se dá porque as placas conseguem passar por diferentes processos ( conformação, usinagem, etc ) sem que apresentem qualquer deformação, rachadura ou mesmo esbranquiçamento. As placas podem ser:

- Cortadas;
- Perfuradas;
- Rebitadas;

- Serradas;
- Usinadas;
- Termoformadas;
- Dobradas a frio\*

O PETG – Polietileno Tereftalato de etileno), ilustrado pela FIGURA 27, é um plástico que pode ser empregado nos mais diversos projetos, em produto de baixo custo, possui ótima praticidade e grande diversidade de uso e aplicações. PETGs (ou copoliéster) são PETs com glicol modificados; esta modificação é realizada por adição de um segundo glicol durante a polimerização. A estrutura molecular resultante é irregular e a resina é claro amorfo.

FIGURA -27 ESTRUTURA MOLECULAR DO PETG



FONTE: O autor ( 2017 ).

Resistência das Chapas de PETG, as chapas conseguem suportar impactos entre 15 e 20 vezes mais que uma placa de acrílico da mesma espessura. Mesmo quando as comparamos com a versão especial anti-choque do acrílico, elas possuem de 2 a 5 vezes mais resistência, uma característica que evita as rachaduras após serem perfuradas.

Além dessa capacidade de suportar impactos, o PETG também se destaca por sua resistência a produtos químicos e solventes. Para projetos externos, o material PETG recebe uma camada protetora coextrudada de UV, para que resista aos raios ultravioletas, veja as propriedades do material na Tabela 1.

TABELA 1- PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS PETG

ÓPTICAS	NORMA	VALOR
Índice de refração		1.57 N
Transparência à luz visível		88,00%
Transparência à luz ultravioleta		71,00%
MECÂNICA	NORMA	VALOR
Módulo de flexão	DIN 53452	2075 MPa
Módulo de flexão	DIN 53452	70 MPa
Módulo de Tração	DIN 53452	2200 MPa
Tensão de tração	DIN 53452	50 MPa
Elongação	DIN 53452	54,00%
Força de Impacto	IZOD	11,5 KJ/m²
TÉRMICAS	NORMA	VALOR
Temperatura (VICAT)	DIN 53460	82°C
Calor específico	D 2766	1,10 J/gk
Temperatura de degradação	-	>280 °C
Temperatura de Serviço	-	70 °C
Faixa de temperatura de moldagem	-	120-160 °C
FÍSICAS	NORMA	VALOR
Peso específico	ASTM D1505	1.27 g/cm³
Dureza Rockwell	DIN 785	105R

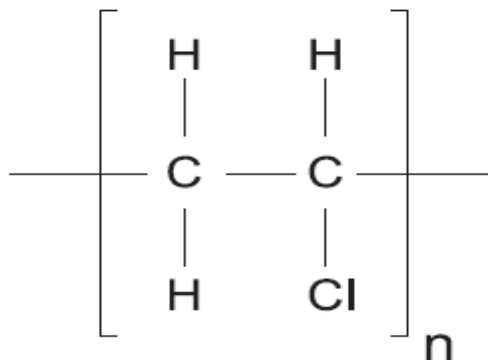
FONTE: PLASTIREAL - ESPECIFICAÇÕES DO PETG

### 2.11.2 Pvc

Franzen et al (2009) e Silva et al (2010), aprofundaram nas análises sobre as possibilidades do uso de EI de PVC para produção de pequenos lotes de produtos com o emprego desse material.

As chapas poliméricas PETG e PVC, possuem dimensões de 90 x 90mm, com espessura de 2mm. Normalmente o polímero PVC é representado por meio de sua unidade repetitiva (ou mero), ilustrado pela Figura 28.

FIGURA -28 ESTRUTURA MOLECULAR DO PVC



FONTE: O autor ( 2017 ).

A estrutura entre colchetes (unidade repetitiva ou mero) repete-se  $n$  vezes ao longo da molécula, sendo que o parâmetro  $n$  representa o grau de polimerização da molécula, tendo relação direta com os pesos moleculares da mesma. PVC é um produto considerado amorfo ou de baixa cristalinidade, sendo que essa varia conforme as condições de polimerização, onde os polímeros comerciais possuem a cristalinidade da ordem de 8 a 10%.

O PVC é obtido através de uma combinação de etileno e cloro. É um produto de aplicação geral devido à possibilidade de se acrescentar determinados aditivos (plastificantes, estabilizantes, lubrificantes, pigmentos, espumantes etc.) que são incorporados antes da transformação no produto final.

O PVC é o mais versátil dentre os plásticos, veja na TABELA 2 as propriedades comparativas compostos de PVC. Devido à necessidade de a resina ser formulada mediante a incorporação de aditivos, o PVC pode ter suas características alteradas dentro de um amplo espectro de propriedades em função da aplicação final, variando desde o rígido ao extremamente flexível, passando por aplicações que vão desde tubos e perfis rígidos para uso na Construção Civil até brinquedos. A grande versatilidade do PVC deve-se, em parte, também à sua adequação aos mais variados processos de moldagem, podendo ser injetado, extrudado, calandrado, espalmado, somente para citar algumas das alternativas de transformação.

TABELA 2 - ALGUMAS PROPRIEDADES COMPARATIVAS DE COMPOSTOS DE PVC COM DIFERENTES GRAUS DE PLASTIFICAÇÃO.

	Norma ASTM	Rígido	Semi-rígido	Flexível	Muito Flexível	Altamente Flexível
Quantidade de plastificante (pcr)	-	0	34	50	80	600
Quantidade de plastificante (%)	-	0	25	33	44	86
Peso específico (20°C) (g/cm <sup>3</sup> )	D-792	1,40	1,26	1,22	1,17	1,02
Resistência à tração (MPa)	D-882	>40	25	20	15	-
Alongamento na ruptura (%)	D-882	<15	285	330	385	-
Módulo de rigidez (MPa)	D-747	> 9.000	70	12	3	< 1
Dureza Shore A	D-2240	>100	95	83	66	<10
Dureza Shore D	D-2240	80	49	<35	<20	-
Temperatura de fragilização (°C)	D-746	>23	-16	-32	-46	-

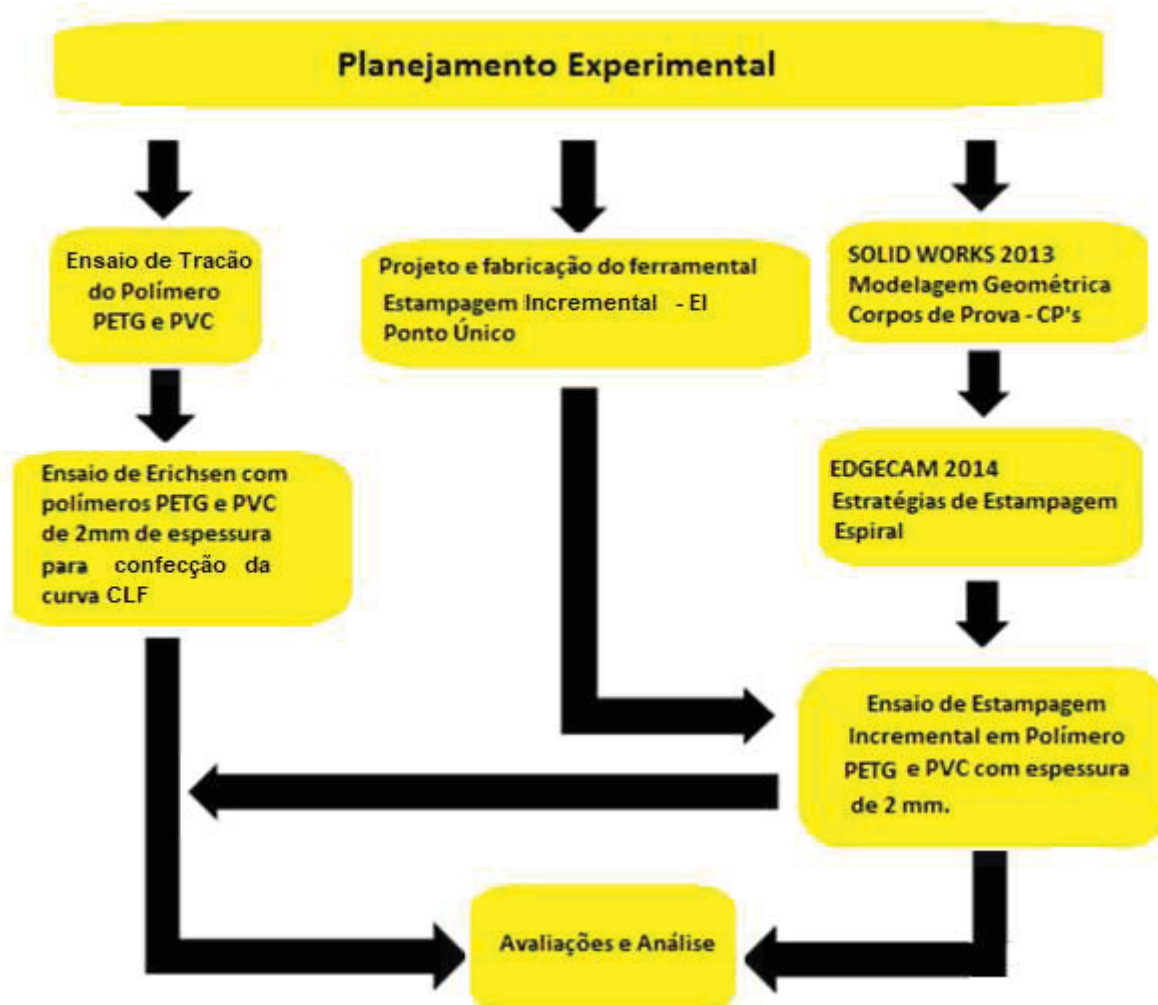
FONTE: Adaptado de NASS; HEIBERGER ( 1988 )

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia e o planejamento experimental segue conforme o planejamento abaixo, ilustrado na Figura 29.

FIGURA -29 FLUXOGRAMA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.



FONTE: O autor ( 2017 ).

### 3.2. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO POLÍMERO PETG E PVC

A realização do trabalho foi necessária a caracterização dos polímeros PVC e PETG por ensaio mecânico com o intuito de medir as propriedades mecânicas desse material. Os ensaios de tração foram realizados para medir as propriedades como tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento e demais propriedades mecânicas respectivas ao material. Todos os ensaios foram realizados seguindo normas ASTM D 638 -03, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

### 3.2.1 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram realizados na máquina de ensaios universal EMIC, modelo EMIC 23-100, eletromecânica, microprocessada, marca INSTRON/EMIC (FIGURA 30)

FIGURA -30 – MÁQUINA DE ENSAIO UNIVERSAL - EMIC



FONTE: O AUTOR ( 2017 )

As características da máquina são as seguintes:

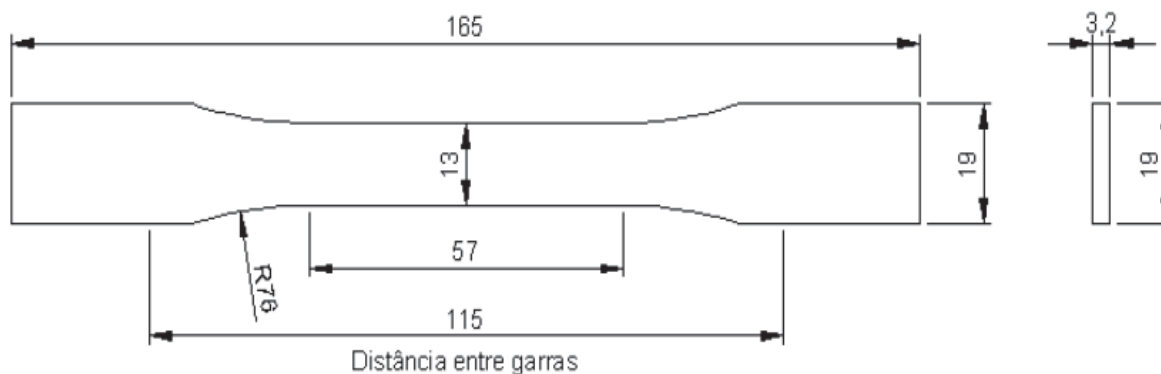
- Velocidade do ensaio: 0,001 a 500 mm/min;
- Velocidade do ensaio com aplicação da força: 100 mm/min a 200 kN, 500 mm/min a 50 kN;

Os parâmetros do ensaio usado na máquina de ensaio de tração, foram:

- Velocidade de ensaio: 5 mm/ min (segundo a norma ASTM D638-97);
- Limites máximos de força e deslocamento: 415 kN e 150 mm (respectivamente);

Baseado na norma ASTM D 638-03, as dimensões utilizadas nos CP`s para a realização dos ensaios de tração, estão de acordo com o tipo I, veja a FIGURA 31.

FIGURA -31 CORPO DE PROVA TIPO I ( mm ).



FONTE: ASTM D 638 -03

Os CP's foram fabricados por usinagem na FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIC- Laboratório de Usinagem – SENAI-PR. Após a usinagem, os CP's foram submetidos a lixamento longitudinal da seção lateral útil ao ensaio, com a finalidade de reduzir os riscos ou rebarbas que poderiam acarretar pontos de concentração de tensão e prejudicar assim nos resultados dos ensaios de tração.

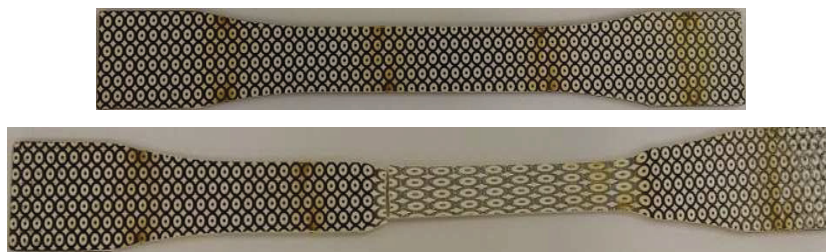
O número de CP's para os ensaios de tração foi definido seis amostras, conforme a norma ASTM D -638 para a obtenção do limite de resistência, limite de escoamento e alongamento da chapa de polímeros PETG e PVC. Veja na FIGURA 32 e 33, corpos de prova (CP's) antes e após os ensaios de tração.

FIGURA -32 CP's DE POLÍMERO PETG



FONTE: O autor ( 2017 ).

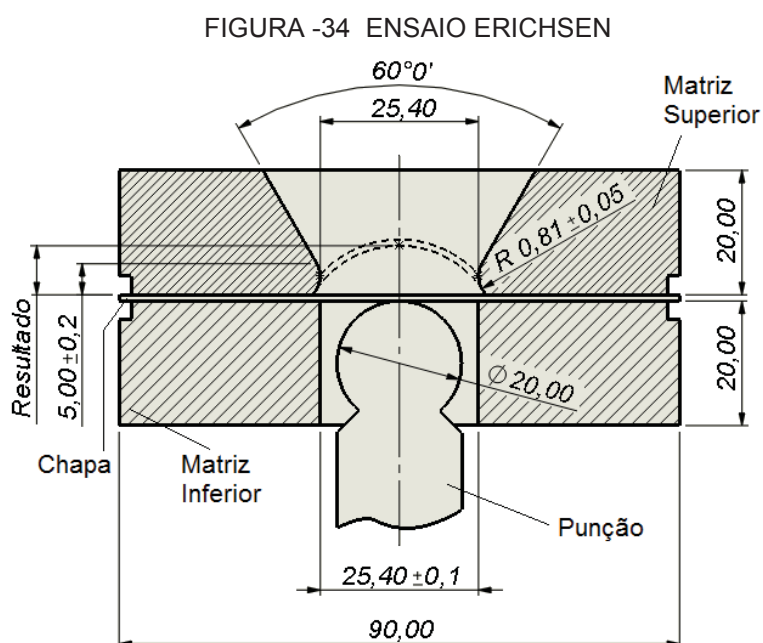
FIGURA -33 CP's DE POLÍMERO PVC



FONTE: O autor ( 2017 ).

### 3.2.2 Curvas Limite de Conformação (CLC)

As curvas limite de conformação (CLC) demonstram o nível e o tipo de deformações que uma chapa polimérica pode suportar quando submetida a esforços de conformação. Na Faculdade do Senai-CIC, foi usada o ensaio de Erichsen de bancada para avaliação das deformações dos CP's, veja a FIGURA 34 e 35, ilustrando a matriz, punção e a chapa.



FONTE: Adaptado de ASTM E643-84 (1992) apud GARCIA; SPIM; SANTOS (2000).

FIGURA -35 EQUIPAMENTO DE BANCADA ENSAIO ERICHSEN

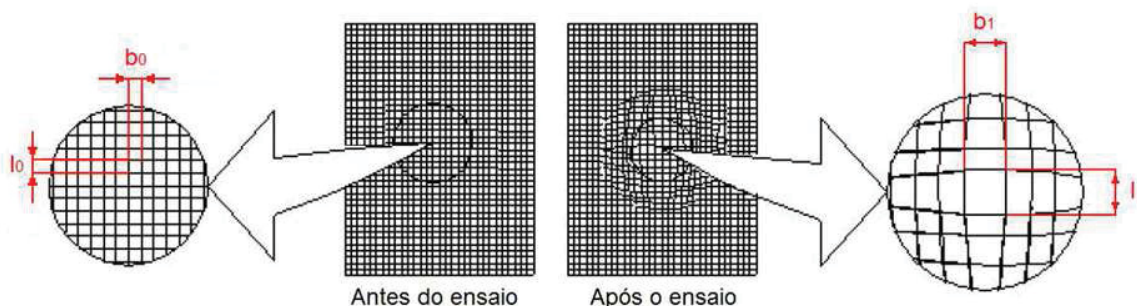


FONTE: O autor ( 2017 ).

### 3.2.3 Impressão serigráfica de malhas

Para construção da CLF foi usado a técnica de impressão de malhas para avaliar as deformações às quais a chapa polimérica foi imposta na estampagem. Na FIGURA 36 é realizada uma pequena abordagem sobre a técnica da visioplasticidade empregada nos CP's para avaliar deformações, através da leitura de uma grade ou malha e na sequência a subseção 3.3 abordará o planejamento do ensaio de Erichsen.

FIGURA -36 DESENHO ESQUEMÁTICO DE MALHA IMPRESSA EM CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE NAKAJIMA

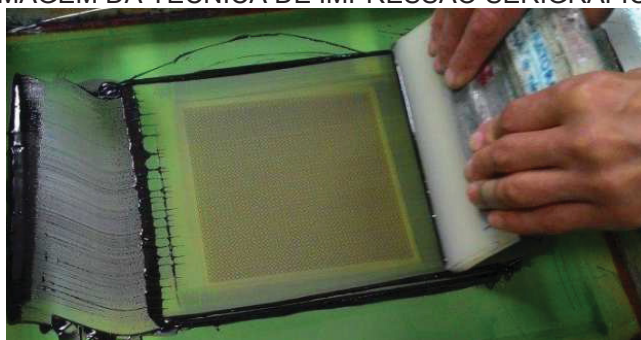


FONTE: Adaptado de NETTO ( 2004).

Segundo Netto (2004) relata que a norma ISO 12004:1997 recomenda a geometria de malha circular ou quadrada na faixa de 1,5 mm a 5,0 mm.

Seguindo a recomendação de Netto (2004), realizou-se a impressão de malhas circulares de diâmetro de 2,5 mm empregando-se a técnica de impressão serigrafia, pela empresa Parllare Serigrafia. A técnica de impressão consiste na serigrafia como a técnica de impressão gráfica das malhas, ilustrado na FIGURA 37.

FIGURA -37 IMAGEM DA TÉCNICA DE IMPRESSÃO SERIGRÁFICA DE MALHAS



FONTE: O autor ( 2017 ).

O procedimento empregado para a impressão serigrafica da malha de círculos nos CP's para os ensaios de expansão de furos e levantamento de CLF's é descrito na sequência.

1. Efetuar a limpeza de cada corpo de prova com álcool isopropílico para ausência de sujeira e gordura na superfície dos CP's, evitando falhas de impressão.
2. Colocar cada corpo de prova e prender no berço da mesa de silk-screen, que é um processo de impressão no qual a tinta é vazada pela pressão de um rodo ou puxador através de uma tela preparada.
3. Posicionar a tela encaixada no registro que é o encaixe perfeito da tela na mesa, para não errar e sair desencaixado o desenho.
4. Despejar a tinta em um faixa horizontal acima do desenho na tela.
5. Pegar o rodo de aplicação do silk e passar sobre a tela cobrindo todo o desenho fazendo uma certa pressão para a tinta passar através da tela e penetrar na chapa de polímero PETG e PVC.
6. Repetir três vezes a passagem do rodo e retirar a tela sem deixar excesso de tinta sobre o desenho.
7. Secar a tinta do CP por UV, trata-se de um sistema que gera uma radiação de luz, com determinado comprimento de onda, conhecido como

UV(ultravioleta). Esse tipo de luz, por conta de um determinado comprimento de onda, faz com que a tinta, especialmente desenvolvida para essa finalidade, seja sensibilizada e se solidifique.

Composição química da tinta UV utilizado na impressão serigráfica dos CP's:

- veículo ou agregante, que é o líquido que contém as partículas de pigmento, constituído por óleos secativos, resinas naturais ou sintéticas. Óleos Oligômeros, consiste de um finito número de unidades de monômeros ( pequena molécula ). A resina é a parte não volátil da tinta, que serve para aglomerar as partículas do pigmento, transformando o estado líquido para sólido, que é a película da tinta. Resina epóxi, poliéster e monômeros (solvente reativo); Os Monômeros, são utilizados insaturados e bifuncionais ( cura e a função de solvente ), monômero mais utilizado é o de estireno, ou vinil benzeno, devido a razões técnicas e econômicas.

- pigmentos ou corantes, são as substâncias que conferem à película proteção e a cor desejada, se classificam em orgânicos e inorgânicos. Orgânicos são naturais: vegetais e animais; e sintético: petroquímico. Inorgânicos: óxidos.

- modificadores, que controlam a secagem da tinta.

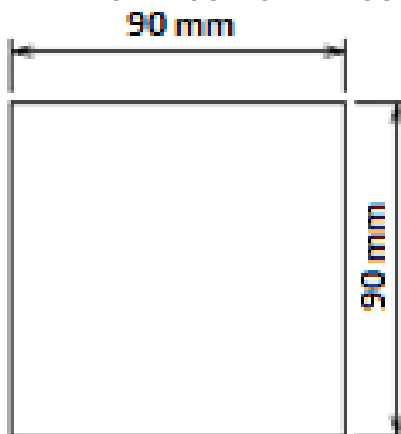
Na secagem das tintas convencionais ocorre evaporação de compostos orgânicos voláteis, muitas vezes prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. Na proteção do Meio Ambiente: o controle da emissão de solventes para a atmosfera, está longe de ser o principal problema das indústrias de tintas num futuro não muito longínquo. A ausência de solventes coloca as tintas de cura UV na categoria de ecologicamente limpas e o ambiente de trabalho torna-se mais seguro, como mais produtivo.

#### 3.2.4 Ensaio de Erichsen - Curva Limite de Falha (CLF)

Um dos objetivos específicos deste trabalho foi levantar a curva CLF do chapa polimérica PETG e PVC. Para o levantamento da CLF, foi utilizado ensaio

Erichsen, no qual foi considerado adequada utilização de seis CP's, ilustrado na FIGURA 38.

FIGURA -38 CP's UTILIZADOS PARA O LEVANTAMENTO DA CLF DOS POLÍMEROS PETG E PVC.



FONTE: O autor ( 2017 ).

No total foram utilizados 6 CP's para construção da CLF dos polímeros PETG e PVC, sendo todos estampados utilizando uma carga no anel de fixação que prende a chapa de aproximadamente 1000 Kgf.

Inicia o giro da manivela do equipamento em rotações aproximadamente 40 a 65rpm e parar no momento em que ocorre a ruptura que pode ser visto a olho nu ou ouvindo um estralo característico de ruptura. Na sequência a Tabela 3 informa as dimensões e quantidades de CP's preparados para os ensaios de Erichsen.

TABELA 3 – QUANTIDADE DE CP'S NECESSÁRIOS PARA OS ENSAIOS DE ERICHSEN

Material	Dimensões dos CP's (mm)	Quantidade	Finalidade
PETG	90 X 90	3	Determinação da CLF
PVC	90 X90	4	
<b>Total de CP's</b>		<b>6</b>	

FONTE: AUTOR ( 2018 ).

Após realizados os ensaios de Erichsen, os eixos maior e menor das elipses formadas na malha impressa nos CP's deformados foram medidos com o auxílio de um paquímetro digital, medindo as deformações verdadeiras maiores e menores numa faixa central, conforme FIGURA 39 e 40.

FIGURA -39 SUPERÍCIE POLIMÉRICA PETG CONVEXA ILUSTRANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIOR E MENOR, PARA LEVANTAMENTO DA CLF



FONTE: O autor ( 2017 ).

FIGURA -40 SUPERÍCIE POLIMÉRICA PVC CONVEXA ILUSTRANDO OS PONTOS DE MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MAIOR E MENOR, PARA LEVANTAMENTO DA CLF



FONTE: O autor ( 2017 ).

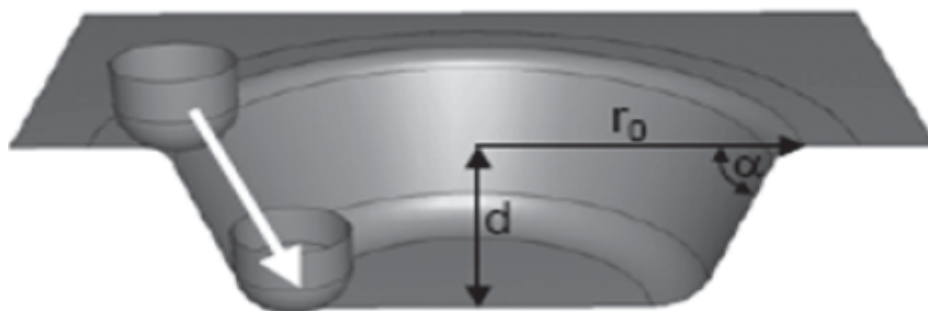
A curva CLF do polímero PETG e PVC é construída através das deformações verdadeiras  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ , que são calculadas com os valores das deformações de engenharia. As deformações relativas  $e_1$  e  $e_2$ , são calculadas pelos valores dos eixos maior e menor de cada elipse medida.

### 3.3 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS COM ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Na estampagem incremental foi usada uma ferramenta com geometria de punção cilíndrico com ponta arredonda e uma estratégia de trajetória convencional (paralela) de contorno, ilustrado na FIGURA 41, em que a movimentação da ferramenta é feita de fora para dentro, do maior para o menor diâmetro do cone, descrevendo círculos paralelos decrescentes. Os tempos de estampagem previstos

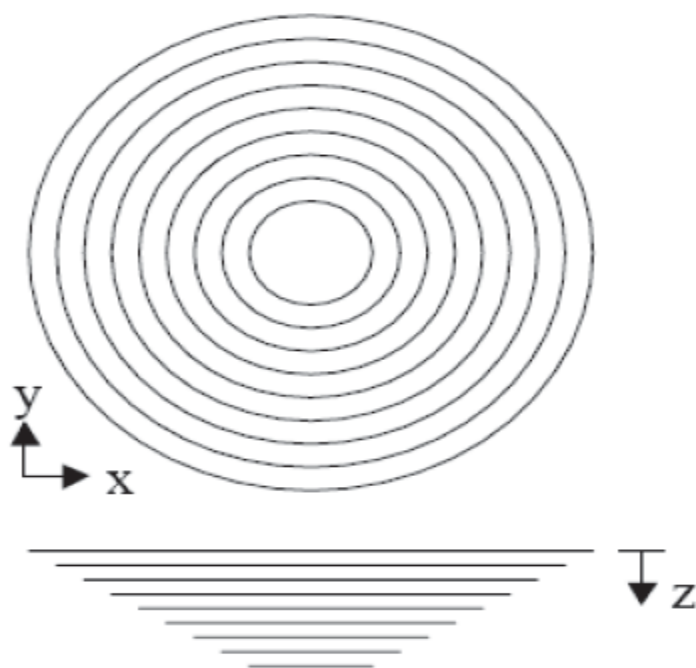
para cada um dos CP's nas simulações com o software CAM, podem chegar até um tempo máximo de 2h, e foi definido um plano de experimento contando com os ensaios preliminares e suas réplicas, totalizando em 23 ensaios, conforme a Tabela 4.

FIGURA -41 ESTAMPAGEM INCREMENTAL CONVENCIONAL (PARALELA) DE CONTORNO.



**estratégia convencional**

(a)



(b)

FONTE: HAGAN ( 2003 )

LEGENDA: a) Maior para menor diâmetro.

b) Círculos de fora para dentro e profundidade em Z.

TABELA 4 - MATRIZ DE PLANEJAMENTO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL COM ESTAMPAGEM INCREMENTAL.

<b>Ensaio</b>	<b>Profundidade de estampagem (mm)</b>	<b>Ângulo de Estampagem ( Graus )</b>
1	10	80°
2	20	80°
3	10	70°
4	20	70°
5	30	70°
6	40	70°
7	50	70°
8	60	70°
9	10	60°
10	20	60°
11	30	60°
12	40	60°
13	50	60°
14	60	60°
15	62,4	60°
16	10	50°
17	20	50°
18	30	50°
19	40	50°
20	10	45°
21	20	45°
22	30	45°
23	38,2	45°

FONTE: O autor ( 2017 ).

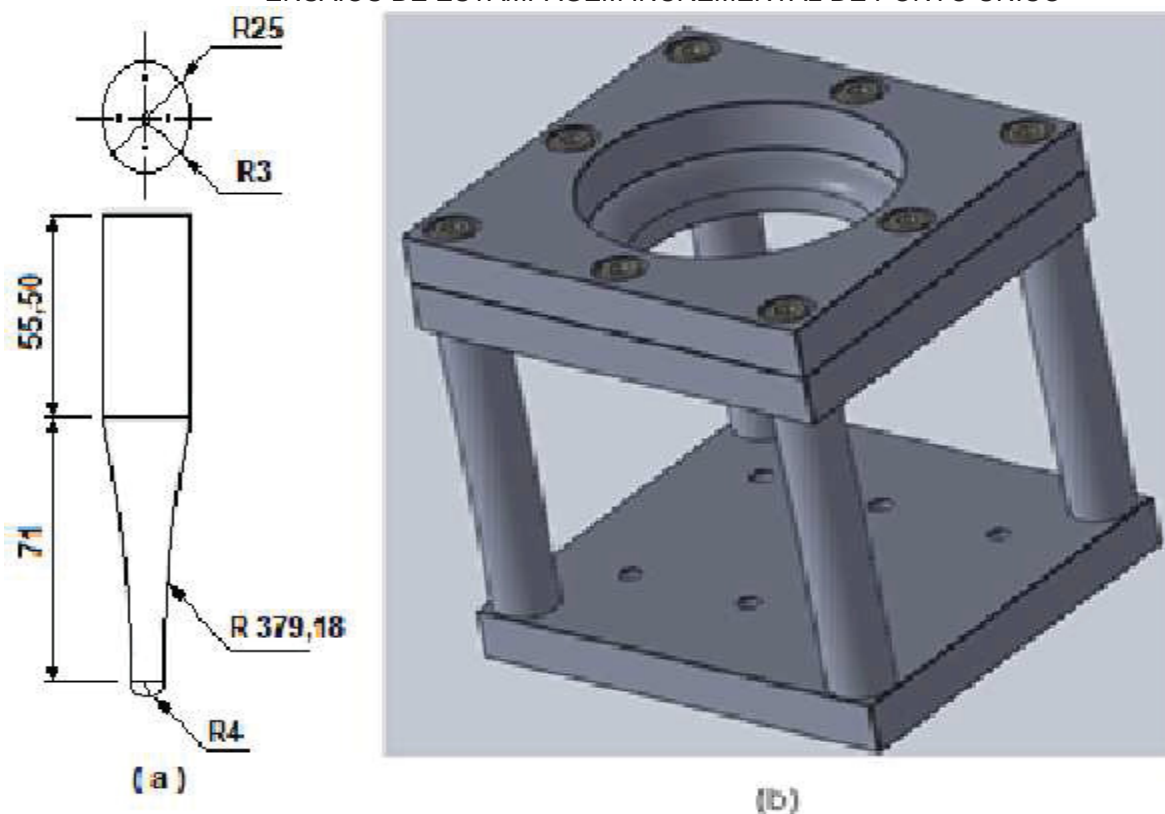
NOTA: Estratégia CAM empregada: por convencional (paralela) de contorno ( espiral ).

### 3.3.1. Ensaio de estampagem incremental com ferramental e máquina CNC

Os ensaios de estampagem incremental em polímeros PETG e PVC, foram realizados com um ferramental específico, de um punção cilíndrico e um suporte, ilustrado na FIGURA 42. No laboratório da Faculdade de Tecnologia SENAI-CIC (SENAI-PR), setor de usinagem CNC, usou-se o ferramental VC131 da Villares Metals para o punção e aço 1045 para o suporte de fixação das chapas a serem estampadas. O punção foi temperado, revenido e usinado para acabamento, obtendo uma dureza de 54 HRC pós tratamento térmico.

No laboratório de usinagem CNC da Faculdade de Tecnologia SENAI-CIC, os ensaios com estampagem incremental foram realizados em um centro de usinagem ROMI Discovery 560, ilustrado na FIGURA 43.

FIGURA -42 DESENHO DO FERRAMENTAL UTILIZADO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO



FONTE: O autor ( 2017 )

LEGENDA: a) Punção cotado.

b) Suporte montado em perspectiva.

FIGURA -43 CENTRO DE USINAGEM E FERRAMENTAL UTILIZADO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE PONTO ÚNICO.



FONTE: O autor ( 2017 )

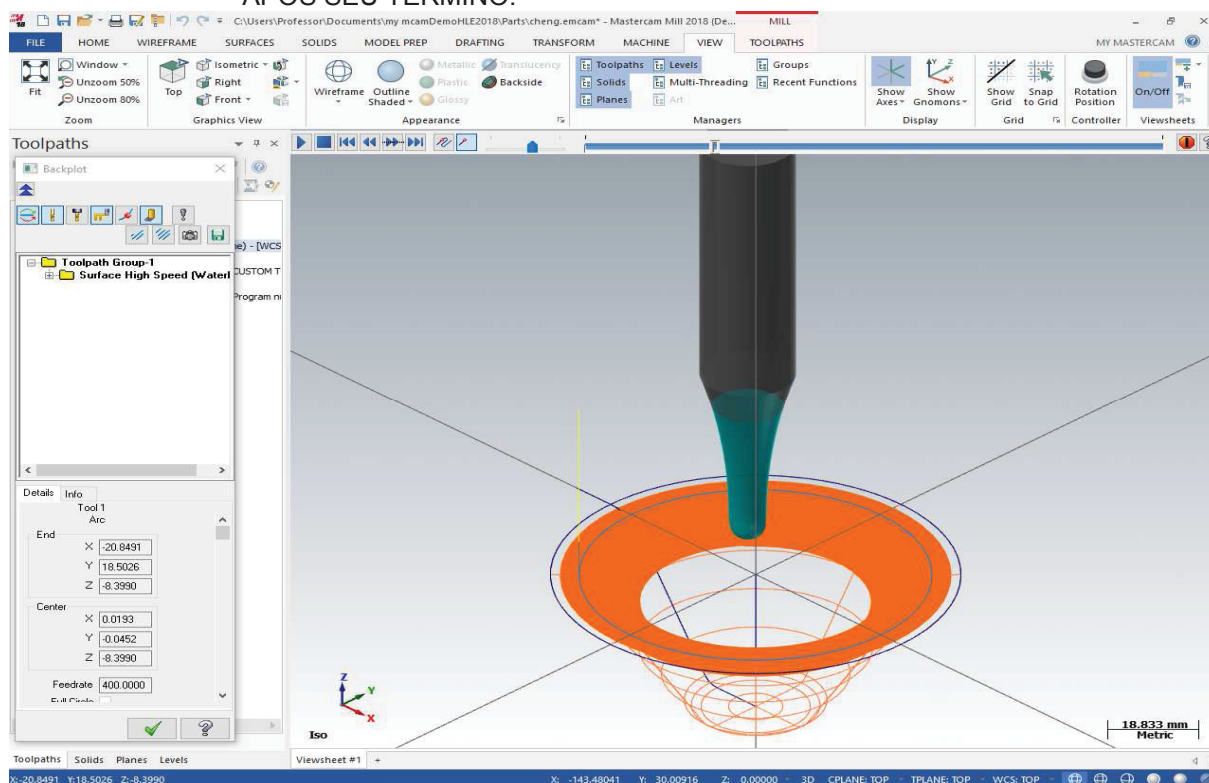
### 3.3.2. Estratégias de estampagem convencional (paralela) de contorno com edgecam 2014 R2 e pós-processamento

A estratégia de estampagem foi gerado pelo processo CAM – Computer Aided Manufacturing utilizando o software EdgeCAM 2014 R2, através dos modelos das superfícies hemisféricas de estampagem definidos com o auxílio do Solidworks 2012 nas profundidades de domo de 10 e 60 mm.

EdgeCAM é um software que define as estratégias de usinagem com máquinas-ferramenta CNC, também é uma ferramenta adequada para a geração de estratégias para estampagem incremental, ilustrado na FIGURA 38. É um software que simula os processos de usinagem e gerar os programas CNC, formado por códigos, funções e coordenadas cartesianas que tornam possível as operações a partir da interpolação dos eixos da máquina-ferramenta CNC.

A FIGURA 44 é mostrada a interface do programa, uma simulação da estampagem incremental de uma superfície em formato hemisférico com profundidade de domo de 60 mm.

FIGURA -44 SOFTWARE EDGE CAM, SIMULAÇÃO DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL APÓS SEU TÉRMINO.



FONTE: O autor ( 2017 ).

A estratégia de trajetória da ferramenta de estampagem incremental com EdgeCAM foi, *convencional (paralela) de contorno*, onde usou-se um punção de 8 mm de diâmetro, na qual, para fins de simulação no EdgeCAM foi substituído por uma fresa tipo esférica (ballnose), que normalmente é empregada em operações de acabamento em usinagem de superfícies.

Os parâmetros de estampagem foram definidos como: punção de 50 rpm; velocidade de avanço de 300 mm/min; velocidade de avanço em profundidade de 300 mm/min; avanço em profundidade de 0,2 mm por translação completa em torno do eixo Z. Após as simulações serem ajustadas no EdgeCAM, o pós-processamento da estratégia de estampagem foi realizado para que fosse possível carregar os programas no computador do CNC do centro de usinagem. O pós-processamento foi efetuado com um pós-processador para a conversão de linguagem de programação compatível com o comando Siemens 810 D do centro de usinagem ROMI Discovery 560.

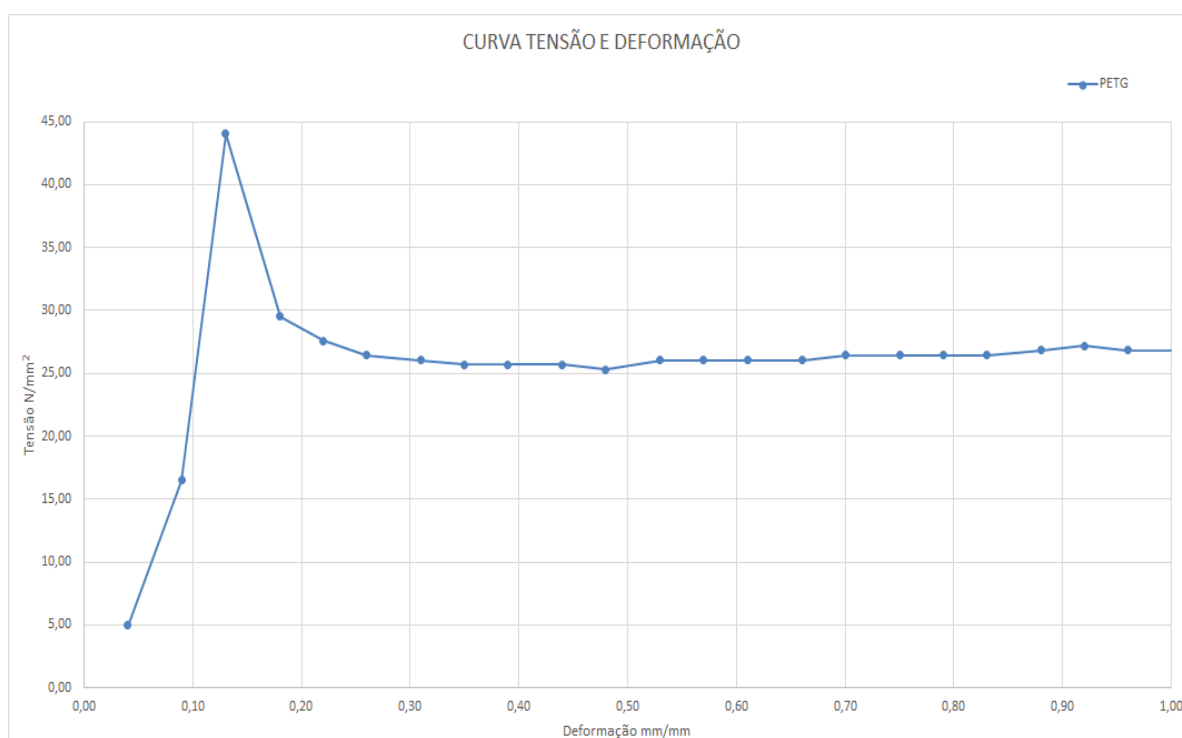
## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS DE TRAÇÃO

FIGURA 45 a 48, apresentam os gráficos com os resultados específicos de tensão, deformação, força e alongamento dos polímeros PETG e PVC.

A FIGURA 45, gráfico de tensão e deformação do PETG, apresenta uma tensão máxima de  $44,05\text{N/mm}^2$  e permanece quase que constante com a tensão no valor de  $25\text{N/mm}^2$ , já na deformação atinge valor de  $1,0\text{mm/mm}$ .

FIGURA -45 GRÁFICO TENSÃO E DEFORMAÇÃO – PETG

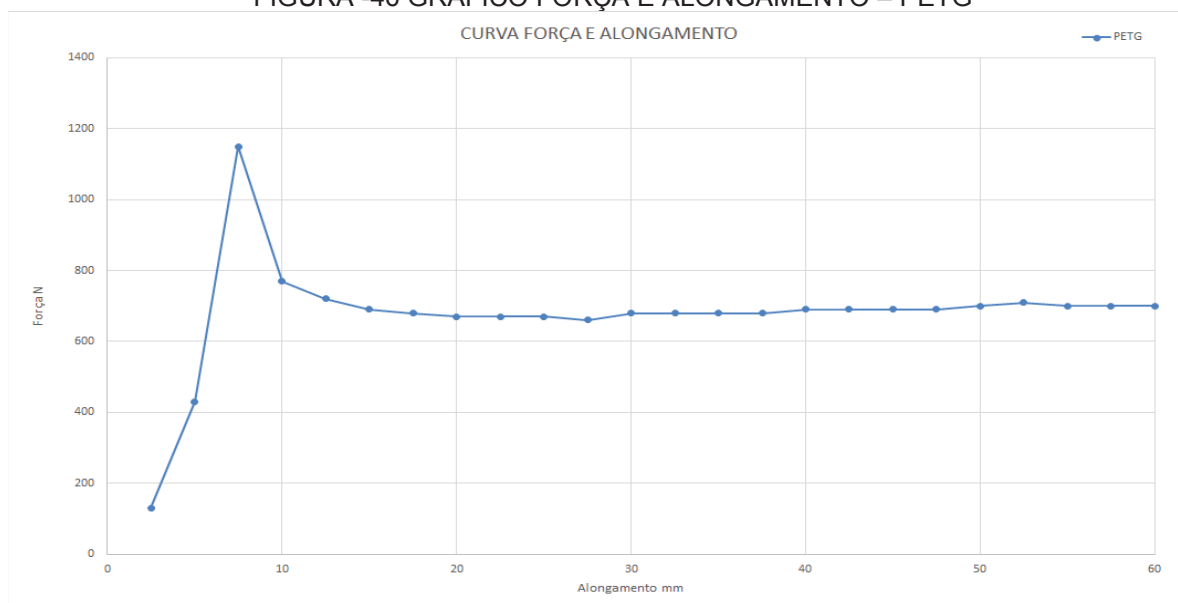


FONTE: O autor ( 2017 ).

DESCRIÇÃO DA FIGURA: Tensão Máxima =  $44,05\text{N/mm}^2$

A FIGURA 46, gráfico de força e alongamento do PETG, apresenta uma força máxima de  $1150\text{N}$  e permanece quase que constante com a força no valor de  $650\text{N}$ , já no alongamento atinge valor de  $60\text{mm}$ .

FIGURA -46 GRÁFICO FORÇA E ALONGAMENTO – PETG

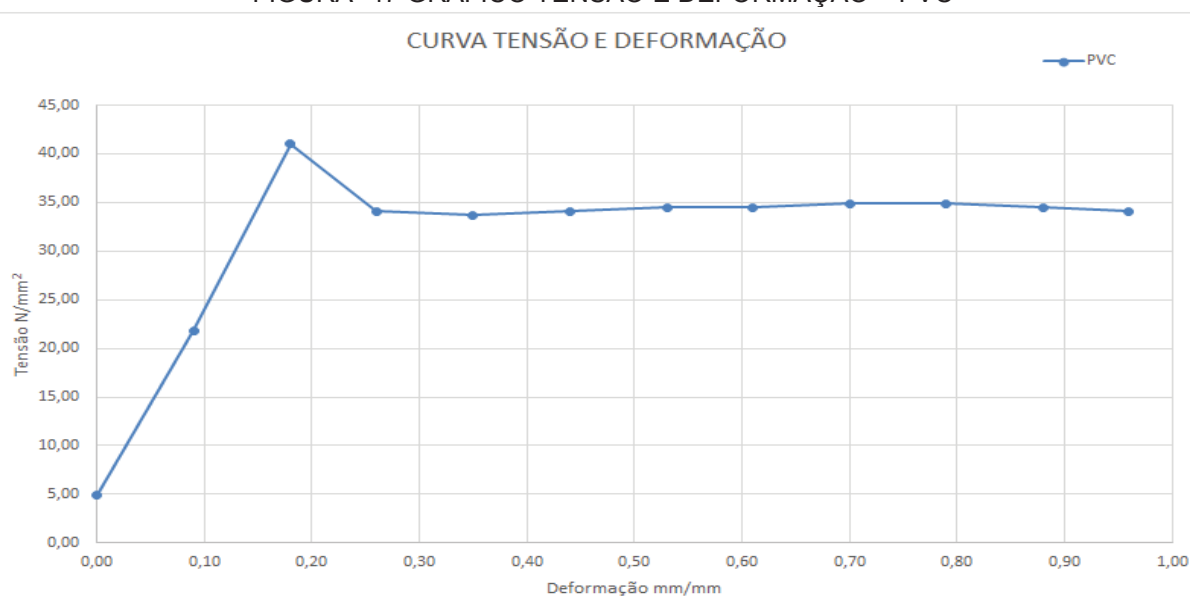


FONTE: O autor ( 2017 ).

DESCRIÇÃO DA FIGURA: Força Máxima = 1150,0 N

A FIGURA 47, gráfico de tensão e deformação do PVC, apresenta uma tensão máxima de 40,99N/mm<sup>2</sup> e permanece quase que constante com a tensão no valor de 35N/mm<sup>2</sup>, já na deformação atinge valor de 1,0mm/mm.

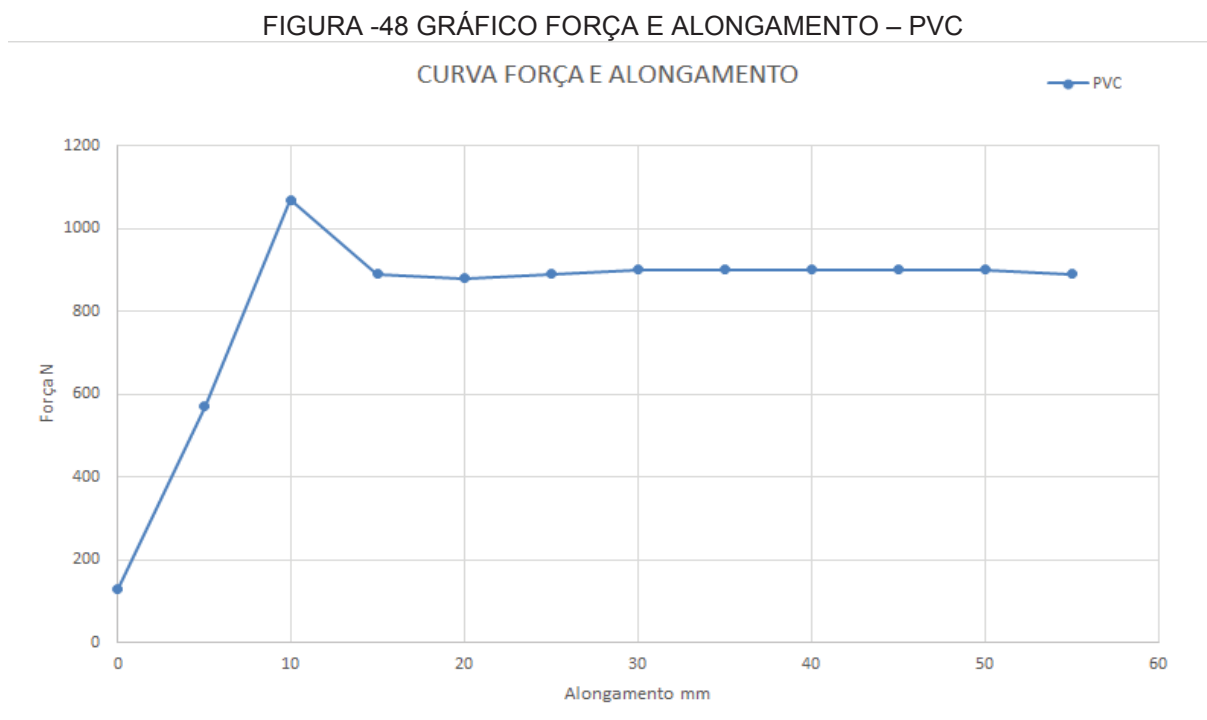
FIGURA -47 GRÁFICO TENSÃO E DEFORMAÇÃO – PVC



FONTE: O autor ( 2017 ).

DESCRIÇÃO DA FIGURA: Tensão Máxima = 40,99 N/mm<sup>2</sup>

A FIGURA 48, gráfico de força e alongamento do PVC, apresenta uma força máxima de 1070N e permanece quase que constante com a força no valor de 900N, já no alongamento atinge valor de 60 mm.



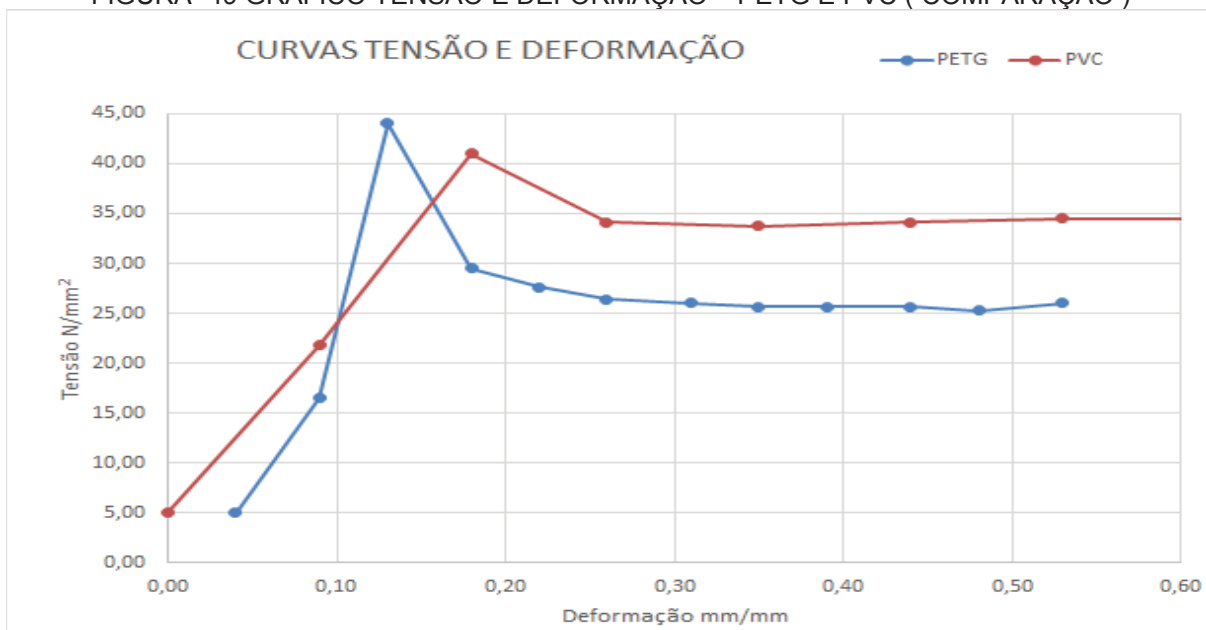
FONTE: O autor ( 2017 ).

DESCRIÇÃO DA FIGURA: Força Máxima = 1070,0 N

FIGURAS 49 e 50, descrevem a comparação entre os gráficos com os resultados específicos de tensão, deformação, força e alongamento dos polímeros PETG e PVC.

A FIGURA 49, comparação do gráfico de tensão e deformação do PETG e PVC, apresenta uma tensão máxima de PETG =  $44,05\text{N/mm}^2$  E PVC =  $40,05\text{N/mm}^2$ , com uma diferença da tensão máxima =  $3,06\text{ N/mm}^2$ , já na deformação atinge valor de 0,5 a 1,0mm/mm.

FIGURA -49 GRÁFICO TENSÃO E DEFORMAÇÃO – PETG E PVC ( COMPARAÇÃO )

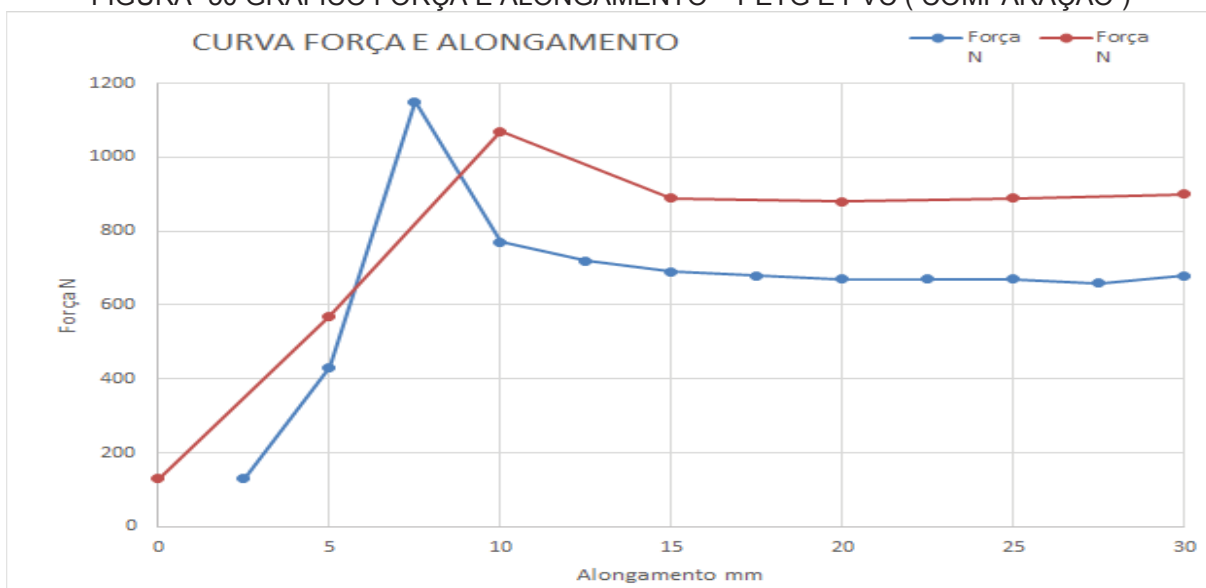


FONTE: O autor ( 2017 ).

DESCRIÇÃO DA FIGURA: Diferença da Tensão Máxima = 3,06 N/mm<sup>2</sup>

A FIGURA 50, comparação do gráfico de força e alongamento do PETG e PVC, apresenta uma força máxima de PETG = 1150N e PVC = 1070N, com uma diferença de 80,0N, já no alongamento atinge valor de 30 a 60 mm.

FIGURA -50 GRÁFICO FORÇA E ALONGAMENTO – PETG E PVC ( COMPARAÇÃO )



DESCRIÇÃO DA FIGURA: Diferença da Força Máxima = 80,0 N

FONTE: O autor ( 2017 ).

Após o corpo de prova de tração sofrer uma falha por estrição, que é caracterizado por uma concentração da maior parte da deformação em uma região específica o que além de prejudicar a conformabilidade do material, ocorre a fratura, ilustrado na FIGURA 51.

FIGURA -51 FRATURA DO CORPO DE PROVA –ENSAIO DE TRAÇÃO



FONTE: O autor ( 2017 ).

Faz-se um tratamento prévio das amostras para evitar acúmulo de tensão em regiões em que existem falhas, que por sua vez, estão relacionadas a problemas de injeção dos corpos de prova, como a temperatura do molde, a pressão de injeção e o recalque entre outras variáveis que devem ser adequadamente selecionadas para o sucesso da moldagem.

A fratura dos polímeros dúcteis PETG e PVC, inicia com escoamento das moléculas poliméricas, ocorrendo após atingirem níveis de deformações irreversíveis nos corpos de provas, acompanhado do fenômeno de empescoçamento no ensaio de tração. Após iniciar o escoamento, as moléculas são orientadas na direção da sollicitação e ao atingirem um grau elevado de orientação, inicia o processo de ruptura com o estiramento a frio das moléculas e chegando ao estágio final da fratura.

## 4.2 RESULTADOS DE ESTAMPAGEM

A estampagem incremental nos metais apresenta uma conformabilidade influenciada principalmente pela espessura da chapa, pelo raio da ferramenta de conformação e pela ductilidade do metal, mas na estampagem incremental para os polímeros PETG e PVC, o valor inicial do ângulo de estampagem tem maior influência na estampabilidade.

FIGURA 52, apresenta peças poliméricas de PETG com ângulo de  $10^\circ$  à  $45^\circ$  e profundidade de 20 à 62,4mm. Descrição do resultados das peças poliméricas:

- PETG com estampagem incremental a um ângulo de  $10^\circ$  e profundidade de 20 mm, ausência de fissuras e trincas;
- PETG com estampagem incremental a um ângulo de  $20^\circ$  e profundidade de 40 mm, ausência de fissuras e trincas;
- PETG com estampagem incremental a um ângulo de  $30^\circ$  e profundidade de 40 mm, ausência de fissuras e trincas;
- PETG com estampagem incremental a um ângulo de  $30^\circ$  e profundidade de 62,4 mm, ausência de fissuras e trincas;
- PETG com estampagem incremental a um ângulo de  $40^\circ$  e profundidade de 40 mm, ausência de fissuras e trincas;
- PETG com estampagem incremental a um ângulo de  $45^\circ$  e profundidade de 38,2 mm, ausência de fissuras e trincas;

FIGURA -52 ESTAMPAGEMMM INCREMENTAL – PETG

(CONTINUA)

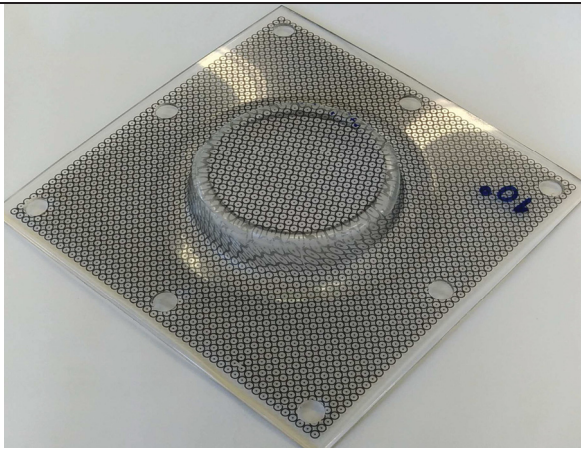
Material: PETG	Ângulo ( $^\circ$ )	Profundidade (mm)
	10	20

FIGURA -52 ESTAMPAGEMM INCREMENTAL – PETG

(CONTINUAÇÃO)

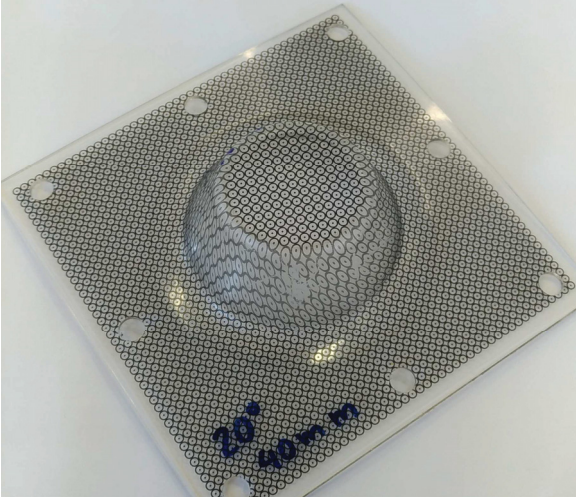
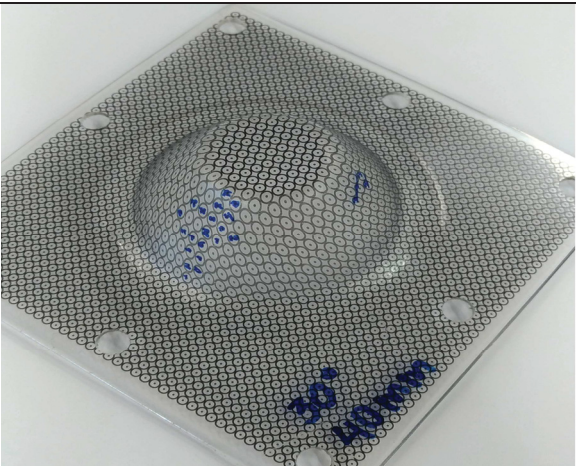
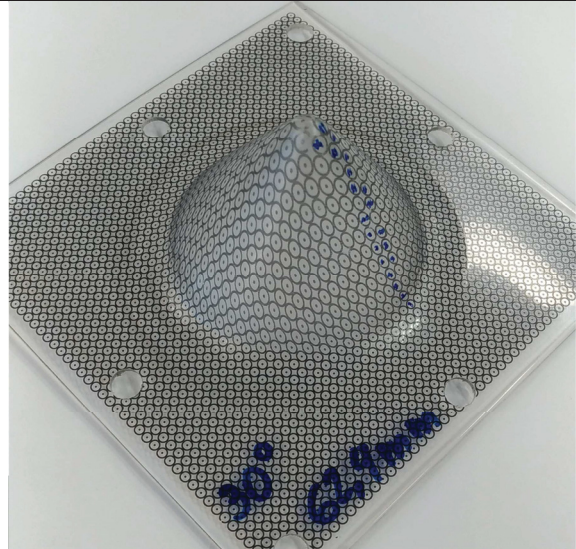
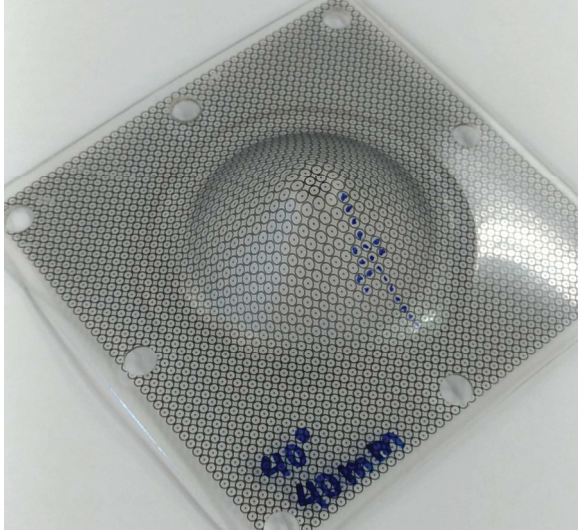
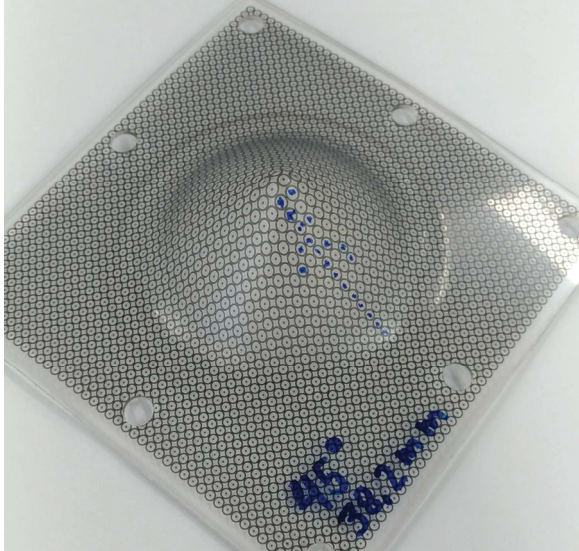
Material: PETG	Ângulo ( ° )	Profundidade (mm)
	20	40
	30	40
	30	62,4

FIGURA – 52 ESTAMPAGEM INCREMENTAL – PETG

(CONCLUSÃO)

	40	40
	45	38,2

FONTE: O autor ( 2017 ).

FIGURA 53, apresentam peças poliméricas de PVC com ângulos de  $10^\circ$  à  $45^\circ$  e profundidades de 20 à 40mm. Descrição do resultados das peças poliméricas:

- PVC com estampagem incremental a um ângulo de  $10^\circ$  e profundidade de 20 mm, apresentou uma trinca circunferencial;
- PVC com estampagem incremental a um ângulo de  $20^\circ$  e profundidade de 20 mm, apresentou uma trinca circunferencial;

- PVC com estampagem incremental a um ângulo de 30° e profundidade de 20 mm, apresentou uma trinca circumferencial;
- PVC com estampagem incremental a um ângulo de 40° e profundidade de 40 mm, apresentou uma trinca diagonal;
- PVC com estampagem incremental a um ângulo de 45° e profundidade de 20 mm, não apresentou nem uma fissura e trinca;

FIGURA -53 ESTAMPAGEM INCREMENTAL – PVC

(CONTINUA)

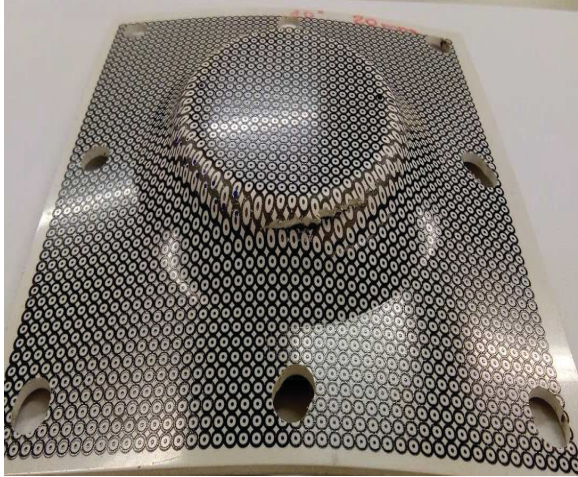


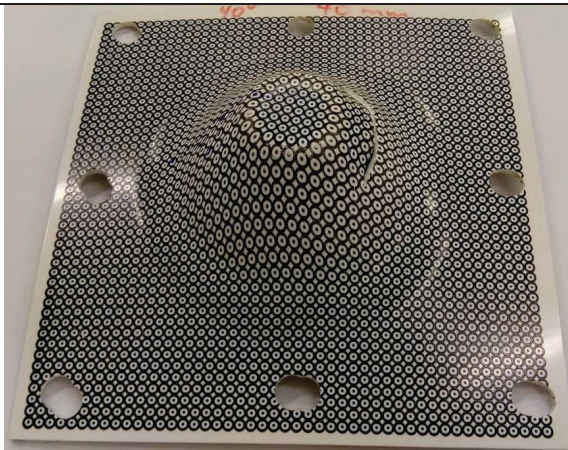
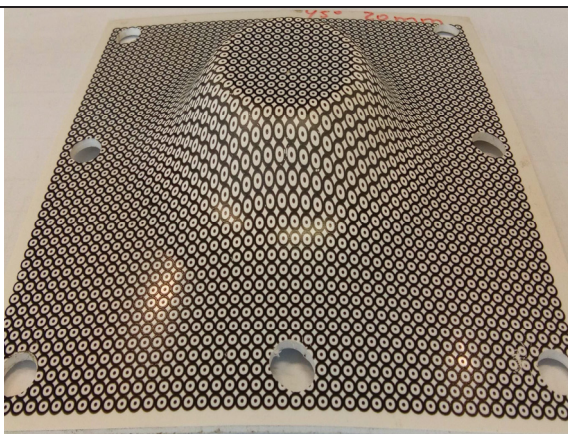
Material: PVC	Ângulo ( ° )	Profundidade (mm)
	10	20
	20	20

FIGURA -53 ESTAMPAGEMM INCREMENTAL – PVC

(CONCLUSÃO)

	30	20
	40	40
	45	20

FONTE: O autor ( 2017 ).

#### 4.2.1 Resultados das Falhas nos polímeros PETG e PVC

As pesquisas sobre EI para polímeros PETG e PVC, foram constatado que os polímeros adicionam novos fenômenos na caracterização dos limites de conformabilidade da estampagem incremental, introduzindo novos modos de falha que não são encontrados experimentalmente nos metais. A FIGURA 54 a 56 mostra os tipos de falha encontrado na Estampagem Incremental.

A falha da trinca circunferencial é uma abertura de fissura ao longo da direção circunferencial na zona de transição entre a parede inclinada e o raio de canto das peças, ilustrado na FIGURA 54.

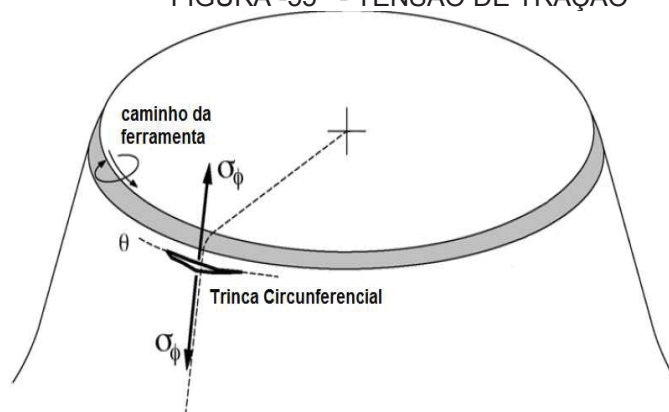
FIGURA -54 DEFEITO NA ETAMPAGEM INCREMENTAL  
TRINCA CIRCUNFERENCIAL - PVC



FONTE: O autor ( 2017 )

A mecânica de deformação associada ao modo de falha de trinca circunferencial é causada por mecanismos de alongamento devido a tensões de tração -  $\sigma$ , ilustrado na FIGURA 55. A morfologia das trincas e seus caminhos de propagação, ao longo da direção circunferencial são muito parecidos com os metais, mas diferem nos modos de falha dos polímeros PETG e PVC.

FIGURA -55 - TENSÃO DE TRAÇÃO



FONTE: Franzen (2009 ).

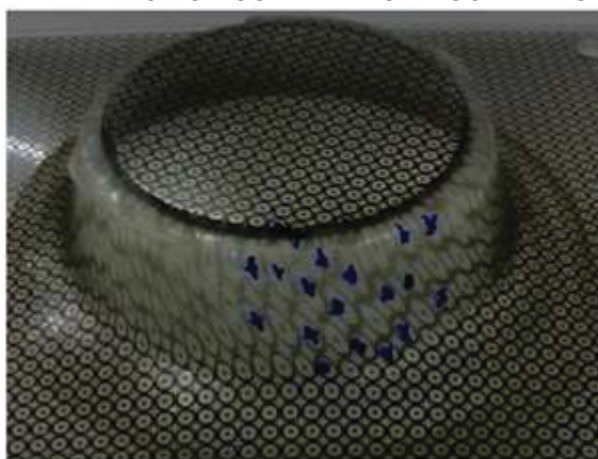
A falha da deformação por enrugamento é desenvolvida pelas rugas ao longo da parede inclinada das peças ( FIGURA 56 ), no qual o modo de falha é causado pela torção em torno do eixo de revolução na direção da rotação da ferramenta de formação, onde é desencadeada na região inferior da parede inclinada, perto do raio de canto. A morfologia das rugas é uma clara indicação de dificuldades em resistir à torção de planos transversais radiais decorrentes do movimento da ferramenta de formação ao longo do percurso circular ( SILVA, 2010 e FRANZEN, 2008 ).

FIGURA -56 – DEFEITO NA ETAMPAGEM INCREMENTAL  
DEFORMAÇÃO POR ENRUGAMENTO -PETG

FONTE: O autor ( 2017 ).

Na FIGURA 57, a deformação é composta de duas falhas, a falha da trinca circunferencial e a falha de enrugamento ao longo da espessura da parede, com ligeira inclinação da parede para esquerda. Neste caso, a conformabilidade é limitada pelo desenvolvimento de rugas ao longo da parede inclinada das peças de estampagem incremental que se ocorreu mais cedo do que a trinca circunferencial.

FIGURA -57 – DEFEITO NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL -PETG  
TRINCA CIRCUNFERENCIAL COM ENRUGAMENTO



FONTE: O autor ( 2017 ).

#### 4.2.2 Resultados de Estampagem – DLF e CLF

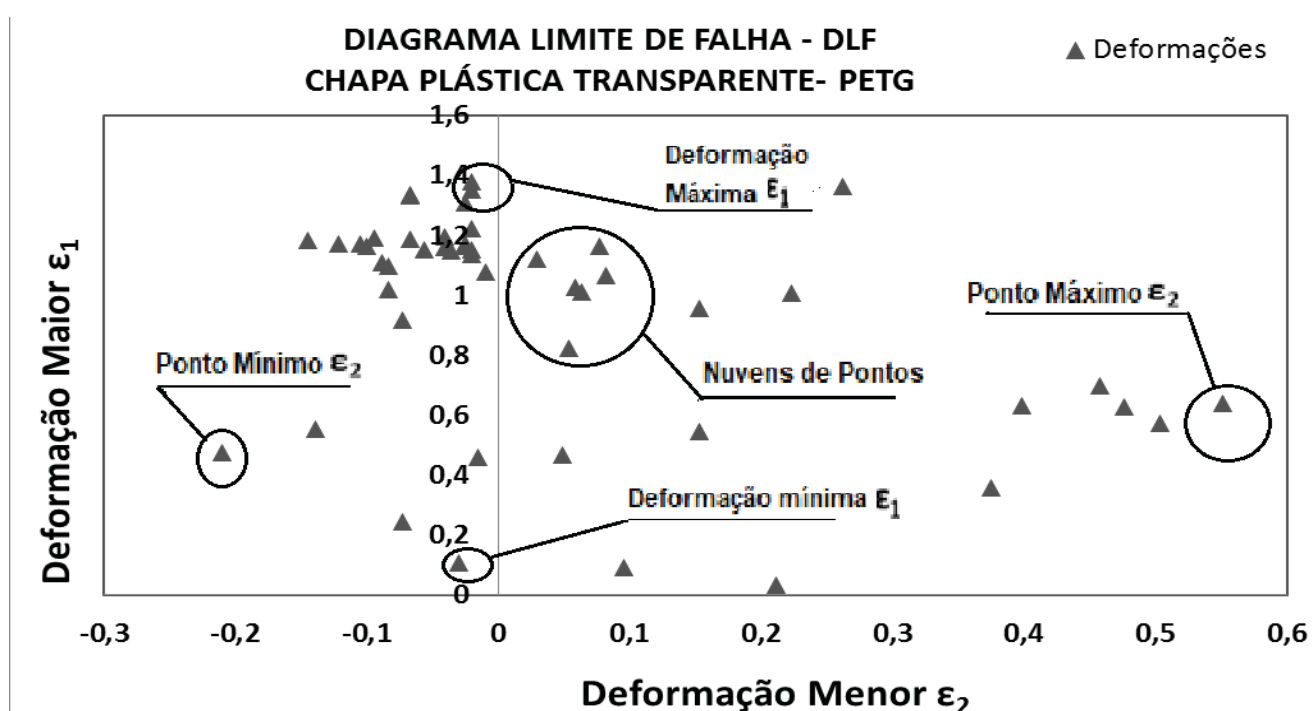
Para obter cada curva de Diagrama Limite de Falha- DLF foram feitas duas baterias de ensaios de tração, Erichsen e estampagem incremental em PETG e PVC. Tomou-se o cuidado de medir a deformação  $\epsilon_1$ , perpendicular à ruptura, pois sendo  $\epsilon_1$  maior, é essa deformação que provoca a ruptura, depois na direção da ruptura, perpendicular a  $\epsilon_1$  foi medida a deformação  $\epsilon_2$ .

Foi tomado o cuidado de medir, após a conformação dos corpos de prova, os círculos impressos onde havia maiores deformações principais maiores e menores, depois os valores foram plotados no gráfico Excel.

## 4.2.2.1 Resultados Experimentais dos Ensaio - PETG

A partir dos dados resultantes dos ensaios de tração, Erichsen e estampagem incremental no polímero PETG realizado com as geometrias de corpo-de-prova, seguindo as normas, foi possível construir o diagrama limite de falha mostrado na FIGURA 58.

FIGURA -58 DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA- PETG



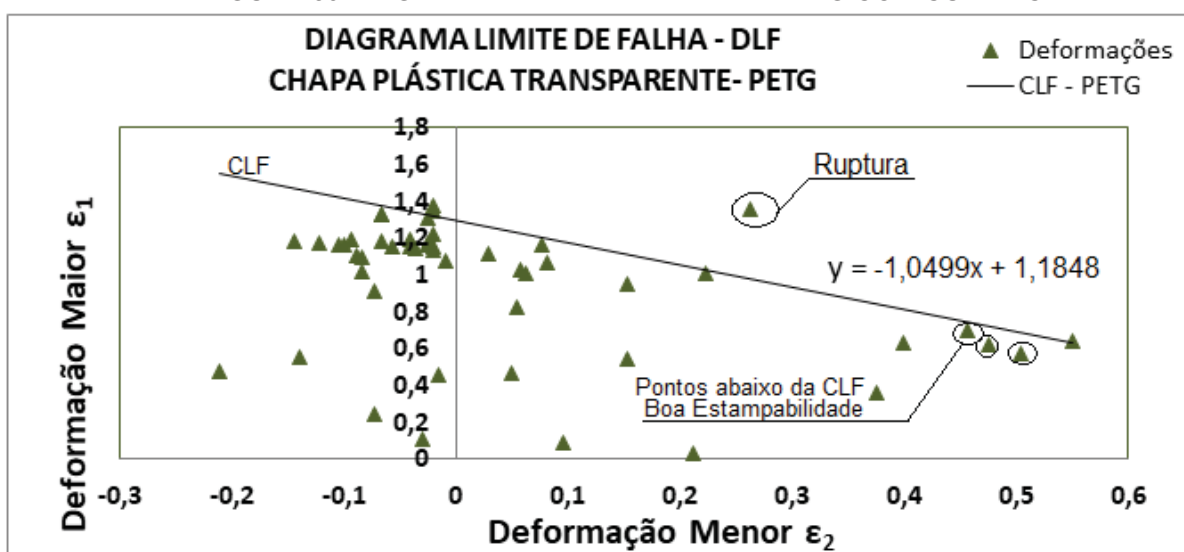
FONTE: O autor ( 2017 ).

O DLF obtido, a partir dos ensaios experimentais, foi possível avaliar os limites de deformação para os diferentes estados de deformação. Nele nota-se que a nuvem de pontos apresenta diversos pontos de deformações em  $\epsilon_1$  próxima de 1,20, um ponto de deformação mínima em  $\epsilon_1$  próxima de 0,10 e um ponto de deformação máxima em  $\epsilon_1$  próxima de 1,4. Encontramos uma nuvem de pontos que apresentam diversos pontos de deformações em  $\epsilon_2$  próxima de -0,04, um ponto de deformação mínima em  $\epsilon_2$  próxima de -0,20 e um ponto de deformação máxima em  $\epsilon_2$  próxima de 0,55.

Observa no lado esquerdo do diagrama uma concentração de pontos de deformações em  $\epsilon_2$  próxima a um estado de tensão uniaxial do que de embutimento profundo. Pode-se observar que o valor de mínima deformação não ocorre no estado plano de tensões e deformações ( $\epsilon_2=0$ ), algo que é geralmente observado nesse tipo de representação.

A partir do gráfico do diagrama de limite de falha, PETG foi realizado um levantamento da curva de limite de falha, ilustrado na FIGURA 59. Esta curva limite de falha- CLF passa sobre os pontos de máxima deformação, ou seja, sobre os pontos mais elevados do DLF. Sendo que a curva CLF é representada por uma reta da ordem 1, onde os valores obtidos a acima da reta, correspondem a zona de falha ou fratura, e os valores obtidos abaixo da reta representam uma zona segura ou zona de boa conformabilidade.

FIGURA-59 DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PETG COM CURVA CLF



FONTE: O autor ( 2017 )

A curva de limite de falha-CLF representada pela função,  $y = -1,0499x + 1,1848$  foi construída a partir do ponto de deformação  $\epsilon_1 = 1,18$  e  $\epsilon_2 = -0,14$  (CP's de tração ) e do ponto de deformação  $\epsilon_1 = 0,69$  e  $\epsilon_2 = 0,45$  ( CP's de estampagem incremental PETG ).

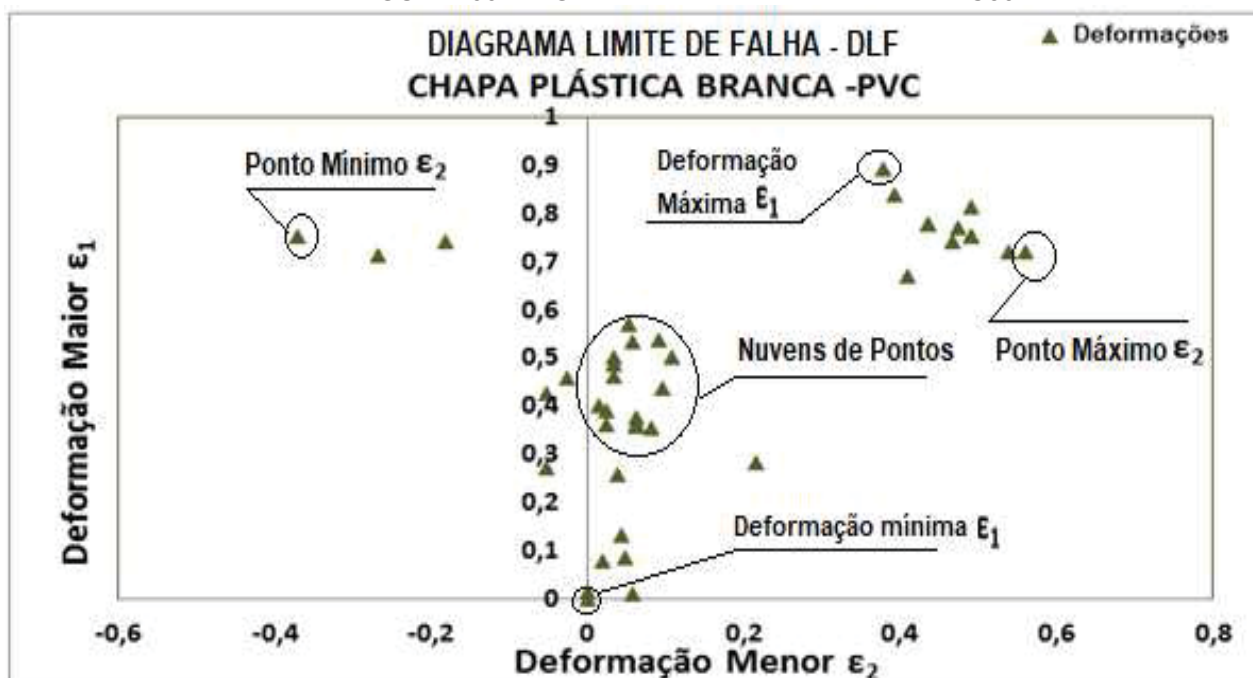
Para a correção ( compensação ) do erro cometido na construção do CLF, com a deformação  $\epsilon_1$  próxima de 1,20, pode ser considerada uma margem para trabalho seguro de 10% ( faixa de estrição ) abaixo desse valor experimental, tem-

se uma deformação máxima verdadeira possível de 1,08 válida para todos estados de deformação representados pelo diagrama experimental.

#### 4.2.2.2 Resultados Experimentais dos Ensaio – PVC

Os dados resultantes dos ensaios de tração, Erichsen e estampagem incremental no polímero PVC realizado com as geometrias de corpo-de-prova, seguindo as normas, foi possível construir o diagrama limite de falha mostrado na FIGURA 60.

FIGURA -60 DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PVC59



FONTE: O autor ( 2017 ).

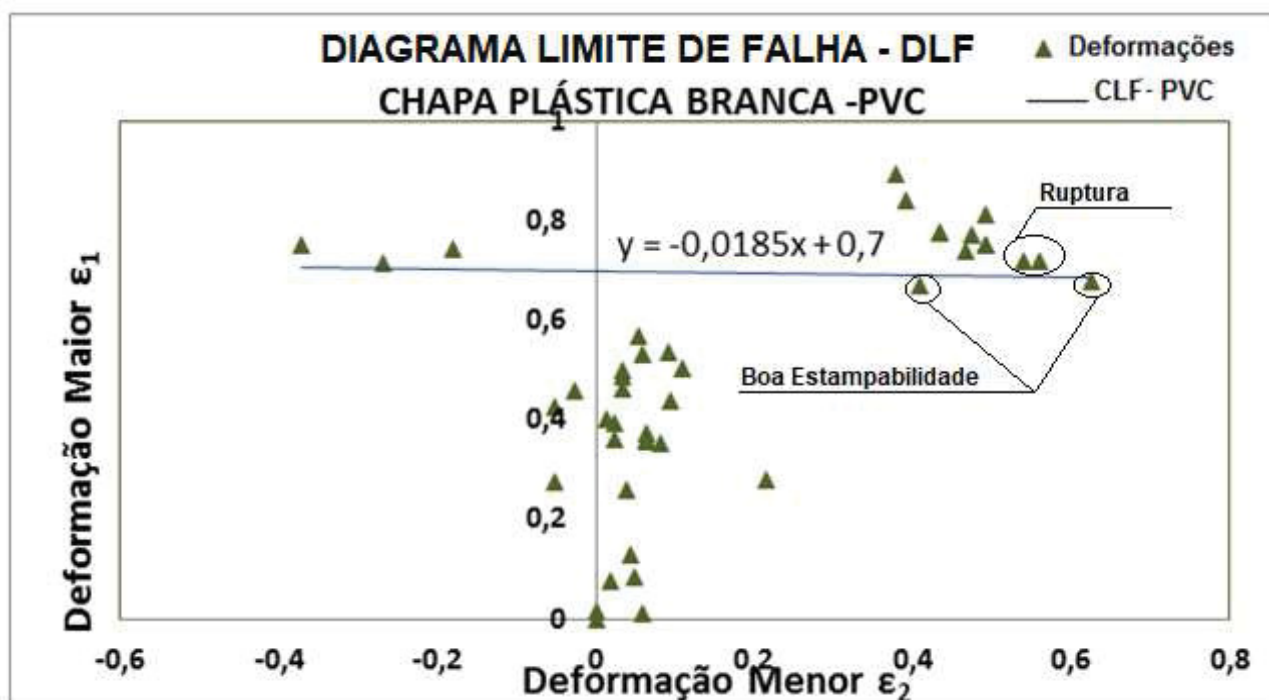
O DLF obtido, a partir dos ensaios experimentais, foi possível avaliar os limites de deformação para os diferentes estados de deformação. Nele nota-se que a nuvem de pontos apresenta diversos pontos de deformações em  $\epsilon_1$  próxima de 0,5, um ponto de deformação mínima em  $\epsilon_1$  próxima de 0,0 e um ponto de deformação máxima em  $\epsilon_1$  próxima de 0,9. Encontramos uma nuvem de pontos que apresenta

várias deformações em  $\epsilon_2$  próxima de 0,1, um ponto de deformação mínima em  $\epsilon_2$  próxima de -0,40 e um ponto de deformação máxima em  $\epsilon_2$  próxima de 0,6.

Observa-se lado esquerdo do diagrama uma região de poucos pontos de deformações em  $\epsilon_2$  próxima a um estado de tensão uniaxial do que de embutimento profundo. Pode-se observar que o valor de mínima deformação ocorre no estado plano de tensões e deformações ( $\epsilon_2=0$ ), algo que é geralmente observado nesse tipo de representação.

A partir do gráfico do diagrama de limite de falha, PVC foi realizado um levantamento da curva de limite de falha, ilustrado na FIGURA 61.

FIGURA -61 DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PVC COM CURVA CLF



FONTE: O autor ( 2017 ).

Para a curva CLF do PVC foi obtido uma reta de ordem 1,  $y=-0,0185x+0,70$  na qual os valores posicionados acima da curva correspondem à ruptura e abaixo representam uma faixa de boa estampabilidade. A curva de limite de falha- CLF  $y=-0,0185x+0,70$  apresentou limite de deformação com ponto de  $\epsilon_1$  próxima de 0,7. Esta curva de limite de falha foi construída a partir do ponto de deformação  $\epsilon_1= 0,75$  e  $\epsilon_2=-0,37$  ( CP's de tração ) e do ponto de deformação  $\epsilon_1=0,72$  e  $\epsilon_2= 0,55$  ( CP's de estampagem incremental PVC ).

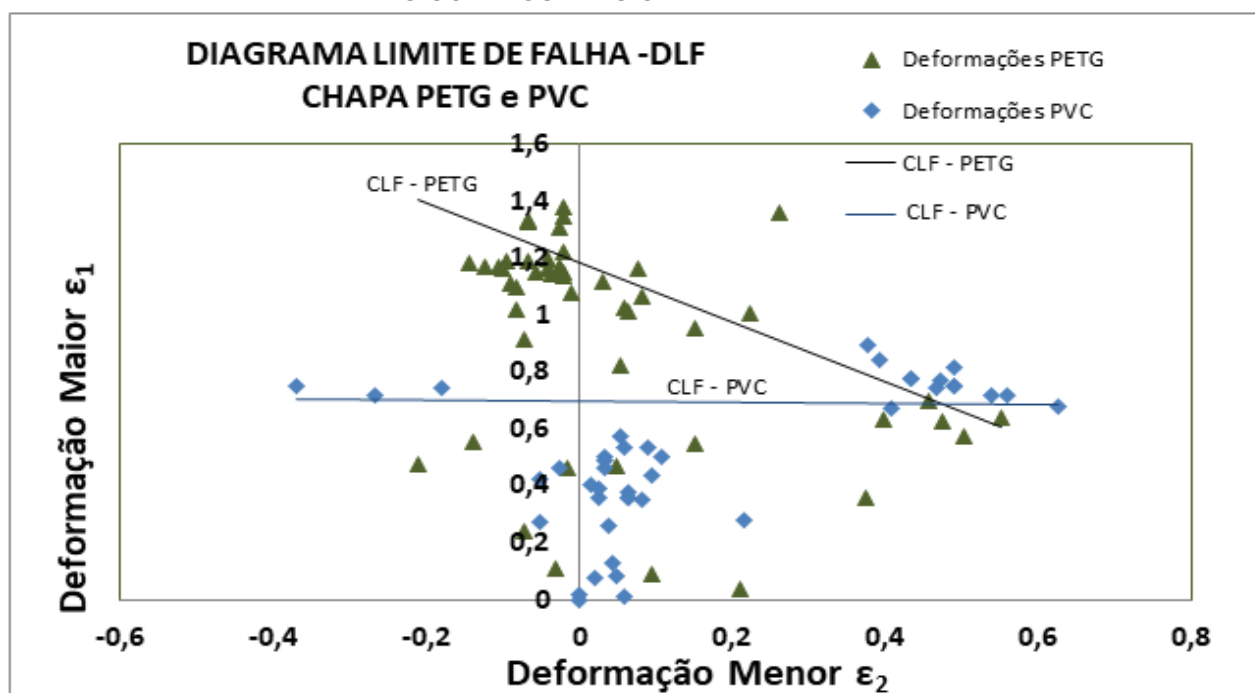
#### 4.2.2.3 Comparação dos Resultados Experimentais dos Ensaios: PETG e PVC

A partir do gráfico do diagrama de limite de falha, PETG e PVC foi realizado um levantamento das curvas de limite de falha, para efeito comparativo, ilustrado FIGURA 61. Nota-se que a nuvem de pontos apresenta diversos pontos de deformações, um ponto de deformação mínima em  $\epsilon_1$  próxima de 0,0 e um ponto de deformação máxima em  $\epsilon_1$  próxima de 1,4. Encontramos uma nuvem de pontos que apresentam várias deformações, um ponto de deformação mínima em  $\epsilon_2$  próxima de -0,40 e um ponto de deformação máxima em  $\epsilon_2$  próxima de 0,6.

Observa no lado esquerdo do diagrama, uma concentração de pontos de deformações em  $\epsilon_2$  próxima a um estado de tensão uniaxial do que de embutimento profundo. Pode-se observar que o valor de mínima deformação ocorreu no estado plano de tensões e deformações ( $\epsilon_2=0$ ) somente para o polímero PVC.

A partir do gráfico do diagrama de limite de falha, PETG e PVC foi realizado um levantamento de duas curvas de limite de falha, ilustrado na FIGURA 62.

FIGURA -62 COMPARAÇÃO DIAGRAMA DE LIMITE DE FALHA PETG E PVC COM 2 CURVAS CLF



FONTE: O autor ( 2017 ).

A curva de limite de falha -CLF de PETG com polinômio de ordem 1,  $y = -1,0499x + 1,1848$  apresentou limite de deformação com valor de  $\epsilon_1$  próxima de 1,20, e a curva de limite de falha-CLF de PVC com polinômio de ordem 1,  $y = -0,0185x + 0,70$  apresentou limite de deformação com ponto de  $\epsilon_1$  próxima de 0,7. Ambas as curvas apresentam os pontos de deformação mínima em  $\epsilon_2$  próxima de -0,2 e um ponto de deformação máxima em  $\epsilon_2$  próxima de 0,5.

$$A_{\text{hemisférico}} = \int_{-0,2}^{0,5} (-1,0499 \epsilon_1 + 1,1848) d\epsilon \quad (\text{PETG}) \quad (4.2.2.3-1)$$

$$A_{\text{hemisférico}} = 0,7189 \text{ ua}$$

$$A_{\text{hemisférico}} = \int_{-0,2}^{0,5} (-0,0185 \epsilon_1 + 0,70) d\epsilon \quad (\text{PVC}) \quad (4.2.2.3-2)$$

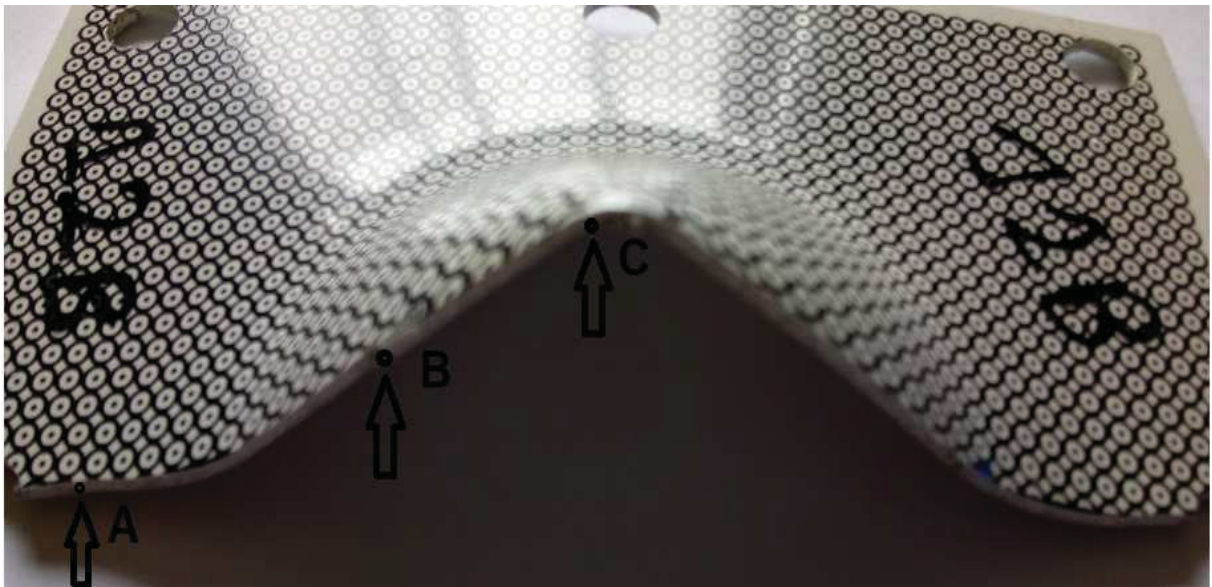
$$A_{\text{hemisférico}} = 0,4881 \text{ ua}$$

Analisando o resultado das integrações das duas equações ( 4.2.2.3-1 e 4.2.2.3-2) obtemos a diferença das áreas sob as duas curvas ( PETG e PVC ) um valor de 0,2308 ua, que corresponde a 32,16% em favor ao PETG, o que significa um aumento de capacidade nos ensaio de tração, Erichsen e estampagem incremental, mantendo os mesmos parâmetros envolvidos nos ensaios: velocidade de avanço, velocidade de avanço em profundidade, ângulos de estampagem e profundidade do passe vertical. Essa diferença de 32,16% para material PETG, representa maior capacidade de se deformar numa situação de estampagem comparado com polímero PVC.

#### 4.2.2.4 Resultados da Variação de Espessura dos Polímeros: PETG e PVC

A variação na espessura ( $s_1$ ) é um dado muito importante quando se analisa a estampagem de chapa polimérica PETG e PVC. Após o final dos testes o experimento (Ângulo de parede  $45^\circ$  -PVC e  $70^\circ$  - PETG), foi cortado para medição das espessuras após o processo de ISF, como mostra a FIGURA 63 e 64. Para a execução das medições foi usado um Paquímetro Digital da marca Stainless Hardened com 0,01 mm de precisão.

FIGURA -63 VARIAÇÃO DA ESPESSURA NA CHAPA PVC -  $45^\circ$  ( PONTOS A, B e C )



FONTE: O autor ( 2017 ).

Chapa PVC de 2mm de espessura ocorreu uma variação da espessura ( $s_1$ ) nos pontos:

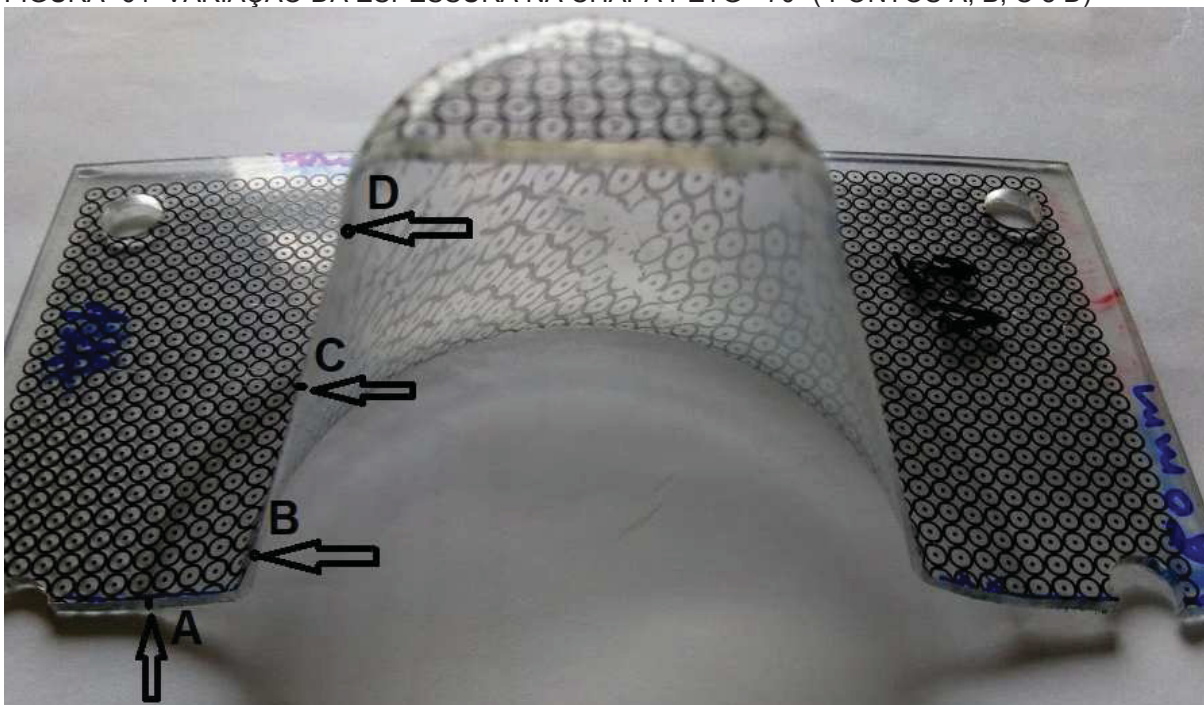
A = 1,91mm

B = 1,41 mm

C = 1,28 mm

Através da análise na espessura da chapa PVC foi possível verificar que as medições realizadas fica em aproximadamente espessura mínima =1,28 mm, máxima = 1,91mm e a média = 1,41mm.

FIGURA -64 VARIAÇÃO DA ESPESSURA NA CHAPA PETG - 70° ( PONTOS A, B, C e D)



FONTE: O autor ( 2017 ).

Chapa PETG de 2mm de espessura ocorreu uma variação da espessura ( $s_1$ ) nos pontos:

A = 1,82mm

B = 0,80 mm

C = 0,67 mm

D = 0,61 mm

Através da análise na espessura da chapa PETG foi possível verificar que as medições realizadas fica em aproximadamente espessura mínima = 0,61 mm, máxima = 1,82mm e a média ( pontos C e D )= 0,64 mm.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos experimentos práticos, foi demonstrado que é possível adaptar recursos da área de usinagem (softwares CAD/CAM, equipamentos, ferramentas e centros de usinagem CNC) para a fabricação de chapas poliméricas PETG e PVC através de estampagem incremental.

A gravação dos círculos nas chapas antes da estampagem, proporcionou um bom resultado possibilitando a medição das deformações na chapas de PETG e PVC após a estampagem. Baseado nos resultados obtidos através dos ensaios de tração, pode-se qualificar a chapa polimérica PETG como um material de boa conformabilidade uma vez que o no gráfico de tensão e deformação apresentou valores de tensão máxima de PETG = 44,05N/mm<sup>2</sup> acima do PVC= 40,05N/mm<sup>2</sup>.

Na estampagem incremental para os polímeros PETG e PVC, conclui-se que o valor inicial do ângulo de estampagem tem maior influência na estampabilidade. Na identificação do material mais adequado para a estampagem incremental do perfil definido, o polímero PETG apresentou melhores resultados. Ângulo de conformação foi a maior dificuldade encontrada na estampagem incremental de polímeros, que é encontrar o ângulo máximo de conformação.

PETG apresentou os melhores resultados de falhas em relação ao PVC, onde a falha da trinca circunferencial surgiu no PVC, porém a falha de deformação por enrugamento e a falha da trinca circunferencial com a falha de enrugamento ao longo da espessura da parede ocorreram somente na chapa polimérica PETG, demonstrando que este material polimérico possui maior conformabilidade.

O processo de estampagem incremental de polímeros PETG e PVC, utilizando chapas com dimensões de 140 x 140 mm, espessura de 2,0 mm, ferramenta de conformação de 8 mm de diâmetro, com ângulo máximo da peça, que foi de 45° e profundidade de até 38,2 mm para PETG, sendo que para a chapa polimérica PVC não foi possível realizar a conformação, o mesmo se rompeu antes dos 25mm de profundidade. Conclui-se que a chapa polimérica PETG é a mais indicada para a estampagem incremental, conseguindo obter melhores resultados que a chapa polimérica PVC.

No gráfico do diagrama de limite de falha, PETG e PVC foi realizado um levantamento das duas curvas de limite de falha- CLF, analisando o resultado das integrações de duas equações, obtemos uma diferença das áreas sob as duas curvas CLF ( PETG e PVC ) um valor de 0,2308 ua, que corresponde a 32,16% em relação ao PETG, o que representa maior capacidade de se deformar em relação ao polímero PVC.

Os resultados da variação da espessura mostraram o alongamento e espessura final da chapa conformada, assim demonstrando a resistência do PETG e PVC no processo de estampagem incremental e que a conformação incremental possui uma estreita correlação com o ângulo de parede (  $\psi$  ),  $\psi = 45^\circ$  ( PVC ) e  $\psi = 70^\circ$  ( PETG ). Conclui-se facilmente, que ao aumentar-se o ângulo de parede a espessura da parede irá diminuir, e que a um determinado ângulo, a espessura atinge o valor mínimo e ocorre a fratura. Portanto até uma certa extensão, o ângulo de parede pode ser caracterizado como limite de conformabilidade. Por fim, comparando as variação da espessura entre chapas poliméricas PETG e PVC, onde PVC obteve uma média de espessura = 1,41mm e PETG obteve uma média de espessura = 0,64mm, observa-se um aumento da 0,77mm ( 54,60% ) da espessura média pela chapa de PETG em relação ao PVC.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Testar outros materiais plásticos como: PEAD, PLA, POM, PP, PE, PVC, PET, PETG na Estampagem Incremental com calor e usar ferramentas de diâmetros superiores a 8 mm. A estampagem incremental com calor melhora e aumenta as condições de estampabilidade, já o uso de ferramentas com diâmetros superiores a 8mm diminuíam a pressão e o atrito na chapa polimérica.

## REFERÊNCIAS

ALLWOOD, J. M., BRAMLEY, A. N., Ridgman, T. W., MILEHAM, A. R. **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, 2005: 323-327p.

ALKAS YONAN, S., SOYARSLAN, C., HAUPT, P., et al., **"A simple finite strain non-linear visco-plastic model for thermoplastics and its application to the simulation of incremental cold forming of polyvinylchloride (PVC)"**, International Journal of Mechanical Sciences, v. 66, pp 192-201, 2013.

AMBROGIO G., DI LORENZO R., FILICE L. , MANCO G.L., **Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31**. CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 57, pp.257-260, 2008.

AMBROGIO, G.; COZZA V., FILICE, L., MICARI, F. **An analytical model for improving precision in single point incremental forming**. Journal of Materials Processing Technology, 2007: 92-95p.

AMBROGIO, G.; FILICE, L.; GAGLIARDI, F. **Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming**. Materials and Design, Rende (CS), Italy, p. 501–508, 2012.

ARRUDA, R. P. D. **Estampagem Incremental na Conformação de Chapas para Fabricação de Coletores Solares Planos**. UFRGS. Tese de Doutorado. Porto Alegre, p. 111. 2009.

ASTM D 638-03 (2005) **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. ASTM Standards

ASTM E 643-84(2000) **Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material** – Cobre a padronização dos parâmetros do teste Olsen. É aplicável a chapas de espessuras entre 0,008" e 0,80" (0,2mm e 2,0 mm).

ATTANASIO, A., CERETTI, E., GIARDINI, C. **Optimization of tool path in two points incremental forming**. Journal of Materials Processing Technology, 2006: 409-412.

BAGUDANCH, I., GARCIA-ROMEU, M.L., CENTENO, G., et al., **"Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride"**, Journal of Materials Processing Technology, v. 219, pp. 221-229, 2015.

BAGUDANCH I., MARTÍNEZ-ROMERO O., ELÍAS-ZÚÑIGA A., et al., **"Identifying Polymeric Constitutive Equations for Incremental Sheet Forming Modelling"**, Procedia Engineering, v. 81, p. 2292-2297, 2014.

BAGUDANCH I., GARCIA-ROMEU M.L., SABATER M., **"Incremental forming of polymers: process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost"**, Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 1013-1024, 2016.

BAMBACH, M. *et al.* **Initial Experimental and Numerical Investigations Into a Class of New Strategies for Single Point Incremental Sheet Forming (SPIF)**. Saarland University, Saarbrücken, Germany, 2003.

BAMBACH, M.; HIRT, G.; AMES, J. **Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process**. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP), Germany, p. 6, 2004. Saarland University.

CÂMARA, JOÃO LUÍS PADRÃO DE BRITO. **Single Point Incremental Forming**. Dissertação de Mestrado, ISF - Instituto Superior Técnico, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009. 88p.

CASTELAN, JOVANI, DALEFFE, ANDERSON, SCHAEFFER, LIRIO, CASA GRANDE, JOECI, GRUBER, VILSON, FRITZEN DANIEL. **Development of Cranial Implant Through Incremental Sheet Forming for Medical Orthopedic Applications**. International Journal of Materials Engineering and Technology (Pushpa Publishing House). (2010): 63-80p

CAVALER, LUIZ CARLOS DE CESARO. **Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L**. Tese de Doutorado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2010, 152p.

CENTENO, G. et al. **Hole-flanging by incremental sheet forming**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, n. 59, p. 46 – 54, 2012.

DALEFFE, ANDERSON. **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro**. Dissertação de Mestrado, LdTM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre. 2008. 84p.

DA SILVA LOPES, T. F. R. **Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Ruptura**. [s.l.] Universidade do Porto, 2013.

DAVARPANA M. A., MIRKOU EI A., YU X., MALHOTRA R., et al., **"Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers"**, Journal of Materials Processing Technology, v. 222, p. 287-300, 2015.

DIGGES KH, GANN RG, GRAYSON SJ, HIRSCHLER MM, LYON RE, PURSER DA, et al. **Human survivability in motor vehicle fires**. Fire Mater 2008; 32(4): 249–58.

DUFLOU, J.R. et al. **Experimental study on force measurements for single point incremental forming**. Journal of Materials Processing Technology, p. 62 – 72, 2007.

DUFLOU, J.R., et al. **Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008: 253–256p

ESSA, K. **Conventional Spinning and Single Point Incremental Forming: Numerical Investigation and Statistical Analysis**. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. ISBN ISBN 978-3-8454-4355-3.

EMMENS W.C., A.H. VAN DEN BOOGAARD. **An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 3688-3695 2008.

FRANZEN V, KWIATKOWSKI L, NEVES J, MARTINS PAF, TEKKAYA AE. **On the capability of single point incremental forming for manufacturing pvc sheet parts**. ICTP-2008, International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, Korea; 2008.

FRANZEN V., KWIATKOWSKI L., MARTINS P.A.F., TEKKAYA A.E., **Single point incremental forming of PVC**, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 462-469.

GARCIA, A., SPIM, M.J., e SANTOS, C. A., 2000, “**Ensaio dos materiais**”, **Livros Técnicos e Científicos**, Rio de Janeiro R.J.

HAGAN E. and JESWIET J., **A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods**”. *Journal of Engineering Manufacture*, 217 (2003) 213–225.

HAM M., JESWIET J. **Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming** *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, p 277 – 280, 2006

HIRT, G., AMES, J., BAMBACH, M. **Basic Investigation into the Characteristics of dies and support tools used in CNC-Incremental Sheet Forming**. *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group Conference ( IDDRG)*, 2006: 341-348p

HIRT, G. *et al.* **Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation**. *Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP)*, Saarland University, Germany, p. 12, 2005.

HIRT, G.; AMES, J.; BAMBACH, M. **Economical and ecological benefits of CNC incremental sheet forming (ISF)**. *Institute of Materials Science/Precision Forming (LWP)*, Saarland University Building, 2003.

HUSSAIN G., *et al.* **A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming**. *Journal of Materials Processing Technology*. p. 98–94, 2007.

HUSSAIN, G., GAO, L., HAYAT, N., ZIRANA, X. **A new formability indicator in single point incremental forming**. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009: 4237–4242p

INGARAO, G. *et al.* **A sustainability point of view on sheet metal forming operations: material wasting and energy consumption in incremental forming and stamping processes**. *Journal of Cleaner Production*, Palermo, Itália, p. 28, 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2012.01.012.

JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G., BRAMLEY, A., DUFLOU, J., ALLWOOD, J. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 54, pp. 88-114 2005.

JUNK, S., HIRT, G., BAMBACH, M., CHOUVALOVA, I. e AMES J. 2003. **Flexible CNC incremental sheet forming: Process evaluation and simulation. VI.** Conferência Nacional de conformação de chapas, 15. Outubro, porto Alegre /RS, Brasil, ed. Scheafer I., Gráfica e Editora Brasil Ltda. P. 30-38.

KULKARNI, SHUBHAMKAR, **Heat Assisted Single Point Forming of Polymer, Graduate School of Clemson University**, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science Mechanical Engineering p 131. 2016.

KOPAC, J.; KAMPUS, Z. **Incremental sheet metal forming on CNC milling machinetool.** Journal of Materials Processing Technology, p. 622–628, 2005. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, A sker ceva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia.

LAMMINEN, L.; TUOMINEN, T.; KIVIVUORI, S. **Incremental Sheet forming with an Industrial Robot.** Institute of Materials Engineering Australasia Ltd, p. 331-335, 2005

LANDELL, BRUNO MAGNANI. **Deformação Plástica Incremental – Análise por Elementos Finitos.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016. 78p.

LE V.S., Ghiotti A., Lucchetta G., **Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials**, 11th ESAFORM 2008 Conference on Material Forming, Lyon, France (2008).

LESZAK, E. Patent US3342051A1, **Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming.** published 1967- 09-19.

MALHOTRA R, CAO J, BELTRAN M, XU D, MAGARGEE J, KIRIDENA V, et al. **Accumulative-DSIF strategy for enhancing process capabilities in incremental forming.** CIRP Ann Manuf Technol 2012; 61(1): 251–4.

MALHOTRA R, CAO J, REN F, KIRIDENA V, CEDRIC XIA Z, REDDY NV. **Improvement of geometric accuracy in incremental forming by using a squeezing toolpath strategy with two forming tools.** J Manuf Sci Eng 2011; 133(6):061019.

MALHOTRA R, REDDY NV, CAO J. **Automatic 3D spiral toolpath generation for single point incremental forming.** J Manuf Sci Eng 2010; 132(6): 061003–13.

MARCINIAK Z., DUNCAN J.L., HU S. J., **Mechanics of sheet metal forming**, Butterworth Heinemann, Oxford 2002.

MARQUES, TÂNIA ALEXANDRA FERREIRA - **Estampagem Incremental de Polímeros**. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2010, 109p

MARTINS, P. A. F. *et al.* **Theory of single point incremental forming**, p. 247–252, 2008.

MARTINS, P.A.F., KWIATKOWSKI, L., FRANZEN, V., *et al.*, "**Single point incremental forming of polymers**". CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 58, p. 229-232, 2009.

MARTINS, P. A. F. *et al.* **Characterization of fracture loci in metal forming**. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 83, p. 112–123, jun. 2014.

MICARI, F., AMBROGIO, G., & FILIC, L. (2007). **Shape and dimensional accuracy insingle point incremental forming: state of the art and future trends**. J. Materials Procesing Technology , 390-395.

NASS, L. I.; HEIBERGER, C. A. (editores). (1988). **Encyclopedia of PVC –Volume 2: Compound design and additives**. 2. ed. New York:Marcel Dekker.

NEVES JOÃO, **Single Point Incremental Forming of Polymers**, Tese de Mestrado, IST, 2008

NETTO, S.E. 2004. **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PATRÍCIO, L. F. S. **Estampagem Incremental de Chapas: Aplicação em Aço Comercial Automotivo**. PUC Minas. Belo Horizonte, p. 235. 2012. Tese de Doutorado.

PLASTIREAL. **Especificações Técnicas do PETG**. Site da empresa Plastireal Indústria e Comércio de Plásticos Ltda. Disponível em:

<<http://www.plastireal.com.br/pdf/placas-chapas-petg-923.pdf>> Acesso em: 29 em nov. 2017.

PRADELLA, MARCELO PINTO E FOLLE, LUIS FERNANDO. **Estudo dos parâmetros de estampagem incremental para PVC.** *Matéria (Rio J.)* [online]. 2016, vol.21, n.4, pp.1094-1104. ISSN 1517-7076.

PRADELLA, MARCELO PINTO. **Design de embalagens: criação de protótipo em polímero pelo método de conformação através da estampagem incremental.** UNIRITTER Universitário Ritter dos Reis, Porto Alegre –RS, P. 84 2015. Dissertação de Mestrado Mestre em Design,

RAUCH M, HASCOET J-Y, HAMANN J-C, PLENEL Y. **Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications.** *Comput Aided Des* 2009; 41(12):877–85.

ROBERT, C. *et al.* **Comparison between incremental deformation theory and flow rule to simulate sheet-metal forming processes.** *Journal of Materials Processing Technology*, Angers Cedex, France, p. 9, 2012.

RODRIGUES J. M. C., MARTINS P.A.F. (2010), **Tecnologia Mecânica**, Escolar Editora.

RODRIGUES, P.F.S. **Aplicação da Estampagem Incremental no Fabrico de moldes: Estudo da Viabilidade Técnico-econômica para industrialização.** Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013. Dissertação de Mestrado.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 193 p.

SENA, JOSÉ ILÍDIO VELOSA D. **Estampagem incremental: Um novo conceito de produção.** Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal, p. 102. 2009. Dissertação de Mestrado.

SILVA, M.B.; ALVES, L. M.; MARTINS, P. A. F. **Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation.** *European Journal of Mechanics A/Solids*, vol. 29, p. 557-566, 2010.

SILVA, P.J. **Estampagem incremental utilizada para prototipagem de peças de aço** ABNT 1008 e ABNT 304. UNB, Brasília/DF ,2011. Dissertação de mestrado.

SY, LÊ VAN. **Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet**. Tese de Doutorado, Innovazione Meccanica e Gestionale, Università degli Studi di Padova: Università degli Studi di Padova, 2009, 205p.

SHAW M. T., **Cold forming of polymeric materials**, Annual Review of Materials Science, 10 (1980) 19-42.

WIEBECK, HELIO.; HARADA, JULIO. **Plásticos de Engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005. 109,123, 139p.

XU R, SHI X, XU D, MALHOTRA R, CAO J. **A preliminary study on the fatigue behavior of sheet metal parts formed with accumulative double- sided incremental forming**. Manuf Lett 2014; 2(1): 8–11.

ZHANG Z, REN H, XU R, MOSER N, SMITH J, NDIP-AGBOR E, et al. **A mixed double-sided incremental forming toolpath strategy for improved geometric accuracy**. J Manuf Sci Eng 2015; 137(5):051007.