

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Carlos Bertozzi Neto

**Avaliação das deformações na estampagem incremental do PET**

São Carlos  
2020

Carlos Bertozzi Neto

## Avaliação das deformações na estampagem incremental do PET

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciana Montanari

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues  
Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Bertozzi Neto, Carlos  
B545a            Avaliação das deformações na estampagem  
                 incremental do PET / Carlos Bertozzi Neto; orientadora Luciana  
Montanari. São Carlos, 2020.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2020.

1. Deformação Incremental. 2. Polímero.  
3. Efeito Twisting. 4. Flangeamento. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## FOLHA DE AVALIAÇÃO

**Candidato:** Carlos Bertozzi Neto

**Título:** Avaliação de deformações na estampagem incremental do PET

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Mecânica

### BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Luciana Montanari  
(Orientadora)

Nota atribuída: 10 (dez)

Luciana Montanari

Prof. Tit. Jaime Gilberto Duduch

Nota atribuída: 10 (dez)

J. Duduch

Eng. MSc. Gustavo Coser Monteiro Dias

Nota atribuída: 10 (dez)

G. Monteiro Dias

Média: 10 (dez)

Resultado: Aprovado

**Data: 09/12/2020.**

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM x NÃO ☐ Visto da orientadora Luciana Montanari

Observação: Após correções indicadas pela banca.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, em especial à minha mãe e à minha avó, por todo o apoio incondicional ao estudo e ao meu desenvolvimento como pessoa, estudante e profissional.

À minha namorada e meus amigos, da graduação e de fora dela, pelo companheirismo a cada dia.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Montanari e ao meu amigo Pedro Paulo, por todas as orientações dadas para a construção deste trabalho.

Aos técnicos do LAMAFE e do Laboratório de Propriedades Mecânicas de Materiais Poliméricos da EESC. Em especial, ao Tiago e ao Ricardo, diretamente envolvidos na execução dos ensaios aqui descritos.

Aos meus colegas de trabalho, que me ajudaram a conciliar as diversas tarefas do estágio com a graduação.

Por fim, ao projeto social Operação Natal, que tanto me ensinou sobre a vida e moldou quem sou hoje.

“Do. Or do not.  
There is no Try.”  
Master Yoda (1980)

## RESUMO

NETO, C. B. **Avaliação das deformações na estampagem incremental do PET.** 2020. 66 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Este trabalho foca na avaliação da aplicabilidade do Politereftelato de Etileno (PET) ao processo de estampagem incremental. Para a caracterização do material foram realizados ensaios de tração. Em seguida, quatro chapas com 250 mm de lado foram ensaiadas, numa configuração de *Single Point Incremental Forming (SPIF)*. Três trajetórias diferentes de ferramenta foram construídas com auxílio do *software* MATLAB, gerando quatro peças finais. Duas delas continham furos de diferentes geometrias em seus centros, com a finalidade de se modificar a distribuição de forças e deformações às quais as peças eram submetidas. Após os ensaios, círculos gravados previamente nas chapas tiveram suas dimensões finais medidas utilizando um conjunto de réguas, e esses valores foram utilizados para a construção dos Diagramas de Limite de Deformação para cada peça (*FLDs*). Também foram elaborados perfis de deformação para cada peça. Estes dados foram analisados juntamente ao ângulo máximo de parede e ao ângulo de *twisting*, fornecendo insumos para a avaliação do comportamento do material. As peças que continham furos apresentaram menores deformações e notou-se um menor ângulo de *twisting* em comparação com o ensaio com chapa inalterada. A construção dos *FLDs* e dos perfis permitiu a visualização dos modos de deformação presentes e indicou a predominância da deformação plana. O mapeamento dos locais mais propícios a desvios de bi-axialidade nos pontos dos *FLDs* deu indícios de uma relação com o *twisting* presente na região. A ausência de fraturas das peças em qualquer um dos quatro ensaios indica uma boa formabilidade do PET, e traça um futuro na utilização do material em aplicações aonde a estampagem incremental se apresenta como uma opção viável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Deformação Incremental. Polímero. Efeito *Twisting*. Flangeamento.

## **ABSTRACT**

NETO, C. B. **Evaluating strain on Single Point Incremental Forming of PET**. 2020. 66 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

This work focuses on evaluating Polyethylene terephthalate (PET, for short) in the process of incremental forming. Samples of the material were characterized through tensile tests, so that mechanical behavior parameters could be obtained. Following that, four 250 mm sided sheets were tested, through Single Point Incremental Forming. Three distinct tool paths were designed with the use of MATLAB software, and they were used to manufacture four final parts. Two of them were drilled, in different geometries, so that the holes could act as forming forces and strain distribution modifiers. After the process, the final strain was evaluated via the circles grid method, with their final dimensions measured using a special set of rulers. These values were then used to build Forming Limit Diagrams (FLDs) for each part. Also, strain profiles were constructed for each part. This piece of data was analyzed along with the maximum achieved wall (or drawing) angle and the twisting angle, providing useful information for an evaluation of the material's behaviors during the tests. The strain measured in pre-drilled parts was smaller when compared to the ones formed in solid sheets. Besides that, the measured twisting angle from them was also smaller in comparison to that of the Benchmark part. The FLDs and strain profiles allowed for a clear visualization of the present strain mechanisms, and shows a dominance of plane strain. Mapping the most common spots where bi-axial stretching was spotted in the FLDs gave indications to a possible relation with that region's twisting phenomena. No parts fractured during any of the four SPIF tests, which attests to a good formability for PET, and points to a future of practical applications for the material, in areas where incremental forming presents itself as a viable solution.

**KEYWORDS:** Incremental Forming. Polymer. Twisting Effect. Hole Flanging.





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Deformação Incremental sem matriz patenteado na década de 60 .....                                                                                      | 17 |
| <b>Figura 2</b> – Métodos distintos de estampagem incremental: a) Com ferramenta única sem matriz; b) Com duas ferramentas; c) Com matriz parcial; d) Com matriz total .. | 19 |
| <b>Figura 3</b> – Ilustração do processo de Single Point Incremental Forming.....                                                                                         | 21 |
| <b>Figura 4</b> – Exemplos de chapas que apresentam o fenômeno de <i>Twisting</i> .....                                                                                   | 22 |
| <b>Figura 5</b> – Exemplos de enrugamento causado por <i>twisting</i> em chapas de PET e PC .....                                                                         | 22 |
| <b>Figura 6</b> – Representação da relação entre espessura inicial e espessura de parede .....                                                                            | 23 |
| <b>Figura 7</b> – (a) Sistema de medição das deformações; (b) Exemplo de elementos deformados após estampagem .....                                                       | 24 |
| <b>Figura 8</b> – (a) Esquema de um <i>FLD</i> ; (b) Zonas de um <i>FLD</i> .....                                                                                         | 25 |
| <b>Figura 9</b> – (a) <i>FLD</i> de uma peça de PVC com imagens dos resultados; (b) <i>FLD</i> de uma peça de PVC com três zonas de medição.....                          | 25 |
| <b>Figura 10</b> – Principais estruturas moleculares – (a) Linear; (b) Ramificada; (c) Com ligação cruzada; (d) Em rede .....                                             | 27 |
| <b>Figura 11</b> – Influência da Temperatura na Tensão real e Deformação real .....                                                                                       | 28 |
| <b>Figura 12</b> – Estrutura do Politereftelato de Etileno (PET).....                                                                                                     | 30 |
| <b>Figura 13</b> – (a) Ilustração da geometria Benchmark; (b) Representação 3D da geometria Benchmark (tronco de cone) .....                                              | 30 |
| <b>Figura 14</b> – (a) Esquema de um processo de Flangeamento; (b) Representação 3D de um produto de Flangeamento .....                                                   | 31 |
| <b>Figura 15</b> – Corpo de prova Tipo I.....                                                                                                                             | 33 |
| <b>Figura 16</b> – Máquina INSTROM 5969 .....                                                                                                                             | 34 |
| <b>Figura 17</b> – (a) Corpo de Prova pré-ensaio; (b) Três réguas específicas de medida .....                                                                             | 35 |
| <b>Figura 18</b> – Procedimento de Offset para obtenção da Tensão de Escoamento .....                                                                                     | 36 |
| <b>Figura 19</b> – Corpos de Prova ensaiados .....                                                                                                                        | 38 |
| <b>Figura 20</b> – Montagem utilizada para os ensaios SPIF .....                                                                                                          | 40 |
| <b>Figura 21</b> – Modelo CAM para a Geometria Benchmark – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Lateral; (c) Vista Superior .....                                          | 42 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 22</b> – Modelo CAM para a Geometria Elipsoidal – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Lateral; (c) Vista Superior .....                   | 44 |
| <b>Figura 23</b> – Desenho 2D da Chapa do ensaio Complexo .....                                                                                     | 45 |
| <b>Figura 24</b> – Modelo CAM para a Geometria Elipsoidal – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Lateral; (c) Vista Superior .....                   | 46 |
| <b>Figura 25</b> – (a) Ensaio Benchmark, seis linhas consideradas na média; (b) Ensaio Elipsoidal, linhas consideradas três a três nas médias ..... | 47 |
| <b>Figura 26</b> – Obtenção do Ângulo de Twisting ( $\beta$ ) para uma das quatro chapas .....                                                      | 48 |
| <b>Figura 27</b> – Peças finais após ensaio SPIF Benchmark – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior .....                                     | 49 |
| <b>Figura 28</b> – Peças finais após ensaio SPIF Hole Flanging – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior .....                                 | 52 |
| <b>Figura 29</b> – Peças finais após ensaio SPIF Elipsoidal – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior .....                                    | 55 |
| <b>Figura 30</b> – Peças finais após ensaio SPIF Complexo – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior .....                                      | 58 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> – Temperaturas de Transição Vítrea de polímeros .....      | 20 |
| <b>Tabela 2</b> – Dimensões principais de um corpo de prova Tipo I .....   | 33 |
| <b>Tabela 3</b> – Principais resultados dos ensaios de tração do PET ..... | 39 |
| <b>Tabela 4</b> – Parâmetros da trajetória para geometria Benchmark.....   | 41 |
| <b>Tabela 5</b> – Parâmetros da trajetória para geometria Elipsoidal ..... | 43 |
| <b>Tabela 6</b> – Parâmetros da trajetória para geometria Complexa.....    | 45 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|      |                                                   |
|------|---------------------------------------------------|
| CNC  | <i>Computer Numeric Control</i>                   |
| CAM  | <i>Computer-Aided Manufacturing</i>               |
| SPIF | <i>Single Point Incremental Forming</i>           |
| DSIF | <i>Double-Sided Incremental Forming</i>           |
| FLD  | <i>Forming Limit Diagram</i>                      |
| FLC  | <i>Forming Limit Curve</i>                        |
| PET  | Politereftelato de Etileno                        |
| PC   | Policarbonato                                     |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |

# SUMÁRIO

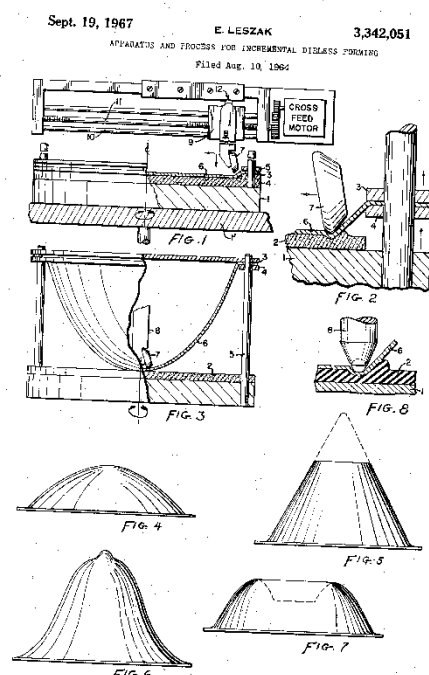
|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                    | 17 |
| 1.1 Objetivos                                                                          | 32 |
| <b>2 EMBASAMENTO TEÓRICO</b>                                                           | 21 |
| 2.1 Parâmetros de influência na estampagem incremental com Ferramenta sem Apoio (SPIF) | 21 |
| 2.1.1 Ângulo de Twisting                                                               | 22 |
| 2.1.2 Ângulo de Parede                                                                 | 23 |
| 2.1.3 Diagrama de Limite de Deformação ( <i>FLD</i> )                                  | 23 |
| 2.1.3.1 Diagrama de Limite de Deformação na Estampagem Incremental                     | 25 |
| 2.2 Polímeros na Estampagem Incremental                                                | 26 |
| 2.2.1 Definição e características dos polímeros                                        | 26 |
| 2.2.2 Politereftalato de etileno (PET)                                                 | 29 |
| 2.3 As geometrias da estampagem incremental                                            | 29 |
| 2.3.1 Benchmark                                                                        | 29 |
| 2.3.2 Hole Flanging/Flangeamento                                                       | 30 |
| 2.3.3 Geometrias Complexas                                                             | 31 |
| <b>3 ENSAIOS DE TRAÇÃO</b>                                                             | 32 |
| 3.1 Metodologia dos Ensaios                                                            | 32 |
| 3.2 Resultados e Discussão                                                             | 36 |
| <b>4 ENSAIOS SPIF</b>                                                                  | 39 |
| 4.1 Metodologia dos Ensaios SPIF                                                       | 39 |
| 4.2 Trajetórias de ferramenta e geometrias                                             | 40 |
| 4.2.1 Benchmark e Hole Flanging                                                        | 40 |
| 4.2.2 Elipsoidal                                                                       | 42 |
| 4.2.3 Complexa                                                                         | 44 |
| 4.3 Medições                                                                           | 46 |
| 4.4 Resultados e Discussão                                                             | 48 |
| 4.4.1 Benchmark                                                                        | 48 |
| 4.4.2 Hole Flanging                                                                    | 50 |
| 4.4.3 Elipsoidal                                                                       | 53 |
| 4.4.4 Complexo                                                                         | 57 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 4.4.5 Discussão Geral..... | 60        |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>    | <b>62</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>    | <b>63</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Na década de 1960 houve o avanço da automação nos processos de fabricação, em especial com a comercialização mais ampla de máquinas de controle numérico, cuja tecnologia já vinha sendo desenvolvida desde o pós-guerra. Com o progresso dos computadores ao final da década, surgem as primeiras versões comerciais com CNC, sigla para Controle Numérico Computadorizado. Com isso, as diversas novas possibilidades de processos e técnicas começaram a ser exploradas. Em 1964, Edward Leszak entrou com um pedido de patente de método e ferramental para um processo de “deformação incremental sem matriz” (KUMAR et al., 2018), ilustrado na Figura 1. A partir deste conceito, a estampagem incremental pode, hoje, ser definida como um processo de fabricação em que o material escolhido é deformado plasticamente de forma gradual, através de uma ferramenta de trajetória controlada pelo emprego de um centro de usinagem CNC ou de uma máquina própria para o processo (ECHRIF et al., 2011; JESWIET et al., 2005).

**Figura 1** – Deformação Incremental sem matriz patenteado na década de 60



Fonte: Leszak (1964)

A estampagem incremental oferece algumas vantagens em relação a outros processos, dos quais destacam-se: a) ainda que possam ser utilizadas matrizes parciais ou totais (JESWIET et al., 2005), essas não são obrigatórias, barateando a operação; b) não é utilizado ferramental ou maquinário complexo; c) tem impacto



ambiental reduzido, visto que não gera resíduos e pode ocorrer à temperatura ambiente; d) permite personalização das trajetórias, levando a um conjunto de geometrias possíveis extenso e com potencial de crescimento, com avanço da técnica. Porém, devido às limitações da plasticidade dos materiais mais utilizados (LI et al., 2017), algumas geometrias mais complexas (com cantos vivos, etc.) não podem ser obtidas sem a utilização de matrizes, o que impõe limitações ao processo.

Pelas vantagens citadas, a estampagem incremental se apresenta como uma alternativa promissora para a produção de peças em pequenos lotes ou de caráter único, condições exploradas em pesquisas voltadas a diversas áreas, das quais se destacam: componentes aeronáuticos (GUPTA et al., 2019; VEERA AJAY et al., 2020); próteses médicas (CHENG et al., 2020; CENTENO et al., 2017; DUFLOU et al., 2005; ARAÚJO et al., 2014), tubos (RAHMANI et al., 2019; CRISTINO et al., 2019) e peças automotivas (KIRIDENA, 2010), entre outras.

Por características do processo, disponibilidade ampla e utilização pelas áreas prováveis de aplicação, os materiais metálicos foram os primeiros a serem pesquisados mais a fundo, há quase 20 anos (KIM; PARK, 2002). Hoje, são foco de estudos aprofundados para expandir os horizontes da estampagem, como utilização de duas chapas auxiliares colocadas acima e abaixo da chapa-alvo (CHANG et al., 2020) e distribuição de tensão em chapas previamente soldadas que passaram pela estampagem incremental, para entender seu comportamento (RUBINO et al., 2020; ANDRADE-CAMPOS et al., 2020). Os primeiros estudos sobre o emprego de chapas poliméricas no processo de estampagem incremental ocorreram nos anos 2000 (LE et al., 2008; FRANZEN et al., 2008; SILVA et al., 2010), visando compreender melhor como a termoplasticidade desses materiais afetava os resultados do processo.

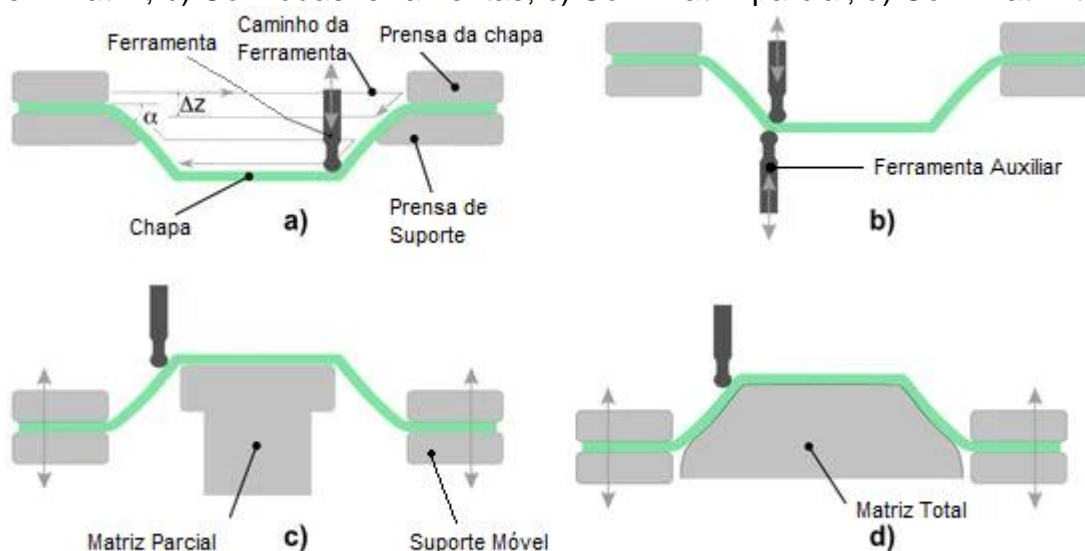
A estampagem incremental pode ser classificada em três métodos principais, ilustrados na Figura 2.

- i) Ferramenta única, sem apoio (*Single Point Incremental Forming*, ou SPIF) – Método mais difundido, econômico e simples de operar, mas apresenta limitação na complexidade da geometria e na precisão;
- ii) Dupla ferramenta (*Double-Sided Incremental Forming*, ou DSIF) – Uma ferramenta possui a função de deformar e a outra, de apoiar. A segunda ferramenta é colocada embaixo da chapa, e pode acompanhar o movimento da ferramenta que deforma ou servir como ponto de apoio, dependendo da automação aplicada ao processo. Quando comparado

ao SPIF, o DSIF é capaz de gerar geometrias mais elaboradas, com maior precisão dimensional, ao custo de maior complexidade na construção das trajetórias;

- iii) Ferramenta única, com auxílio de matriz parcial ou total – Permite geometrias ainda mais complexas e com dimensões mais acuradas. A utilização de matrizes parciais reutilizáveis para peças distintas ou confeccionadas de material mais barato (ATTANASIO, 2008), pode ser um caminho economicamente viável. Pelo melhor produto final, algumas pesquisas tem como foco evoluir a utilização de matrizes, expandindo o envelope de utilização da estampagem incremental (PANJWANI et al., 2016; SILVA et al., 2012; MAIDAGAN et al., 2007).

**Figura 2** – Métodos distintos de estampagem incremental: a) Com ferramenta única sem matriz; b) Com duas ferramentas; c) Com matriz parcial; d) Com matriz total



Fonte: Adaptado de Medina-Sanchez et al. (2018)

Este trabalho tem o SPIF como foco – por sua simplicidade e baixo custo, é o método mais utilizado por diversas pesquisas sobre o tema, inclusive nas que abordam polímeros. Diversos parâmetros do processo influenciam sua capacidade e estão diretamente ligados à geometria da peça e ao material utilizado (BAGUDANCH et al., 2017; MARTINS et al., 2009; DURANTE et al., 2017). Quando se estudam os polímeros, destacam-se:

- Ângulo de *Twisting* – Ângulo máximo de torção das seções transversais da chapa após o processo de estampagem incremental. Por gerar

desvios dimensionais na geometria final, é uma das desvantagens da estampagem incremental (YANG, 2020).

- Ângulo de Parede (Alpha) – Ângulo máximo de parede da geometria, sem a fratura da chapa, importante para entender os limites do material.
- Diagrama de Limite de Formação (*FLD*) – Diagrama que utiliza as deformações da chapa experimental para prever o comportamento e formabilidade do material, de forma gráfica.

### 1.1 Objetivos

Este trabalho propõe avaliar chapas de Politereftalato de Etileno (PET), ao serem submetidas ao processo de estampagem incremental, sob a ótica dos parâmetros descritos. Para isso, serão analisados os *FLDs* das chapas, além de medidos o ângulo de parede e de *twisting*. Diferentes trajetórias de ferramenta foram utilizadas, e duas das quatro chapas foram previamente furadas de formas distintas. O material foi escolhido por sua grande utilização em processos industriais e por apresentar Temperatura de Transição Vítrea distinta de outros polímeros de alto volume industrial, como observado na Tabela 1. Suas propriedades mecânicas foram determinadas através de ensaios de tração, descritos na Seção 3. Assim, o estudo busca avaliar a viabilidade de aplicação da estampagem incremental ao PET, pela análise do estado de deformações do material, agregando à base de conhecimento sobre o processo e fornecendo insumos para pesquisas futuras sobre o tema.

**Tabela 1** – Temperaturas de Transição Vítrea de polímeros

| <b>Material</b>                      | <b>Temperatura de Transição Vítrea (Tg)</b> |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| PET                                  | ~350K                                       |
| Polycarbonato (PC)                   | 423K                                        |
| Policloreto de Vinila (PVC)          | 370K                                        |
| Polietileno de Alta Densidade (PEAD) | ~150K                                       |

Fonte: Mark (1999)

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

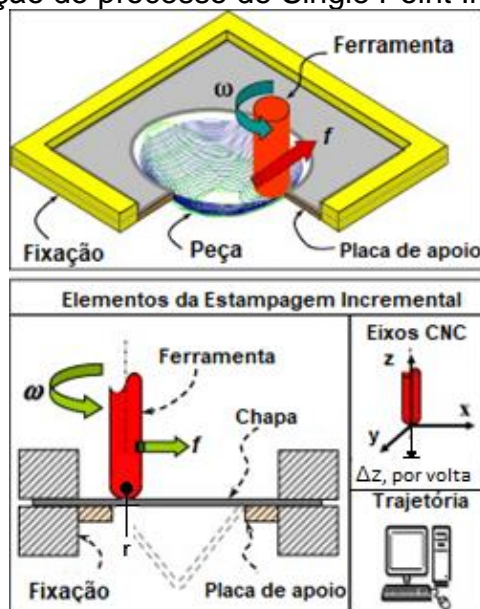
### 2.1 Parâmetros de influência na estampagem incremental com Ferramenta sem Apoio (*SPIF*)

Conceitos como o mecanismo de deformações, forças e consumo de energia da operação já são estudados há décadas, muitas vezes com um enfoque em entender como parâmetros de processo, de geometria e de ferramental atuam sobre o resultado final de peça (LI et al., 2017). Entre esses parâmetros, destacam-se três principais (JESWIET et al., 2005):

- i) Velocidades de avanço ( $f$ ) e de rotação ( $\omega$ ) da ferramenta;
- ii) Incremento em Z ( $\Delta z$ );
- iii) Geometria da ponta da ferramenta (por exemplo, raio  $r$  para ponta esférica).

Além desses, outros parâmetros como a espessura da chapa e características do material utilizado (módulo de Young, etc.) também influenciam na formabilidade – habilidade de uma peça ser deformada plasticamente sem danos. A Figura 3 apresenta a configuração tradicional de um ensaio *SPIF* com seus elementos principais e ilustra alguns dos parâmetros citados.

**Figura 3** – Ilustração do processo de Single Point Incremental Forming



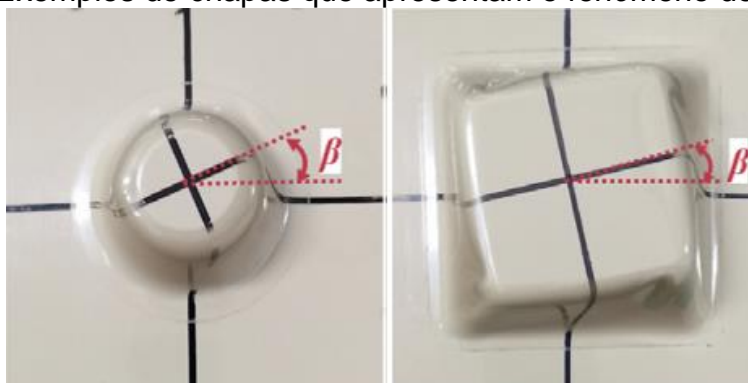
Fonte: Adaptado de Jeswiet et al. (2008).

Para avaliar o impacto das variações dos parâmetros i) a iv), podem ser estudadas algumas grandezas do produto final. Em particular, três são recorrentes nas pesquisas acadêmicas sobre estampagem incremental:

### 2.1.1 Ângulo de *Twisting*

Durante o processo de estampagem, a fricção no contato entre ferramenta e chapa polimérica força parte do material a se deslocar na direção do movimento da ferramenta. Dessa forma, seções paralelas (*in-plane*) ao plano inicial da chapa rotacionam na direção da trajetória da ferramenta. O fenômeno é ilustrado na Figura 4, onde o Ângulo de *Twisting* é representado por  $\beta$  (YANG, 2020; DURANTE et al., 2017; MARQUES et al. 2011).

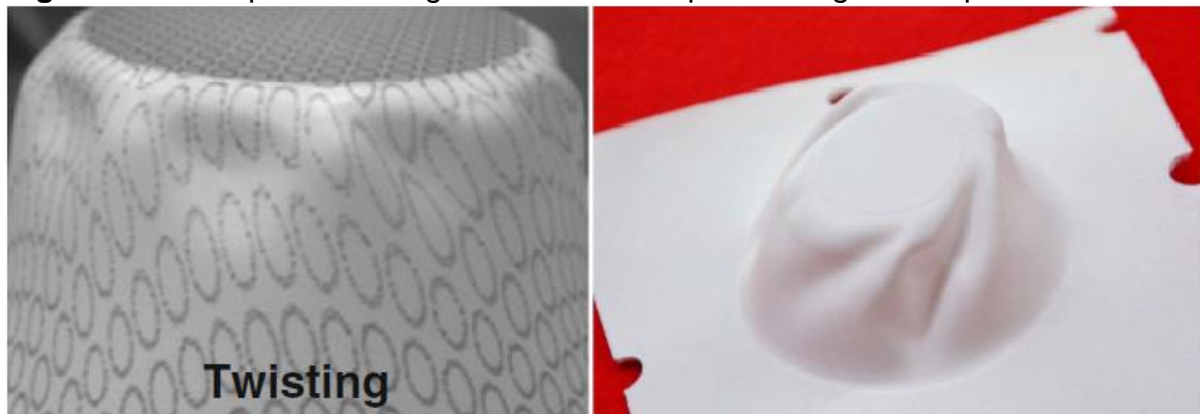
**Figura 4** – Exemplos de chapas que apresentam o fenômeno de *Twisting*



Fonte: Adaptado de Yang (2020)

O fenômeno de *twisting*, por si só, prejudica a precisão dimensional do produto final obtido. Além disso, pode levar à falha da chapa em caso de enrugamento por *wrinkling*, um dos modos de falha observáveis experimentalmente (MARQUES et al., 2011) – situação onde o material não suporta a rotação das seções paralelas. A Figura 5 exemplifica o enrugamento causado por *twisting* excessivo, fenômeno não observado com tamanha magnitude em chapas metálicas.

**Figura 5** – Exemplos de enrugamento causado por *twisting* em chapas de PET e PC



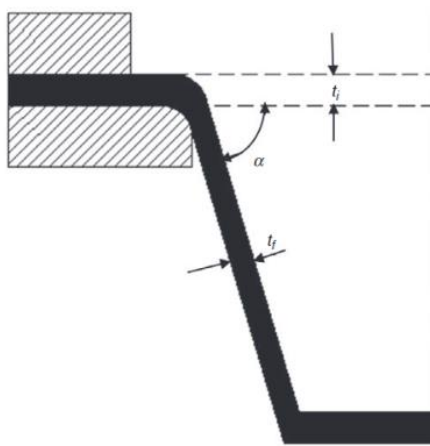
Fonte: Adaptado de Marques et al. (2011) e Durante et al. (2017)

### 2.1.2 Ângulo de Parede

Ao se deformar a chapa durante a estampagem incremental, a espessura de parede da geometria vai sendo reduzida. Uma relação entre a espessura original da chapa e a espessura da parede pode ser estimada pela Equação 1 (KURRA et al., 2014), ilustrada na Figura 6:

$$t_f = t_i * \cos \alpha \quad (1)$$

**Figura 6** – Representação da relação entre espessura inicial e espessura de parede



Fonte: Kurra et al. (2014)

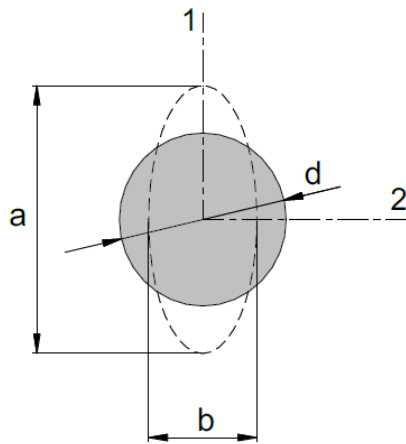
Da Figura 6 e Equação 1, fica claro que, quão maior for o ângulo de parede, menor tende a ser sua espessura, até o ponto de fratura do material. Dessa forma, o máximo ângulo de parede e o mínimo de espessura são capazes de avaliar os limites de formabilidade do material. Essas são características importantes de serem estudadas para que se compreenda quais materiais podem ser melhor empregados em determinadas aplicações.

### 2.1.3 Diagrama de Limite de Formação (FLD)

Um *FLD* (abreviação em inglês de Diagrama de Limite de Formação) é um diagrama que ilustra limites de formação de um material, representando as deformações principal ( $\epsilon_1$ ) e secundária ( $\epsilon_2$ ) – cada uma em um eixo. A *FLC* (abreviação em inglês de Curva de Limite de Formação) indica graficamente a máxima deformação antes da fratura. De forma geral, a construção de um *FLD* se dá com a medição das dimensões finais de elementos circulares gravados previamente na superfície da chapa a ser estampada. Uma vez deformados, os elementos tem suas dimensões medidas e suas deformações principal e secundária calculadas.

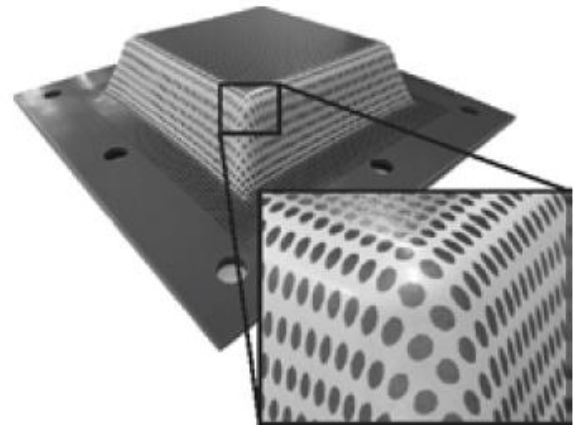
Cada elemento tem suas deformações plotadas no diagrama, sendo representado por um ponto. A distribuição destes pontos permite uma interpretação dos estados de deformação presentes na chapa. A Figura 7 e as equações 2 e 3 descrevem o processo de obtenção das deformações de engenharia e verdadeira (ou real), sendo esta última utilizada no *FLD*. A deformação verdadeira é mais apropriada para deformações de maior magnitude – uma vez que as seções passam a ser consideravelmente diferentes da inicial, a deformação de engenharia (que utiliza a inicial como referência) pode não representar da melhor forma o comportamento do material.

**Figura 7** – (a) Sistema de medição das deformações; (b) Exemplo de elementos deformados após estampagem



(a)

Fonte: Adaptado de Centeno et al. (2012)



(b)

Fonte: Adaptado de Yonan et al. (2013)

$$\text{Deformação de Engenharia (e): } e_1 = \frac{a - d}{d}; e_2 = \frac{b - d}{d} \quad (2)$$

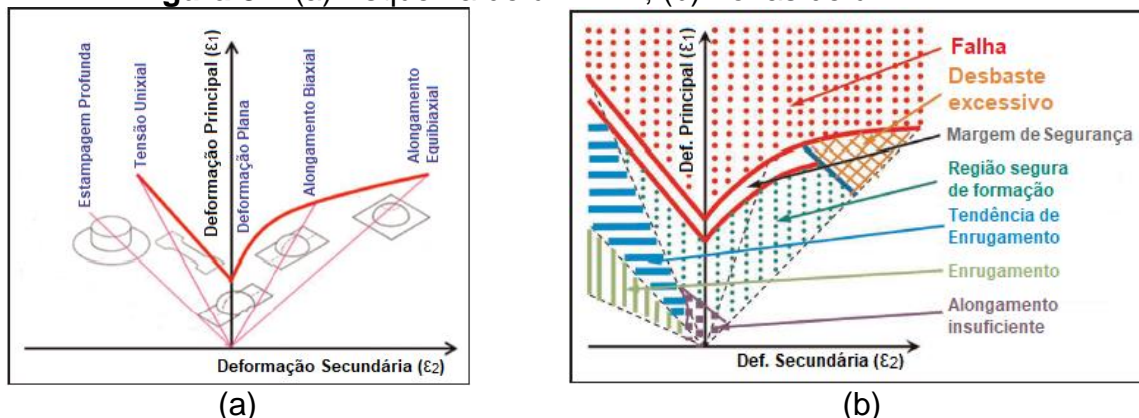
$$\text{Deformação Verdadeira (}\varepsilon\text{): } \varepsilon_1 = \ln\left(\frac{a}{d}\right); \varepsilon_2 = \ln\left(\frac{b}{d}\right) \quad (3)$$

A Figura 8 esquematiza um *FLD*, suas diferentes zonas e estados de deformação correspondentes à certas dispersões dos pontos que representam os elementos. A linha vermelha é chamada de Curva de Limite de Deformação (*FLC*, abreviado em inglês) e indica o limite de deformação, delineando os pontos de falha do material. A partir da *FLC*, é traçada uma margem de segurança de 10%, de onde pode-se definir a zona segura de deformação. Essa abordagem é utilizada para se



compreender melhor a possibilidade da aplicação do material utilizado em processos industriais (BAGUDANCH et al., 2017; YONAN et al., 2013; MARQUES et al., 2011).

**Figura 8** – (a) Esquema de um *FLD*; (b) Zonas de um *FLD*

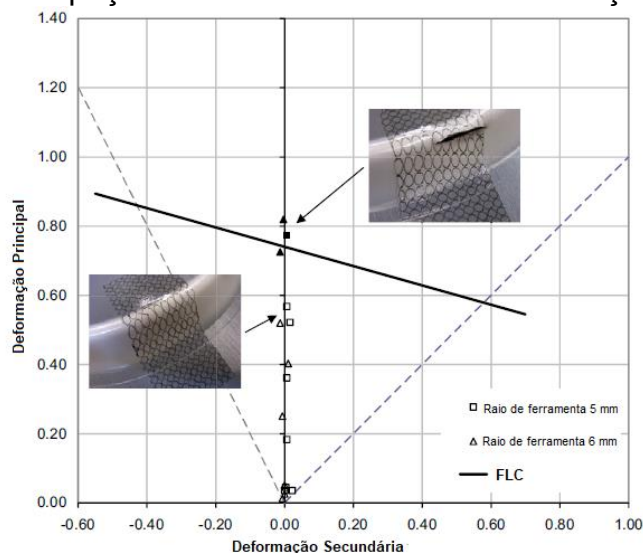


Adaptado de KUMAR PAUL et al. (2013)      Adaptado de KUMAR PAUL et al. (2013)

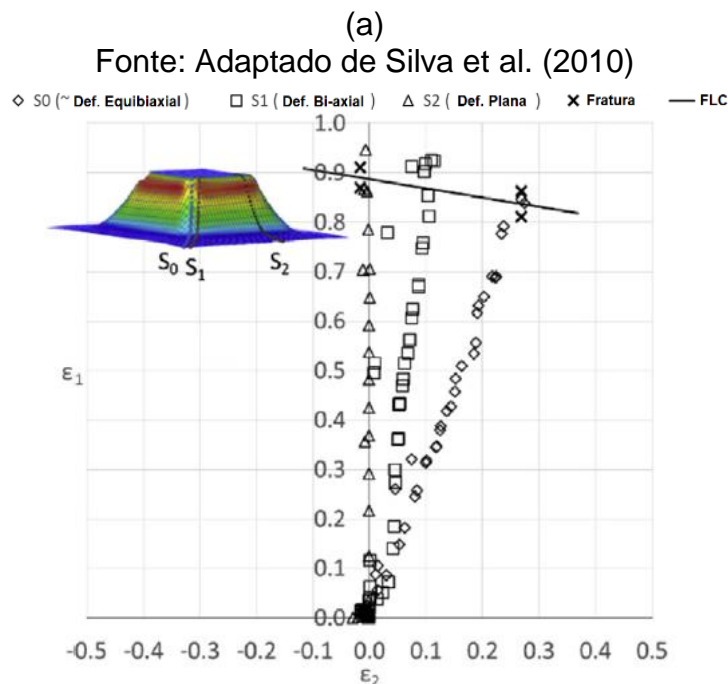
#### 2.1.3.1 Diagrama Limite de Deformação na Estampagem Incremental

No processo SPIF, de forma geral, a deformação plana é dominante, com a presença pontual de alongamento bi-axial, particularmente perto de elementos concentradores de tensão como bordas de furos ou cantos da geometria (MARQUES et al., 2011; CENTENO et al., 2012; YONAN et al., 2013; BAGUDANCH et al., 2017; SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2013). A Figura 9 apresenta dois *FLDs*: um deles (Figura 9a) montado para o PVC, com *FLC* traçada e duas imagens representando o modo de deformação plana, e o ponto de fratura da peça, com geometria de tronco de cone. O outro (Figura 9b), também para uma chapa de PVC, conta com *FLC* e indicação de três regiões de medição no tronco de pirâmide construído.

**Figura 9** – (a) *FLD* de uma peça de PVC com imagens dos resultados; (b) *FLD* de uma peça de PVC com três zonas de medição







(b)

Fonte: Adaptado de Bagudanch et al. (2017)

Na Figura 9b), fica clara a presença de três modos distintos de deformação, com desvios para o modo de deformação bi-axial nas regiões próximas ao canto da geometria. Os autores da Figura 9b) definem três zonas de deformação:

- Os triângulos representam pontos medidos na região S2, ao centro da geometria. O principal modo de deformação presente é a plana, predominante na região.
- Os quadrados indicam pontos medidos em S1, mais próximo da extremidade da geometria. Neles, é possível notar deformações ao longo do eixo secundário. Os autores definem que essa tendência configura uma zona com modo de deformação bi-axial.
- Por fim, os losangos medidos no canto da geometria (S0) apresentam ainda mais um desvio de bi-axialidade. Essa terceira zona foi definida como apresentando modo de deformação equibiaxial.

## 2.2 Polímeros na Estampagem Incremental

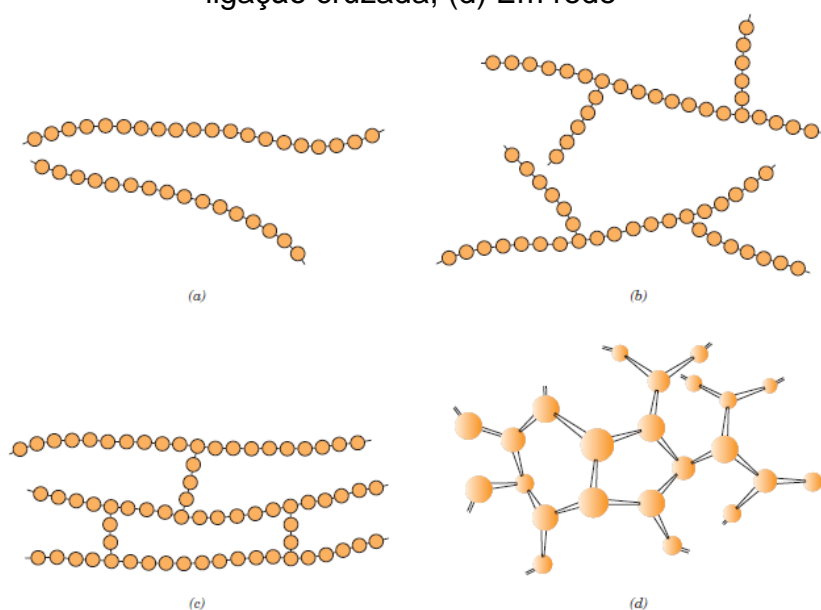
### 2.2.1 Definição e características dos polímeros

Polímeros, de forma objetiva, são substâncias (naturais ou sintéticas) constituídas de grandes cadeias de macromoléculas, compostas por múltiplas unidades de repetição, os meros (CALLISTER, 2000). Polímeros cuja estrutura central é composta por átomos de carbono são chamados polímeros orgânicos. À esta cadeia

podem se acoplar elementos orgânicos ou outros átomos, alterando a natureza química do mero.

A massa molecular causa variações consideráveis nas propriedades de moléculas menores, mas não deixa de ser um fator nas grandes macromoléculas poliméricas (CANEVAROLO, 2006). Também pode-se citar a estrutura molecular, em especial as ramificações e ligações cruzadas, como uma característica de alta influência no material. Em geral, os polímeros não são compostos por apenas uma estrutura, de forma que o volume das ramificações e cruzamentos também tem importância (CALLISTER, 2000). Outras propriedades à nível molecular também alteram o comportamento do material, como a forma das moléculas e seu isomerismo. Além disso, atributos relativos à fabricação e condições de teste da amostra – como sua história térmica, grau de cristalização atingido e velocidade de solicitação – também podem afetar o resultado de um ensaio, por exemplo. A Figura 10 ilustra diferentes estruturas moleculares de um polímero.

**Figura 10** – Principais estruturas moleculares – (a) Linear; (b) Ramificada; (c) Com ligação cruzada; (d) Em rede



Fonte: Adaptado de Callister (2000)

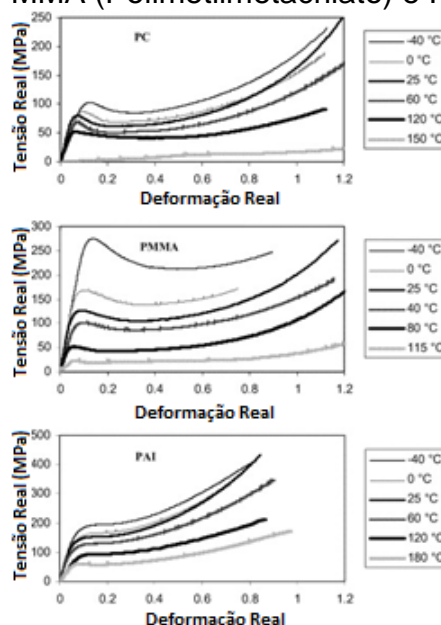
Devido as ligações covalentes entre os átomos que os compõem, os polímeros apresentam cadeias moleculares consideravelmente móveis, apesar de seu grande tamanho. Essa capacidade de movimentação das cadeias poliméricas é o principal responsável pelas propriedades termomecânicas de um polímero, permitindo sua transformação e aplicação industrial, já que permite a fluidez do material quando, por

exemplo, atinge temperaturas próximas a de transição vítrea, como na Tabela 1 (CALLISTER, 2000).

Além disso, ao se solicitar lentamente um polímero, suas cadeias podem se ajustar e proporcionar uma deformação maior do que em um esforço rápido. Todos os parâmetros citados (composição química, estrutura, história térmica...) impactam diretamente na mobilidade molecular e, por isso, atuam sobre o comportamento final do material. Essas características tornam os polímeros candidatos propícios a um processo como a estampagem incremental, que deforma lenta e progressivamente o material.

A temperatura tem um papel fundamental na fabricação e aplicação de polímeros, uma vez que cada um deles apresenta uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) distinta. Com o aumento da temperatura, o polímero adquire energia interna suficiente para que as cadeias moleculares da fase amorfa se movimentem entre si (CANEVAROLO, 2006). Naturalmente, isso causa alterações nas propriedades do material, que passa de um estado vitrificado a um semelhante ao da borracha, motivo para a nomeação da temperatura como a de transição vítrea. A Figura 11 mostra um exemplo de como a temperatura afeta a curva de Tensão real por Deformação real de três diferentes polímeros.

**Figura 11** – Influência da Temperatura na Tensão real e Deformação real do PC (Policarbonato), PMMA (Polimetilmetacrilato) e PAI (Poliamida-imida)



Fonte: Richeton et al. (2006)

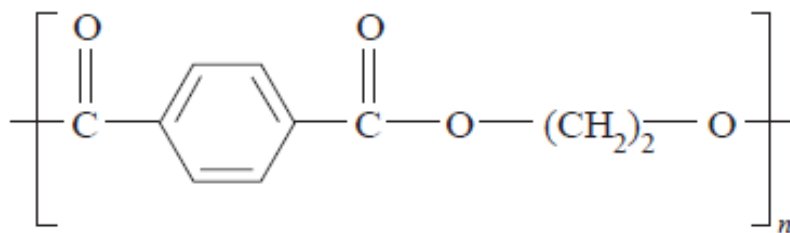
Os polímeros capazes de passar por essa liquefação e solidificação de forma totalmente reversível são chamados de termoplásticos. Polietileno, Poliestireno e Politereftalato de Etileno são alguns dos mais comuns polímeros termoplásticos, presentes em diversas aplicações cotidianas. Este comportamento também reforça a aplicação desse tipo de material na estampagem incremental – a fricção entre ferramenta e chapa gera calor que, dependendo das condições do ensaio, pode acentuar o movimento molecular e facilitar a deformação (BAGUDANCH et al., 2014). Isso permite que o processo ocorra à temperatura ambiente, com diferentes parâmetros de ferramenta para potencializar a variação de temperatura na chapa, ou com um controle de ambiente que consuma menos energia. Os impactos de se variar parâmetros de máquina no consumo de energia e na variação de temperatura foram estudados por diversos projetos de pesquisa (BAGUDANCH et al., 2014; BAGUDANCH et al., 2015; BAGUDANCH et al., 2017; DAVARPANAH et al., 2017). Em geral, busca-se mapear os pontos ótimos do processo, que reduzam os impactos ecológicos e econômicos sem prejudicar a viabilidade da estampagem incremental.

#### 2.2.2 Politereftalato de etileno (PET)

O Politereftalato de etileno, mais conhecido por sua abreviação, PET, é um dos polímeros mais comumente utilizados na indústria mundial. Por conter éster em sua cadeia principal, o PET é incluído na família dos poliésteres, que são muito utilizados na fabricação têxtil, área para onde são destinados 60% da produção mundial de PET (JI, 2013). Além disso, é comum sua utilização para embalagens de comidas e bebidas, cujo enorme volume de reciclagem faz do PET um dos polímeros mais reutilizados mundialmente.

Sua composição química consiste da repetição de unidades  $C_{10}H_8O_4$ , e está ilustrada na Figura 12. Por ter estrutura molecular linear, o PET apresenta comportamento termoplástico, assim como a maioria dos polímeros com esta estrutura. Sua forma natural é a de uma resina sem cor e semicristalina, impermeável ao ar e hidrofóbico. Sua forma amorfa é mais transparente, sendo tradicionalmente utilizada para embalagens alimentícias. Dependendo de como é processado, pode adquirir diferentes estados de rigidez (MARK, 1999).

Algumas das principais propriedades termomecânicas do PET foram obtidas a partir de ensaios de tração conduzidos com amostras do material – os resultados serão apresentados na Seção 3.2.

**Figura 12** – Estrutura do Politereftelato de Etileno (PET)

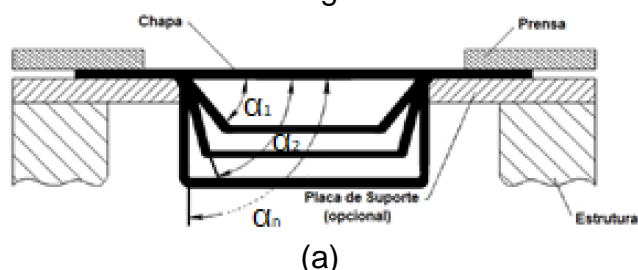
Fonte: MARK (1999)

## 2.3 As geometrias da estampagem incremental

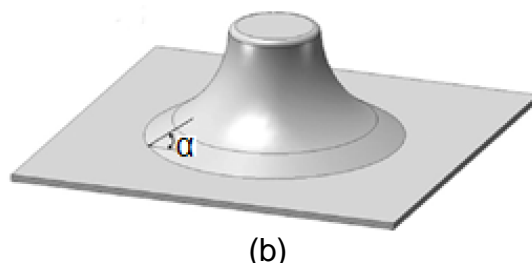
### 2.3.1 Benchmark

Como o próprio nome sugere, uma geometria Benchmark é utilizada para buscar um padrão entre diferentes pesquisas acadêmicas, permitindo uma comparação direta entre resultados das mesmas. A utilização da geometria Benchmark é fundamental para a avaliação de quão bem um material se adapta à estampagem incremental, fornecendo uma base para análises de ângulo de parede (*wall angle*) ou de *FLD*. São utilizadas duas variações para a geometria Benchmark:

- I. Tronco de cone, diâmetro da base de 100 mm a 180 mm (de acordo com o tamanho do lado da chapa), ângulo de parede (alpha) inicial entre 30 e 45°, incremento discreto do ângulo de parede (alpha) de 5° e profundidade até falha. (SILVA et al., 2013), ilustrada na Figura 13.
- II. Tronco de pirâmide de base quadrada, 105 mm de lado, raio de geratriz de 80mm, ângulo de parede (alpha) inicial de 45° e profundidade até falha. (BAGUDANCH et al., 2017; DURANTE et al., 2017 e YONAN et al., 2013).

**Figura 13** – (a) Ilustração da geometria Benchmark; (b) Representação 3D da geometria Benchmark (tronco de cone)

Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Silva et al. (2013)

Pesquisas em que o PET foi submetido a ensaios de *SPIF* com geometrias de Benchmark indicam bons resultados do material. O PET apresentou ângulos de parede se aproximando dos 90 graus em ensaios realizados em condições

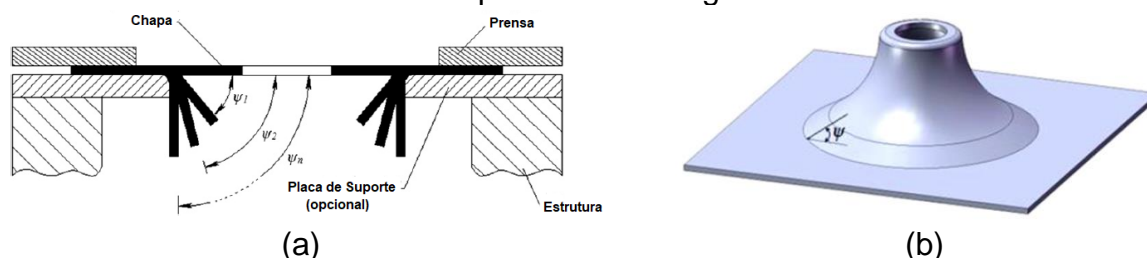
semelhantes às utilizadas neste trabalho, gerando troncos cônicos truncados também. (MARQUES et al. 2011). Esse desempenho pode ser atribuído a capacidade maior do PET de se deformar (graças à sua estrutura semicristalina) e maior resistência à fratura, quando comparado a outros polímeros como PC ou PVC (SILVA et al., 2013).

### 2.3.2 Hole Flanging/Flangeamento

Uma das limitações da estampagem incremental é a obtenção de paredes retas (com ângulo de parede próximo à 90 graus), devido aos limites de plasticidade dos materiais utilizados, em especial quando metais são utilizados. A redução de espessura da parede, resultante do discutido na Seção 2.1.2, contribui para a fratura de uma peça obtida de uma chapa maciça antes de que esta atinja ângulos de parede muito altos. Como mostra a Equação 1, a espessura do material tende a zero quanto maior for o ângulo de parede (KURRA et al., 2014).

Um processo utilizado para buscar paredes retas é o flangeamento (ou *hole flanging*, em inglês). De forma geral, o procedimento consiste na realização de um furo inicial centralizado na chapa, seguido por sucessivas estampagens de troncos de cone, com ângulos de parede cada vez maiores. A Figura 14 ilustra o processo.

**Figura 14** – (a) Esquema de um processo de Flangeamento; (b) Representação 3D de um produto de Flangeamento



Fonte: Adaptado de Centeno et al. (2012)      Fonte: Adaptado de Centeno et al. (2012)

Assim como nos ensaios de geometrias benchmark, experimentos com flangeamento de chapas de PET tiveram resultados positivos, com ângulos de parede que se aproximam dos 90 graus, quando utilizados estampagens sucessivas. O ângulo reto não era atingindo devido ao retorno elástico mais pronunciado observado no material (SILVA et al., 2013).

### 2.3.3 Geometrias Complexas

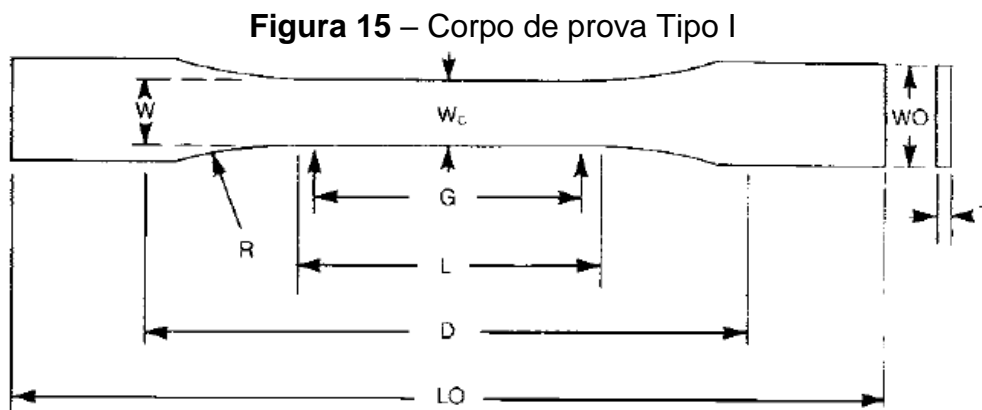
Pensando em algumas das principais aplicações de peças produzidas a partir de estampagem incremental, componentes aeronáuticos (GUPTA et al., 2019; VEERA AJAY et al., 2020) e próteses médicas (CHENG et al., 2020; CENTENO et al., 2017;

DUFLOU et al., 2005; ARAÚJO et al., 2014) se destacam por geometrias intrincadas e alta precisão necessária. Assim, é importante que seja analisado o comportamento dos materiais quando as condições são distintas das encontradas em ensaios padronizados como os de Benchmark.

### 3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

#### 3.1 Metodologia dos Ensaios

Para caracterização das amostras de PET utilizadas, foram realizados ensaios de tração do material. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma ASTM D638-14 (2014), com corpos de prova do Tipo I, ilustrado na Figura 15.



Fonte: ASTM D638-14 (2014)

As principais dimensões de um corpo de prova do Tipo I estão indicadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Dimensões principais de um corpo de prova Tipo I**

| <b>Dimensão</b>                     | <b>Valor [mm]</b> |
|-------------------------------------|-------------------|
| W – largura da seção estreita       | 13                |
| L – comprimento da seção estreita   | 57                |
| WO – Largura geral                  | 19                |
| LO – Comprimento geral              | 165               |
| G – Comprimento de medida           | 50                |
| D – Distância entre garras          | 115               |
| R – Raio de curvatura               | 76                |
| T – Espessura (utilizada no ensaio) | 3                 |

Fonte: ASTM D638-14 (2014)

Os ensaios foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universal INSTROM 5969, apresentada na Figura 16. Foram realizados ensaios com quatro velocidades de solicitação distintas: 1 mm/min, 5 mm/min, 50 mm/min e 500 mm/min. Foi ensaiado um corpo de prova por velocidade. Dessa forma, pôde-se estudar o comportamento do PET sob solicitações rápidas, úteis para determinação do Módulo



de Elasticidade, e lentas, capazes de aferir a deformação máxima suportada pelo material.

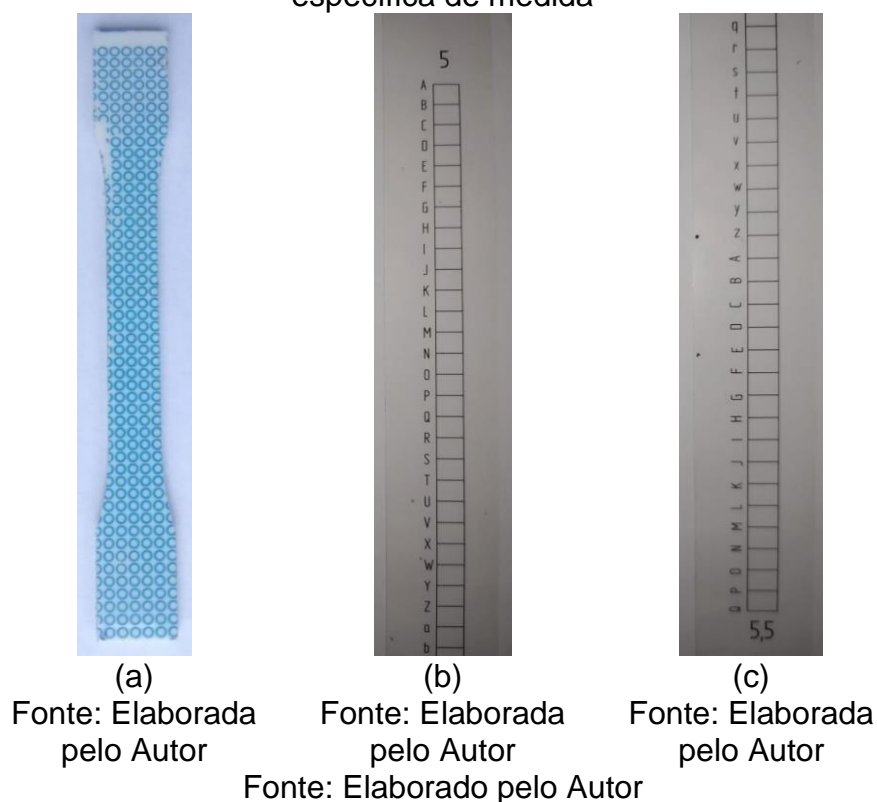
**Figura 16** – Máquina INSTROM 5969



Fonte: Elaborado pelo Autor

O equipamento é capaz de fornecer algumas características (os resultados serão discutidos na seção 3.2), mas não fornecia dados de deformação transversal nem o Coeficiente de Poisson. Para que fossem aferidos esses pontos, os corpos de prova foram previamente marcados com círculos, observáveis na Figura 17. As deformações de cada elemento circular foram medidas como na Figura 7, utilizando um conjunto de réguas (Figura 17b) e c).

**Figura 17** – (a) Corpo de Prova pré-ensaio; (b) Início de uma régua específica de medida; (c) Final da mesma régua específica de medida



Uma vez registradas as deformações, foi computado uma grandeza que, se estivesse sendo analisada a deformação elástica dos elementos circulares, seria o coeficiente de Poisson. À cada elemento medido foi aplicada a Equação 4, onde  $e_1$  e  $e_2$  são a primeira e segunda deformações de engenharia principais, respectivamente. O coeficiente final foi obtido através de uma média simples entre os valores dos elementos deformados do corpo ensaiado a 50 mm/min, que apresentava o maior número de elementos capazes de serem medidos. Como o Coeficiente de Poisson é uma grandeza relacionada ao comportamento elástico do material e o que foi medido foram as deformações plásticas finais dos corpos, é de se esperar um desalinhamento entre o resultado encontrado e valores tabelados de Poisson para o PET.

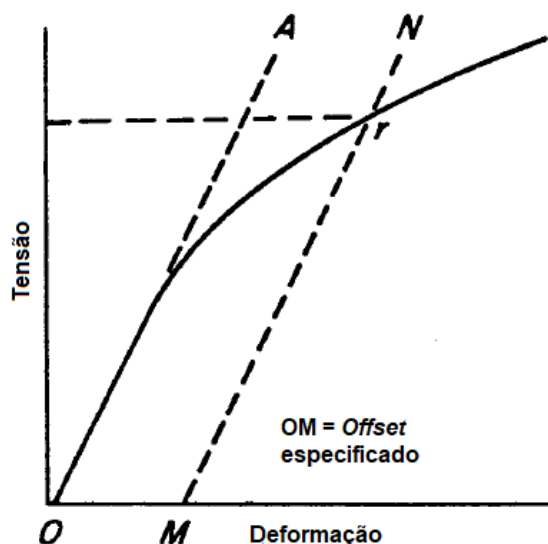
$$\nu = -e_2/e_1 \quad (4)$$

A transição entre as zonas de deformação elástica e plástica não é clara para polímeros. Por isso, os valores relativos ao escoamento foram calculados de acordo com o método de *Offset* sugerido pela norma ASTM D638-14. A norma propõe que a tensão de escoamento seja obtida por uma reta paralela a descreve o comportamento elástico ideal do material e deslocada da mesma (no eixo da deformação) em um valor

especificado. Para este trabalho, foi considerado um valor de 0,2% no eixo da deformação para a distância entre as retas elástica ideal e de *Offset*.

A Figura 18 ilustra o procedimento – a reta OA indica a elasticidade ideal, a reta MN é a reta de *Offset*, e a distância OM é o *Offset* utilizado. O ponto *r* tem como coordenadas a Tensão e Deformação de escoamento.

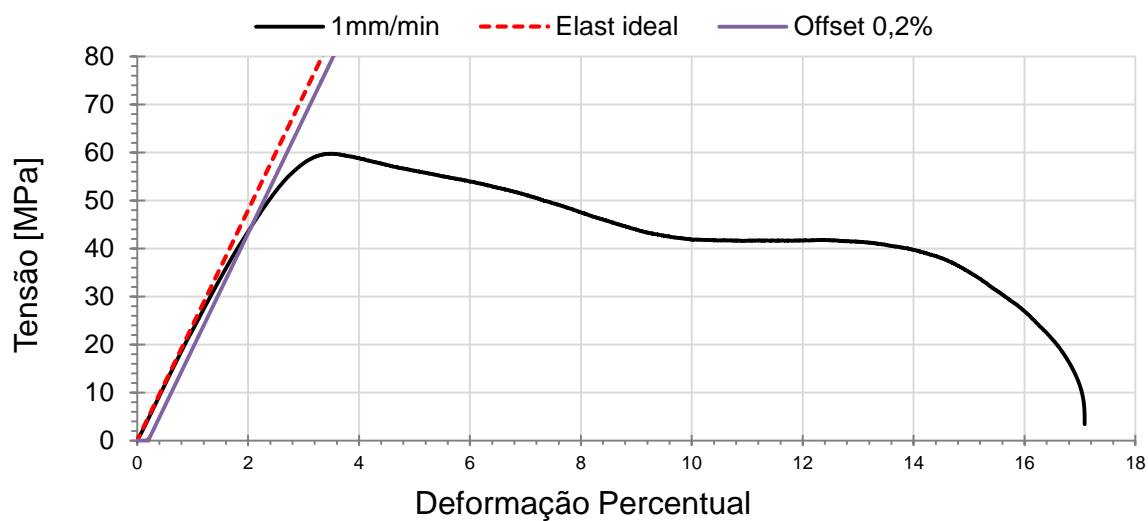
**Figura 18** – Procedimento de Offset para obtenção da Tensão de Escoamento



Fonte: Adaptado de ASTM D638-14

O Gráfico 1 é a curva tensão *versus* deformação para o corpo de prova ensaiado à 1 mm/min, e nele é possível observar as retas utilizadas para a obtenção dos valores de deslocamento. A máquina de ensaios universal INSTRON 5969 fornece os valores de tensão, deformação e força máximos e no escoamento, além do módulo de elasticidade para todos os quatro corpos de prova. Os valores finais foram obtidos por média simples entre os corpos e serão apresentados na Seção 3.2.

**Gráfico 1** – Curva de Tensão de engenharia versus Deformação para velocidade 1mm/min, com curva de Elasticidade Ideal e Offset 0,2%



Fonte: Elaborado pelo Autor

### 3.2 Resultados e Discussão

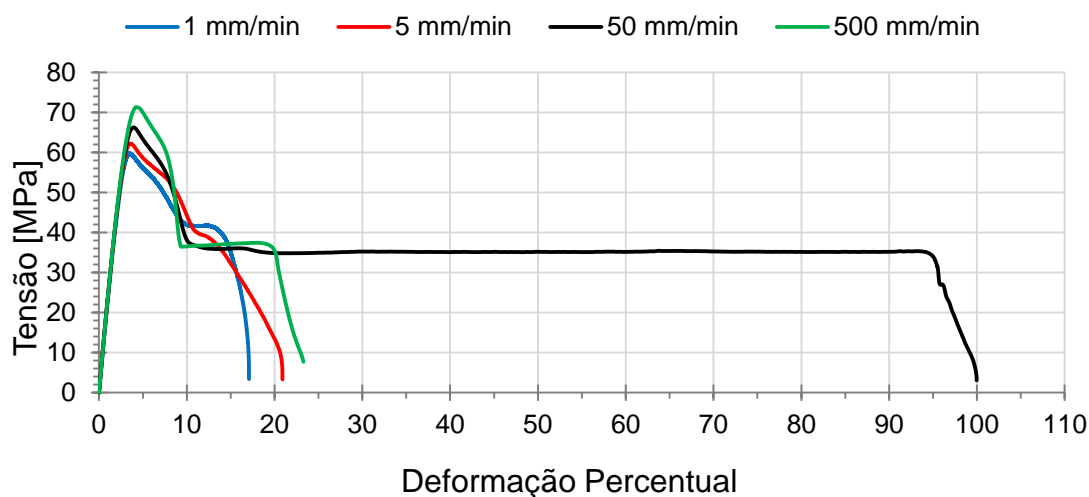
A Figura 19 apresenta os corpos de prova já ensaiados, além de um corpo não ensaiado, para efeito de comparação visual. O corpo 3 foi desconsiderado, uma vez que os resultados obtidos pela máquina se mostraram inconsistentes, sendo esse desvio resultante de algum erro de operação no ensaio ou uma imperfeição local do material. Assim, a velocidade de 50 mm/min foi repetida para o corpo 4. A relação entre os números dos corpos de prova e a velocidade de solitação é:

- |                  |             |              |              |               |
|------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| 1. 1 mm/min      | 2. 5 mm/min | 3. 50 mm/min | 4. 50 mm/min | 5. 500 mm/min |
| (desconsiderado) |             |              |              |               |

**Figura 19** – Corpos de Prova ensaiados

Fonte: Elaborado pelo Autor

A máquina de ensaios universal INSTROM 5969 fornece dados que permitem a construção das curvas de Tensão de engenharia por Deformação percentual para o material ensaiado. O Gráfico 2 apresenta as curvas de cada ensaio realizado.

**Gráfico 2** – Curvas de Tensão de engenharia versus Deformação para o PET

Fonte: Elaborado pelo Autor

Após os ensaios, foram medidas as deformações dos elementos circulares de todos os corpos, sendo os valores do corpo 4 considerados para o cálculo do coeficiente baseado no de Poisson. Também foi extraída a média de grandezas mecânicas do material (Tensão, Força e Deformação máximas e no escoamento, Módulo de Elasticidade) considerando os corpos 1, 2, 4 e 5. A Tabela 3 resume os resultados encontrados.

**Tabela 3 – Principais resultados dos ensaios de tração do PET**

| <b>Grandeza</b>                               | <b>Unidade</b> | <b>Valor médio entre os corpos</b> |
|-----------------------------------------------|----------------|------------------------------------|
| <b>Módulo de Elasticidade</b>                 | MPa            | 2483,96                            |
| <b>Tensão de Escoamento</b>                   | MPa            | 45,05                              |
| <b>Deformação no Escoamento</b>               | %              | 2,04                               |
| <b>Força no Escoamento</b>                    | N              | 1756,93                            |
| <b>Tensão Máxima</b>                          | MPa            | 64,89                              |
| <b>Deformação Máxima</b>                      | %              | 40,31                              |
| <b>Força Máxima</b>                           | N              | 2530,79                            |
| <b>Coeficiente do corpo 4<br/>("Poisson")</b> | -              | 0,065                              |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Analizando os resultados encontrados, em especial o Gráfico 1 e a Figura 19, percebe-se um comportamento particular do material. À exceção do corpo 4, todos os corpos tiveram uma deformação altamente localizada, com não mais que três fileiras de elementos circulares com alongamentos significativos. Esses elementos sofreram aumentos de mais de 100% na direção principal, indicando a capacidade do PET em se deformar plasticamente. Do Gráfico 1, é perceptível que a velocidade de sollicitação não influencia no Módulo de Elasticidade, e quanto maior for, maior tende a ser a tensão máxima suportada. O valor encontrado para o Coeficiente de Poisson está consideravelmente distante da faixa de 0,3-0,5 esperado para um polímero como o PET (CALLISTER, 2000). Isso comprova que o procedimento utilizado, que utiliza as deformações plásticas finais, não representa corretamente o Coeficiente de Poisson. Assim, o correto seria a utilização de uma máquina capaz de medir as deformações na fase elástica, durante o ensaio.

De forma geral, os ensaios de tração foram importantes para atestar o comportamento visco elástico do PET, mais claramente exemplificado no corpo 4. As consideráveis deformações encontradas para este corpo, juntamente com a alta localidade das mesmas, indicam para um bom desempenho do material na estampagem incremental. Apesar do bom panorama inicial, a caracterização das amostras a serem utilizadas nos ensaios *SPIF* se faz fundamental para o PET, para um maior entendimento do comportamento do material utilizado.

## 4 ENSAIOS SPIF

### 4.1 Metodologia dos Ensaios *SPIF*

Foram realizados quatro ensaios de estampagem incremental no Laboratório de Processos de Fabricação (LAMAFE) da USP. Foram utilizadas chapas quadradas de PET com 3 mm de espessura e 250 mm de lado. Nelas, foram gravados círculos de diâmetro 2,5 mm, ocupando uma área retangular e central, de 150 x 150 mm. Os ensaios foram feitos utilizando um centro de usinagem CNC ROMI D-600 de quatro eixos. A ele, foi montado um suporte para a chapa e acoplado o conjunto da ferramenta, cuja ponta esférica apresenta diâmetro de 10mm. A velocidade de avanço foi configurada para 1010 mm/min, a rotação do eixo da ferramenta foi deixada livre e não foi utilizado qualquer tipo de lubrificação. A configuração dos ensaios está ilustrada na Figura 20.

**Figura 20** – Montagem utilizada para os ensaios SPIF



Fonte: Elaborado pelo Autor

## 4.2 Trajetórias de ferramenta e geometrias

Para este trabalho, a geometria de tronco de cone foi a escolhida para o ensaio de Benchmark. As geometrias foram construídas através de trajetórias de ferramenta helicoidais, geradas com o auxílio do software MATLAB – uma curvatura variável da parede lateral, que permite a evolução contínua do ângulo de parede ( $\alpha$ ) (em oposição ao incremento discreto em função da profundidade proposto pela literatura). Dessa forma, a geometria Benchmark utilizada é similar, porém não equivalente à proposta pela bibliografia para o tipo I, como detalhado na seção 2.3.1. A nuvem de pontos que descreve a trajetória foi então utilizada para a criação do modelo e código CAM. Ao total, foram empregadas três trajetórias diferentes para os quatro ensaios realizados.

### 4.2.1 Benchmark e Hole Flanging

Para os dois primeiros ensaios, foi utilizada uma mesma trajetória, similar a Benchmark. Seus parâmetros estão descritos na Tabela 4.

**Tabela 4** – Parâmetros da trajetória para geometria Benchmark

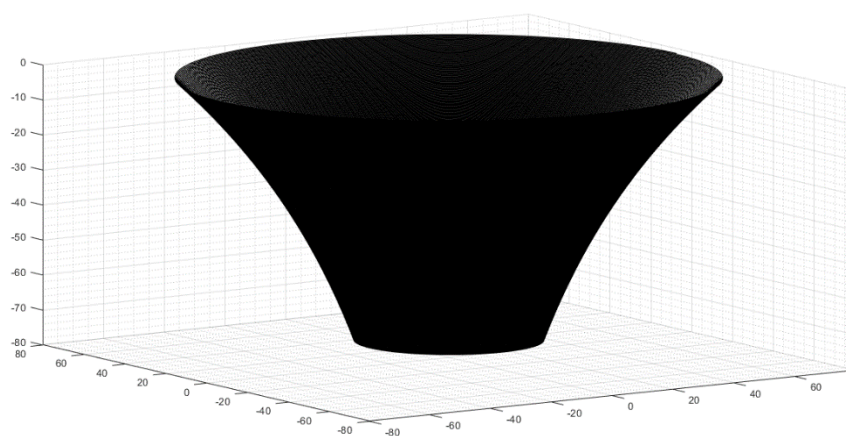
| <b>Parâmetro</b>               | <b>Valor</b>  |
|--------------------------------|---------------|
| Raio inicial do tronco de cone | 75,00 mm      |
| Raio final do tronco de cone   | 26,00 mm      |
| Raio de curvatura inicial      | 75,00 mm      |
| Raio de curvatura final        | 25,97 mm      |
| Profundidade máxima            | 75,00 mm      |
| Ângulo de parede inicial       | 43,32°        |
| Ângulo de parede máximo        | 69,83°        |
| Avanço (em z) por volta        | 0,20 mm/volta |

Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 21 ilustra o modelo CAM da geometria gerada pela trajetória empregada nas duas primeiras chapas estampadas por SPIF.

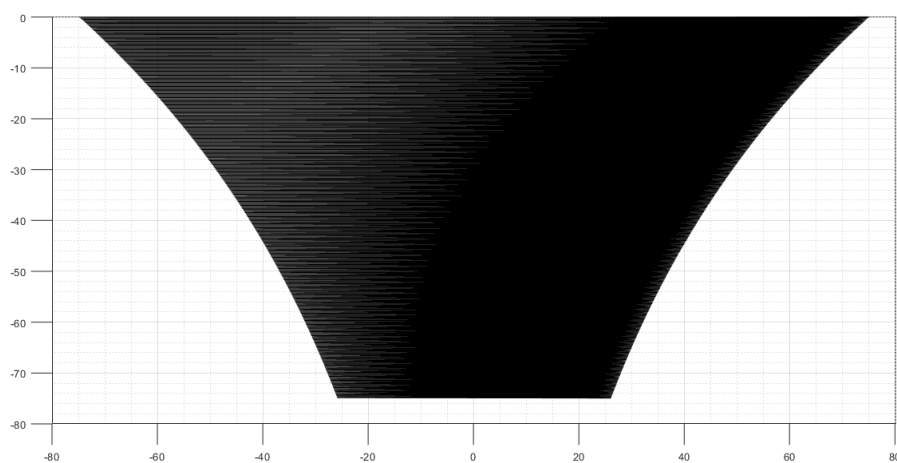


**Figura 21** – Modelo CAM para a Geometria Benchmark – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Lateral; (c) Vista Superior



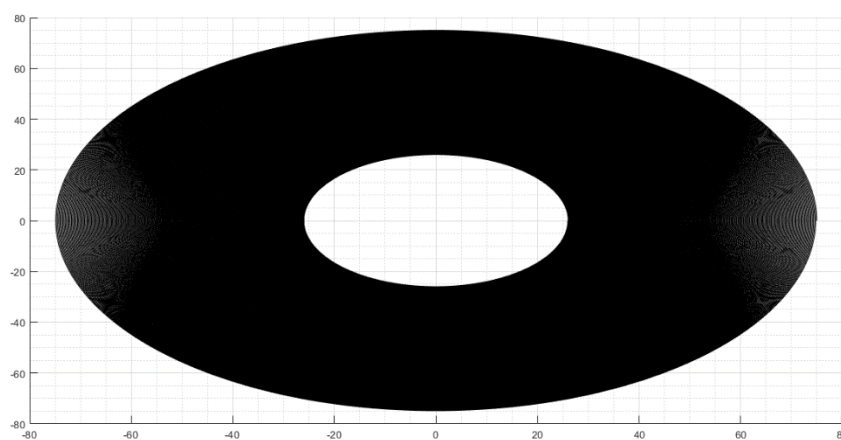
(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor



(c)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A primeira chapa ensaiada não continha qualquer tipo de alteração, sendo totalmente inteiriça. Já a segunda chapa contava com um furo central passante de 40 mm de diâmetro. Esse ensaio pode ser considerado similar a um de Hole Flanging, com a particularidade de se utilizar uma trajetória específica e ter sido realizada uma passada única, em contraste com os múltiplos estágios propostos em literatura. A intenção foi que se comparassem os resultados de ambas, e analisassem se o furo central gera mudanças no comportamento final do material.

#### 4.2.2 Elipsoidal

Para o terceiro ensaio, denominado de “Elipsoidal” foi utilizada uma trajetória com seções elipsoidais (paralelas ao plano da chapa) em contraste com as circulares utilizadas para os dois primeiros experimentos. A motivação por trás dessa configuração é verificar as diferenças entre as deformações nos eixos maior e menor, e o impacto da geometria em elipse no ângulo de *twisting* final da peça. Os parâmetros estão resumidos na Tabela 5.

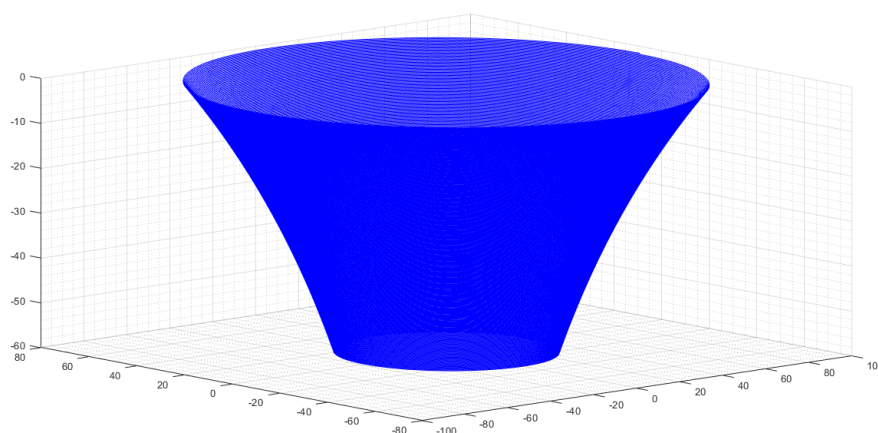
**Tabela 5** – Parâmetros da trajetória para geometria Elipsoidal

| <b>Parâmetro</b>                     | <b>Valor</b> |
|--------------------------------------|--------------|
| Raio maior inicial do tronco de cone | 90,00 mm     |
| Raio maior final do tronco de cone   | 39,00 mm     |
| Raio menor inicial do tronco de cone | 75,00 mm     |
| Raio menor final do tronco de cone   | 32,00 mm     |
| Raio de curvatura inicial            | 62,59 mm     |
| Raio de curvatura final              | 26,76 mm     |
| Profundidade máxima                  | 60,00 mm     |
| Ângulo de parede inicial             | 43,32°       |
| Ângulo de parede máximo              | 65,58°       |
| Avanço (em z) por volta              | 0,2 mm/volta |

Fonte: Elaborado pelo autor

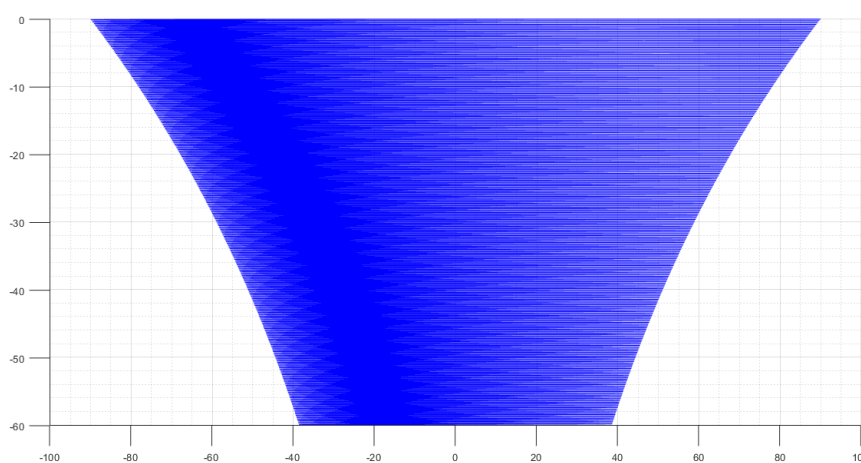
A Figura 22 ilustra o modelo CAM da geometria gerada pela trajetória elipsoidal, utilizada no terceiro ensaio SPIF realizado.

**Figura 22** – Modelo CAM para a Geometria Elipsoidal – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Lateral; (c) Vista Superior



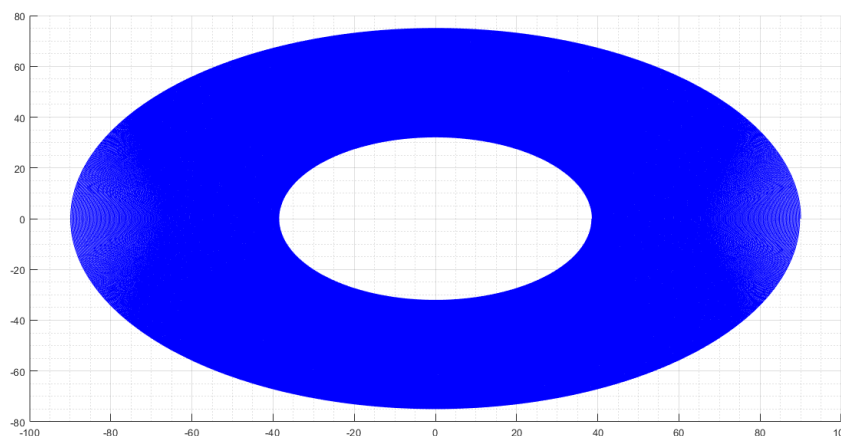
(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor



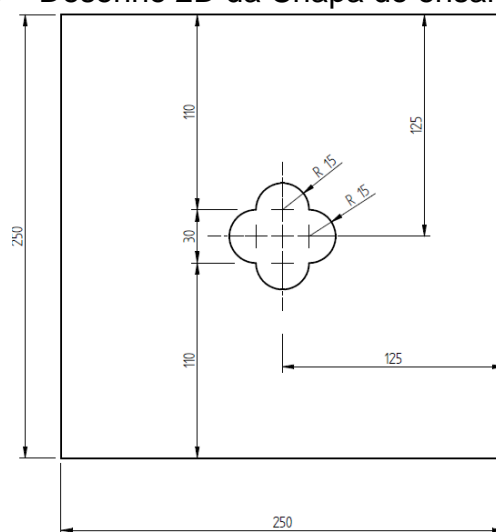
(c)

Fonte: Elaborado pelo Autor

### 4.2.3 Complexo

Por fim, o último ensaio visou o estudo das deformações em uma chapa com modificações maiores, e foi denominado como “Complexo”. Foi removida uma parte central do material através de quatro furos passantes, cada um de 30 mm de diâmetro. A disposição dos furos e o recorte final pode ser observado na Figura 23, que mostra o desenho 2D da chapa.

**Figura 23** – Desenho 2D da Chapa do ensaio Complexo



Fonte: Elaborado pelo Autor

A trajetória e geometria finais foram desenvolvidas a partir daquelas usadas nos primeiros ensaios, ou seja, uma trajetória helicoidal resultando numa geometria de tronco de cone com seção circular. Houveram ajustes, para evitar a entrada da ferramenta nos furos centrais. Os parâmetros utilizados estão listados na Tabela 6.

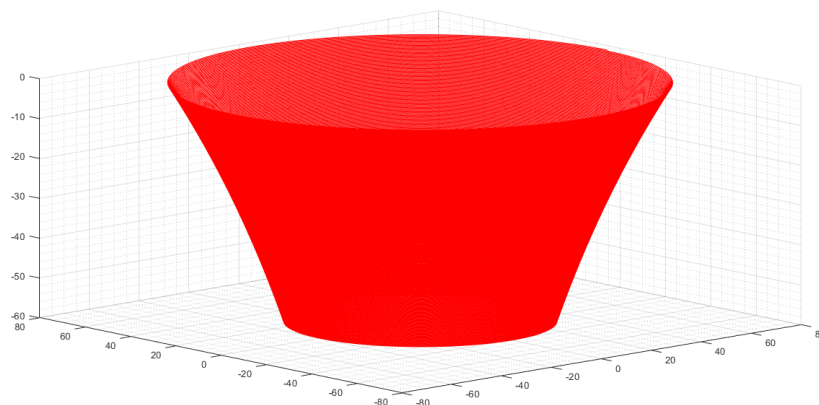
**Tabela 6** – Parâmetros da trajetória para geometria Complexa

| Parâmetro                            | Valor        |
|--------------------------------------|--------------|
| Raio maior inicial do tronco de cone | 75,00 mm     |
| Raio maior final do tronco de cone   | 40,50 mm     |
| Raio de curvatura inicial            | 75,00 mm     |
| Raio de curvatura final              | 40,52 mm     |
| Profundidade máxima                  | 60 mm        |
| Ângulo de parede inicial             | 52,53°       |
| Ângulo de parede máximo              | 67,34°       |
| Avanço (em z) por volta              | 0,2 mm/volta |

Fonte: Elaborado pelo Autor

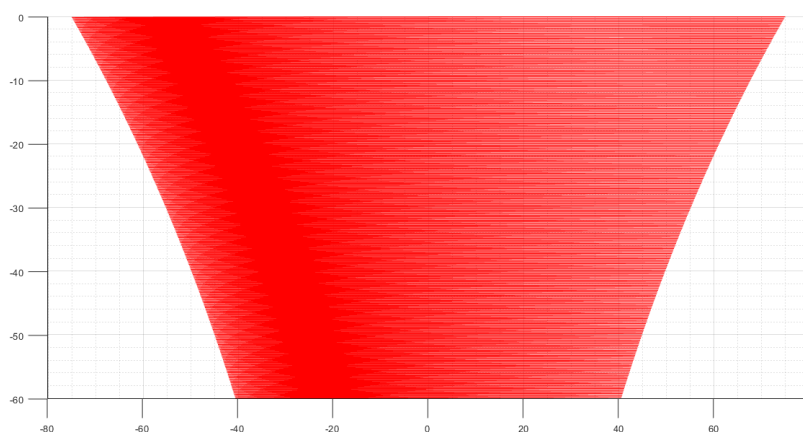
A Figura 24 ilustra o modelo CAM da geometria gerada pela trajetória construída para o ensaio SPIF denominado Complexo, o último a ser realizado.

**Figura 24** – Modelo CAM para a Geometria Elipsoidal – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Lateral; (c) Vista Superior



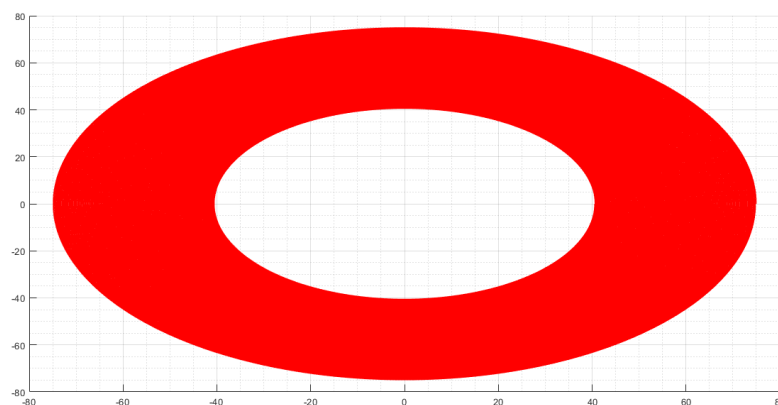
(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor



(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor



(c)

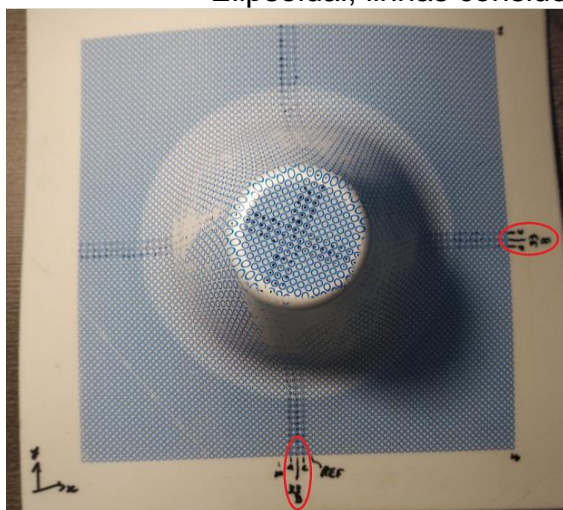
Fonte: Elaborado pelo Autor

### 4.3 Medições

Após os ensaios realizados, os círculos gravados nas chapas se deformaram, e suas dimensões finais puderam ser utilizadas para aferir os resultados dos experimentos. Foram medidos, em cada lado de cada chapa, as dimensões finais dos elementos circulares das três fileiras centrais. Cada elemento teve sua deformação real e de engenharia calculada, tanto no eixo transversal (secundário) quanto no longitudinal (principal). O procedimento seguiu de acordo com o descrito na Seção 2.1.3 (Figura 7 e equações 2 e 3) e também de forma análoga ao realizado para os ensaios de tração.

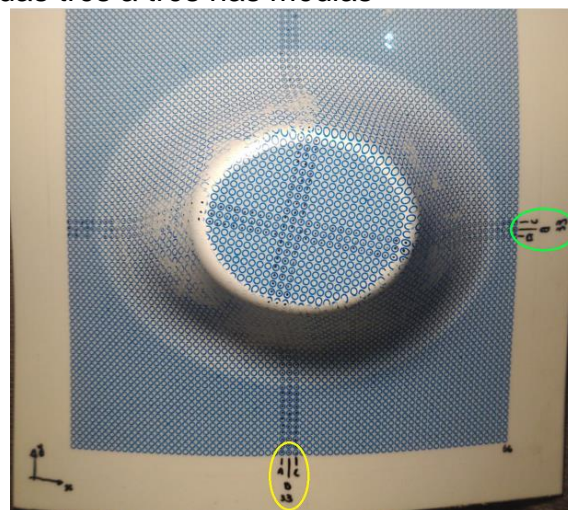
Para os dois primeiros ensaios, foi tirada a média das deformações entre os elementos das seis linhas, um a um. Para os dois últimos, foi calculada a média entre as deformações dos elementos, um a um, para os dois conjuntos de três fileiras – obteve-se, portanto, dois conjuntos de dados médios, um para cada eixo. Dessa forma, pode-se analisar o comportamento das deformações nos eixos menor e maior da seção transversal elíptica no ensaio Elipsoidal, e dos dois eixos principais do ensaio Complexo. A Figura 25 ilustra essa configuração – as linhas cujos inícios foram circulados com a mesma cor, tiveram os valores médios de deformação calculadas para seus elementos, um a um.

**Figura 25** – (a) Ensaio Benchmark, seis linhas consideradas na média; (b) Ensaio Elipsoidal, linhas consideradas três a três nas médias



(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor



(b)

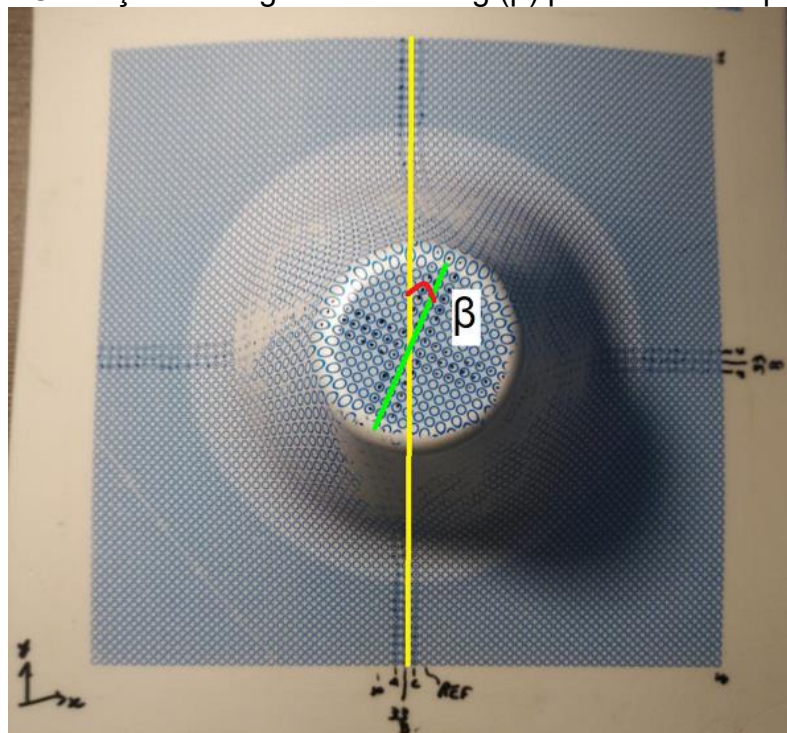
Fonte: Elaborado pelo Autor

Esses conjuntos de valores finais para cada chapa foram utilizados para gerar insumos dos parâmetros descritos nas Seções 2.1.1 a 2.1.3:



- Ângulo de *Twisting*: utilizando fotos da vista superior das peças e com o auxílio de uma ferramenta que aplica um sistema de coordenadas a imagem, pôde-se obter o Ângulo de *Twisting* ( $\beta$ ) através de retas auxiliares. A Figura 26 ilustra um exemplo de retas para a obtenção de  $\beta$ , replicado para todas as peças.

**Figura 26** – Obtenção do Ângulo de *Twisting* ( $\beta$ ) para uma das quatro chapas



Fonte: Elaborado pelo Autor

- Ângulo de Parede: o código construído no MATLAB gerava como *output* uma planilha de Excel com, além das coordenadas nos três eixos utilizadas para o código CAM, o ângulo de parede ( $\alpha$ ) para cada ponto. Uma vez concluído o ensaio, as coordenadas finais eram registradas e cruzadas com a planilha, para que se obtivesse o ângulo de parede final. É importante ressaltar que o  $\alpha$  encontrado é calculado de acordo com a trajetória da ferramenta – fenômenos como retorno elástico do material (*springback*) não foram considerados no código e, portanto, não estão refletidos nos valores de  $\alpha$ .
- Diagrama de Limite de Deformação (*FLDs*): com as deformações reais médias no eixo principal e no secundário para cada ponto, foi possível montar o Diagrama de Limite de Deformação. Os dois primeiros ensaios

contam com apenas um *FLD*. Já os dois últimos ensaios, foi construído um *FLD* para dois eixos, para que fossem avaliados por si só.

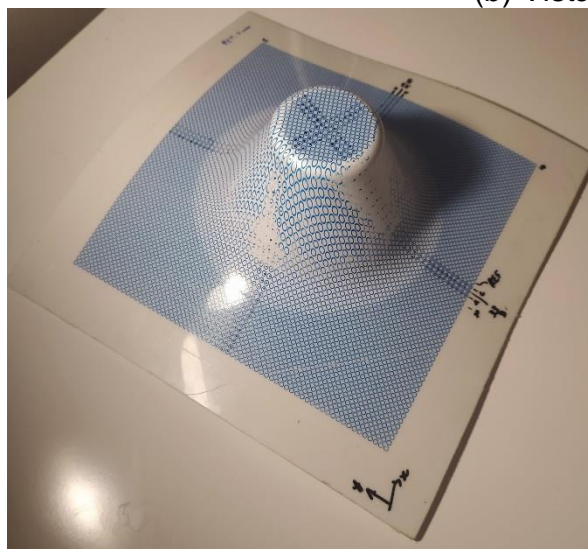
- Perfil de deformações: gráfico que ilustra, as deformações de cada elemento, para um determinado eixo – Principal ou Eixo 1 da Figura 7; Secundário ou Eixo 2 da Figura 7. Os perfis são complementares ao *FLD*, ao passo que se pode ver o comportamento das deformações em cada eixo de forma separada.

#### 4.4 Resultados e Discussão

##### 4.4.1 Benchmark

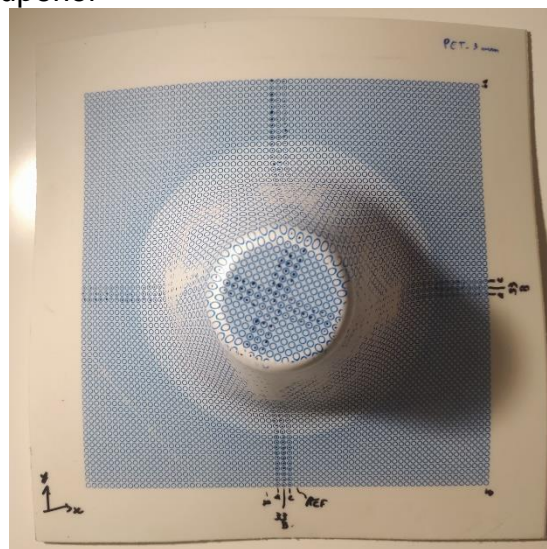
O ensaio para a geometria de Benchmark foi conduzido em pouco menos de duas horas e não houve fratura do material. A Figura 27 mostra a peça final por alguns ângulos, após as medições das deformações dos elementos circulares.

**Figura 27** – Peças finais após ensaio SPIF Benchmark – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior



(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor



(b)

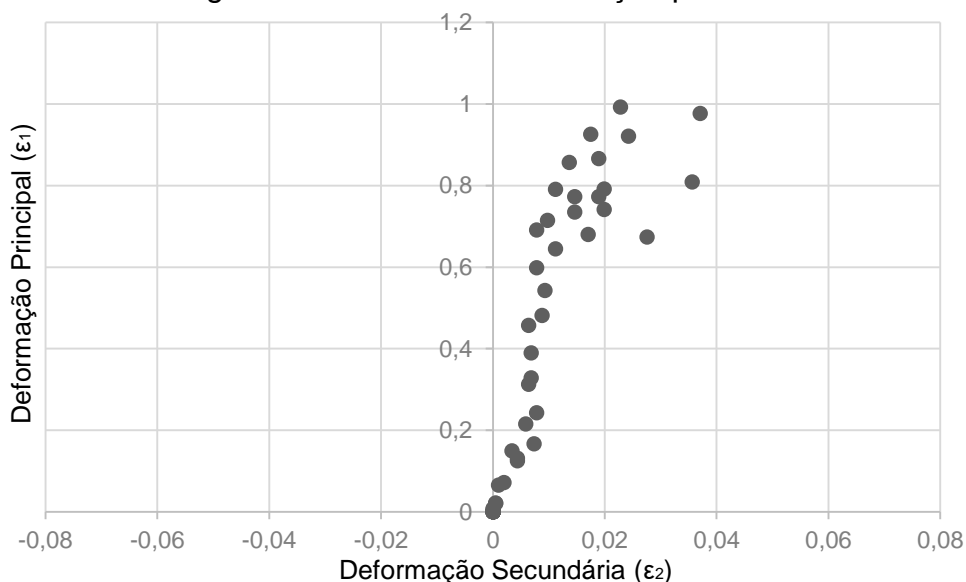
Fonte: Elaborado pelo Autor

O Ângulo de Twisting ( $\beta$ ) encontrado foi de aproximadamente  $26^\circ$ , e o fenômeno é visível ao se observar a vista superior da peça. O Ângulo de Parede ( $\alpha$ ) final foi de  $69,8^\circ$ . Esse valor, inferior ao encontrado na bibliografia (MARQUES et al., 2011), aliado ao fato de que não houve ruptura da peça, suporta a hipótese de que o PET pode alcançar ângulos de parede mais agressivos e ser um candidato apropriado para situações que exijam maior deformação à temperatura ambiente.



O Gráfico 3 ilustra o *FLD* para a geometria Benchmark, outra ferramenta importante para se avaliar a formabilidade do material. Uma vez que não houve ruptura da peça, não há Curva de Limite de Deformação traçadas.

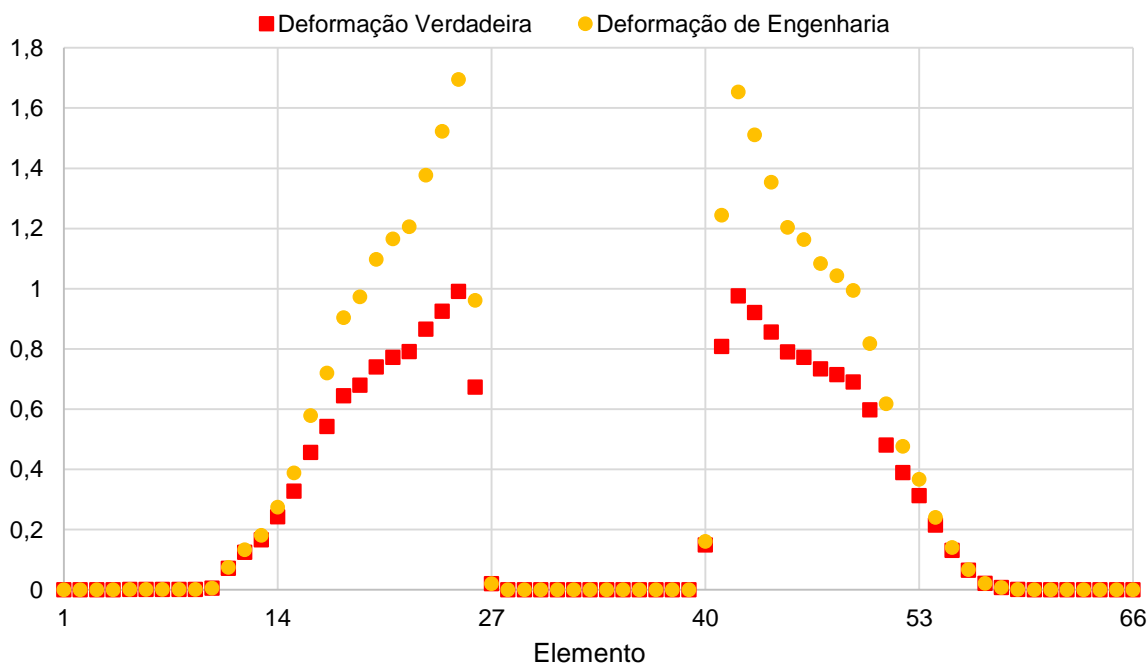
**Gráfico 3** – Diagrama de Limite de Deformação para o Ensaio Benchmark



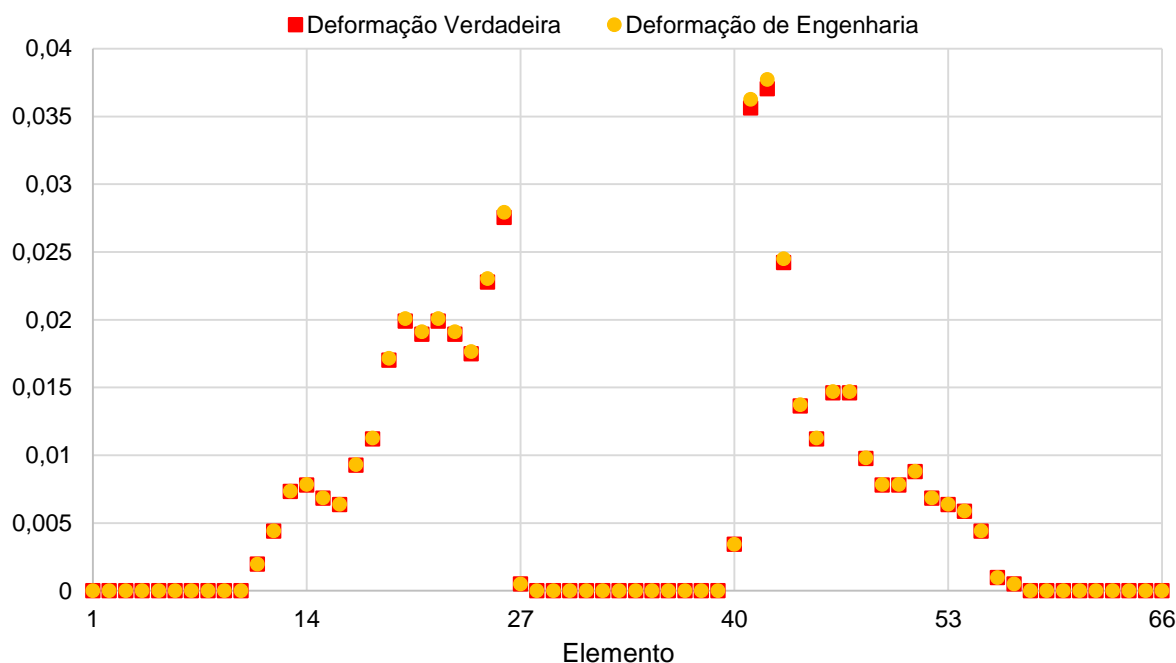
Fonte: Elaborado pelo Autor

Os Gráficos 4 e 5 mostram as deformações médias principais e secundárias, respectivamente, para cada elemento circular, montando assim o perfil de deformação da peça.

**Gráfico 4** – Perfil de Deformações principais do Ensaio Benchmark



Fonte: Elaborado pelo Autor

**Gráfico 5 – Perfil de Deformações secundárias do Ensaio Benchmark**

Fonte: Elaborado pelo Autor

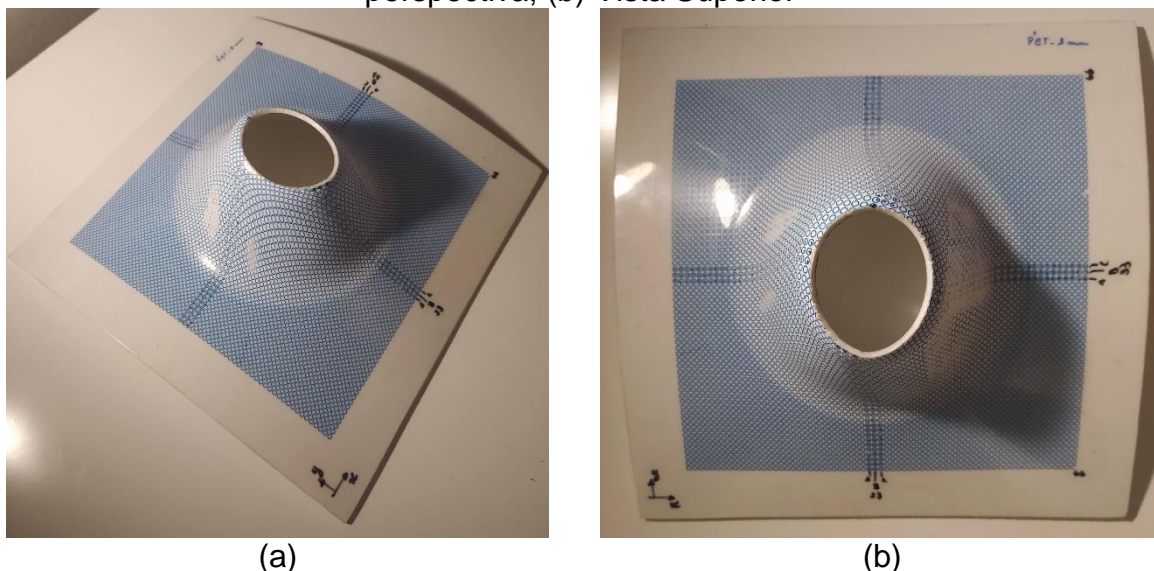
Pelo *FLD* (Gráfico 3), é perceptível que a formação da peça se deu, principalmente, em condições de deformação plana. Essa conclusão é possível uma vez que os pontos apresentam deformação secundária muito próxima a zero, ainda que diferente desse valor. Alguns pontos apresentaram certo desvio, representando uma composição com o modo de deformação bi-axial. Através do Perfil de Deformações secundárias (Gráfico 5), pode-se identificar que os pontos onde essa composição é maior se localizam próximos à transição entre a parede da geometria e o topo plano. Essa região apresenta ângulo de parede elevado e *twisting* pronunciado.

#### 4.4.2 Hole Flanging

O ensaio de Hole Flanging também foi realizado em aproximadamente duas horas, e novamente não houve fratura do material. Porém, esse ensaio não foi até o final do código, uma vez que havia o risco da ferramenta entrar no furo central da chapa. Além disso, é notável o empenamento da chapa, em direção ao centro – o mais pronunciado entre os ensaios. Também é perceptível que o furo central, antes circular com 40 mm de diâmetro, assumiu uma forma ovalada após o ensaio. A Figura

28 mostra algumas vistas da peça, após as medições das deformações dos elementos circulares.

**Figura 28** – Peças finais após ensaio SPIF Hole Flanging – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior



(a)

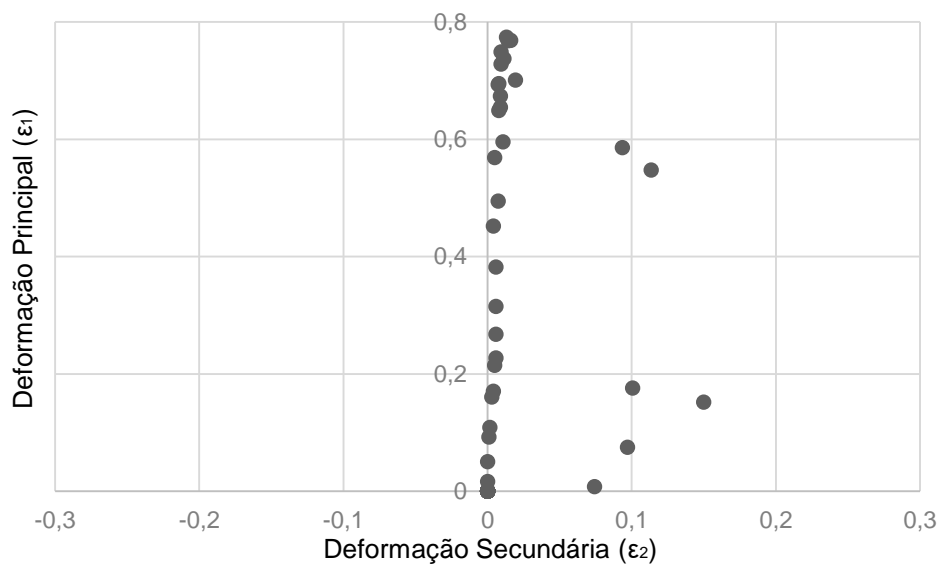
Fonte: Elaborado pelo Autor

(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

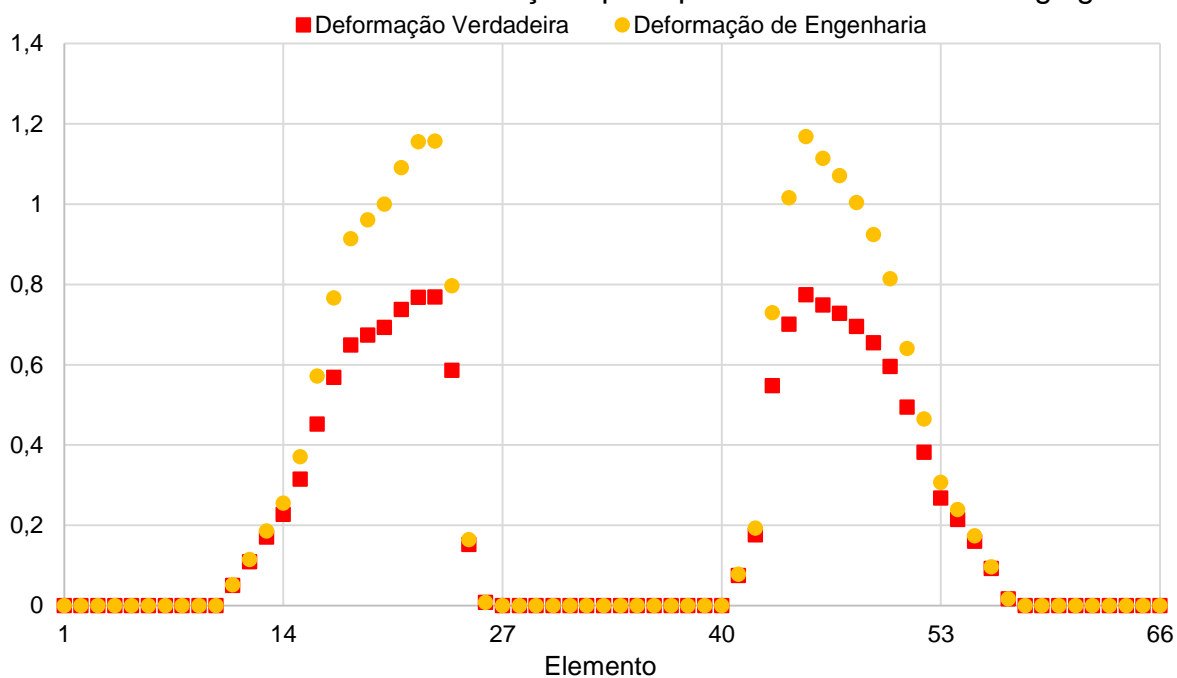
O Ângulo de Twisting ( $\beta$ ) medido ficou próximo de  $15^\circ$  e, apesar de ainda perceptível, é consideravelmente menor que o encontrado para o Ensaio Benchmark. O Ângulo de Parede ( $\alpha$ ) no momento do fim do ensaio era de  $69,3^\circ$ , também inferior ao encontrado na bibliografia (SILVA et al., 2013). Porém, os ensaios conduzidos pelos autores foram mais aderentes à definição do processo de Hole Flanging – múltiplos estágios onde  $\alpha$  era progressivamente aumentado até próximo de  $90^\circ$ , em contraste com a trajetória única empregada neste trabalho.

O Gráfico 6 ilustra o *FLD* montado para o Ensaio Hole Flanging. Como também não houve ruptura da peça neste experimento, não há Curva de Limite de Deformação traçadas.

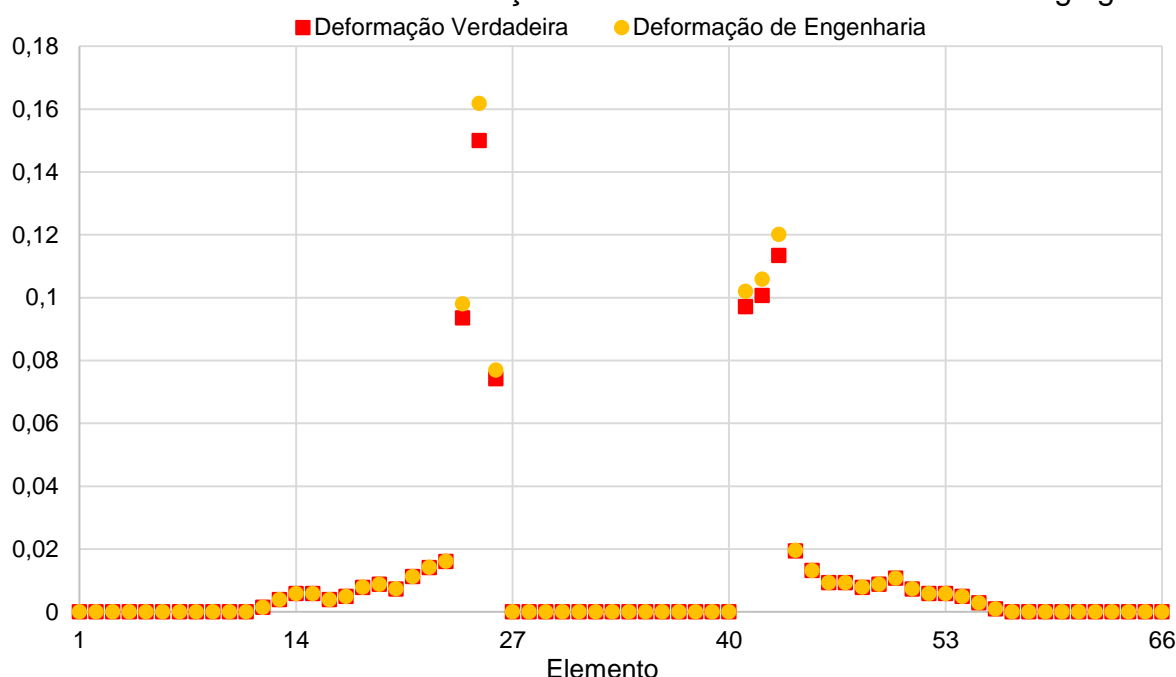
**Gráfico 6 – Diagrama de Limite de Deformação para o Ensaio Hole Flanging**

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os Gráficos 7 e 8 mostram o perfil de deformação da peça, nos eixos principal e secundário, respectivamente.

**Gráfico 7 – Perfil de Deformações principais do Ensaio Hole Flanging**

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Gráfico 8 – Perfil de Deformações secundárias do Ensaio Hole Flanging**

Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim como no ensaio Benchmark, o modo de deformação plana foi a predominante na formação da peça por Hole Flanging. Os Gráficos 7 e 8, quando comparados com seus equivalentes do primeiro ensaio, mostram que as deformações máximas foram mais acentuadas no eixo secundário do ensaio Hole Flanging. O oposto ocorreu no eixo principal dos elementos. Porém, em contraste com o observado anteriormente, não houve uma distribuição contínua dos pontos que apresentaram desvios de bi-axialidade – enquanto o Gráfico 5 indica um progressivo aumento da deformação no eixo secundário dos elementos, o Gráfico 8 mostra que poucos elementos na vizinhança do furo central concentraram as deformações.

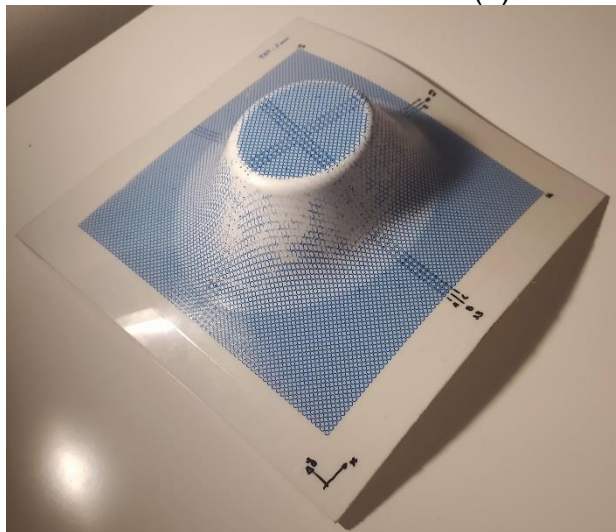
Isso é refletido no Gráfico 6, onde o pequeno conjunto identificado como os elementos que margeiam o furo central apresenta bi-axialidade mais expressiva, desviada da maioria que segue o eixo vertical principal. Pelas imagens da chapa (Figura 28), é possível perceber que esses elementos também apresentam *twisting* relevante, na região de maiores ângulos de parede.

#### 4.4.3 Elipsoidal

O ensaio SPIF para a geometria Elipsoidal levou o mesmo tempo que os dois anteriores e, mais uma vez, o código CAM pôde correr até o final sem que a peça apresentasse fratura. Assim como no Ensaio Hole Flanging, a chapa apresentou empenamento visível, porém menor que o anterior. A Figura 29 mostra o resultado

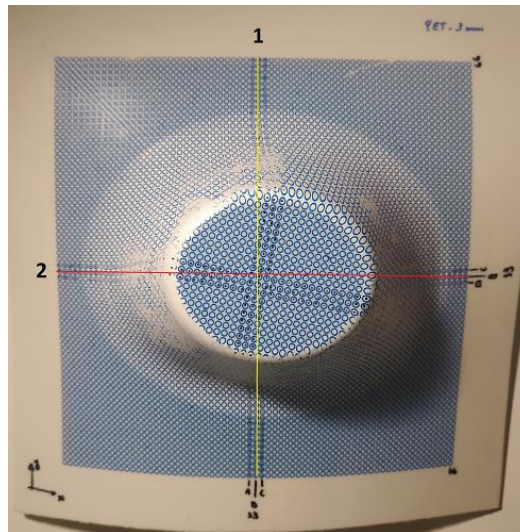
final do experimento, já com as marcações utilizadas para controle das medições de deformações dos elementos circulares. Na Figura 29b) o eixo menor está indicado com o número 1, e o maior com o número 2.

**Figura 29** – Peças finais após ensaio SPIF Elipsoidal – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior



(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor

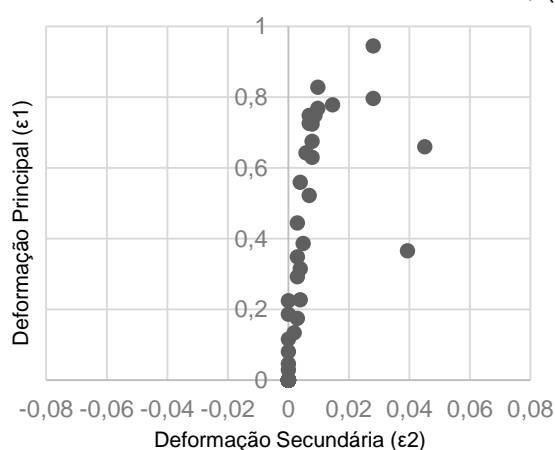


(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

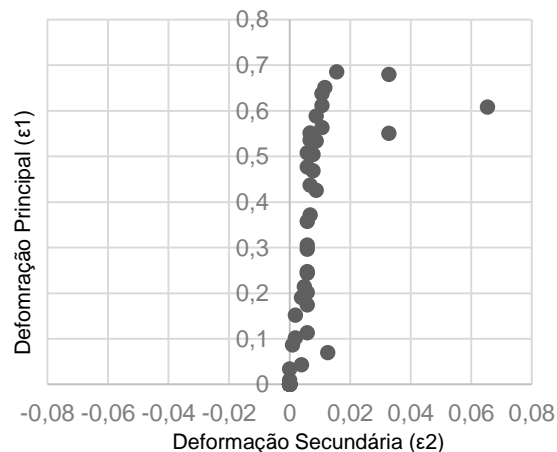
O Ângulo de Twisting ( $\beta$ ) medido ficou próximo de  $12^\circ$ , o menor dentre os ensaios. Já o Ângulo de Parede ( $\alpha$ ) final foi de  $65,6^\circ$ , também o mínimo dos quatro experimentos. O Gráfico 9a) ilustra o *FLD* montado para o eixo menor da peça gerada no Ensaio Elipsoidal, enquanto o Gráfico 9b) traz o *FLD* para o eixo maior. Novamente, como não houve ruptura, não há Curva de Limite de Formação em nenhum dos dois gráficos apresentados.

**Gráfico 9** – Diagrama de Limite de Deformação para o Ensaio Elipsoidal: (a) Eixo menor; (b) Eixo maior



(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor

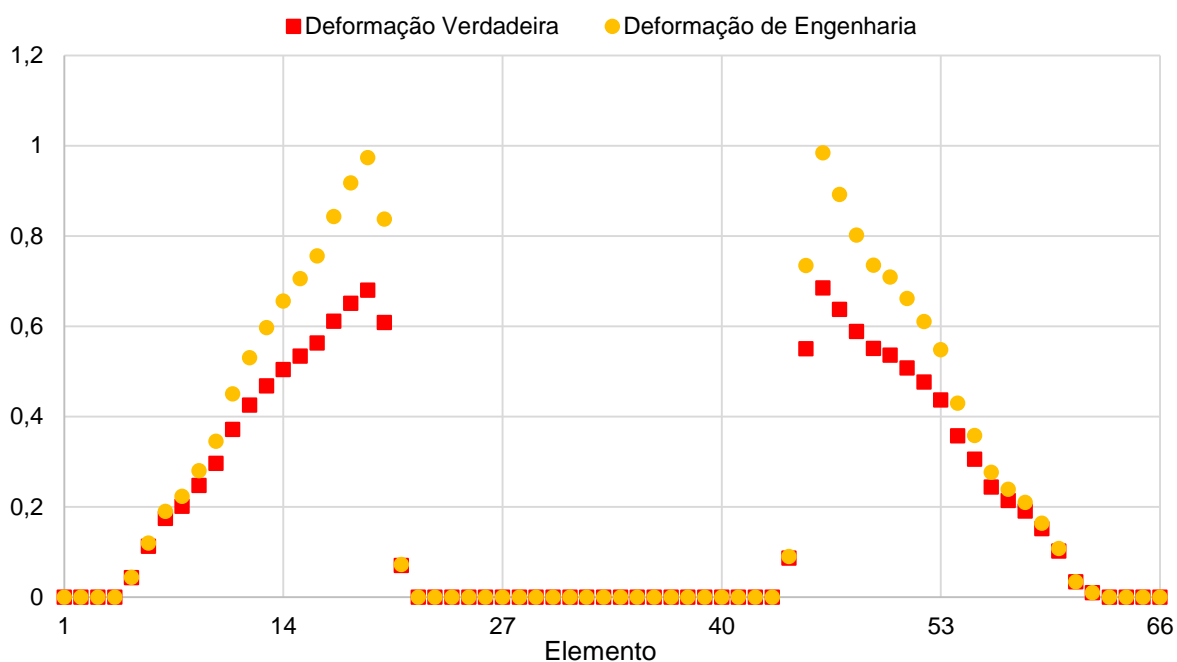


(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

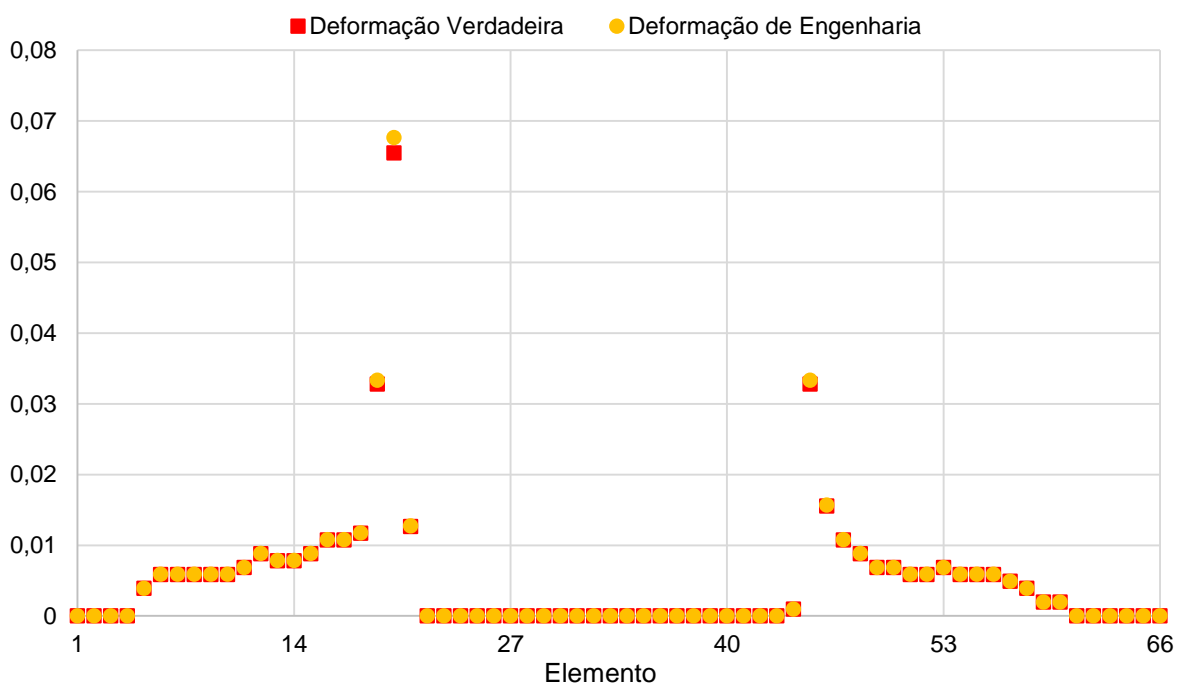
Os Gráficos 10 e 11 mostram o perfil de deformações principais e secundárias, respectivamente, dos elementos no eixo maior da peça. Já os Gráficos 12 e 13 retratam o perfil de deformações principais e secundárias, respectivamente, dos elementos no eixo menor da peça.

**Gráfico 10 – Perfil de Deformações principais do eixo maior do Ensaio Elipsoidal**

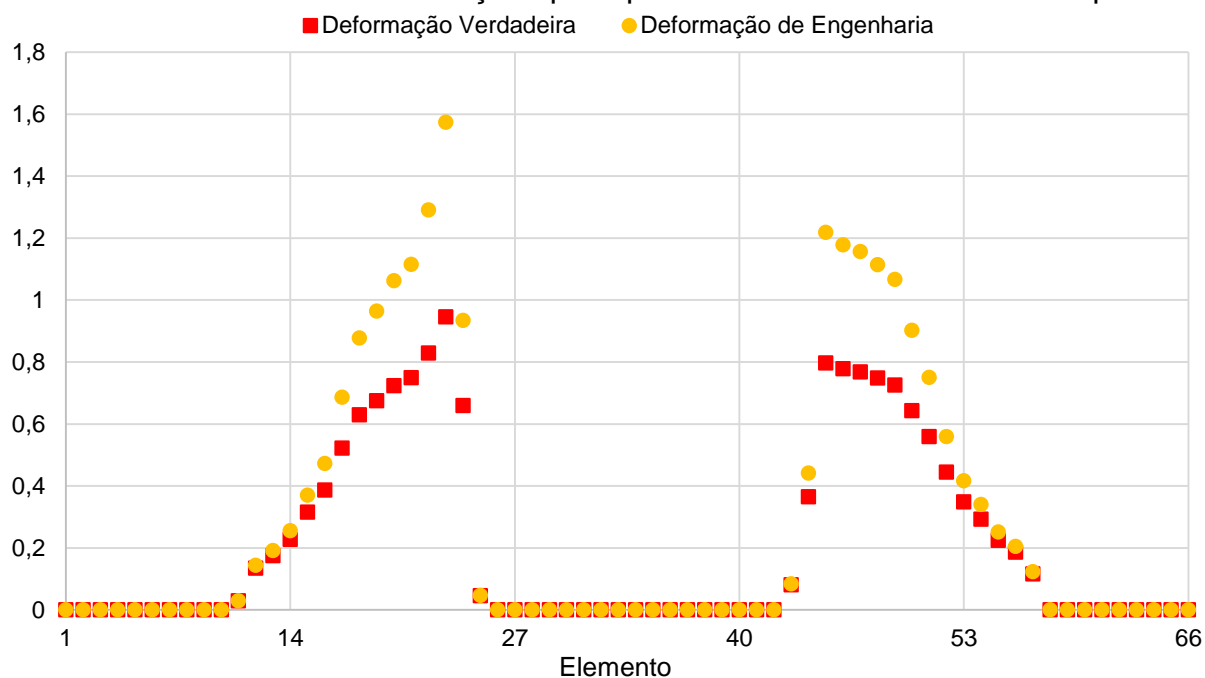


Fonte: Elaborado pelo Autor

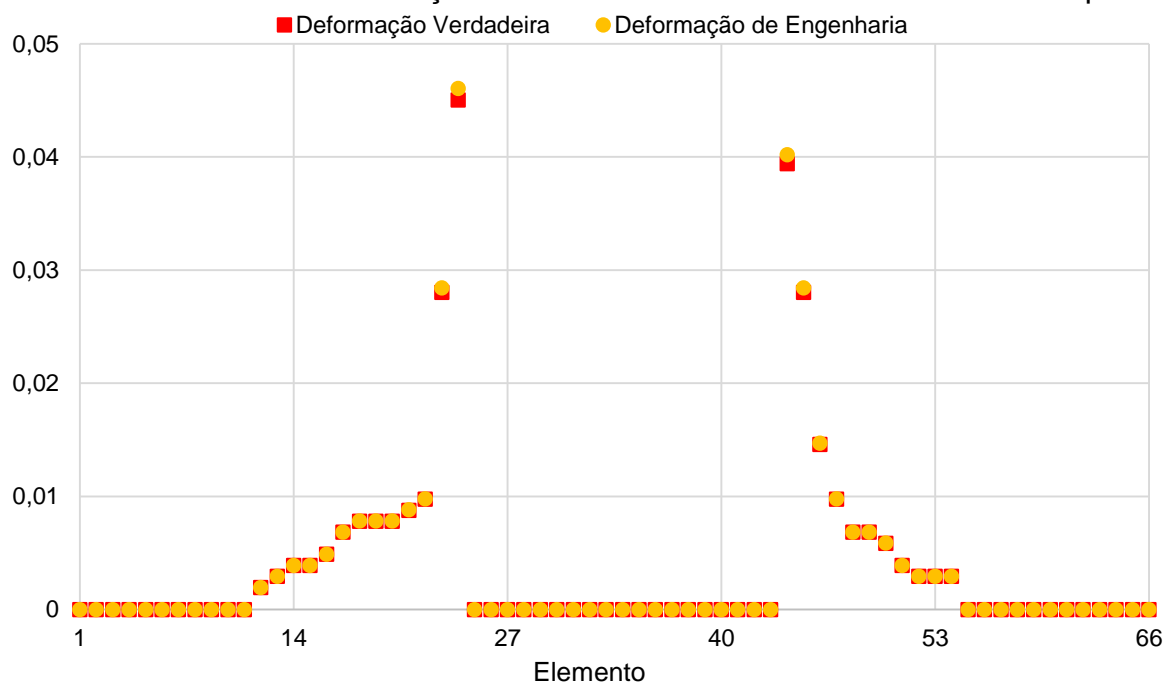
**Gráfico 11 – Perfil de Deformações secundárias do eixo maior do Ensaio Elipsoidal**



Fonte: Elaborado pelo Autor

**Gráfico 12 – Perfil de Deformações principais do eixo menor do Ensaio Elipsoidal**

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Gráfico 13 – Perfil de Deformações secundárias do eixo menor do Ensaio Elipsoidal**

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os Gráficos 10 e 12 mostram que o comportamento das deformações principais do ensaio Elipsoidal se assemelha ao encontrado no ensaio Benchmark, com um gradual aumento da magnitude conforme o ângulo de parede cresce. As deformações para os elementos no eixo maior foram menores que as dos elementos do eixo menor,



o que era esperado (maior número de elementos leva a menor deformação por elemento, para uma mesma profundidade final).

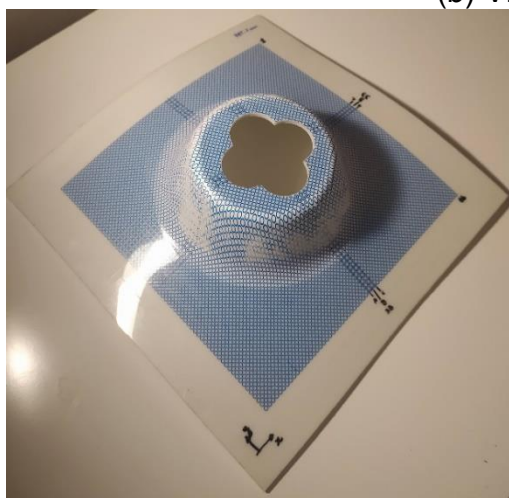
Porém, para as deformações secundárias, o comportamento se assemelhou ao observado no ensaio Hole Flanging, com alguns poucos elementos concentrando as maiores deformações secundárias. Essa distribuição se repete para ambos os eixos, como indicado nos Gráficos 11 e 13. Novamente, os elementos na transição entre a parede inclinada e o topo plano são os que apresentam as deformações secundárias mais elevadas.

Esse comportamento intermediário é evidenciado nos *FLDs* (Gráfico 9), onde há uma tendência leve de desvio do eixo vertical, e um pequeno conjunto que se destaca dos demais por uma bi-axialidade mais proeminente.

#### 4.4.4 Complexa

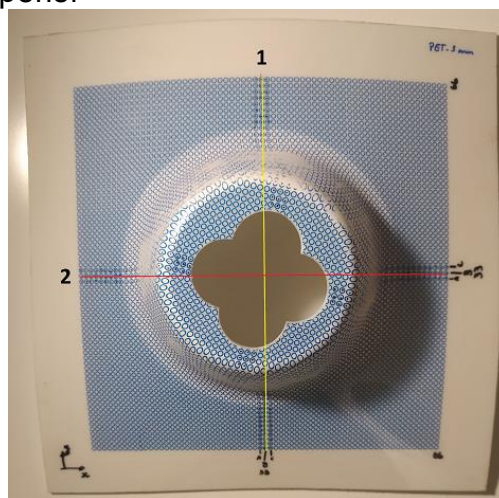
O ensaio SPIF para a geometria chamada Complexa foi o mais curto dos quatro, sendo interrompido perto do final do código para evitar a entrada da ferramenta no recorte central. A peça não se rompeu durante o experimento e o empenamento, apesar de presente, foi modesto quando comparado com os dois ensaios anteriores. A Figura 30 mostra o resultado final após a medição dos elementos circulares para os dois eixos. Na Figura 30b) o eixo denominado “Vertical” está indicado com o número 1, e o chamado “Horizontal”, com o número 2.

**Figura 30** – Peças finais após ensaio SPIF Complexo – (a) Vista em perspectiva; (b) Vista Superior



(a)

Fonte: Elaborado pelo Autor



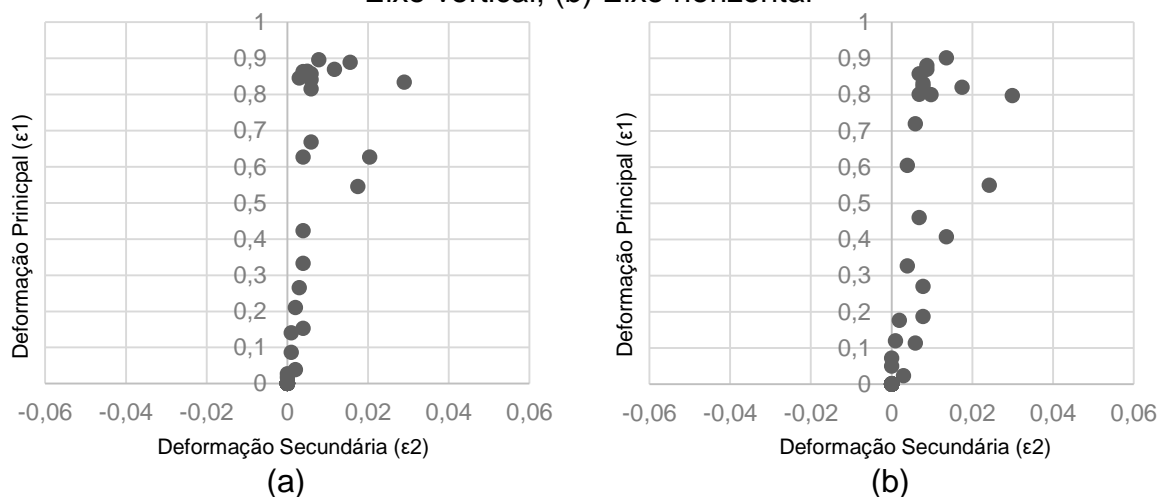
(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor

O Ângulo de Twisting ( $\beta$ ) foi medido como  $16^\circ$ , próximo ao encontrado no ensaio de Hole Flanging. O Ângulo de Parede ( $\alpha$ ) foi de  $66,29^\circ$ , similar aos das outras

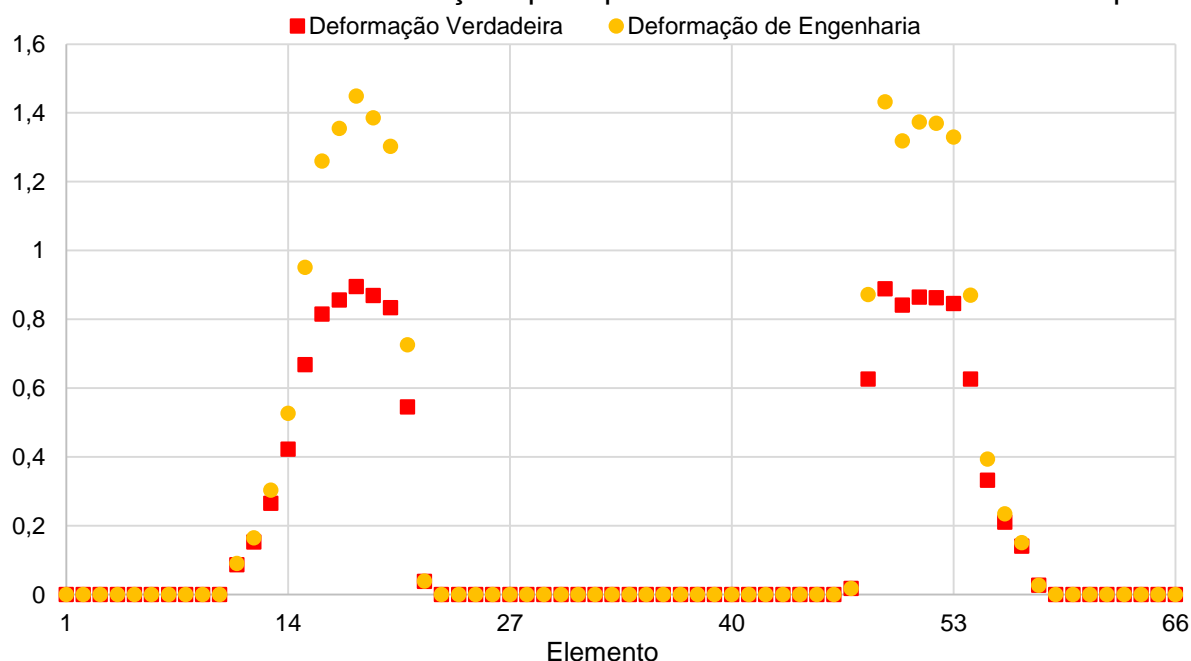
peças. O Gráfico 14a) mostra o *FLD* montado para o eixo vertical da peça do Ensaio Complexo, enquanto o Gráfico 14b) traz o *FLD* para o eixo horizontal dessa peça. Já que não houve ruptura, não há Curva de Limite de Deformação em ambos os gráficos.

**Gráfico 14** – Diagrama de Limite de Deformação para o Ensaio Complexo: (a) Eixo vertical; (b) Eixo horizontal

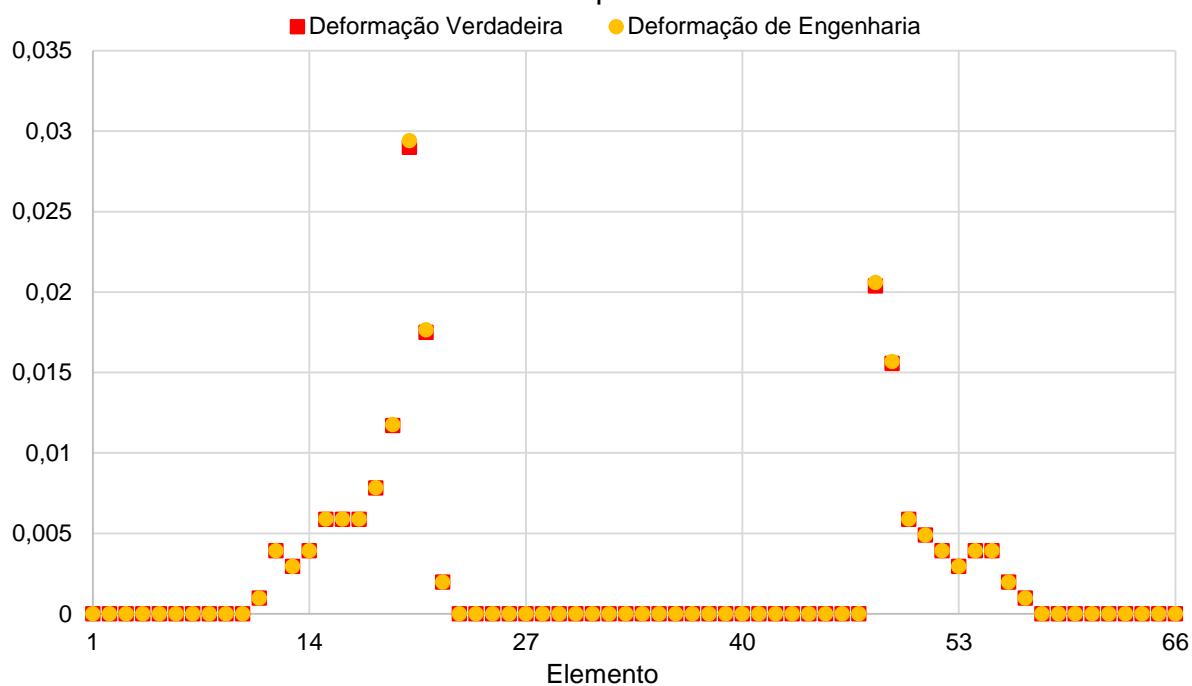


Os Gráficos 15 e 16 mostram o perfil de deformações principais e secundárias, respectivamente, dos elementos no eixo vertical da peça. Os Gráficos 17 e 18, por sua vez, retratam o perfil de deformações principais e secundárias, também respectivamente, dos elementos no eixo horizontal da peça.

**Gráfico 15** – Perfil de Deformações principais do eixo vertical do Ensaio Complexo

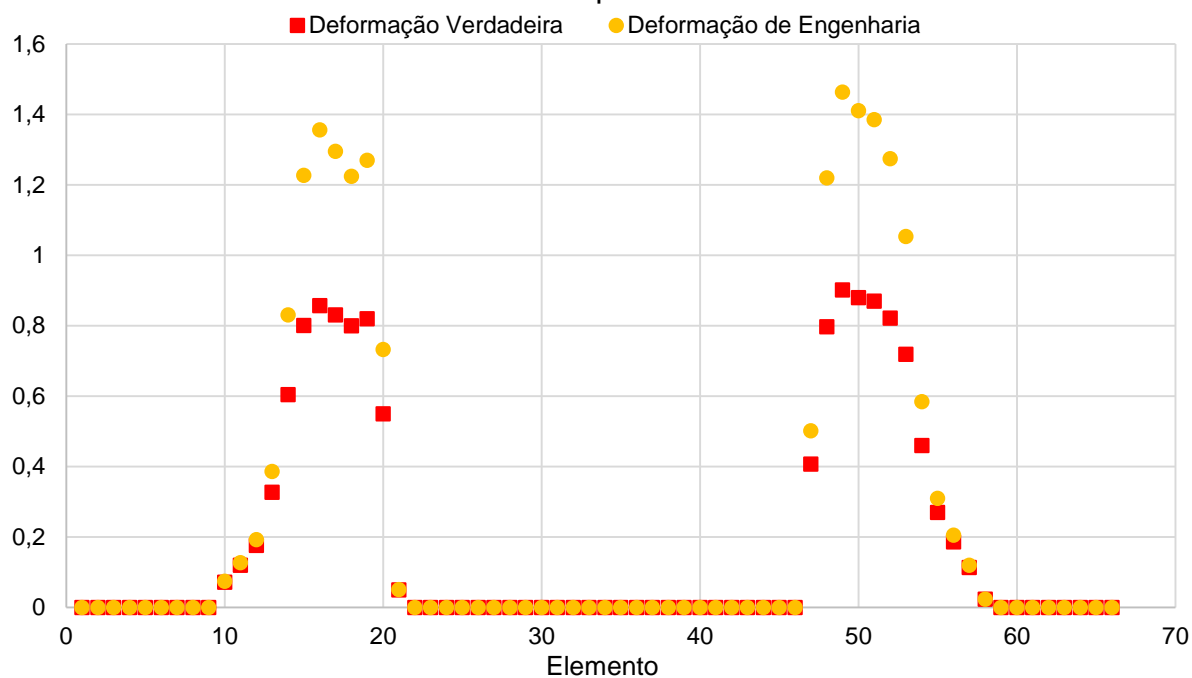


**Gráfico 16 – Perfil de Deformações secundárias do eixo vertical do Ensaio Complexo**



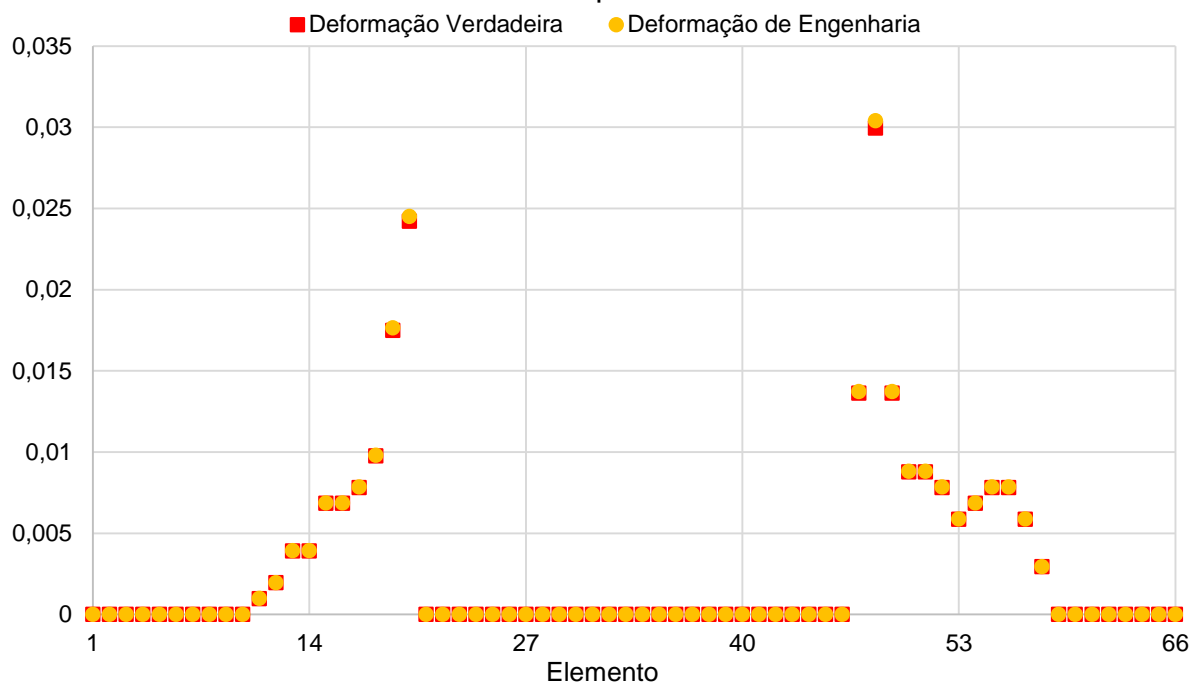
Fonte: Elaborado pelo Autor

**Gráfico 17 – Perfil de Deformações principais do eixo horizontal do Ensaio Complexo**



Fonte: Elaborado pelo Autor

**Gráfico 18 – Perfil de Deformações secundárias do eixo horizontal do Ensaio Complexo**



Fonte: Elaborado pelo Autor

Como ambos definem os mesmos planos de simetria, os eixos Vertical e Horizontal tiveram comportamento semelhante tanto nos *FLDs* (Gráfico 14) quanto nos Perfis de Deformação (Gráficos 15 a 18). Pelos gráficos, é possível notar que a progressão das deformações principais se dá de forma rápida, com poucos pontos intermediários – uma vez que o ângulo de parede ( $\alpha$ ) cresce bruscamente no começo e a velocidade decresce com o crescimento da profundidade, isso resulta em um conjunto maior de pontos com deformações mais elevadas.

Seguindo o que foi observado nos ensaios anteriores, a formação da geometria se deu sob condições de deformação plana combinada com alongamento bi-axial, com os desvios sendo mais pronunciados na região de maiores ângulos de parede e *twisting*.

#### 4.4.5 Discussão Geral

Ao se analisarem os ensaios como um todo, alguns pontos podem ser observados: acima de tudo, o PET permite deformações consideráveis, atingindo deformações reais próximas a 2 em alguns pontos. O material suportou os ângulos de parede sem qualquer sinal aparente de fratura e, apesar das peças terem apresentado ângulos de *twisting* elevados, não houveram sinais de enrugamento. Pelos *FLDs*

construídos, pode-se perceber a capacidade do PET de suportar deformações em ambos os eixos, apesar da predominância do estado de deformações plano.

A inclusão dos furos, elementos que mudam a distribuição das tensões na chapa, acarretou em menores deformações finais para esses ensaios. Quando comparados os ensaios Benchmark e Hole Flanging, o segundo apresentou menor *twisting*, resultado explicado pela presença do furo. Além disso, os pontos do *FLD* do ensaio Hole Flanging apresentaram menor desvio bi-axial em relação aos do Benchmark, o que pode estar relacionado com o modificador de tensão.

As regiões que apresentaram o fenômeno de *twisting* mais pronunciado (na transição parede-furo do Hole Flanging, ou parede-topo para as outras peças) também concentravam os pontos com maior desvio bi-axial nos *FLDs*. A observação visual das peças corrobora o ponto, ainda que não se possa concluir com certeza que esses resultados são diretamente relacionados.

De forma geral, o PET se comportou de forma muito promissora, suportando todas as cargas dos ensaios sem maiores problemas. Isso reitera a aplicabilidade do material ao processo de estampagem incremental, que já apresenta vantagens por seu baixo custo e alta disponibilidade.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo permitiu que fosse avaliada a utilização do PET no processo de estampagem incremental, avaliando seu comportamento em quatro ensaios com configurações distintas, após a caracterização da amostra através de ensaios de tração. A avaliação foi feita à luz de três parâmetros da peça final – o ângulo máximo de parede, o ângulo de *twisting* e o Diagrama de Limite de Deformação, sendo o último construído através da medição das dimensões finais de elementos circulares grafados nas chapas. Esse conjunto de dados também foi utilizado para construção de perfis de deformação, que complementaram a análise.

Ainda que ângulos de *twisting* relevantes tenham sido observados e ângulos de parede médios (próximos à 70°) obtidos, não houve fratura do material em qualquer ensaio. Isso indica que as condições utilizadas estão dentro do envelope de formabilidade do material, que deve ser explorado e detalhado para que se possa reiterar o bom desempenho apresentado.

Avaliando os *FLDs* e os perfis de deformação, pôde-se perceber a predominância do estado de deformação plana. Todos os ensaios apresentaram alguns pontos com desvios de bi-axialidade, principalmente em regiões onde o *twisting* era mais presente. A utilização de modificadores de tensão resultou em menores deformações nos elementos, impactando os desvios de bi-axialidade, e em ângulos de *twisting* menores.

Ainda que se tenha avaliado que o material tem boa aderência ao processo, como apontado na literatura, a real dimensão do quão bem o PET ou qualquer outro material se portará em aplicações reais só virá com o aprofundamento das pesquisas. Diferentes condições de ensaio, configurações de máquina variáveis, trajetórias inovadoras, geometrias complexas e modificadores de tensão complexos são alguns dos caminhos que podem trazer o entendimento sobre o comportamento do PET à outro patamar dentro da estampagem incremental.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE-CAMPOS, A. et al. Integrated Design in Welding and Incremental Forming: Material Model Calibration for Friction Stir Welded Blanks. **Procedia Manufacturing**, Vol. 47, pp. 429-434, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.327>>. Acesso em 25 jul. 2020.
- ARAÚJO, R. et al. Single point incremental forming of a facial implant. **Prosthetics and Orthotics International**, Vol. 38, pp. 369-378, 2014.
- American Society for Testing and Materials. ASTM D638-14 – Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.*
- ATTANASIO, A. et al. Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 197, pp. 59-67, 2008.
- BAGUDANCH, I. et al. Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 219, pp. 221-229, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.004>>. Acesso em 03 set. 2020.
- BAGUDANCH, I. et al. Incremental forming of polymers: process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost. **Journal of Cleaner Production**. Vol. 112, pp. 1013-1024, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.087>>. Acesso em 04 out. 2020.
- BAGUDANCH, I. et al., Revisiting formability and failure of polymeric sheets deformed by Single Point Incremental Forming. **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 144, pp. 366 – 377, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.08.021>>. Acesso em 04 set. 2020
- CALLISTER, J. W. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª edição. LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2012.
- CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros - Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros**. 3ª edição. Editora Artliber, 2010.
- CENTENO, G. et al. Hole-flanging by incremental sheet forming. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 59, pp. 46-54, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.03.007>>. Acesso em: 03 set. 2020.
- CENTENO, G. et al. Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming. **Procedia Engineering**, Vol. 183, pp. 180-187, 2017.
- CHANG, Z.; CHEN, J. Investigations on the deformation mechanism of a novel three-sheet incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 281, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116619>>. Acesso em 07 ago. 2020.

CHENG, Z. et al. Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, Vol. 9, Issue 4, pp. 7225-7251, 2020.

CRISTINO, V. A. et al. Converting circular tubes into square cross-sectional parts using incremental forming process. **Journal of Materials Processing Technologies**, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116659>>. Acesso em 25 jul. 2020.

DAVARPANA, M. A.; BANSAL, S.; MALHOTRA, R. Influence of Single Point Incremental Forming on Mechanical Properties and Chain Orientation in Thermoplastic Polymers. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. Vol. 139, 2017.

DUFLOU J. R. et al., Medical application of single point incremental forming: cranial plate manufacturing. **Virtual Modelling and Rapid Manufacturing**, pp. 161-166, 2005.

DURANTE et al. Incremental forming of polycarbonate sheets. **Journal of Materials Processing Tech**, Vol. 253, pp. 57 – 63, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.005>>. Acesso em 05 set. 2020.

ECHRIF, S.B.M.; HRAIRI, M. Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes. **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 26 Issue 11, pp. 1404-1414, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10426914.2010.544817>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

FRANZEN, V.; KWIATKOWSKI, L.; MARTINS, P.A.F.; TEKKAYA, A.E. Single point incremental forming of PVC. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 209 Issue 1, pp. 462-469, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.013>>. Acesso em 20 jul. 2020.

GUPTA, P.; JESWIET, J. Manufacture of an aerospace component by single point incremental forming. **Procedia Manufacturing**, Vol. 29, pp. 112-119, 2019.

JESWIET, J. et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, pp. 84-114, 2005.

JESWIET, J. et al. Metal forming progress since 2000. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Vol. 1 Issue 1, pp. 2-17, 2008.

JI, L. N. Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET). **Applied Mechanics and Materials**, Vol. 312, pp. 406-410, 2013. Disponível em: <<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.312.406>>. Acesso em 26 ago. 2020.

KIM, Y.H.; PARK, J.J. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 130-131, pp. 42-46, 2002.

KIRIDENA, V.S.; REN, F.; XIA, Z.C. **Method of incremental forming with successive wrap**. Depositante: Ford Global Technologies LLC. US8733143B2. Depósito: 17 jul. 2010. Concessão: 27 mai. 2014. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US8733143>>. Acesso em: 05 ago. 2020.



KUMAR PAUL, S. Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams. **Journal of Strain Analysis**, Vol. 48 Issue 3, pp. 177-188, 2013.

KUMAR, A.; GULATI, V.; KUMAR, P. Investigation of Surface Roughness in Incremental Sheet Forming. **Procedia Computer Science**, Vol. 133, pp. 1014-1020, 2018.

KURRA, S.; REGALLA, S.P. Experimental and numerical studies on formability of extra-deep drawing steel in incremental sheet metal forming. **Journal of Materials Research and Technology**, Vol. 3 Issue 2, pp. 158-171, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.03.009>>. Acesso em: 28 set. 2020.

LE, V.S.; GHIOTTI, A; LUCCHETTA, G. Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials. **International Journal of Material Forming**, Vol. 1, pp. 1179-1182, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12289-008-0191-0>>. Acesso em 05 ago. 2020.

LESZAK, E. **Apparatus and process for incremental dieless forming**. Depositante: Edward Leszak. US3342051A. Depósito: 10 ago. 1964. Concessão: 19 set. 1967. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US3342051A>>. Acesso em: 02 ago. 2020.

LI, Y.; CHEN X.; LIU, Z.; SUN, J.; LI, F.; ZHAO, G. A review on the recent development of incremental sheet-forming process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 92, pp. 2439-2462, 2017.

LI, Y.; DANIEL, W. J. T.; MEEHAN, P. A. Deformation analysis in single-point incremental forming through finite element simulation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 88, pp. 255-267, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8727-9>>. Acesso em 13 ago. 2020.

MAIDAGAN, E.; ZETTLER, J.; BAMBACH, M.; RODRÍGUEZ, P. P.; HIRT, G. A. **New Incremental Sheet Forming Process Based on a Flexible Supporting Die System**. Key Engineering Materials, Vol. 344, pp. 607-614, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.344.607>>. Acesso em 17 ago. 2020.

MARK, J. **Polymer Data handbook**, Oxford University Press, pp. 363-367, 493-507, 558-560, 928-934, 1999.

MARQUES, T. A.; SILVA, M.B.; MARTINS, P.A.F. On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 60, pp. 75-86, 2011. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3585-y>>. Acesso em 17 set. 2020.

MARTINS, P. A. F. et al. Single point incremental forming of polymers. *CIRP Annals*, Vol. 58, pp. 229 – 232, 2009.

MEDINA-SANCHEZ, G. et al. Force Prediction for Incremental Forming of Polymer Sheets. **Materials**, Vol. 11 Issue 9, pp. 1597, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma11091597>>. Acesso em 25 ago. 2020.

PANJWANI, D et al. Single Point Incremental Forming Using Flexible Die. CAD/CAM, **Robotics and Factories of the Future**, pp. 741-749, 2016. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-81-322-2740-3\\_71](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2740-3_71)>. Acesso em 14 ago. 2020.

RAHMANI, F.; SEYEDKASHI, S.M.H.; HASHEMI, S.J. Converting circular tubes into square cross-sectional parts using incremental forming process. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Vol. 29 Issue 11, pp. 2351-2361, 2019.

RICHETON, J. et al. Influence of temperature and strain rate on the mechanical behavior of three amorphous polymers: Characterization and modeling of the compressive yield stress. **International Journal of Solids and Structures**, Vol. 43 Issues 7-8, pp. 2318-2355, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768305003677#fig3>>. Acesso em: 29 ago. 2020.

RUBINO, F. et al. Integrated Manufacturing of AA6082 by Friction Stir Welding and Incremental Forming: Strain Analysis of Deformed Samples Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. **Procedia Manufacturing**, Vol. 47, pp. 440-444, 2020.

SILVA, M. B.; MARTINHO, T. M.; MARTINS, P. A. F. Incremental Forming of Hole-Flanges in Polymer Sheets. **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 28, Issue 3, pp. 330-335, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10426914.2012.682488>>. Acesso em 21 set. 2020.

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, pp. 1-10, 2010.

SILVA. M. B.; MARTINS, P.A.F. Two-Point Incremental Forming with Partial Die: Theory and Experimentation. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Vol. 22, pp. 1018-1027, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11665-012-0400-3>>. Acesso em 20 ago. 2020.

VEERA AJAY, C.; ELANGO VAN, S; PANICKER, C.T.J. Studies on single point incremental forming of Ti-6Al-4V alloy for aerospace applications. **Materials Today: Proceedings**, Vol. 22 Parte 4, pp. 1967-1976, 2020.

YANG, Z.; CHEN. F. Mechanism of twist in incremental sheet forming of thermoplastic polymer. **Materials & Design**, Vol. 195, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108997>>. Acesso em 14 set. 2020.

YONAN, S. A. et al. Plastic flow and failure in single point incremental forming of PVC sheets. **eXPRESS Polymer Letters**, Vol. 8, pp. 301 – 311, 2014.