

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS LAGES
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MARIA EDUARDA SILVA DE MACEDO

**AValiação de parâmetros em estampagem incremental
para chapas de policloreto de vinila (PVC)**

**LAGES
2023**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS LAGES
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MARIA EDUARDA SILVA DE MACEDO

**AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL
PARA CHAPAS DE POLICLORETO DE VINILA (PVC)**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Santa Catarina como requisito para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Rafael Gustavo Schreiber.

**LAGES
2023**

MARIA EDUARDA SILVA DE MACEDO

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM ESTAMPAGEM INCREMENTAL PARA CHAPAS
DE POLICLORETO DE VINILA (PVC)

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica.

Lages, 15 de dezembro de 2023.

Profa. Natalia Madalena Boelter, MSc.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rafael Gustavo Schreiber, Dr.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Profa. Natalia Madalena Boelter, MSc.
Avaliadora
Instituto Federal de Santa Catarina

Profa. Vilma Gisele Karsburg, MSc.
Avaliadora
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho ao Senhor Jesus Cristo:
Porque Dele e por Ele e para Ele, são todas as
coisas; Glória, pois, a Ele eternamente. Amém.
Romanos 11:36

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar comigo nesta jornada, por seu amor, fidelidade e infinita bondade.

Agradeço a meus pais, por sempre me apoiarem e me proporcionarem condições de me dedicar aos estudos, por várias vezes integralmente e por vibrarem comigo esta conquista.

Agradeço a meus avós, que não puderam acompanhar esta jornada, mas me ensinaram grandes lições que contribuíram ricamente para este resultado.

Agradeço à minha melhor amiga, pelos longos anos de amizade e cumplicidade.

Agradeço ao meu melhor amigo que dividiu comigo a caminhada ao longo destes cinco anos de curso.

Agradeço aos meus colegas pelo companheirismo e amizade ao longo da graduação.

Agradeço ao meu orientador Rafael Gustavo Schreiber pelos aprendizados, conselhos e apoio desde os projetos de pesquisa até a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas Alysson Henrique Rudek e Bianca Grahl Reyes pela colaboração neste trabalho.

Agradeço a todos os meus professores por contribuíram com esta conquista diretamente.

Agradeço também aos demais servidores do IFSC que contribuem para o excelente funcionamento da instituição.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram com este resultado.

RESUMO

Este trabalho avalia a estampabilidade de chapas de Policloreto de Vinila (PVC) por meio da realização de doze experimentos de estampagem incremental de ponto único (SPIF). Para esse fim, um sistema foi montado, incluindo um braço robótico ABB IRB 140, uma ferramenta semiesférica de 10 mm, chapas de PVC com 0,7 mm de espessura, lubrificante Starrett M1, dispositivo de fixação, multímetro com sensor de temperatura, soprador térmico e um suporte. A sequência operacional compreendeu a fixação da chapa, a aplicação de lubrificante e o aquecimento controlado pelo soprador térmico, mantendo a temperatura monitorada através do sensor térmico. Durante a conformação, a temperatura e o incremento vertical (Δz) foram variados e a ferramenta seguiu a trajetória de hiperboloide até a identificação da primeira ruptura na peça. O objetivo desse estudo foi estabelecer a relação entre os dois parâmetros citados e a deformação final da peça, buscando proporcionar sua previsibilidade. Assim, a análise de regressão linear múltipla foi empregada para examinar essa relação, resultando na equação de regressão que apresentou um erro máximo de 14,77%. Posteriormente, observou-se que o menor incremento vertical combinado a maior temperatura promove a deformação máxima. Por fim, foi constatado que a espessura de 0,7 mm favorece o surgimento de rugas na peça, e esse efeito é acentuado com o aumento da temperatura.

Palavras-chave: Estampagem Incremental. PVC. Temperatura. Incremento Vertical. Deformação.

ABSTRACT

This work assesses the formability of Polyvinyl Chloride (PVC) sheets through the execution of twelve Single Point Incremental Forming (SPIF) experiments. For this purpose, a system was assembled, including an ABB IRB 140 robotic arm, a 10 mm semi-spherical tool, 0.7 mm thick PVC sheets, Starrett M1 lubricant, a clamping device, a multimeter with a temperature sensor, a heat gun, and a support. The operational sequence involved clamping the sheet, applying lubricant, and controlled heating by the heat gun, with temperature monitored through the thermal sensor. During the forming process, the temperature and vertical increment (Δz) were varied, and the tool followed a hyperboloid trajectory until the first rupture in the workpiece was identified. The objective of this study was to establish the relationship between the two mentioned parameters and the final deformation of the workpiece, aiming to provide predictability. Thus, multiple linear regression analysis was employed to examine this relationship, resulting in the regression equation that showed a maximum error of 14.77%. Subsequently, it was observed that the smaller vertical increment combined with a higher temperature promotes maximum deformation. Finally it was observed that a thickness of 0.7 mm promotes the emergence of wrinkles in the part, and this effect is accentuated with the increase in temperature.

Keywords: Incremental Sheet Forming. PVC. Temperature. Vertical Increment. Deformation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros do processo de estampagem incremental	12
Figura 2 – Tipos de Estampagem Incremental (a) SPIF, (b) TPIF com matriz negativa, (c) TPIF com matriz parcial e (d) TPIF com matriz positiva.....	13
Figura 3 – Rugosidade sob condições de estampagem padrão.....	14
Figura 4 - Diâmetro Inicial e Final da Chapa Estampada.....	15
Figura 5 – Gravações Chapas a Serem Conformadas (a) Chapa Polimérica Gravada com Tinta Permanente (b) Chapa Metálica com Gravação Química	15
Figura 6 - Representações esquemáticas de estruturas moleculares (a) linear (b) ramificada (c) com ligações cruzadas (d) em rede (tridimensional).....	17
Figura 7 – Volume Específico x Temperatura.....	19
Figura 8 – Comportamento tensão-deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e altamente elásticos (elastoméricos) (curva C)	20
Figura 9 - Efeito da Simetria em Tg e Tm.....	21
Figura 10 – Módulo de Armazenamento x Temperatura para PVC rígido e PVC plastificado (10%, 30%, 50% de DOP)	22
Figura 11 – Tensão x Deformação PVC, PCTFE, PTFE, CA.....	23
Figura 12 – Resistência ao Impacto x Raio da Ponta do Entalhe em diferentes termoplásticos	24
Figura 13 - Modos de falha observados experimentalmente no SPIF de polímeros (a) Ruptura Circunferencial em PC (b) Torção em PE (c) Ruptura Oblíqua em PVC	26
Figura 14 - Gráfico de força por deslocamento gerado no ensaio de tração do PVC	27
Figura 15 – Conformabilidade de Termoplásticos a partir da variação do ângulo de parede inicial e máximo.....	28
Figura 16 – Montagem do Sistema de Estampagem Incremental	29

Figura 17 – Dispositivo para Suporte do Soprador Térmico	30
Figura 18 - Hiperboloide: Vista em corte	30
Figura 19 – Ficha Técnica PVC.....	31
Figura 20 – Dispositivo de Fixação para Caneta	32
Figura 21 – Gravação Grade de Círculos em PVC. (a) Impressora 3D adaptada; (b) Chapas cortadas e gravadas.	32
Figura 22 – Aparecimento da primeira Fratura durante a conformação.....	33
Figura 23 – Fratura de cada peça após a estampagem incremental	34
Figura 24 – Influência Incremento Vertical.....	36
Figura 25 – Influência Temperatura	36
Figura 26 – Dispersão dos Dados	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais materiais utilizados em Estampagem Incremental	25
Tabela 2 – Resultado 12 Experimentos	35
Tabela 3 – Comparação das Equações e Erro Percentual.....	39

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT	5
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO GERAL.....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL	12
2.2 POLÍMEROS.....	16
2.3 PVC	21
2.4 ESTAMPAGEM DE PVC.....	24
3 METODOLOGIA.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5 CONCLUSÃO	41
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
7 REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

A estampagem incremental, um processo proeminente na indústria, destaca-se pela fabricação eficiente de peças de geometria complexa. Fundamentado pela conformação gradual de chapas a partir de deformações sequenciais, esse método representa uma abordagem consolidada em diferentes setores, incluindo automotivo, aeroespacial e geração de energia, evidenciando, ainda, potencial promissor em aplicações biomecânicas e de prototipagem rápida (PRADELLA, 2015).

Este processo de fabricação, demonstra ser uma alternativa ágil e economicamente viável para a produção de protótipos e lotes de pequena escala (PRADELLA, 2015). Na estampagem incremental, a conformação de chapas metálicas ou poliméricas é realizada por meio de uma ferramenta controlada por CNC (Controle Numérico Computadorizado), responsável por aplicar força direcionada e percorrer uma trajetória predeterminada sobre o material. Este processo persiste até que a peça atinja a forma desejada, conforme discutido por (CAVALER, 2010).

A conformação gradual se destaca pela habilidade de minimizar tensões excessivas e diminuir as distorções ocorridas durante a estampagem, resultando em peças com elevada precisão dimensional (BOFF et al., 2012). Essa característica, associada à eficiência e versatilidade do método, fortalece sua posição como uma estratégia preferencial para a produção eficaz de componentes de alta complexidade geométrica.

Paralelamente, os polímeros apresentam ótima aplicação para embalagens, dada a suas propriedades mecânicas. Estas incluem baixa densidade, flexibilidade, resistência à fadiga e à corrosão, baixo coeficiente de atrito, bem como propriedades isolantes térmicas, elétricas e o baixo custo. Entretanto, é importante reconhecer que os polímeros, em sua generalidade, são suscetíveis à inflamabilidade e apresentam baixa resistência a elevadas temperaturas, à radiação ultravioleta, às intempéries e à abrasão (PRADELLA, 2015).

Dentre os diversos polímeros, destaca-se o Policloreto de Vinila (PVC), um termoplástico com propriedades mecânicas que o conferem versatilidade para uma gama diversificada de aplicações, englobando construção civil, indústria automotiva, eletrônica e de brinquedos (SOUZA; PESSAN, 2006). Além disso, a capacidade de conformação do PVC, aliada à sua resistência à fadiga e ao desgaste, o posiciona como uma escolha ideal para processos de estampagem incremental (PRADELLA, 2015).

Ponderando estas considerações, o presente trabalho direcionou-se para a temática de conformação de polímeros, precedido por uma análise criteriosa dos trabalhos já publicados sobre estampagem incremental. Observou-se uma lacuna significativa na literatura, sobretudo de estudos centrados na estampagem de PVC.

Esta constatação, em conjunto com a avaliação da acessibilidade econômica e a ampla disponibilidade do material, fundamentou a condução deste estudo. Nesse contexto, é analisada a relação entre os principais parâmetros envolvidos no processo de estampagem incremental do PVC.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros temperatura e incremento vertical na estampabilidade de chapas de PVC com 0,7 mm de espessura.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar doze experimentos de estampabilidade variando temperatura e incremento vertical;
- Avaliar a relação entre deformação, temperatura e incremento vertical;
- Realizar análise de regressão com base nos parâmetros avaliados;
- Definir equação de regressão para estimar a deformação máxima em função da temperatura e do incremento vertical.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

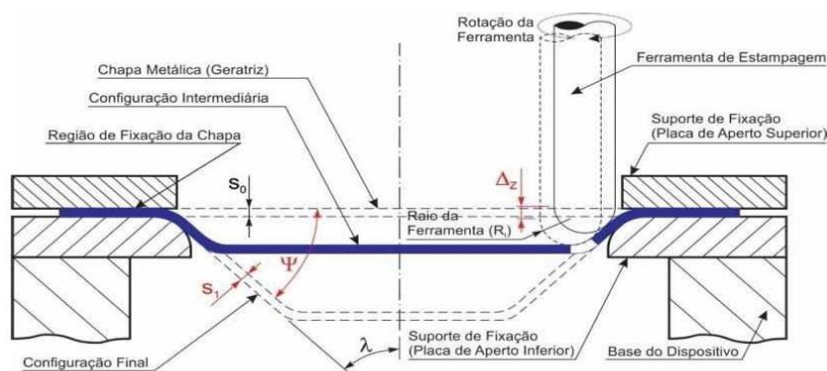
Neste capítulo, apresenta-se uma revisão abrangente, abordando os conceitos relacionados aos processos de estampagem incremental, além de uma análise das principais propriedades dos polímeros. Posteriormente, será enfatizado o Policloreto de Vinila (PVC) e suas aplicações no contexto da conformação mecânica.

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

A estampagem incremental é muito utilizada na fabricação de pequenos lotes de peças estampadas, na prototipagem rápida e para geometrias complexas (BRITTO, 2023). Este é um processo de conformação mecânica que se baseia em incrementar pouco a pouco uma chapa plana metálica ou polimérica, de acordo com a trajetória programada. Para isso, é necessário a utilização de uma prensa chapas para fixar o material e uma ferramenta guiada por um CNC para estampar a peça.

Além disso, alguns parâmetros devem ser observados, pois exercem influência na estampabilidade e acabamento da peça, como a espessura inicial (s_0) e final (s_1) da chapa, o incremento vertical (Δz), o raio da ferramenta (R_f), o ângulo de estampagem (ψ) e o ângulo de inclinação da parede da chapa (λ), conforme Figura 1.

Figura 1 - Parâmetros do processo de estampagem incremental

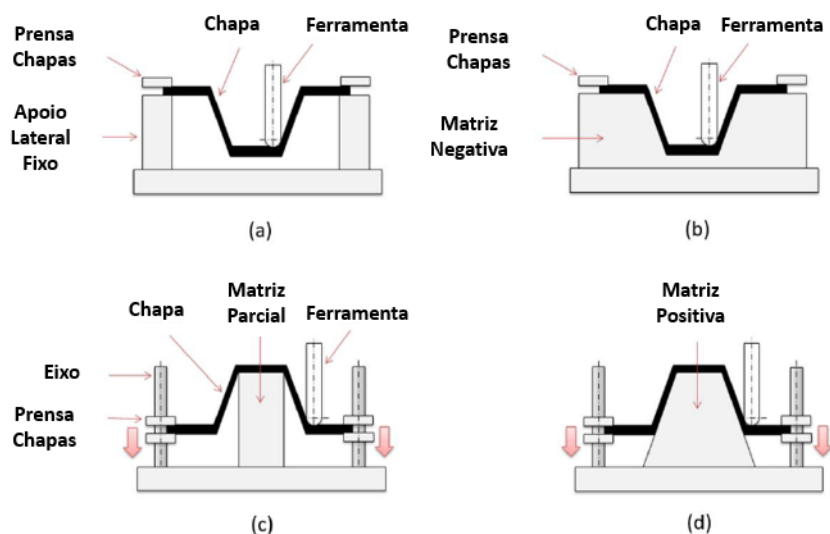


Fonte: Mateus, 2018

Existem diferentes técnicas de estampagem incremental, como a estampagem incremental de dois pontos (TPIF), que emprega matrizes parciais, positivas ou negativas,

e a estampagem incremental de ponto único (SPIF), que é mais utilizada por não depender de uma matriz, (BOFF et al., 2012). A TPIF visa aprimorar a geometria durante a produção de peças complexas, utilizando uma matriz negativa de baixo custo. Já a SPIF, é menos precisa, mas requer uma menor força para conformar a chapa, nesse caso, uma matriz positiva é utilizada, permitindo o movimento inferior da chapa, embora exija um conjunto de guias e um porta-chapa móvel conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Tipos de Estampagem Incremental (a) SPIF, (b) TPIF com matriz negativa, (c) TPIF com matriz parcial e (d) TPIF com matriz positiva



Fonte: Schreiber et al., 2022a (Adaptado)

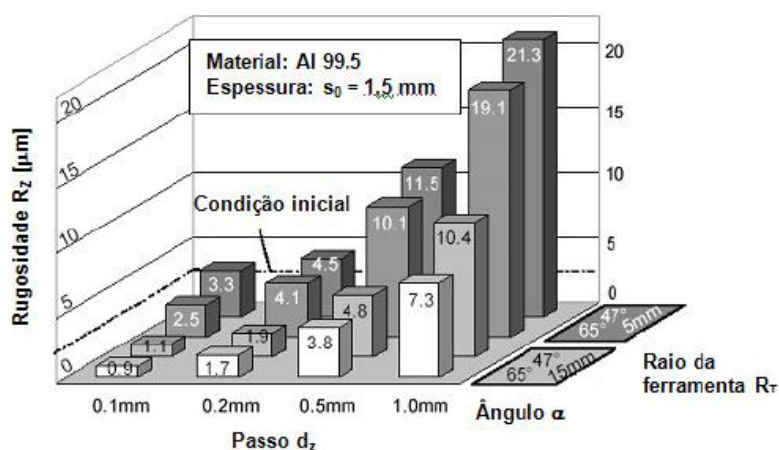
Os principais parâmetros avaliados em estampagem incremental são: ângulo de parede, trajetória de conformação, Δz , temperatura, lubrificação, características da ferramenta (raio, material, formato e rotação) e da chapa (material, espessura e força de fixação) (CAVALER, 2010). Estes parâmetros interferem diretamente no acabamento da peça.

Durante a conformação da peça, o Δz , pode ser explicado como o “degrau” que a ferramenta avança a cada volta completa, sendo inversamente proporcional ao tempo de estampagem. Entretanto um valor menor de incremento vertical pode proporcionar um acabamento melhor a peça. Já a velocidade de rotação da ferramenta, influencia diretamente a conformabilidade e o acabamento da peça. Isso porque gera atrito e aumento de temperatura entre a chapa e a ferramenta, diminuindo assim a resistência de conformação e melhorando a estampabilidade, porém possibilitando um acabamento rugoso (SCHREIBER et al., 2022a).

Além disso, a velocidade de avanço, assim como o Δz , tem seu valor inversamente proporcional ao tempo de conformação, no entanto, aumentá-la pode comprometer o acabamento superficial. Neste caso, também ocorre a elevação da temperatura, afetando a conformabilidade (SCHREIBER et al., 2022b).

Ademais, outros parâmetros estão inter-relacionados, como a espessura da chapa, a qual limita os valores do ângulo de parede, pois à medida que esse ângulo aumenta, a espessura final da peça diminui. Relação semelhante ocorre para o raio da ferramenta, que impacta a estampabilidade, o acabamento, a precisão e a resistência de conformação, pois seu valor é inversamente proporcional à conformabilidade e diretamente proporcional à rugosidade, Figura 3. Assim, um raio pequeno gera concentração de tensão e fraturas mais precoces, enquanto um raio maior reduz a rugosidade, conforme (CAVALER, 2010).

Figura 3 – Rugosidade sob condições de estampagem padrão



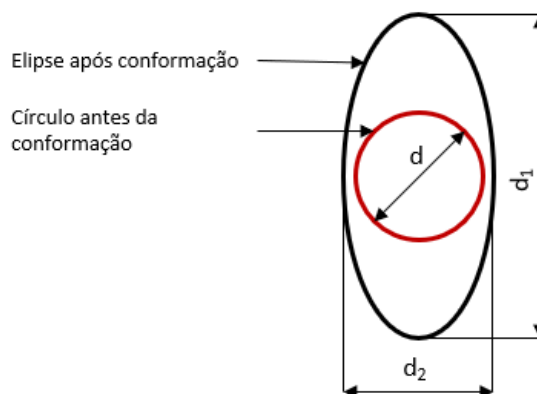
Fonte: Cavaler, 2010

A temperatura é um parâmetro crucial na estampagem, pois o aumento de temperatura resulta na redução da resistência mecânica, tanto em metais quanto em polímeros. Paralelamente, a lubrificação da chapa varia sua quantidade aplicada de acordo com o material estampado e espessura, além de desempenhar um papel significativo, ao minimizar o atrito, o calor e o desgaste da ferramenta, impactando diretamente no acabamento (BRITTO, 2023).

Após a conformação da peça, as deformações da chapa são medidas. Para isso, são comumente empregadas marcações de círculos com diâmetros específicos. A comparação entre o diâmetro do círculo inicial e o da elipse resultante possibilita o cálculo das

deformações da peça, conforme Figura 4. Para realização dos cálculos, apenas os diâmetros d e d_1 são utilizados, pois deseja-se encontrar a deformação máxima da peça.

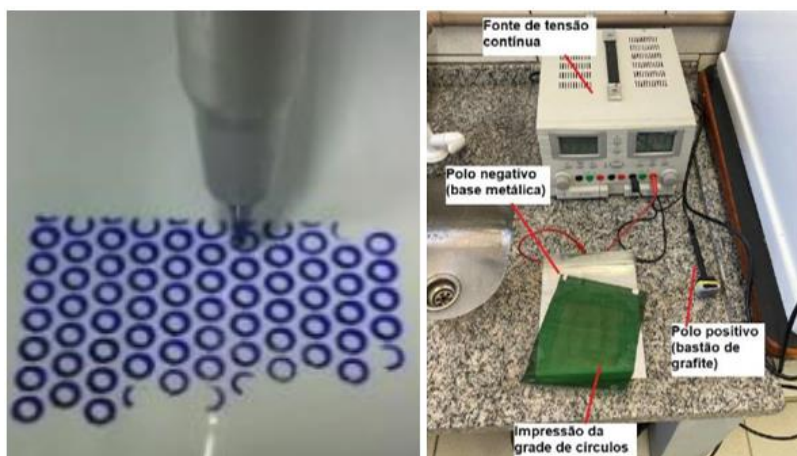
Figura 4 - Diâmetro Inicial e Final da Chapa Estampada



Fonte: Autor

Há diversos métodos para marcação das peças a serem estampadas, e a escolha do método mais adequado depende do tipo de material. Para polímeros, pode-se utilizar marcação com tinta permanente (PRADELLA, 2015) ou uma grade de círculos adesiva (MARTINS et al., 2009), enquanto nos metais, a gravação química é comumente empregada (KINIZ JR, 2022). Estes dois exemplos podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Gravações Chapas a Serem Conformadas (a) Chapa Polimérica Gravada com Tinta Permanente (b) Chapa Metálica com Gravação Química



(a)

(b)

Fonte: (a) Pradella, 2015 (b) Kiniz Jr, 2022 (Adaptado)

2.2 POLÍMEROS

Os polímeros são constituintes de macromoléculas compostas por unidades repetitivas denominadas monômeros, apresentam uma distinção entre naturais, encontrados na natureza, e sintéticos, produzidos por meio de processamento químico (SILVA; SILVA, 2003). A estrutura macromolecular dos polímeros confere-lhes propriedades distintas, tais como flexibilidade, resistência, elasticidade e transparência.

Polímeros naturais, como madeira, borracha, algodão, lã, couro, seda, celulose, proteínas, enzimas e amido, desempenham papéis fundamentais ao longo de séculos em diversas aplicações, desde a construção civil até a alimentação. Em contraste, os polímeros sintéticos, resultantes da síntese de moléculas orgânicas pequenas, como plásticos, borrachas e materiais fibrosos, experimentaram um crescimento significativo de utilização a partir da segunda metade do século XX. Esse aumento é atribuído não apenas à evolução tecnológica, mas também ao baixo custo de produção e à viabilidade de manipulação de suas propriedades, possibilitando uma ampla gama de aplicações (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

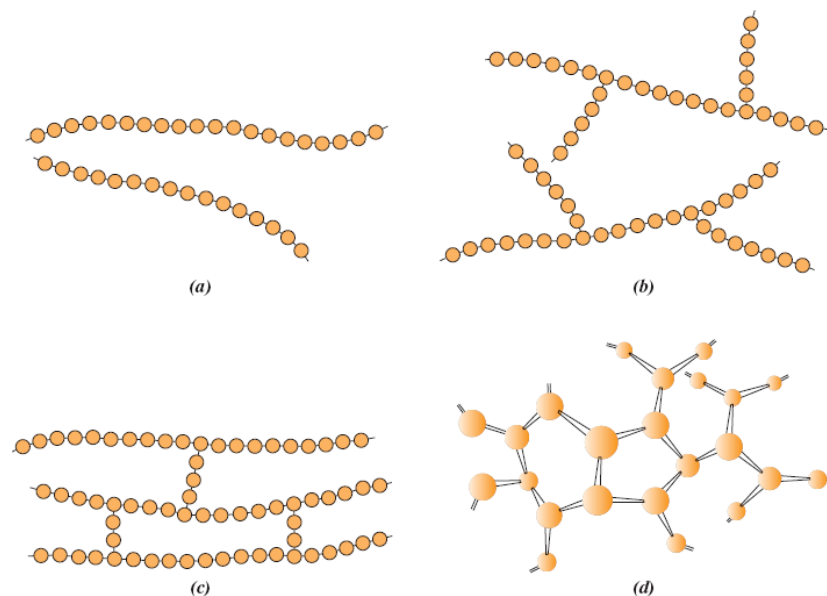
Além disso, os polímeros podem apresentar outras divisões, a partir de sua estrutura por exemplo, eles são classificados em lineares, ramificadas, de ligação cruzada e em rede, o que influencia diretamente suas propriedades (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Aqueles que são caracterizados por monômeros ligados em sequência, proporcionando cadeias longas e flexíveis, favorecendo o processamento são chamados de polímeros lineares. Fazem parte deste grupo, o polietileno, o PVC, o poliestireno, o polimetacrilato de vinila, o náilon e os fluorocarbonos. Já os que possuem cadeias laterais conectadas às cadeias principais, resultando em baixa compactação de cadeia e menor massa específica são chamados de ramificados, sendo exemplificados pelo polietileno de baixa densidade (PEBD) (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Já quando as cadeias lineares de um polímero estão conectadas em geometrias diferentes, o que impede o livre deslizamento, ele é classificado como um polímero com ligações cruzadas. Essa configuração é obtida por meio de reações químicas irreversíveis, como no caso das borrachas vulcanizada (CANEVAROLO JR, 2006). Os polímeros em rede, por sua vez, são caracterizados por muitas ligações cruzadas ou unidades repetidas com três ou mais ligações covalentes, sendo exemplificados pelas resinas epóxi,

poliuretanas e fenol-formaldeídos (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020). A Figura 6, demonstra a diferença entre cada estrutura citada.

Figura 6 - Representações esquemáticas de estruturas moleculares (a) linear (b) ramificada (c) com ligações cruzadas (d) em rede (tridimensional)



Fonte: Callister Jr e Rethwisch, 2020

O arranjo atômico de cada polímero também os classifica como cristalinos, semicristalinos ou amorfos. Materiais cristalinos possuem uma estrutura altamente ordenada e repetitiva, conhecida como rede cristalina. Já os materiais amorfos exibem uma estrutura desordenada e aleatória, resultado da solidificação sem tempo suficiente para uma organização ordenada. Os semicristalinos, por sua vez, apresentam características de ambas as estruturas, com regiões cristalinas e amorfas coexistentes (NUNES; LOPES, 2014).

A probabilidade de formação de cristalinidade é influenciada pela geometria das cadeias poliméricas. Cadeias lineares têm maior probabilidade de formar regiões cristalinas, enquanto as cadeias ramificadas tendem a ser amorfas devido à sua geometria mais complexa. A cristalinidade afeta propriedades como resistência mecânica, resistência à dissolução, rigidez e temperatura de transição vítrea (T_g). Em algumas aplicações, é possível adicionar aditivos para reduzir a cristalinidade do polímero, tornando-o totalmente amorfo, como observado no PVC plastificado (CANEVAROLO JR, 2006).

Em alguns polímeros, ocorre também a formação de esferulitas, cristalitos que contêm feixes cristalinos unidos por regiões amorfas, como polietileno, polipropileno, PVC, politetrafluoroetileno e náilon, quando solidificados a partir de massa fundida (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Ademais, a estrutura molecular desempenha um papel crucial na resposta do material a forças mecânicas, especialmente quando submetidos a altas temperaturas, impactando diretamente nos processos de fabricação. Assim, conforme o mesmo autor, os polímeros são divididos com base no seu comportamento térmico em termoplásticos e termorrígidos.

Os termoplásticos apresentam processos reversíveis, permitindo que seus ciclos de amolecimento e endurecimento sejam repetidos. Quando aquecidos, esses materiais amolecem devido à diminuição das forças de ligações secundárias e, ao serem resfriados, endurecem. No entanto, é crucial controlar a temperatura para evitar a degradação do material durante esse processo (SANFELICE; PAVINATTO; CORRÊA, 2022).

Já os termorrígidos não amolecem quando aquecidos, mas se degradam quando suas ligações cruzadas são quebradas a altas temperaturas. A estrutura destes polímeros é predominantemente em rede, conferindo rigidez permanente, proporcionando maior estabilidade e resistência em comparação aos termoplásticos. Pode-se citar com exemplos de termorrígidos as borrachas vulcanizadas, epóxis, resinas fenólicas e algumas resinas poliéster (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Ademais, a temperatura também afeta as propriedades mecânicas dos polímeros e é importante considerar seus efeitos em diferentes etapas. Há três temperaturas de transição relevantes: vítrea, fusão cristalina e cristalização (CANEVAROLO JR, 2006).

A temperatura de transição vítrea (T_g) representa o ponto em que os materiais amorfos adquirem mobilidade e assim podem alterar sua conformação. Abaixo desse limiar, a falta de energia impede que as cadeias poliméricas essa mudança, mas após atingir a T_g , o material pode experimentar alterações em propriedades como módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, índice de refração e calor específico, entre outros (NUNES; LOPES, 2014).

Por outro lado, a temperatura de fusão cristalina (T_m) indica o ponto em que ocorre a fusão dos cristalitos e o desaparecimento das regiões cristalinas. Nessa temperatura, há energia suficiente para que o polímero faça a transição do estado borrachoso para o viscoso. A T_m pode influenciar propriedades como o volume específico, a entalpia e a

viscosidade, mas seus efeitos são observados apenas na fase cristalina, sendo relevante especialmente para polímeros semicristalinos (NUNES; LOPES, 2014).

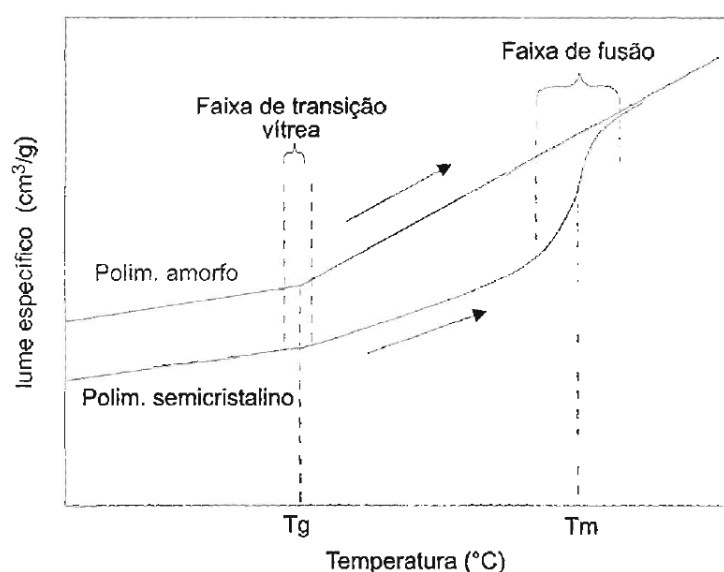
Em relação à temperatura de cristalização (T_c), ela representa o ponto de redução da temperatura, podendo ocorrer de maneira isotérmica ou dinâmica, permitindo a formação de uma estrutura cristalina. O valor de T_c situa-se entre T_g e T_m , e sua definição pode considerá-lo como equivalente à temperatura na qual ocorre a máxima taxa de conversão da cristalização (CANEVAROLO JR, 2006).

Adicionalmente, as propriedades mecânicas dos polímeros são sensíveis ao aumento de temperatura e à diminuição da taxa de deformação. O aumento da temperatura, por exemplo, tem impacto direto nos valores do módulo de elasticidade, resistência à tração e ductilidade (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Os polímeros amorfos, por sua vez, possuem uma característica interessante a depender da temperatura a qual são submetidos. A baixas temperaturas comportam-se como vidro, acima da T_g como borracha e a altas temperaturas como líquido viscoso (CANEVAROLO JR, 2006).

Conforme ocorre a elevação gradual da temperatura há maior mobilidade das cadeias e, assim, o aumento do volume específico. Quando se atinge a T_g , a inclinação da curva é maior, ocorrendo uma inflexão. Para os semicristalinos, seus cristais podem ser reorganizados por haver energia suficiente para fundi-los, acima da T_g , e essas características podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 – Volume Específico x Temperatura

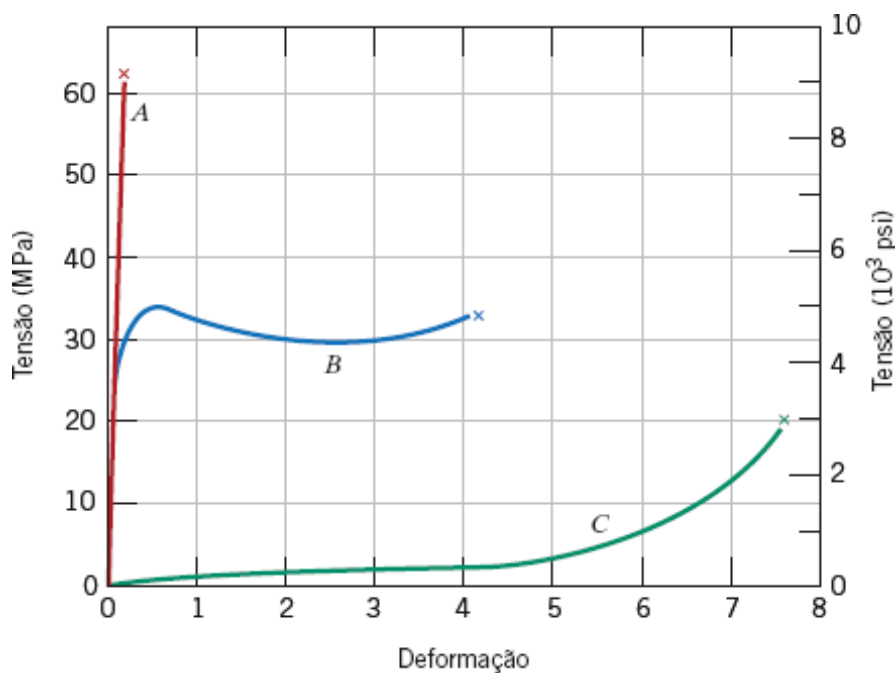


Fonte: Canevarolo Jr, 2006

Além disso, com base em sua resistência mecânica, os polímeros podem ser categorizados como borrachas ou elastômeros, plásticos e fibras. As borrachas são polímeros altamente elásticos e flexíveis, capazes de se deformarem e recuperarem sua forma original. Enquanto os plásticos são polímeros moldáveis em diferentes formas e tamanhos, exibindo uma ampla variedade de propriedades mecânicas, desde materiais rígidos até flexíveis. As fibras, por sua vez, são polímeros alongados, que apresentam alta resistência mecânica e são muito utilizadas, por exemplo, como tecidos em estruturas têxteis (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Ademais, os polímeros também são classificados como frágeis, plásticos ou elastoméricos com base em seu comportamento tensão-deformação, Figura 8. A primeira categoria caracteriza-se por fraturar durante a deformação elástica, enquanto a segunda passa por uma deformação inicial elástica, seguida por escoamento e deformação plástica, assemelhando-se ao comportamento observado em metais. A última categoria apresenta um comportamento totalmente elástico (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

Figura 8 – Comportamento tensão-deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e altamente elásticos (elastoméricos) (curva C)



Fonte: Callister Jr e Rethwisch, 2020

2.3 PVC

O Policloreto Vinila (PVC) foi o quarto plástico mais consumido mundialmente, com uma demanda de aproximadamente 36,8 milhões de toneladas de PVC em 2019 (CZOGAŁA; PANKALLA; TURCZYN, 2021). Isso se deve a sua versatilidade, afinal este material pode se apresentar como rígido ou flexível, além de permitir ser submetido a diferentes processos de fabricação e aplicações variadas, desde brinquedos até a construção civil (SOUZA; PESSAN, 2006).

Este polímero é categorizado como um plástico devido ao seu comportamento sob tensão-deformação e classificado como termoplástico, por demonstrar um comportamento reversível quando aquecido e resfriado. Além disso, pode existir tanto na forma semicristalina, exibindo um grau de cristalinidade em torno de 15%, quanto na forma amorfa. Também possui uma estrutura linear formada pelo monômero de cloreto de vinila ($CH_2 = CHCl$), **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o qual o confere o nome característico. Durante o processo de formação química, o PVC passa por uma polimerização por adição, na qual os monômeros se conectam entre si sem gerar subprodutos, resultando no crescimento gradual da cadeia polimérica à medida que monômeros adicionais se incorporam à cadeia em formação (CANEVAROLO JR, 2006).

Figura 9 - Efeito da Simetria em Tg e Tm

Polímero	Mero	Tg(°C)	Tm(°C)	Tg/Tm(K/K)
Policloreto de Vinila (PVC)	$\left[\begin{array}{c} CH_2 - CH \\ \\ Cl \end{array} \right]_n$	87	212	0,53
Policloreto de Vinilideno (PVDC)	$\left[\begin{array}{c} Cl \\ \\ CH_2 - C \\ \\ Cl \end{array} \right]_n$	-19	198	0,74

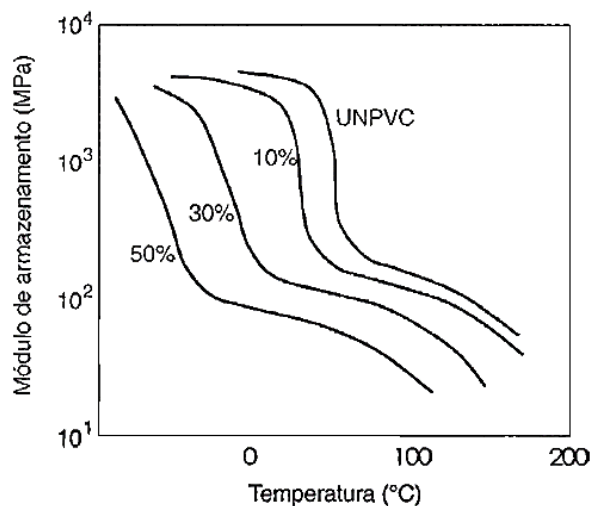
Fonte: Canevarolo Jr, 2006 (Adaptado)

Devido a essa estrutura, o PVC pode ser produzido com transparência óptica, uma vez que as regiões amorfas dos semicristalinos e os demais amorfos permitem a passagem de luz com maior facilidade. Esta característica permite ao material uma gama maior de aplicações, como para calçados nos quais se deseja acabamentos com transparências ou brilhos (LUCHT, 2020).

O PVC apresenta temperatura de fusão igual a 212 °C e temperatura de transição vítrea igual a 87 °C (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020). Durante os processos de fabricação, deve-se observar se o PVC utilizado é amorfo ou semicristalino, pois no primeiro caso deverá ser conformado acima da Tg, já para no segundo caso o processo deverá ser realizado acima da Tm.

De forma simplificada, o PVC pode ser categorizado como plástico, caracterizado por ser mole e tenaz ou rígido, apresentando características de dureza e resistência (ALMEIDA; SOUZA, 2015). Essa distinção é resultado de mudanças em propriedades como viscosidade, Tg e módulo de armazenamento (ou módulo de Young). A inclusão de plastificantes e a variação na concentração de cloreto de vinila são exemplos de fatores que ocasionam essas modificações, conforme demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Módulo de Armazenamento x Temperatura para PVC rígido e PVC plastificado (10%, 30%, 50% de DOP)



Fonte: Canevarolo Jr, 2006

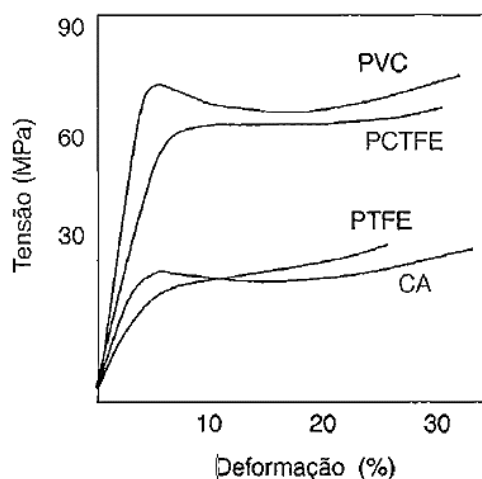
Os plastificantes, geralmente líquidos ou sólidos, possuem alto ponto de ebulição e são muito empregados, principalmente na composição do PVC, sendo este polímero responsável por mais de 80% do consumo (ALMEIDA; SOUZA, 2015). Estes aditivos

reduzem a fragilidade do PVC, aumentam sua flexibilidade e podem reduzir sua T_g , permitindo a produção de PVC rígido, semi-rígido e flexível, a depender da concentração adicionada (PERITO, 2011).

Quando a temperatura de amolecimento é próxima à T_g , no caso do PVC plastificado (PPVC), isso permite deformações e conferem uma aparência semelhante ao couro, mas quando a temperatura de amolecimento é superior à T_g , o material torna-se rígido e vítreo. Apesar disso, os plastificantes não afetam significativamente o grau de cristalinidade ou a temperatura de fusão (CANEVAROLO JR, 2006).

Além disso, o aumento da temperatura, bem como a diminuição da taxa de deformação, Figura 11, interfere diretamente nas propriedades mecânicas do polímero como resistência à tração, módulo de elasticidade e alteração de seu comportamento de frágil para dúctil (LUCHT, 2020).

Figura 11 – Tensão x Deformação PVC, PCTFE, PTFE, CA

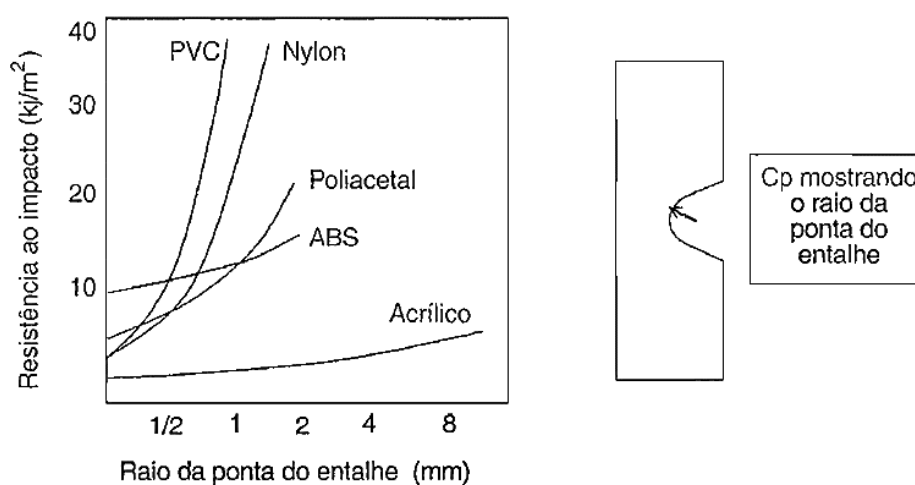


Fonte: Canevarolo Jr, 2006

Da mesma forma, quando submetidos a maiores pressões de trabalho associadas a elevação da temperatura, os polímeros têm seu comportamento afetado, tornando-se maleáveis e fluidos. Tanto termoplásticos quanto termorrígidos podem ser moldados nestas condições, entretanto a influência destas variáveis não apresenta mais efeito nos termorrígidos após sua solidificação, gerando degradação do material, enquanto os termoplásticos podem ser submetidos novamente a estas condições, sendo assim recicláveis (CANEVAROLO JR, 2006).

Outra propriedade importante do PVC é sua elevada resistência ao impacto. Essa característica é avaliada por meio do ensaio de impacto, Figura 12, que consiste na criação de um entalhe com um raio definido, seguido pela liberação de um pêndulo oscilante sobre o corpo de prova a partir de uma altura suficiente para provocar sua quebra. Nesse contexto, o entalhe atua como um concentrador de tensão, resistindo à energia de propagação da trinca. Esta energia somada àquela cedida para iniciar a trinca resulta na energia necessária para romper o corpo de prova (CANEVAROLO JR, 2006).

Figura 12 – Resistência ao Impacto x Raio da Ponta do Entalhe em diferentes termoplásticos



Fonte: Canevarolo Jr, 2006

2.4 ESTAMPAGEM DE PVC

O PVC, devido sua versatilidade, proporciona diversas vantagens de aplicação, sendo compatível com uma variedade de processos de fabricação, como extrusão, injeção, calandragem, estampagem convencional e incremental, entre outros (CANEVAROLO JR, 2006). Em estampagem incremental, o PVC é um dos materiais mais utilizados, ficando atrás apenas dos metais, conforme Tabela 1. Isso deve-se ao fato de o PVC ser uma das alternativas mais econômicas entre os polímeros, considerando seu custo e disponibilidade para aplicação em SPIF, além de ser uma excelente escolha quando se busca precisão, devido ao seu baixo retorno elástico (MARTINS et al., 2009).

Tabela 1 - Principais materiais utilizados em Estampagem Incremental e pesquisadores

Material	Autor(es)
Ligas de Alumínio	(AERENS et al., 2010), (BANSAL et al., 2017), (KUMAR, N.; SINGH; AGRAWAL, 2020), (PACHECO; SILVEIRA, 2018), (SCHREIBER; SCHAEFFER, 2019), (TORSAKUL; KUPTASTHIEN, 2019)
Aço Carbono	(AERENS et al., 2010), (LI; LI; ZHOU, 2012),
Aço Inoxidável	(AERENS et al., 2010)
PVC	(PRADELLA; FOLLE, 2016)
Latão	(TORSAKUL; KUPTASTHIEN, 2019)
Cobre	(TORSAKUL; KUPTASTHIEN, 2019)
Magnésio	(ZHANG et al., 2020)
Titânio	(DUFLOU, J. R. et al., 2013)
Polycarbonatos (PC)	(CENTENO et al., 2017)

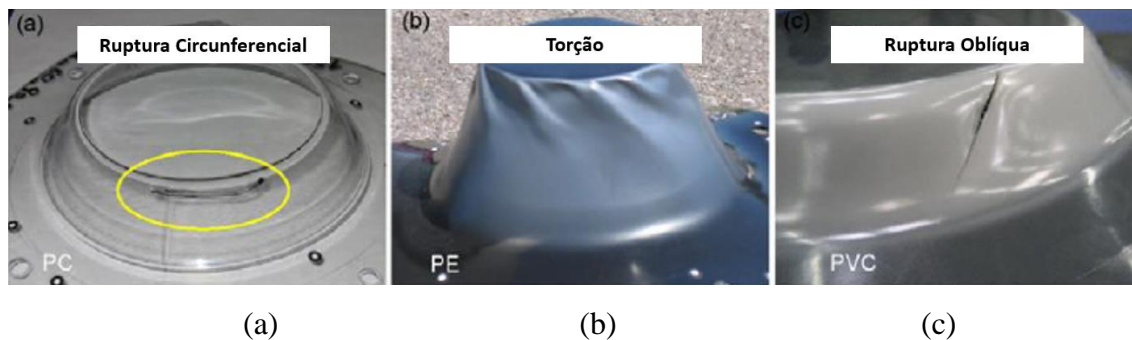
Fonte: Kiniz Jr, 2022

Na estampagem de polímeros, os principais parâmetros do processo são: temperatura de conformação, ângulo de parede, espessura da chapa, incremento vertical, velocidade de rotação, raio e geometria da ferramenta, força aplicada, avanço e trajetória de conformação avanço. Dentre eles, os seis primeiros são mais críticos para a conformabilidade, pois interferem na qualidade de conformação e na ocorrência de falhas na peça (ZHU; OU; POPOV, 2020).

Outro aspecto importante para a conformação incremental de PVC é o uso de lubrificante, conforme verificado por (PRADELLA, 2015), a ausência de lubrificação da chapa pode ocasionar a remoção do material devido a aderência a ferramenta. Isto deve ser considerado a cada conformação para melhorar a conformabilidade com a redução do atrito e garantir um melhor acabamento.

Durante a estampagem incremental, os termoplásticos podem apresentar três tipos de falhas: abertura da fissura ao longo da direção circunferencial na zona de transição entre a parede inclinada e o raio de canto das peças, desenvolvimento de rugas ao longo da parede inclinada da peça ou abertura da trinca ao longo da direção da bissetriz na parede inclinada das peças, conforme indicado na Figura 13.

Figura 13 - Modos de falha observados experimentalmente no SPIF de polímeros (a) Ruptura Circunferencial em PC (b) Torção em PE (c) Ruptura Oblíqua em PVC



Fonte: Martins, 2009 (Adaptado)

A primeira assemelha-se ao que ocorre com os metais, uma estricção local na curva limite de conformação, a segunda refere-se à torção causada de acordo com o avanço da ferramenta, prejudicando o acabamento da peça, e a última está relacionada ao cisalhamento do material, causando uma fratura dúctil direta na linha de formação de fratura (MARTINS et al., 2009). No entanto, diferentemente dos metais, os termoplásticos não apresentam estrangulamento óbvio antes de ocorrer a ruptura (ZHU; OU; POPOV, 2020).

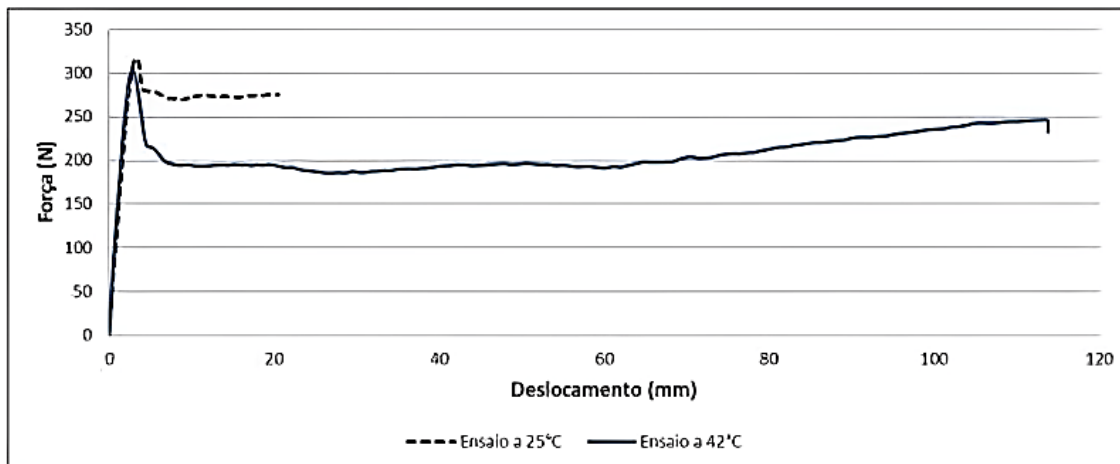
Além disso, a temperatura tem grande efeito sobre os termoplásticos, impactando diretamente na precisão geométrica da conformação e na rugosidade da superfície da peça (ZHU; OU; POPOV, 2020). O aquecimento da chapa pode ser gerado por uma fonte de calor externa ou pelo próprio atrito do material com a ferramenta.

No primeiro caso, há uma melhoria na estampabilidade do material, devido a superfície mais maleável promovida pelo aumento de temperatura, conforme destacado por Zhu, Ou e Popov (2020). No segundo caso, o material permite conformação a frio ou o atrito entre a ferramenta e a superfície é suficiente para amolecer a chapa, obtendo uma peça com maior resistência e processo de produção mais barato.

No trabalho de Pradella (2015), foram realizados ensaios de tração com PVC, de 0,6 mm de espessura, a frio (temperatura ambiente) e com o material aquecido a 42°C. Assim, o autor verificou um alongamento maior do corpo de prova quando submetido a

maior temperatura. Na Figura 14, pode-se verificar o aumento da temperatura ocasionou a diminuição da força de tração e aumento da deformação até o rompimento do corpo de prova.

Figura 14 - Gráfico de força por deslocamento gerado no ensaio de tração do PVC



Fonte: Pradella, 2015

Além disso, o raio e a velocidade de rotação da ferramenta também têm influência sobre o atrito e conseqüentemente, sobre o aumento de temperatura, sendo esta relação diretamente proporcional. Quanto menores estes valores mais fácil será a estampabilidade e menor será a força máxima de conformação, resultando em melhor acabamento da peça (ZHU; OU; POPOV, 2020).

Contudo, é importante ressaltar que a temperatura suportada pelo PVC é limitada pela sua degradação, que pode ocorrer abaixo de 100 °C devido à presença de átomos de cloro lábeis (átomos com alta suscetibilidade à substituição ou remoção devido à sua reatividade e prontidão para participar de reações químicas) em sua composição, conforme mencionado por Rodolfo Jr e Mei (2007).

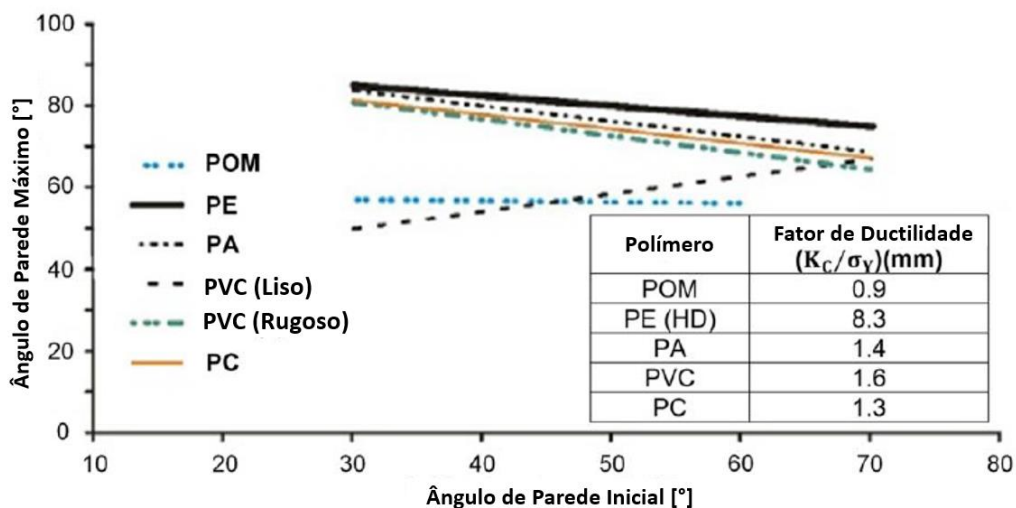
Em relação ao incremento vertical, seu aumento melhora a conformabilidade durante a estampagem incremental, beneficiado pelas propriedades reológicas do PVC (ZHU; OU; POPOV, 2020). Além disso, em termoplásticos como o policarbonato, esse aumento contribui com a redução do retorno elástico do material, mas quando excessivo, pode propiciar enrugamentos. Por outro lado, uma redução no incremento vertical pode resultar em uma diminuição excessiva da espessura da peça (ZHU; OU; POPOV, 2020).

Ademais, referente a influência do ângulo de parede, os termoplásticos são mais afetados por seu valor inicial do que os metais (MARTINS et al., 2009). O PVC apresenta

um comportamento diferente dos demais termoplásticos em relação ao ângulo de parede inicial, enquanto para aqueles o aumento deste ângulo resulta em menor conformabilidade da peça, para este a conformabilidade é melhorada (ZHU; OU; POPOV, 2020).

A relação dos principais termoplásticos com o ângulo de parede pode ser observada na Figura 15. Nela foram comparados tanto o PVC com superfície lisa e brilhante, quanto o PVC de superfície rugosa. Esta diferença de acabamento impacta no acabamento da peça, pois o atrito e a rugosidade prejudicam a estampabilidade da chapa (ZHU; OU; POPOV, 2020).

Figura 15 – Conformabilidade de Termoplásticos a partir da variação do ângulo de parede inicial e máximo



Fonte: Zhu; Ou; Popov, 2020 (Adaptado)

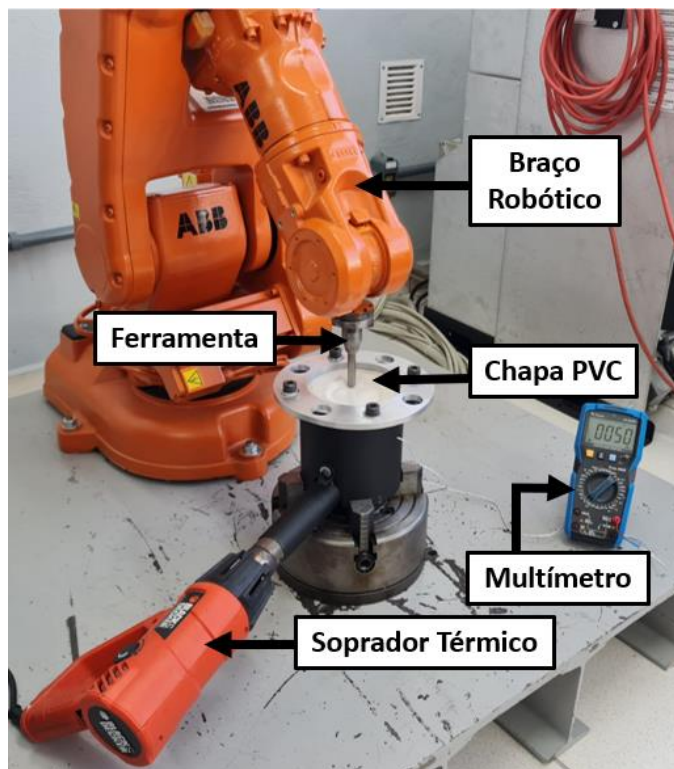
Adicionalmente, conforme verificado por (MARTINS et al., 2009) em ensaios de tração e experimentos de SPIF, o PVC altera sua coloração durante a conformação, passando de cinza escuro para cinza claro. Isso pode representar uma relação entre o efeito do branqueamento de tensões e a diminuição da densidade, que é significativamente diminuída na zona conformada.

Por fim, Martins et al. (2009) também constatou que dentre os polímeros avaliados, o PVC apresenta o menor desvio geométrico, quando comparado a peça estampada com seu projeto via *software*.

3 METODOLOGIA

Para realização deste trabalho foi necessário a montagem do sistema apresentado na Figura 16. Este sistema é composto pelos seguintes elementos: um braço robótico da marca ABB, modelo IRB 140, equipado com uma ferramenta de ponta semiesférica com 10 mm de diâmetro, chapas de PVC, lubrificante desengripante Starrett M1, um dispositivo de fixação, um multímetro digital da marca MINIPA e modelo ET-2042F, com um termopar tipo K, um soprador térmico, e um dispositivo de suporte para o soprador.

Figura 16 – Montagem do Sistema de Estampagem Incremental



Fonte: Macedo et al., 2023

A realização dos experimentos segue a seguinte sequência: a chapa é fixada no suporte e recebe uma fina camada de lubrificante, bem como a ponta da ferramenta, paralelamente o soprador térmico é acionado e controlado manualmente a fim de manter a temperatura dentro do intervalo desejado a partir da indicação na tela do multímetro. Este, por sua vez, possui um sensor de temperatura conectado, o qual é fixado na parte interna do dispositivo de suporte. O laboratório utilizado era climatizado, permitindo também o controle da temperatura ambiente e evitando a interferência nos experimentos.

Então, a ferramenta realiza a trajetória programada até que a primeira ruptura na peça seja identificada e a profundidade máxima é registrada.

O dispositivo de suporte para o soprador térmico, Figura 17, foi projetado e fabricado em aço 1045 por alunos bolsistas de projetos da instituição e pelo professor orientador, para facilitar o aquecimento da chapa por meio do isolamento e direcionamento do fluxo de ar quente gerado pelo soprador térmico.

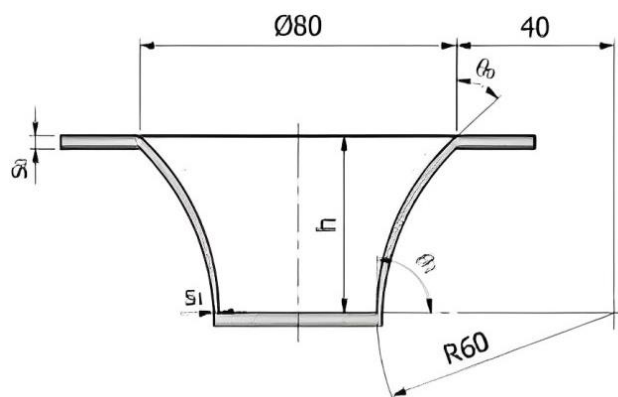
Figura 17 – Dispositivo para Suporte do Soprador Térmico



Fonte: Autor

Para conformação das peças foi escolhido o formato hiperboloide, Figura 18, devido à sua característica de aumento gradual do ângulo de parede (θ) à medida que a ferramenta avança incrementalmente. Isso permite alcançar a deformação máxima da peça. Ademais, durante a conformação da chapa, há a redução progressiva de sua espessura e, conseqüentemente, a ocorrência de ruptura é controlada, permitindo análises com maior precisão.

Figura 18 - Hiperboloide: Vista em corte



Fonte: Schreiber, 2022b

Com base na capacidade do braço robótico utilizado e nos trabalhos de Pradella (2015) e Macedo et al. (2023), pode-se definir que a espessura ideal da chapa deveria estar entre 0,6 mm e 1 mm. Esses mesmos critérios orientaram a definição dos valores para a temperatura, estabelecidos como 20 °C, 25 °C, 30 °C e 40 °C \pm 2°C

Uma pesquisa de mercado foi conduzida, culminando na aquisição de uma placa de PVC rígido branco com 0,7 mm de espessura, cuja ficha técnica está minuciosamente detalhada na Figura 19.

Figura 19 – Ficha Técnica PVC

MATERIAL: PVC

PROPRIEDADES TÉCNICAS:

Peso específico <i>Specific weight</i>	1,4 a 1,5 g/cm ³
Tensão de escoamento à tração <i>Tensile strength at yield DIN EN ISO 527</i>	45 MPa
Resistência à tração <i>Tensile resistance</i>	\geq 50 N/mm ²
Elongação até ruptura <i>Elongation at break DIN EN ISO 527</i>	15%
Módulo de elasticidade <i>Modulus of elasticity (tensile test) DIN EN ISO 527</i>	3000 N/mm ²
Dureza em MPA <i>Ball indentation hardness DIN EN ISO 2039-1</i>	140 MPa
Dureza em Shore D <i>Hardness</i>	\geq 75 Shore D
Temperatura de amolecimento "VICAT" <i>Vicat temperature</i>	\geq 75 °C
Temperatura de trabalho máxima <i>Service temperature</i>	
longa duração <i>long term</i>	70°C
curta duração <i>short term</i>	60°C
Condutividade térmica <i>Thermal conductivity DIN 52612-1</i>	0,20 W/°K.m
Coefficiente linear de expansão térmica <i>Coefficient of linear thermal expansion DIN 53752</i>	8 10 ⁻⁵ /°K
Resistência superficial <i>Surface resistance IEC 60093</i>	10 ¹³ Ω
Resistividade volumétrica <i>Specific volume resistance IEC 60093</i>	10 ¹⁵ Ω *cm
Constante dielétrica <i>Dielectric constant IEC 60250</i>	3
Rigidez dielétrica <i>Dielectric strength IEC 60243-1</i>	39 kV/mm
Inflamabilidade <i>Flamability UL94</i>	V0

Fonte: INCOMPLAST, 2023

Em seguida, os valores para o incremento vertical (Δz) foram estabelecidos com base no estudo realizado por Britto (2023), o qual investigou a influência do incremento vertical na conformação de chapas de alumínio puro. Assim, foram definidos três valores: 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm.

A partir dessas informações, foram realizados doze experimentos, variando incremento vertical (Δz) e temperatura. Para isso, foi utilizando o sistema apresentado na Figura 16 e chapas de PVC rígido branco de 0,7 mm de espessura, conforme ficha técnica da Figura 19, conformadas em formato hiperboloide, de acordo com Figura 18, além da velocidade de avanço de 50 mm/s.

Além disso, visando obter o valor de deformação das peças após serem estampadas, foi realizada a gravação de círculos com diâmetro de 2 mm nas chapas para comparação de antes e depois, utilizando tinta permanente, semelhante ao apresentado na Figura 5a. Desta forma, foi utilizada uma impressora 3D com uma caneta permanente com ponta de 1 mm, acoplada por meio do dispositivo de fixação da caneta confeccionado pelos alunos bolsistas, conforme Figura 20.

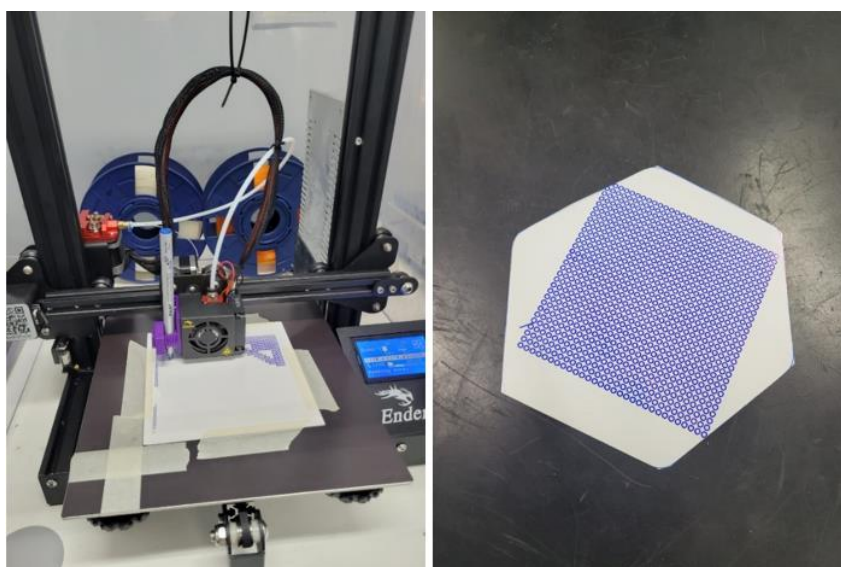
Figura 20 – Dispositivo de Fixação para Caneta



Fonte: Autor

A partir da programação feita pelo *software UltiMaker Cura*, a caneta descreveu sua trajetória gravando uma grade de círculos nas chapas, conforme Figura 21 (a). Após, as chapas foram cortadas no formato hexagonal, Figura 21 (b), para melhor encaixe ao dispositivo de fixação.

Figura 21 – Gravação Grade de Círculos em PVC. (a) Impressora 3D adaptada; (b) Chapas cortadas e gravadas.



(a)

(b)

Fonte: Autor

Após essa etapa, a amostra foi definida como doze experimentos, por ser o número mínimo de correlações entre os três valores de Δz e os quatro de temperatura. Em seguida, cada peça foi conformada até o surgimento da primeira fratura, Figura 22, e os valores de profundidade máxima foram registrados.

Figura 22 – Aparecimento da primeira Fratura durante a conformação



Fonte: Autor

Posteriormente, foram realizadas as medições das elipses, Figura 4, com auxílio de um microscópio e uma régua de calibração para micrômetro de microscópio. Cada peça teve ao menos 3 elipses verificadas entre as que apresentaram maior deformação (próximas a fratura) a cada medição e as medições foram realizadas duas vezes.

A partir disso foi calculada a média de cada diâmetro para realização dos cálculos da deformação por meio da Equação 1:

$$\varphi = \ln \frac{d_1}{d} \quad (1)$$

Onde:

- φ = deformação verdadeira principal (-);
- d = diâmetro do círculo gravado na chapa (mm);
- d_1 = comprimento da elipse (mm).

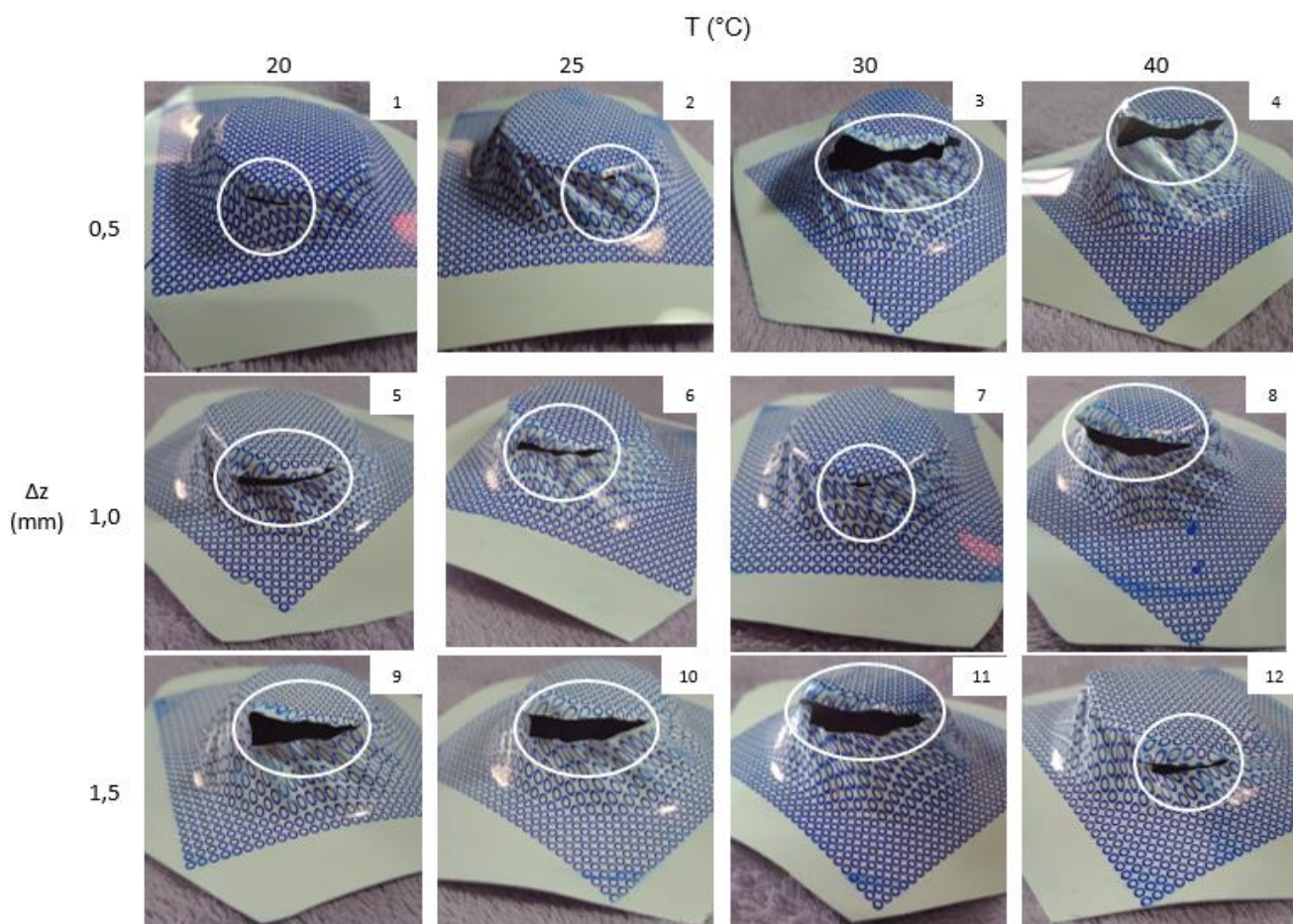
Em seguida, os dados foram tabelados e submetidos a análise estatística de regressão linear.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados e as discussões a partir da realização dos doze experimentos propostos.

Primeiramente, na Figura 23 é possível visualizar cada uma das peças após a estampagem incremental, destacando a fratura. Após a inspeção visual, é possível verificar que as peças apresentaram ruptura circunferencial e torção.

Figura 23 – Fratura de cada peça após a estampagem incremental



Fonte: Autor

Devido a pequena espessura o enrugamento foi recorrente e perceptível em todos os experimentos, resultado semelhante ao obtido por Martins et al. (2009). O agravamento desse problema foi constatado com o aumento da temperatura, conforme também evidenciado por Macedo et al. (2023).

Além disso, pode-se verificar o que se afirma nos estudos de Zhu; Ou e Popov (2020) e Martins et al. (2009), pois o PVC não apresentou estrangulamento óbvio antes da fratura.

A partir da obtenção dos valores do diâmetro da elipse d_1 , foram calculados os valores de deformação por meio da Equação 1. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

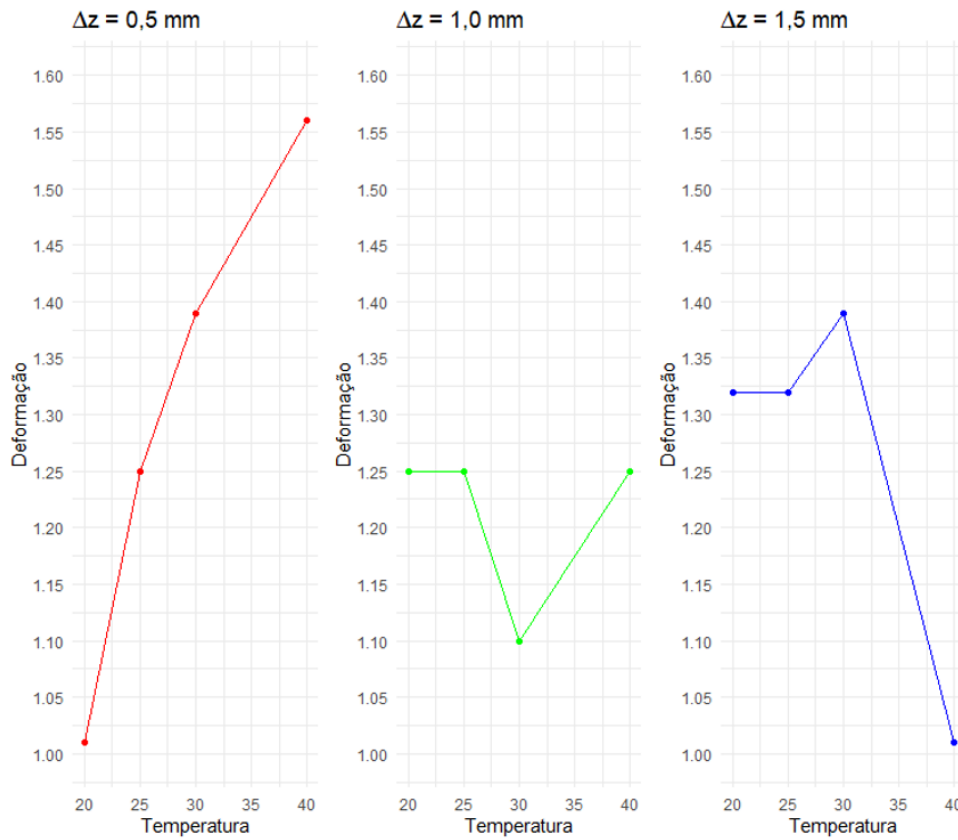
Tabela 2 – Resultado 12 Experimentos

Experimento	Incremento Vertical (mm)	Temperatura (°C)	Profundidade (mm)	Deformação (-)
1	0,5	20	22,5	1,01
2	0,5	25	25	1,25
3	0,5	30	40	1,39
4	0,5	40	41,5	1,56
5	1,0	20	27	1,25
6	1,0	25	32	1,25
7	1,0	30	26	1,10
8	1,0	40	35	1,25
9	1,5	20	33	1,32
10	1,5	25	31,5	1,32
11	1,5	30	34,5	1,39
12	1,5	40	24	1,01

Fonte: Autor

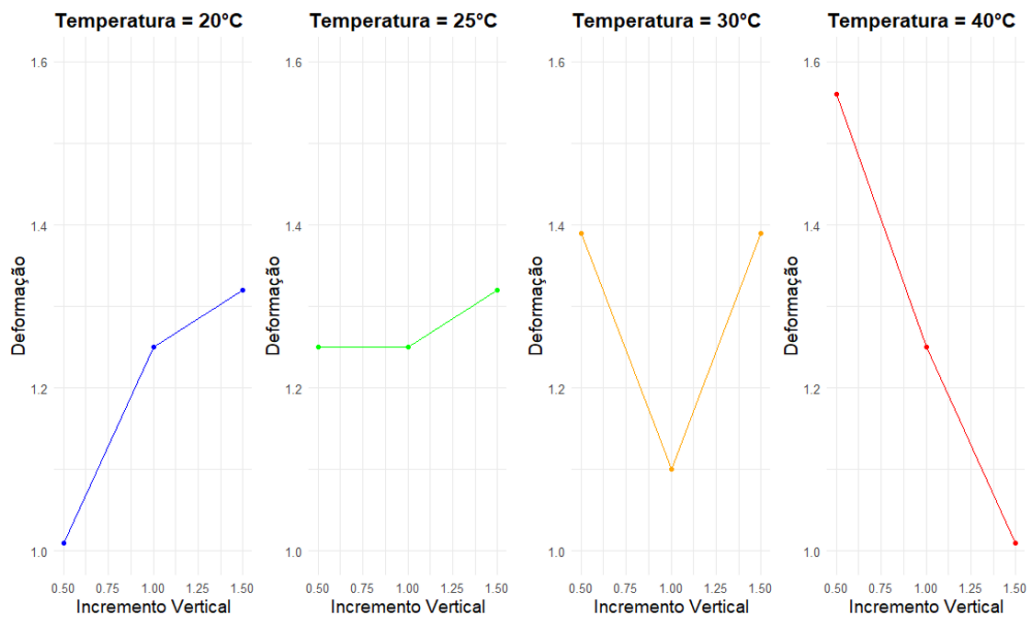
Com isso, foram gerados gráficos de tendência para melhor visualização da influência e comportamento do incremento vertical, Figura 24, e da temperatura, Figura 25.

Figura 24 – Influência Incremento Vertical



Fonte: Autor

Figura 25 – Influência Temperatura



Fonte: Autor

Dessa forma, observa-se que a relação entre incremento vertical e temperatura é inversamente proporcional, pois a combinação do valor mínimo do primeiro com o valor máximo do segundo, a saber 0,5 mm e 40 °C, proporcionou a maior deformação de 1,56. Já as menores deformações, ambas iguais a 1,01, ocorreram quando apenas um dos valores estava no valor máximo, para o incremento vertical, ou mínimo, para a temperatura. Entretanto, a combinação entre estes valores, 1,5 mm e 20 °C, resultou em uma deformação de 1,32, valor próximo a média das doze deformações, que é de 1,25.

Em seguida, foi verificado o coeficiente de variação dos dados, por meio da Equação 2:

$$CV = \left(\frac{s}{\bar{x}} \right) \quad (2)$$

Onde:

s = desvio padrão;

\bar{x} = média dos valores.

Assim, para a temperatura, o valor que apresentou menor coeficiente de variação (CV), foi 25 °C, com $CV = 6,93\%$. Já, para o incremento vertical, o valor de 1 mm apresentou o menor CV, sendo este igual a 2,75%.

Ademais, o experimento 7 apresentou um comportamento destoante dos demais pontos para ambas as análises gráficas. A repetição deste experimento poderia verificar se ele representa um ponto excepcional ou se a combinação de incremento vertical e temperatura neste caso é problemática.

Com isso a seguinte hipótese é levantada: a pequena espessura e a variação de temperatura em até 15 °C não foram suficientes para demonstrar o real impacto deste parâmetro. Devido ao tamanho da amostra a confiança dos resultados diminui, por isso uma amostra maior poderia apresentar melhor relação entre as variáveis.

Além disso, experimentos com uma espessura maior podem permitir uma melhor observação da influência destes parâmetros, uma vez que suportarão maiores temperaturas de trabalho. Porém, neste estudo não foi possível trabalhar com espessuras superiores a 1 mm, devido a capacidade do equipamento.

Posteriormente, com os dados da Tabela 2, foi realizada análise de regressão linear múltipla por meio do *software R Studio*, visando encontrar a relação entre a deformação, a temperatura e o incremento vertical. Com ela foi possível realizar o teste de *Shapiro-*

Wilk, a fim de verificar a normalidade dos dados. Obteve-se $p = 0,9438$, o que significa que os dados foram condizentes com a hipótese nula. Entretanto, este teste pode ter sido afetado pela quantidade pequena de elementos.

Também foi observada a ausência de *outliers* e o valor do coeficiente de determinação, $R^2 = 0,7189$. Este valor indica que o ajuste realizado terá 71,89% de adequação ao modelo utilizado. Apesar de não ser o percentual ideal, essa relação ainda é capaz de direcionar e indicar correlações com certo grau de assertividade.

Para a regressão linear múltipla, foi aplicado um modelo linear de interação entre o Δz e a temperatura sobre a variável dependente, a deformação. Assim, foram avaliados os resíduos e obtidos os coeficientes, com os quais foi descrita a Equação 3:

$$\varphi = 0,00133 + 1,161714 \Delta z + 0,0452 T - 0,041886 \Delta z T \quad (3)$$

Onde:

φ = deformação verdadeira principal (-);

Δz = incremento vertical (mm);

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Em seguida, foram comparados os valores de deformação obtidos pelas duas equações para cálculo da deformação, por meio da verificação do erro percentual, conforme a Equação 4:

$$\text{Erro} = \left| \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\varphi_1} \right| \quad (4)$$

Onde:

φ_1 = deformação obtida pela Equação 1;

φ_3 = deformação obtida pela Equação 3.

Assim, verificando os doze experimentos, foi obtido erro máximo de 14,77%, conforme Tabela 3.

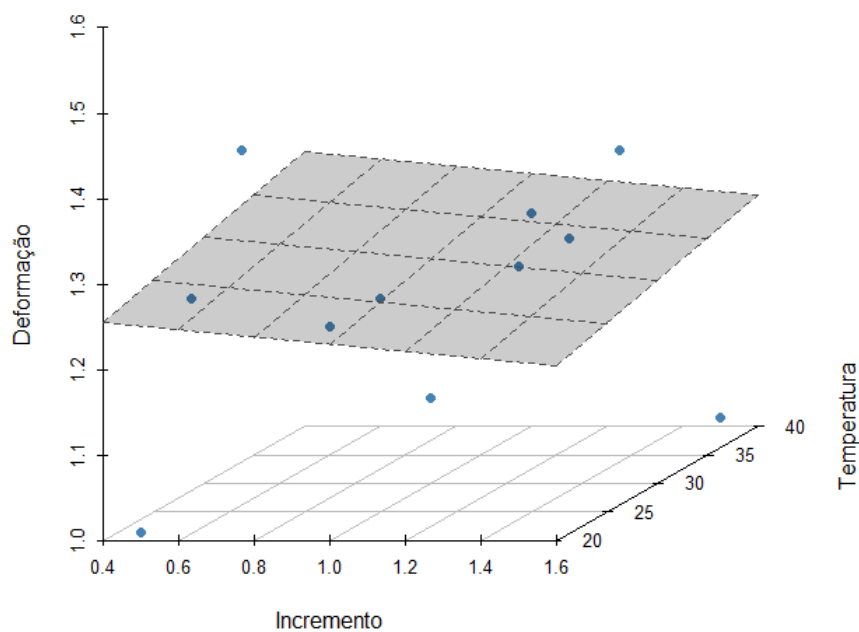
Tabela 3 – Comparação das Equações e Erro Percentual

Deformação - Equação 1	Deformação - Equação 3	Erro (%)
1,01	1,07	5,68
1,25	1,19	4,91
1,39	1,31	5,76
1,56	1,55	0,48
1,25	1,23	1,65
1,25	1,25	0,33
1,10	1,26	14,77
1,25	1,30	3,65
1,32	1,39	5,40
1,32	1,30	1,27
1,39	1,22	12,59
1,01	1,04	2,85

Fonte: Autor

Posteriormente, foi gerado o gráfico de dispersão para verificar a correlação entre os dados. Porém, metade dos pontos ficaram fora do plano de previsão do modelo, conforme Figura 26.

Figura 26 – Dispersão dos Dados



Fonte: Autor

Dessa forma, pode-se observar dois fatores importantes para estes resultados: o comportamento do PVC ao longo da conformação não correspondeu ao esperado, gerando dados parcialmente lineares e o modelo escolhido não descreveu a totalidade das variáveis envolvidas.

Assim sendo, avaliar uma amostra maior pode auxiliar na descrição de um modelo mais preciso e evitar que pontos excêntricos influenciem fortemente os resultados. Com a metodologia utilizada não pode-se observar uma correlação entre os dados, não permitindo fazer previsões, porém os dados encontrados auxiliam pesquisas futuras.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou doze experimentos de estampagem incremental pela configuração SPIF, com chapas de PVC com 0,7 mm de espessura, as quais foram conformadas em formato hiperboloide variando os valores de estampagem incremental e temperatura. Após isso, foram calculadas as deformações finais de cada peça e os dados submetidos a análise gráfica e a regressão linear múltipla. Com isso, pode-se descrever a equação de regressão e definir o erro percentual máximo.

Assim, comparando os resultados obtidos com a literatura utilizada, foi possível concluir que:

- A espessura pequena favorece o aparecimento de rugas e o aumento de temperatura agrava o problema;
- A equação encontrada fornece previsibilidade da deformação da peça com erro máximo de 14,77%;
- A combinação do menor incremento vertical com a maior temperatura promove a deformação máxima.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho analisou a relação entre incremento vertical, temperatura e deformação em chapas de PVC por meio de doze experimentos de estampagem incremental. Utilizando análise gráfica e a regressão linear múltipla para avaliação dos dados.

Assim, sugere-se a utilização de uma amostra maior, visando aumentar o coeficiente de determinação e a assertividade do modelo adotado, além de diminuir o erro máximo da equação encontrada para o cálculo da deformação.

Por fim, incentiva-se a repetição dos experimentos realizados com chapas de PVC com espessuras maiores, pois assim o enrugamento será mitigado e o intervalo de valores utilizados para a temperatura será mais amplo, permitindo melhor visualização da influência deste parâmetro na estampabilidade da peça.

7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Gustavo Spina Gaudêncio de; SOUZA, Wander Burielo de. **Engenharia dos Polímeros - Tipos de Aditivos, Propriedades e Aplicações**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015. E-book. ISBN 9788536520483. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520483/>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- BOFF, Uilian; MEDEIROS, Gianpaulo Alves; GOMES, Tiago de Sá; SCHAEFFER, Lírio. **Estampagem incremental: Método alternativo para fabricação de protótipos e pequenos lotes de peças**. Ferramental, [s. l.], 2012.
- BRITTO, Dionatan de Souza. **Estampagem incremental: influência da rotação e do incremento vertical da ferramenta na estampabilidade do alumínio A1200-H14**. 2023. Dissertação de Mestrado (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.
- CALLISTER JR, William D C; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros – Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª edição., São Paulo: Artliber, 2006.
- CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro. **Parâmetros de Conformação para a Estampagem Incremental de Chapas de Aço Inoxidável AISI 304L**. 2010. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CZOGAŁA, Joanna; PANKALLA, Ewa; TURCZYN, Roman. **Recent Attempts in the Design of Efficient PVC Plasticizers with Reduced Migration**. *Materials*, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 844, 10 fev. 2021. DOI DOI: 10.3390/ma14040844. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14040844>. Acesso em: 1 dez. 2023.
- INCOMPLAST. 2023. **Ficha Técnica de Produto: PVC**. Rio de Janeiro, RJ: INCOMPLAST - Polímeros e Metais Ltda.
- KINIZ JR, Maurício. **Comparação de Métodos de Predição de Forças em Estampagem Incremental**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA, Lages, 2022.

LUCHT, Denise Pereira Lima. **Caracterização das Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas de Formulações de Poli (cloreto de vinila) com Diferentes Massas Molares**. 2020. Dissertação de Mestrado (Mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Joinville, 2020.

MACEDO, Maria Eduarda Silva de; RUDEK, Alysson Henrique; REYES, Bianca Grahl; SCHREIBER, Rafael Gustavo. **Avaliação da Influência da Temperatura na Estampabilidade de Chapas de Policloreto de Vinila (PVC)**. V Mostra 3' Ciência e Tecnologia, [s. l.], 2023.

MARTINS, P. A. F.; KWIATKOWSKI, L.; FRANZEN, V.; TEKKAYA, A.E.; KLEINER, M. **Single point incremental forming of polymers**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, [s. l.], 2009.

MATEUS, Victor Von Glehn. **Estudo do processo de estampagem incremental em chapas de aço aisi 430**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal De Uberlândia, Uberlândia, 2018.

NUNES, Edilene de Cássia D.; LOPES, Fábio Renato S. **Polímeros - Conceitos, Estrutura Molecular, Classificação e Propriedades**. São Paulo: Editora Saraiva, 2014. E-book. ISBN 9788536520506. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520506/>. Acesso em: 28 nov. 2023.

PERITO, Eder Dutra. **Estudo de plastificantes alternativos ao dioctilftalato (DOP) para um composto de poli(cloreto de vinila) (PVC)**. 2011. Dissertação de Mestrado (Mestrado) - Universidade De Caxias Do Sul, Caxias Do Sul, 2011.

PRADELLA, Marcelo Pinto. **Design de embalagens: criação de protótipo em polímero pelo método de conformação através da estampagem incremental**. 2015. Dissertação de Mestrado (Mestrado) - UniRitter, Porto Alegre, 2015.

RODOLFO JR, Antonio; MEI, Lúcia Helena I. Mecanismos de Degradação e Estabilização Térmica do PVC. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 17, ed. 3, 2007.

SANFELICE, Rafaela Cristina; PAVINATTO, Adriana; CORRÊA, Daniel Souza. **Nanotecnologia aplicada a polímeros**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2022.

SCHREIBER, Rafael Gustavo; SOUSA, Adriellen Lima de; SANTOS, Euller Mendonça dos; FILHO, Fernando Fiuza; NORBERTO, Júlio César; MONDO, Lucas Santos Savi; CABRAL, Thainara Hamerski; SCHAEFFER, Lirio. **Incremental sheet forming**

parameters and applications: a review. Brazilian Journal of Development, [s. l.], 2022a.

SCHREIBER, Rafael Gustavo; SOUSA, Adriellen Lima de; SCHAEFFER, Lirio; SANTOS, Euller Mendonça dos; FILHO, Fernando Fiuza; NORBERTO, Júlio César; MONDO, Lucas Santos Savi; CABRAL, Thainara Hamerski. **Influência do Ângulo de Parede na Estampagem Incremental de AA1100-H14.** In: 22ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 2019, Porto Alegre. Anais da 22ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, 2019.

SCHREIBER, Rafael Gustavo; JÚNIOR, Maurício Kiniz; FILHO, Fernando Fiuza; SCHAEFFER, Lirio. **Influência dos parâmetros de estampagem incremental na estampabilidade de chapas de alumínio puro.** Revista Matéria, [s. l.], v. 27, ed. 1, 2022b.

SILVA, André Luis Bonfim Bathista e; SILVA, Emerson Oliveira da. **Conhecendo Materiais Poliméricos.** Lages: [s. n.], 2003.

SOUZA, Michelle A.; PESSAN, Luiz A. **Nanocompósitos de Poli(Cloreto de Vinila) (PVC)/Argilas Organofílicas.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, [s. l.], v. 16, ed. 4, 2006.

ZHU, Hui; OU, Hengan; POPOV, Atanas. **Incremental sheet forming of thermoplastics: a review.** Springer, [s. l.], 2020.