CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL BORGES GUIMARÃES

ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS LIMITES DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL: DETERMINAÇÃO E APLICAÇÕES

Belo Horizonte
2026

Guimarães, Gabriel Borges
G963a Análise computacional dos limites do processo de estampagem incremental: determinação e aplicações / Gabriel Borges Guimarães – 2026.
44 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientador: Sandro Cardoso Santos.
Coorientador: Yukio Shigaki
Banca examinadora: Sandro Cardoso Santos, Yukio Shigaki, Wagner Sade e Sandro de Costa Silva.
Bibliografia: f. 43-44.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Chapas de metal – Teses. 2. Construções geométricas – Teses. 3. Simulação (Computadores) – Teses. 4. Moldagem (Fundição) – Teses. 5. Abaqus (Software) – Teses. I. Santos, Sandro Cardoso. II. Shigaki, Yukio. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDD 621.815

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6ª 1592 / Cefet/MG

GABRIEL BORGES GUIMARÃES

ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS LIMITES DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL: DETERMINAÇÃO E APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data de aprovação: 18/06/2026

Sandro Cardoso Santos, **Dr.**, **Orientador**
Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Yukio Shigaki, **Dr.**, **Coorientador**
Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Wagner Sade, **Dr.**, **Avaliador**
Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Sandro de Costa Silva, **Dr.**, **Avaliador**
Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Nova Gameleira
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

GABRIEL BORGES GUIMARÃES

ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS LIMITES DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL: DETERMINAÇÃO E APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada no Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Sandro Cardoso Santos
Coorientador: Yukio Shigaki

Belo Horizonte
2026

“Sou o que nasci para ser e não o que aconteceu comigo”

AJULIACOSTA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus amigos, os atuais e os que já não estão mais presentes, pelo apoio e compreensão ao longo da minha jornada acadêmica. O suporte durante essa difícil jornada foi fundamental para que ela pudesse ser concluída.

Agradeço ao meu orientador Sandro, pela disponibilidade, paciência e compreensão durante o desenvolvimento desse trabalho, ao coorientador Yukio pelo incentivo e convites para palestras sobre o tema, e ao colega de curso Thiago pela paciência ao responder minhas diversas perguntas.

Em geral agradeço aos professores do CEFET pelos conhecimentos transmitidos ao longo da graduação, que servirão de base para tudo que eu fizer a partir de agora.

À equipe de competição Trincabotz estendo um agradecimento especial pela importância na minha formação tanto acadêmica quanto pessoal.

Por fim, agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pela formação acadêmica e pela oportunidade de me desenvolver.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de simulação computacional pelo Método dos Elementos Finitos, os desvios dimensionais e geométricos de peças obtidas por estampagem incremental em relação às geometrias especificadas em desenho, bem como estabelecer as potencialidades do processo a partir das características geométricas das figuras conformadas no molde. A pesquisa é contextualizada na fabricação de moldes para rotomoldagem, na qual a redução de custos e a flexibilidade geométrica são fatores relevantes para a escolha do processo produtivo. A metodologia contempla a modelagem de geometrias de referência, a geração de trajetórias de ferramenta em ambiente de manufatura assistida por computador (CAM), a conversão das trajetórias para o Abaqus/Explicit e a avaliação dos resultados simulados em diferentes profundidades de conformação. Os principais critérios de análise são os desvios dimensionais, os desvios geométricos e a identificação de regiões críticas associadas às características geométricas das seções circular, triangular, quadrada e hexagonal. Espera-se que o estudo contribua para definir em quais condições a estampagem incremental apresenta maior potencial para fabricação de moldes e quais características geométricas tendem a limitar sua aplicação.

Palavras-chave: estampagem incremental; desvios geométricos; simulação computacional; moldes para rotomoldagem; Abaqus/Explicit.

ABSTRACT

This work aims to evaluate, through finite element computational simulation, the dimensional and geometric deviations of parts produced by incremental sheet forming in relation to the geometries specified in technical drawings, as well as to establish the potential of the process based on the geometric characteristics of the shapes formed in the mold. The research is contextualized in the manufacturing of rotational molding molds, where cost reduction and geometric flexibility are relevant factors for process selection. The methodology includes reference geometry modeling, CAM-based toolpath generation, conversion of toolpaths into Abaqus/Explicit input data and evaluation of simulated results at different forming depths. The main analysis criteria are dimensional deviations, geometric deviations, thickness distribution and the identification of critical regions associated with the geometric characteristics of circular, triangular, square and hexagonal sections. The study is expected to contribute to defining the conditions under which incremental sheet forming presents greater potential for mold manufacturing and the geometric characteristics that tend to limit its application.

Keywords: incremental sheet forming; geometric deviations; computational simulation; rotational molding molds; Abaqus/Explicit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Classificações do tipo processo de ISF..... 10
Figura 3.2 – Geometria e rotação da ferramenta. 16
Figura 4.1: FLC para espessura de 1,21mm AA1050-0 30
Figura 5.1 – Comparativo nuvem de pontos das 4 geometrias analisadas 34
Figura 5.2 – Comparativo geométrico da geometria circular plano XZ na profundidade de 50 mm 37
Figura 5.3 – Comparativo geométrico da geometria circular plano YZ na profundidade de 50 mm 37
Figura 5.4 – Comparativo geométrico da geometria circular plano XY na profundidade de 50 mm 38
Figura 5.5 – Mapa de erro local de profundidade da geometria circular em 50 mm... 38
Figura 5.6 – Comparativo geométrico da geometria triangular plano XZ na profundidade de 50 mm 41
Figura 5.7 – Comparativo geométrico da geometria triangular plano YZ na profundidade de 50 mm 41
Figura 5.8 – Comparativo geométrico da geometria triangular plano XY na profundidade de 50 mm 42
Figura 5.9 – Comparativo geométrico da geometria triangular na profundidade de 50 mm 42
Figura 5.10 – Comparativo geométrico da geometria quadrada plano XZ na profundidade de 50 mm 45
Figura 5.11 – Comparativo geométrico da geometria quadrada plano YZ na profundidade de 50 mm 45
Figura 5.12 – Comparativo geométrico da geometria quadrada plano XY na profundidade de 50 mm 46
Figura 5.13 – Mapa de erro local de profundidade da geometria quadrada em 50 mm 46

Figura 5.14 – Comparativo geométrico da geometria hexagonal plano XZ na profundidade de 50 mm..... 49
Figura 5.15 – Comparativo geométrico da geometria hexagonal plano YZ na profundidade de 50 mm..... 49
Figura 5.16 – Comparativo geométrico da geometria hexagonal plano XY na profundidade de 50 mm..... 50
Figura 5.17 – Mapa de erro local de profundidade da geometria hexagonal em 50 mm 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Custos relativos para a fabricação de moldes para rotomoldagem ... 02
Tabela 3.1 – Ângulos máximos de conformação (φmax) para diferentes materiais em ISF ... 14
Tabela 3.2 – Comparação entre simulações implícita e explícita do ISF pelo Abaqus ... 21
Tabela 4.1 – Especificações das geometrias analisadas nas simulações ... 28
Tabela 4.2 – Parâmetros de processo adotados nas simulações ... 28
Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do AA 1050-0 adotadas nas simulações ... 29
Tabela 5.1 – Desvios no plano XY da geometria circular ... 35
Tabela 5.2 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria circular ... 35
Tabela 5.3 – Erro volumétrico percentual da geometria circular ... 36
Tabela 5.4 – Desvios no plano XY da geometria triangular ... 39
Tabela 5.5 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria triangular ... 39
Tabela 5.6 – Erro volumétrico percentual da geometria triangular ... 40
Tabela 5.7 – Desvios no plano XY da geometria quadrada ... 43
Tabela 5.8 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria quadrada ... 43
Tabela 5.9 – Erro volumétrico percentual da geometria quadrada ... 44
Tabela 5.10 – Desvios no plano XY da geometria hexagonal ... 47
Tabela 5.11 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria hexagonal ... 47
Tabela 5.12 – Erro volumétrico percentual da geometria hexagonal ... 48
Tabela 6.1 – Síntese comparativa dos resultados finais em 50 mm ... 51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA – Aluminum Association; sistema de designação de ligas de alumínio.

AA1050-O – liga de alumínio 1050 na condição recozida.

AISF – Asymmetric Incremental Sheet Forming; estampagem incremental assimétrica.

CAD – Computer-Aided Design; projeto assistido por computador.

CAE – Computer-Aided Engineering; engenharia assistida por computador.

CAM – Computer-Aided Manufacturing; manufatura assistida por computador.

CLC – Curva Limite de Conformação.

CNC – Comando Numérico Computadorizado.

CPU – Central Processing Unit; unidade central de processamento.

DSIF – Double-Sided Incremental Forming; estampagem incremental de dupla face.

FLD – Forming Limit Diagram; diagrama limite de conformação.

HDPE – High Density Polyethylene; polietileno de alta densidade.

IHF – Incremental Hole Flanging; flangeamento incremental de furos.

ISF – Incremental Sheet Forming; estampagem incremental de chapas.

LLDPE – Linear Low Density Polyethylene; polietileno linear de baixa densidade.

MEF – Método dos Elementos Finitos.

MPISF – Multi-Pass Incremental Sheet Forming; estampagem incremental multipasse.

PEEQ – Plastic Equivalent Strain; deformação plástica equivalente.

PVC – Policloreto de vinila.

RMS – Root Mean Square; raiz do erro quadrático médio.

SPIF – Single Point Incremental Forming; estampagem incremental de ponto único.

TPIF – Two Point Incremental Forming; estampagem incremental de dois pontos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 01

2 OBJETIVOS 06

2.1 Objetivos Gerais 06

2.2 Objetivos Específicos 06

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 07

3.1 Rotomoldagem e Fabricação de Moldes 07

3.1.1 O Processo de Rotomoldagem 07

3.1.2 Requisitos dos Moldes Para Rotomoldagem 08

3.1.2 Processos Convencionais de Fabricação de Moldes 08

3.2 Estampagem Incremental: Fundamentos e Histórico 09

3.2.1 Definição e Princípio de Funcionamento 09

3.2.2 Classificação do Processo 10

3.2.3 Histórico do Processo 12

3.3 Formabilidade em Conformação Incremental 13

3.3.1 Formabilidade Aprimorada e Curva Limite de Conformação 13

3.3.2 Ângulo Máximo de Conformação e Lei do Seno 14

3.3.2 Influencia dos Parâmetros de Processo na Formabilidade 15

3.4 Forças de Conformação na Conformação Incremental 17

3.4.1 Influência dos Parâmetros de Processo nas Forças 17

3.4.2 Flutuação da Força de Conformação 17

3.5 Mecanismos de falha na Conformação Incremental 18

3.5.1 Tipos de falha 18

3.5.2 Profundidade limite e Ângulo Máximo 18

3.5.3 Critérios de Previsão de Falha na Simulação 19

3.6 Simulação Computacional do ISF Pelo Método dos Elementos Finitos 20

3.6.1 Fundamentos do MEF Aplicado ao ISF 20

3.6.2 Comparação Entre Solvers Implícito e Explícito 21

3.6.3 Modelos Constitutivos e Parâmetros de Simulação 22

3.6.4 Discretização da Malha e Técnicas de Refinamento 23

3.7 Precisão Dimensional e Rugosidade Superficial no ISF 23

3.7.1 Desvios Geométricos e Estratégias de Compensação 23

3.7.2 Rugosidade Superficial 24

3.7.3 Trajetória de Ferramenta e Precisão Geométrica 24
3.8 Conformação Incremental Aplicado à Fabricação de moldes 25
3.8.1 Conformação Incremental Como Tecnologia de Ferramental Rápido 25
3.8.2 Aplicações Específicas e Lacunas na Literatura 25
4 METODOLOGIA 26
4.1 Visão Geral da Metodologia 26
4.2 Geometrias Analisadas 27
4.2.1 Seleção e Justificativa das Geometrias 27
4.3 Parâmetros de Processo 28
4.3.1 Parâmetros Fixos 28
4.4 Material da Chapa 29
4.4.1 Propriedades Mecânicas Alumínio aa1050-0 29
4.4.2 Modelo Contitutivo e Implementação no Abaqus 29
4.5 Configuração do modelo de Elementos Finitos 30
4.5.1 Modelagem e Discretização da Chapa 30
4.5.2 Modelagem da Ferramenta 31
4.5.3 Condições de Contorno e Carregamento 31
4.5.4 Modelo de Contato e Atrito 31
4.5.5 Escalonamento de Massa e Controle de Qualidade 31
4.6 Geração das Trajetórias de Ferramenta 32
4.7 Critérios de Avaliação dos Resultados 32
4.7.1 Desvios Dimensionais e Geométricos 32
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 34
5.1 Organização da Análise dos Resultados 34
5.2 Geometria Circular 35
5.3 Geometria Triangular 38
5.4 Geometria Quadrada 43
5.5 Geometria Hexagonal 47
6 CONCLUSÕES 51
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 53
8 REFERÊNCIAS 54

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento continuo da indústria de transformação de polímeros nas últimas décadas, faz-se necessária alternativas aos meios de convencionais de produção de moldes para suprir as diversas necessidades do mercado. Nesse cenário, a rotomoldagem ocupada uma posição de destaque por ser um processo versátil capaz de produzir grandes peças ocas de grande e médio porte com geometrias complexas que seriam de difícil obtenção por outros métodos. Entre as aplicações usuais do processo estão tanques de combustível, boias, reservatórios de água, brinquedos de grande porte e componentes veiculares.

O processo de rotomoldagem consiste em depositar uma quantidade especificada de polímero granulado no interior de um molde fechado, que é submetido simultaneamente a aquecimento e rotação biaxial em baixa velocidade. A temperatura promove a fusão e a adesão progressiva e uniforme do particulado à superfície interna do molde. Após o ciclo de aquecimento, o molde é resfriado ainda em rotação até que a peça se estabilize e possa ser desmoldada.

A qualidade dimensional e a vida útil dos produtos rotomoldados estão ligadas diretamente à qualidade do molde utilizado na produção. Um molde com desvios geométricos expressivo produz peças fora de tolerância, podendo tornar a peça inaceitável e gerando retrabalho e desperdício. A uniformidade da espessura da parede do molde e a condutividade térmica afetam diretamente o processo de fusão e resfriamento da peça influenciam tanto o tempo de produção quanto as propriedades mecânicas do produto final. Por essas razões, a fabricação do molde para rotomoldagem é uma etapa crítica do processo e impacta diretamente na competitividade das empresas do setor.

Os processos convencionalmente empregados na fabricação de moldes para rotomoldagem são a usinagem em centros de usinagem CNC, a fundição com acabamento por usinagem e a conformação a partir de chapas metálicas. Estudos comparativos fornecidos pela empresa do setor automobilístico X (A empresa prefere não ser nomeada diretamente) indicam que, para um mesmo molde de referência com dimensões de 835 × 448 × 320 mm, os custos relativos de fabricação variam de forma expressiva entre os processos, conforme apresentado na Tabela 1.1

Tabela 1.1 – Custos relativos para a fabricação de moldes para rotomoldagem

Processo de Fabricação	Custo Relativo
Conformação em chapas de aço 1020	C
Fundição com acabamento por usinagem	4×C
Usinagem exclusiva	32×C

Fonte: Autor

A usinagem exclusiva, embora seja o processo de maior precisão e flexibilidade geométrica, apresenta custo relativo 32 vezes superior ao da conformação em chapas, tornando-a economicamente inviável para moldes de geometria simples ou para empresas de pequeno e médio porte. A fundição com acabamento por usinagem representa um ponto de equilíbrio com custo intermediário, mas impõe restrições geométricas decorrentes do processo de solidificação. A conformação em chapas é o processo de menor custo, porém limitado a geometrias simples.

É nesse contexto que o processo de estampagem incremental de chapas, denominado na literatura internacional de Incremental Sheet Forming (ISF), apresenta-se como alternativa tecnológica de grande potencial. O ISF é um processo de conformação localizada no qual uma ferramenta de ponta esférica, controlada por máquina CNC, deforma progressivamente uma chapa metálica presa em suas bordas, sem a necessidade de matrizes ou punções dedicados (JESWIET et al., 2005). A trajetória da ferramenta é gerada diretamente a partir do modelo CAD da peça desejada, e as deformações plásticas locais acumuladas ao longo do percurso produzem a geometria final. Essa característica confere ao ISF uma flexibilidade geométrica próxima à da usinagem, com custos de ferramental comparáveis aos da conformação convencional em chapas.

O conceito de conformação incremental por ferramenta de ponto único foi documentado pela primeira vez na patente de Leszak, em 1967, e posteriormente desenvolvido de forma sistemática por Matsubara no Japão, na década de 1990. JESWIET et al. (2005) publicaram um artigo de revisão seminal sobre o estado da arte do processo de estampagem incremental assimétrica (Asymmetric Incremental Sheet Forming — AISF), que consolidou a terminologia, a classificação e as diretrizes de

projeto do processo. Desde então, o número de publicações sobre ISF cresceu exponencialmente, abrangendo novos materiais, configurações de processo, estratégias de trajetória e aplicações em setores como aeroespacial, automotivo e médico.

Uma das características mais relevantes do ISF, amplamente documentada na literatura, é a sua formabilidade superior à observada em processos convencionais de estampagem. JESWIET et al. (2005) demonstraram que as deformações alcançáveis no ISF superam significativamente os limites definidos pela Curva Limite de Conformação (CLC) convencional, em razão dos estados de tensão específicos gerados pela ação localizada da ferramenta. CERRO et al. (2006), mostra que ao empregar o Abaqus/Explicit para simulação do ISF, demonstraram que modelos MEF são capazes de prever com boa precisão a distribuição de espessura e as forças de conformação, desde que o modelo constitutivo e os parâmetros de contato sejam adequadamente definidos.

No campo das forças de conformação, CHANG; LI; CHEN (2019) desenvolveram modelos analíticos para a previsão das forças no ISF de ponto único (SPIF), no ISF multi-passagem (MPISF) e no ISF de flangeamento de furos (IHF), demonstrando que a força de conformação é governada principalmente pela tensão de escoamento do material, pela espessura da chapa, pelo ângulo de parede e pelo raio da ferramenta. Os autores concluíram que a flutuação da força de conformação observada experimentalmente é causada pela variação da deflexão elástica da chapa ao longo do percurso da ferramenta, fenômeno que tem impacto direto sobre a precisão geométrica das peças produzidas. Esses resultados são particularmente relevantes para o presente trabalho, pois a precisão dimensional é um dos critérios centrais de avaliação na fabricação de moldes por ISF.

PATEL; GANDHI (2022), em uma revisão abrangente sobre os parâmetros de processo que afetam o ISF, concluíram que os parâmetros de maior influência sobre a formabilidade, a precisão geométrica, as forças de conformação e a rugosidade superficial são o diâmetro da ferramenta, o tamanho do incremento axial ΔZ, o ângulo de parede e a espessura da chapa. Os autores destacam que o ISF é extremamente adaptável a máquinas CNC convencionais e requer mínima utilização de ferramental complexo, o que reduz substancialmente o custo do processo. Essas conclusões reforçam o potencial do ISF como rota alternativa para a fabricação de moldes para

rotomoldagem, especialmente em contextos de pequenas séries e prototipagem rápida.

A literatura também evidencia que o desempenho do ISF deve ser avaliado de forma integrada, considerando formabilidade, espessura final, rugosidade, retorno elástico e estabilidade numérica do processo. Revisões recentes sobre tensões residuais e qualidade superficial indicam que a redução de espessura, os caminhos de ferramenta, o diâmetro da ferramenta, a lubrificação e o incremento axial influenciam simultaneamente a precisão geométrica e a integridade superficial da peça (KAJAL; TYAGI; KUMAR, 2022; KUMAR, 2024). Assim, a análise computacional proposta não deve se limitar à profundidade final alcançada, mas também à identificação das regiões críticas onde a peça deixa de atender aos requisitos geométricos e mecânicos de um molde.

Apesar dos avanços reportados na literatura, persistem lacunas significativas quanto à caracterização sistemática dos limites do processo de estampagem incremental aplicado especificamente à fabricação de moldes para rotomoldagem. Parâmetros como a profundidade máxima de estampagem antes da ocorrência de falha, os desvios dimensionais e geométricos em função da complexidade da forma, o ângulo de saída mínimo viável e a influência da taxa de incremento axial (ΔZ) sobre a qualidade das peças não estão suficientemente consolidados na literatura para as geometrias características de moldes industriais (BEN SAID, 2022). Adicionalmente, JESWIET et al. (2005) apontam que a maioria dos estudos disponíveis utilizou geometrias simples — principalmente cones e pirâmides truncados — para avaliação do processo, sendo necessários estudos sistemáticos com geometrias variadas, que representem melhor a diversidade de formas encontradas em moldes industriais.

A simulação computacional pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma ferramenta poderosa para a investigação dos limites do ISF, permitindo a avaliação paramétrica do processo sem a necessidade de ensaios físicos extensivos e onerosos. O software Abaqus, em sua versão com solver explícito (Abaqus/Explicit), é amplamente utilizado para simulações de ISF em razão de sua robustez no tratamento de grandes deformações e de contato localizado entre ferramenta e chapa. CERRO et al. (2006) demonstraram que o Abaqus/Explicit fornece previsões precisas de distribuição de espessura e forças de conformação para o ISF, com erros inferiores a 5% em relação a dados experimentais. JESWIET et al. (2005) ressaltam que,

embora simulações implícitas ofereçam maior precisão geométrica, o alto custo computacional as torna inviáveis para estudos paramétricos extensos, tornando o solver explícito a escolha preferencial para esse tipo de análise.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe analisar, por meio de simulação computacional no Abaqus/Explicit, os desvios dimensionais e geométricos de peças obtidas por estampagem incremental em relação às geometrias especificadas em desenho, adotando o alumínio AA1050-O como material de referência para a etapa computacional. O estudo abrange quatro geometrias de diferentes complexidades — quadrado, triângulo, hexágono e círculo — conformadas sob condições equivalentes de processo. A partir dessa comparação, busca-se estabelecer as potencialidades da estampagem incremental para a fabricação de moldes, considerando a capacidade do processo de reproduzir diferentes características geométricas.

A relevância deste trabalho reside na contribuição para o preenchimento de uma lacuna específica na literatura sobre ISF aplicado a moldes para rotomoldagem, fornecendo uma análise comparativa dos desvios dimensionais e geométricos associados a diferentes geometrias de conformação. Os resultados poderão subsidiar decisões de projeto e de seleção de processo, indicando quais características geométricas favorecem ou limitam o uso da estampagem incremental na fabricação de moldes.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 apresenta os objetivos geral e específicos do trabalho.
- O Capítulo 3 reúne a revisão bibliográfica sobre os processos de fabricação de moldes, os fundamentos do ISF, a formabilidade, os mecanismos de falha, as forças de conformação e o estado da arte em simulação computacional do processo.
- O Capítulo 4 descreve a metodologia empregada, detalhando a configuração das simulações no Abaqus, as geometrias analisadas, os parâmetros de processo e os critérios de avaliação adotados.
- O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos nas simulações.
- O Capítulo 6 reúne as conclusões do trabalho.
- O Capítulo 7 apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar, por meio de simulação computacional, os desvios dimensionais e geométricos de peças obtidas por estampagem incremental em relação às geometrias especificadas em desenho, estabelecendo as potencialidades do processo a partir das características geométricas das figuras conformadas no molde.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar os desvios dimensionais das peças conformadas em relação às dimensões nominais especificadas nos desenhos de referência.
- Avaliar os desvios geométricos das peças estampadas em relação às superfícies e perfis definidos nos modelos geométricos de referência.
- Comparar a influência das características geométricas das figuras conformadas, considerando seções circular, triangular, quadrada e hexagonal.
- Identificar regiões críticas de desvio associadas a vértices, mudanças de curvatura, paredes inclinadas e variações de profundidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Rotomoldagem e Fabricação de Moldes

Analisar, por meio de simulação computacional, os desvios dimensionais e geométricos de peças obtidas por estampagem incremental em relação às geometrias especificadas em desenho, estabelecendo as potencialidades do processo a partir das características geométricas das figuras conformadas no molde.

3.1.1 O Processo de Rotomoldagem

A rotomoldagem é um processo de conformação de polímeros desenvolvido comercialmente a partir da década de 1950 e consolidado como alternativa competitiva para a produção de peças ocas de médio e grande porte. O processo opera sem pressão interna, o que o diferencia fundamentalmente da moldagem por injeção, da extrusão-sopro e da termoformagem. Essa característica implica menores tensões residuais nas peças produzidas e elimina a necessidade de sistemas hidráulicos de fechamento de molde, reduzindo o custo do equipamento e tornando o processo acessível para empresas de pequeno e médio porte.

O ciclo de rotomoldagem é composto por quatro etapas principais: carregamento do material polimérico em pó no molde, aquecimento com rotação biaxial em forno, resfriamento com rotação contínua e extração da peça. Durante o aquecimento, a rotação distribui o polímero fundido de forma uniforme sobre as paredes internas do molde, gerando uma camada de espessura aproximadamente constante. O controle preciso da temperatura e do tempo de aquecimento é fundamental para garantir a qualidade da fusão e evitar a degradação do material.

Os polímeros mais utilizados no processo são o polietileno de baixa densidade linear (LLDPE), o polietileno de alta densidade (HDPE) e o PVC plastificado. O polietileno representa a grande maioria do volume de material processado por rotomoldagem em escala mundial, em razão de suas características de fluidez em pó, ampla janela de processamento e boa resistência química e mecânica. As aplicações abrangem desde tanques de armazenamento de pequeno porte até reservatórios com capacidade superior a 50.000 litros, passando por brinquedos, mobiliário urbano, canoas e componentes para a indústria química e agrícola.

3.1.2 Requisitos dos Moldes para Rotomoldagem

Os moldes para rotomoldagem são submetidos a ciclos térmicos repetidos de aquecimento e resfriamento, o que impõe requisitos específicos quanto ao material e à geometria. Alumínio fundido e aço conformado em chapas são os materiais mais utilizados. O alumínio apresenta elevada condutividade térmica, que favorece a uniformidade do aquecimento e reduz o tempo de ciclo, mas sua resistência mecânica e dureza superficial são inferiores às do aço, limitando sua vida útil em aplicações de alta produção.

Os moldes de aço conformados em chapas, embora apresentem menor condutividade térmica em relação ao alumínio, oferecem maior resistência mecânica e podem ser fabricados a custo significativamente menor, especialmente para geometrias simples. Segundo AFONSO et al. (2019), os moldes de chapas de aço são adequados para produções de baixo e médio volume, nas quais o custo de fabricação do molde representa uma parcela significativa do custo total do produto. A escolha do processo de fabricação do molde deve considerar, portanto, não apenas o custo inicial, mas também a vida útil esperada, o volume de produção e as exigências geométricas da peça final.

Os principais requisitos de um molde para rotomoldagem são: precisão dimensional compatível com as tolerâncias do produto; uniformidade de espessura de parede para garantir distribuição homogênea do calor; acabamento superficial adequado para facilitar a desmoldagem; ângulos de saída suficientes para permitir a extração da peça sem danos; e resistência mecânica e térmica para suportar os ciclos de produção sem deformação permanente ou fadiga térmica.

3.1.3 Processos Convencionais de Fabricação de Moldes

A usinagem em centros de usinagem CNC de múltiplos eixos é o processo de maior precisão para fabricação de moldes para rotomoldagem. Permite a obtenção de geometrias altamente complexas, com tolerâncias dimensionais da ordem de décimos de milímetro e excelente acabamento superficial. Sua principal desvantagem é o elevado custo, decorrente do alto volume de material removido que pode representar mais de 50% do bloco inicial e do longo tempo de usinagem para moldes de grande porte. Além disso, a usinagem gera grandes quantidades de cavacos metálicos, que exigem tratamento e destinação adequados.

A fundição em areia ou em molde permanente, seguida de acabamento por usinagem, é o processo mais utilizado para moldes de alumínio de médio e grande porte. O processo permite obter geometrias próximas à forma final reduzindo o volume de material usinado e, consequentemente, o custo e o tempo de fabricação. Entretanto, exige a confecção prévia de um modelo para a fabricação do molde de fundição, e a geometria do molde deve obedecer aos critérios de fundição, como ângulos de saída mínimos e raios de concordância para evitar tensões de solidificação. RIOFRIO SABANDO (2024) demonstra, em uma análise comparativa detalhada, que o custo do processo de fundição/usinagem pode ser até quatro vezes superior ao da conformação em chapas para moldes de referência.

A conformação a partir de chapas metálicas é o processo de menor custo para a fabricação de moldes simples. Chapas de aço são cortadas, dobradas e soldadas para compor as superfícies do molde. O processo é adequado para geometrias prismáticas simples, com superfícies planas ou com curvatura suave. A principal limitação é a dificuldade de obtenção de geometrias complexas com curvaturas compostas, reentrâncias ou detalhes geométricos intricados, que demandariam operações de conformação especializadas ou soldagem de múltiplas peças, aumentando o custo e comprometendo a integridade estrutural do molde.

3.2 Estampagem Incremental: Fundamentos e Histórico

3.2.1 Definição e Princípio de Funcionamento

A estampagem incremental (ISF) é um processo de conformação de chapas metálicas no qual a deformação plástica é realizada de forma localizada e progressiva por uma ferramenta de ponta hemisférica. A ferramenta, montada no eixo de uma máquina CNC, percorre trajetórias programadas em planos paralelos ou em espiral helicoidal, induzindo deformações plásticas locais que se acumulam ao longo do percurso para produzir a geometria final desejada. A chapa é fixada em suas bordas por um dispositivo de fixação, denominado prensa-chapas, enquanto a região central permanece livre para deformar (JESWIET et al., 2005). A trajetória da ferramenta é gerada diretamente a partir do modelo CAD da peça, por meio de software CAM, o que permite a rápida adaptação do processo a diferentes geometrias sem a necessidade de ferramental dedicado.

JESWIET et al. (2005) definem formalmente o processo de estampagem incremental assimétrica (AISF) como:

(i) Processo de conformação de chapas metálicas;

(ii) Emprega uma ferramenta sólida de pequeno porte;

(iii) Não utiliza matrizes ou punções dedicados de grande porte;

(iv) Mantém contato contínuo entre a ferramenta e a chapa metálica;

(v) Move a ferramenta sob controle programado em espaço tridimensional;

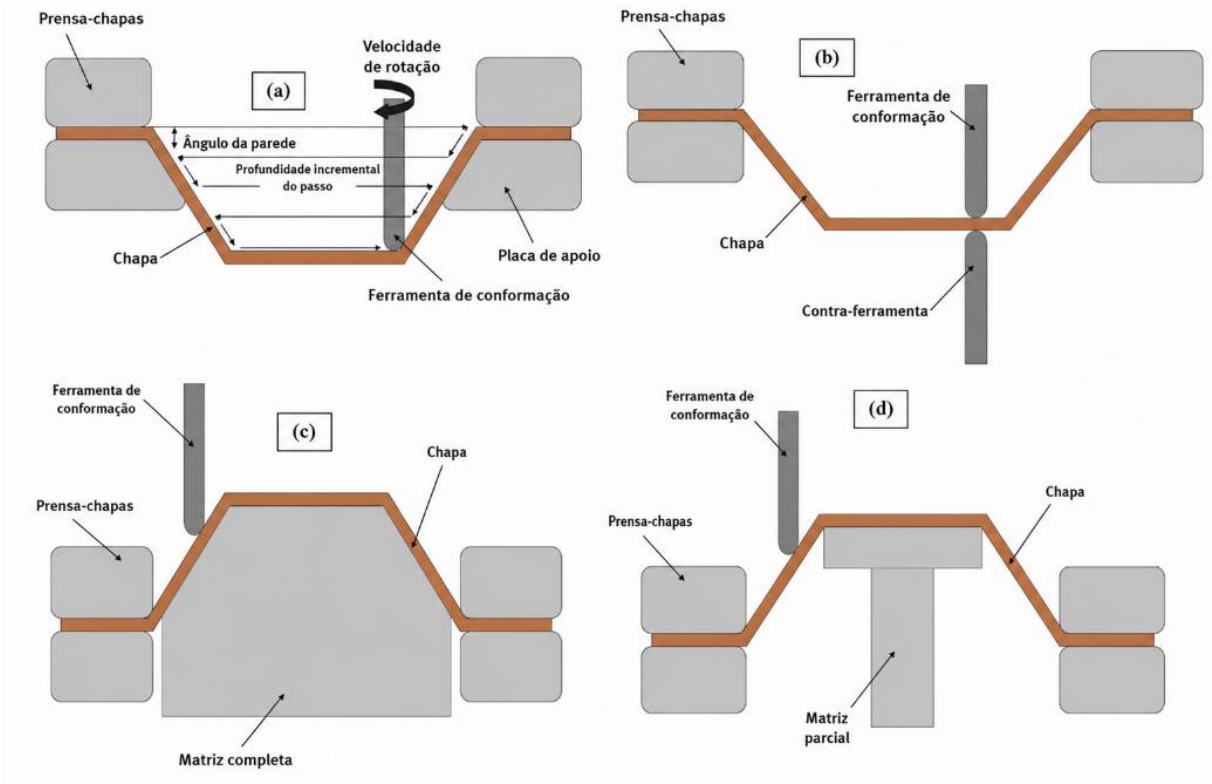
(vi) Pode produzir formas assimétricas.

É justamente a última característica que distingue o processo das técnicas simétricas tradicionais, como o repuxamento e o repuxamento por cisalhamento.

3.2.2 Classificação do Processo

O processo ISF pode ser classificado de acordo com diferentes critérios. Quanto ao método de conformação e ao suporte da chapa, JESWIET et al. (2005) identificam quatro variantes principais, ilustradas na literatura como mostrado na figura 3.1.

Figura 3.1 – Classificações do tipo processo de ISF.



Fonte: PATEL; GANDHI (2022)

(a) Estampagem incremental de ponto único sem suporte (SPIF — Single Point Incremental Forming), na qual a chapa é apoiada apenas em suas bordas;
(b) ISF com ferramenta de contraponto sem matriz;
(c) ISF de dois pontos com matriz completa (TPIF com molde). PATEL; GANDHI (2022) complementam essa classificação ao considerar também a geometria da peça, simétrica ou assimétrica, e a estratégia de trajetória da ferramenta.
(d) ISF de dois pontos com matriz parcial (TPIF — Two Point Incremental Forming);

No presente trabalho, adota-se a configuração SPIF, que é a mais simples, a mais estudada na literatura e a mais adequada para a fabricação de moldes, uma vez que elimina completamente a necessidade de ferramental dedicado. Na configuração SPIF, a chapa é fixada por um prensa-chapas rígido, e a ferramenta de ponta hemisférica deforma a chapa seguindo trajetórias helicoidais geradas pelo software CAM a partir do modelo CAD do molde a ser fabricado.

A classificação do ISF também pode ser ampliada considerando a quantidade de estágios, o tipo de apoio inferior e a existência de assistência térmica ou vibracional. Além do SPIF convencional, a literatura apresenta variantes como o TPIF, o DSIF, o ISF híbrido com pré-conformação, o ISF multiestágio, o ISF aquecido e o ISF assistido por ultrassom. Essa classificação é importante porque cada variante altera o estado de tensões, a distribuição de espessura, o retorno elástico e o custo de implementação do processo.

No contexto deste trabalho, o foco permanece no SPIF simulado em ambiente computacional, mas a revisão das variantes auxilia na interpretação dos resultados e na formulação de sugestões futuras. Processos híbridos com pré-conformação podem reduzir o tempo de conformação e melhorar a precisão geométrica, enquanto estratégias multiestágio tendem a melhorar a distribuição de espessura em geometrias com ângulos elevados, embora possam aumentar o retorno elástico acumulado.

Processos híbridos e assistidos aparecem na literatura como alternativas para melhorar precisão geométrica, reduzir forças ou ampliar a conformabilidade. JAGTAP; KUMAR (2020) investigaram o ISF híbrido com pré-conformação e observaram que a

etapa inicial de conformação pode contribuir para melhorar a precisão geométrica e reduzir o tempo de processo. CUI et al. (2015), por sua vez, estudaram a conformação incremental eletromagnética de chapas, evidenciando que a aplicação de campos energéticos auxiliares constitui uma rota possível para modificar a resposta do material durante a conformação.

No campo dos processos assistidos por temperatura, LI, W.; ATTALLAH; ESSA (2023) revisaram o ISF aquecido para materiais de alta resistência, destacando métodos como aquecimento por laser, corrente elétrica, indução e convecção. Exemplos específicos dessa linha incluem o estudo de MOSECKER et al. (2012) sobre Ti6Al4V conformado com aquecimento a laser, o modelo de aquecimento localizado por convecção proposto por KULKARNI; MOCKO (2020) e a previsão de temperatura por rede neural em estampagem incremental dupla face eletricamente assistida apresentada por JIANG; EHMANN; CAO (2022).

Também se destacam os processos assistidos por vibração. LA et al. (2024) otimizaram parâmetros de estampagem incremental assistida por ultrassom e reportaram redução das forças de conformação, enquanto LI, J. et al. (2023) desenvolveram modelagem por elementos finitos para investigar o comportamento de deformação em diferentes estágios do ISF assistido por ultrassom. Esses trabalhos não fazem parte do escopo experimental do presente estudo, mas indicam rotas futuras para ampliar as potencialidades do processo em geometrias e materiais mais severos.

3.2.3 Histórico do Processo

O histórico do ISF foi sistematizado por JESWIET et al. (2005) em uma revisão seminal que cobre o período desde os trabalhos pioneiros de Leszak (patente de 1967), que descreveu o conceito de conformação incremental por ferramenta de ponto único, até os desenvolvimentos modernos com controle CNC. Os autores identificam os trabalhos de Matsubara no Japão, na década de 1990, como o marco do desenvolvimento comercial do processo. Matsubara demonstrou que o TPIF pode ser realizado em máquinas CNC convencionais, o que foi um passo fundamental para a popularização do processo.

A partir do início dos anos 2000, o processo passou a ser amplamente investigado em universidades e centros de pesquisa em todo o mundo. JESWIET et

al. (2005) documentam extensamente as contribuições de grupos de pesquisa na Bélgica (KU Leuven), Reino Unido (Bath, Cambridge), Alemanha (Aachen), Itália (Palermo) e Canadá (Queen's University), que avançaram o entendimento dos mecanismos de deformação, dos critérios de formabilidade, das forças de conformação e das aplicações industriais do processo. Dentre essas contribuições, destaca-se o desenvolvimento de diagramas de limite de conformação (FLD) específicos para o ISF, que demonstram a formabilidade superior do processo em relação aos processos convencionais.

PATEL; GANDHI (2022) complementam esse histórico ao registrar que, nas últimas duas décadas, a pesquisa em ISF expandiu-se para cobrir novos materiais (ligas de titânio, magnésio e aços de alta resistência), novas variantes do processo (ISF assistido por aquecimento laser, resistência elétrica e corrente elétrica), e novas aplicações (implantes médicos personalizados, peças aeroespaciais, componentes automotivos de baixo volume). Os autores destacam que o avanço dos sistemas de controle CNC e dos softwares CAM foi determinante para viabilizar a implementação comercial do processo em máquinas fresadoras convencionais.

3.3 Formabilidade no ISF

3.3.1 Formabilidade Aprimorada e Curva Limite de Conformação

Uma das características mais relevantes e documentadas do ISF é a sua formabilidade superior à observada em processos convencionais de conformação de chapas. JESWIET et al. (2005) apresentam dados extensos mostrando que a Curva Limite de Conformação (CLC) no ISF tem inclinação negativa no diagrama deformação-menor versus deformação-maior, em contraste com a forma em V característica da CLC convencional. Esse deslocamento da curva limite implica que deformações que resultariam em fratura em um processo de estampagem profunda convencional são plenamente atingíveis no ISF, tornando o processo viável para geometrias com elevados ângulos de parede e grandes profundidades.

O mecanismo responsável pela formabilidade aprimorada tem sido objeto de debate na literatura. JESWIET et al. (2005) documentam que estudos analíticos e simulações indicam que a deformação no SPIF ocorre em condições próximas à deformação plana, com tensões compressivas significativas na zona de contato ferramenta-chapa. Essas tensões compressivas, geradas pela pressão hidrostática da

ferramenta sobre a região localizada de deformação, suprimem a nucleação e o crescimento de vazios, retardando a fratura dúctil e permitindo deformações plásticas muito maiores que as observadas em condições convencionais.

3.3.2 Ângulo Máximo de Conformação e Lei do Seno

O ângulo máximo de conformação (φmax) é o principal indicador de formabilidade no ISF, definido como o maior ângulo de parede em relação ao plano horizontal da chapa que pode ser conformado em um único passo sem fratura. JESWIET et al. (2005) apresentam uma tabela abrangente de valores de φmax para diferentes materiais e espessuras, reproduzida parcialmente na Tabela 3.1, que demonstra a variabilidade significativa desse parâmetro em função do material.

Tabela 3.1 – Ângulos máximos de conformação (φmax) para diferentes materiais em ISF

Material	**Espessura (mm)**	**φmax (°)**	**Espessura, mm**
AA 1050-O	1,21	67,5	1,21
AA 3003-O	1,21	78,1	2,1
AA 5754-O	1,02	62,0	1,02
DC04 (aço suave)	1,20	65,0	1,0
DDQ (aço)	1,00	70,0	1,0
HSS (aço)	1,00	65,0	1,0
Cobre	1,00	65,0	1,0
Latão	1,00	40,0	1,0

Fonte: Adaptado de Jeswiet et al. (2005).

A distribuição de espessura ao longo da parede de uma peça conformada por ISF é governada, em primeira aproximação, pela lei do seno (também denominada lei da espessura), que estabelece uma relação direta entre a espessura final da chapa e o ângulo de parede em relação ao plano horizontal:

$$t_1 = t_0 \times \text{sen}(90° - \alpha) = t_0 \times \cos(\alpha) \quad \text{(Equação 3.1)}$$

Onde t_1 é a espessura final da chapa após a conformação, t_0 é a espessura inicial e α é o ângulo de parede medido em relação ao plano horizontal da chapa.

JESWIET et al. (2005) demonstram que, para ângulos de parede baixos e estratégias de trajetória em contornos planos, a lei do seno fornece boa concordância com os dados experimentais. Entretanto, CERRO et al. (2006) observam que, para trajetórias helicoidais e ângulos mais elevados, a lei do seno superestima a espessura real, pois não captura os efeitos de flexão e de achatamento local da chapa na zona de contato com a ferramenta. No presente trabalho, a lei do seno é utilizada como referência teórica para comparação com os resultados das simulações no Abaqus.

3.3.3 Influência dos Parâmetros de Processo na Formabilidade

PATEL; GANDHI (2022) revisaram extensivamente a influência dos parâmetros de processo sobre a formabilidade no ISF e identificaram os seguintes efeitos principais. A espessura inicial da chapa tem influência direta sobre φmax: JESWIET et al. (2005) determinaram empiricamente, para duas ligas de alumínio, que:

- $\varphi_{max} = 8{,}5 \cdot t_0 + 60{,}7°$ (AA 3003-O)
- $\varphi_{max} = 3{,}3 \cdot t_0 + 58{,}3°$ (AA 5754-O)

Onde t_0 é a espessura em milímetros. Essas equações lineares, embora válidas apenas dentro de determinadas faixas de espessura, são úteis para estimativas preliminares de viabilidade de conformação.

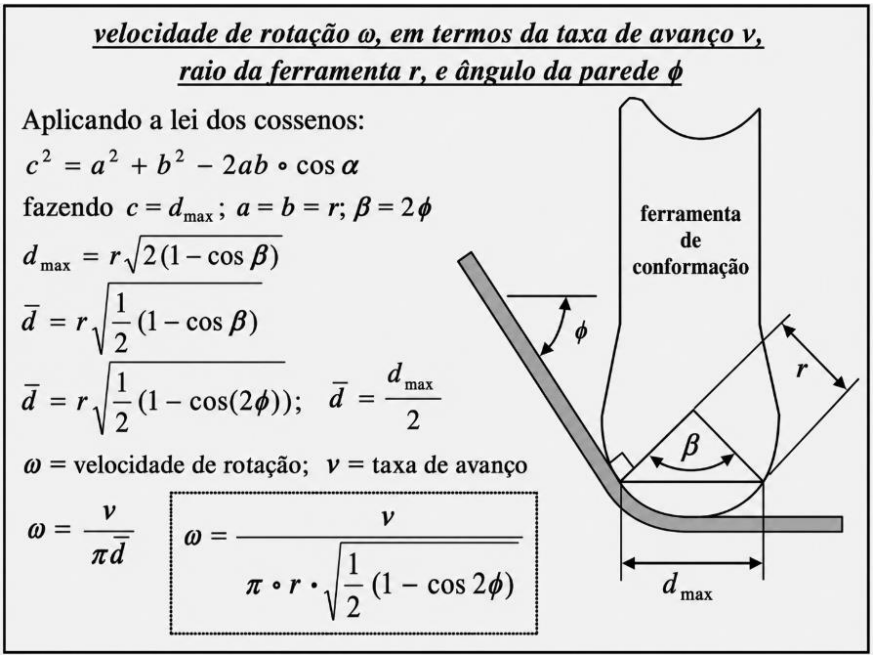
O tamanho da taxa de incremento axial ΔZ influencia a formabilidade de forma inversamente proporcional: incrementos menores produzem maior formabilidade, pois cada volta da trajetória helical impõe menor deformação localizada à chapa, permitindo que o material acomode a deformação de forma mais distribuída. PATEL; GANDHI (2022) revisam estudos que mostram que incrementos entre 0,1 mm e 1 mm aumentam a formabilidade com o aumento do ΔZ em valores menores, mas a reduzem para ΔZ maiores (acima de 0,7 mm para a maioria dos materiais testados).

O diâmetro da ferramenta também exerce influência relevante: ferramentas com raio menor concentram a deformação em uma área menor, aumentando a formabilidade local. JESWIET et al. (2005) apresentam dados experimentais mostrando que a redução do diâmetro da ferramenta de 30 mm para 6 mm resulta em deformações muito maiores antes da fratura, com a CLC se deslocando para valores de deformação principal muito superiores. CERRO et al. (2006) confirmam essa tendência em seus experimentos com Al 1050, demonstrando que ferramentas

menores aumentam tanto a formabilidade quanto a qualidade superficial das peças produzidas.

A variação da rotação da ferramenta também exerce influencia relevante no processo. Controlando esta variável pode-se controlar o atrito na chapa e consequentemente o calor gerado. Para que o atrito seja minimizado, a ferramenta deve rolar sobre a superfície enquanto é conformada, JESWIET et al. (2005) apresenta uma relação de equações que servem como guia para esses parâmetros, Figura 3.2.

Figura 3.2: Geometria e rotação da ferramenta.



Fonte: Adaptado de Jeswiet et al. (2005).

O incremento axial ΔZ é um dos parâmetros mais sensíveis do processo. Incrementos maiores reduzem o tempo de conformação, porém tendem a elevar a força de contato, aumentar a rugosidade e reduzir a formabilidade, pois impõem maior deformação local a cada passagem da ferramenta. Incrementos menores, por outro lado, melhoram a continuidade da deformação e a qualidade superficial, mas aumentam o tempo de processamento e o número de pontos da trajetória, elevando o custo computacional da simulação.

O diâmetro ou raio da ferramenta também apresenta efeito de compromisso. Ferramentas menores favorecem a obtenção de detalhes geométricos e podem ampliar a formabilidade em determinadas condições, mas aumentam a pressão de

contato local e podem intensificar marcas superficiais. Ferramentas maiores distribuem melhor o contato e reduzem a severidade local da deformação, porém exigem maiores forças de conformação e podem limitar a reprodução de cantos, raios pequenos e detalhes de moldes industriais.

A velocidade de avanço e a rotação da ferramenta influenciam principalmente o atrito e a geração de calor na interface ferramenta-chapa. Em condições sem aquecimento externo, tais parâmetros devem ser avaliados com cautela, pois alterações no atrito podem modificar tanto a força de conformação quanto a distribuição de deformação. Para uma análise computacional inicial, é adequado manter esses parâmetros fixos e variar prioritariamente a geometria e o incremento axial, isolando os efeitos diretamente associados à trajetória e à severidade da deformação.

3.4 Forças de Conformação no ISF

3.4.1 Influência dos Parâmetros de Processo nas Forças

O estudo das forças de conformação no ISF é fundamental para a compreensão dos mecanismos de deformação, a seleção adequada da máquina-ferramenta, o monitoramento do processo e a previsão de falhas. JESWIET et al. (2005) apresentam resultados de medições de força em SPIF e TPIF, obtidos com sensores de força montados no eixo da máquina, demonstrando que a força axial é a componente dominante e que a força horizontal é significativamente menor. Os resultados mostram que a força máxima observada em SPIF de AA 3003-O (1,21 mm de espessura) é da ordem de 450 N na direção axial, valor consideravelmente menor que o observado em processos convencionais de estampagem profunda para peças de dimensões similares.

3.4.1 Flutuação da Força de Conformação

Um fenômeno característico do ISF que tem implicações diretas sobre a precisão geométrica das peças é a flutuação periódica da força de conformação ao longo de cada contorno da trajetória. CHANG; LI; CHEN (2019) investigaram sistematicamente esse fenômeno e concluíram que ele é causado pela variação da deflexão elástica da chapa ao longo do percurso da ferramenta. À medida que a ferramenta se move ao longo de um contorno, a rigidez local da chapa varia em função

da área não deformada remanescente, alterando a deflexão elástica e, consequentemente, a área de contato e a força de conformação.

Os autores demonstraram que a flutuação da força tem caráter aproximadamente senoidal em um contorno completo, com amplitude proporcional ao raio da ferramenta, à espessura da chapa e ao tamanho do incremento axial ΔZ, e com relação não-monotônica com o ângulo de parede. Essa flutuação periódica da força gera ondulações na superfície da peça e contribui para os desvios geométricos observados no ISF. CERRO et al. (2006) confirmam que o aumento da sobreposição entre etapas de conformação reduz tanto as forças quanto os desvios geométricos, ao distribuir a deformação em incrementos menores por etapa.

3.5 Mecanismos de Falha no ISF

3.5.1 Tipos de Falha

A falha em peças produzidas por ISF ocorre predominantemente por fratura dúctil, resultante da redução excessiva de espessura em regiões de elevada deformação plástica acumulada. JESWIET et al. (2005) identificam dois modos principais de falha: fratura por estricção difusa, associada a estados de deformação biaxial, e fratura por cisalhamento na espessura, típica de regiões com elevados ângulos de parede. A fratura por estricção difusa manifesta-se pelo afunilamento gradual da espessura em uma região extensa, seguido pela ruptura quando a espessura local atinge um valor crítico. A fratura por cisalhamento ocorre de forma mais abrupta e localizada, sem a formação de estricção visível.

PATEL; GANDHI (2022) destacam que a previsão precisa da falha no ISF é um dos principais desafios do processo, pois os critérios clássicos baseados na Curva Limite de Conformação (CLC) convencional tendem a subestimar significativamente a formabilidade real do ISF. Os autores revisam critérios alternativos baseados em deformação de fratura, modelos de dano contínuo (como o critério de Cockcroft-Latham) e critérios baseados em triaxialidade de tensão, que fornecem previsões mais acuradas para o processo.

3.5.2 Profundidade Limite e Ângulo Máximo

A profundidade limite de conformação é um parâmetro fundamental para a aplicação do ISF na fabricação de moldes. Essa profundidade depende do ângulo de

parede, da taxa de incremento ΔZ, do material e da espessura da chapa. JESWIET et al. (2005) apresentam a relação entre ângulo de parede e espessura residual para cones e pirâmides formados por SPIF, mostrando que a zona de afunilamento máximo de espessura precursora da falha ocorre na região de transição entre a parede e o fundo da peça, e não ao longo da parede, como seria previsto pela lei do seno. Essa observação é fundamental para a determinação correta da profundidade limite, pois indica que a falha pode ocorrer de forma repentina mesmo em peças aparentemente sem problemas ao longo da maior parte da parede.

CERRO et al. (2006) demonstraram experimentalmente que a estratégia de conformação em múltiplos passos (multi-pass forming) permite superar os limites de profundidade obtidos em um único passo, ao distribuir a deformação total entre várias etapas e evitar a concentração de redução de espessura nas zonas críticas. Os autores testaram a conformação de uma pirâmide com ângulo de parede de 75° em um, três e sete etapas, e demonstraram que apenas a estratégia de sete etapas (com ângulos de 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70° e 75°) produziu a peça sem fratura, enquanto as estratégias de um e três passos resultaram em ruptura da chapa.

3.5.3 Critérios de Previsão de Falha na Simulação

Na simulação computacional do ISF pelo MEF, a falha pode ser representada por diferentes abordagens. JESWIET et al. (2005) e PATEL; GANDHI (2022) revisam as principais abordagens disponíveis:

(i) Monitoramento da deformação plástica equivalente (PEEQ) e comparação com um valor crítico determinado experimentalmente;

(ii) Uso de critérios de dano acumulado implementados como variáveis de estado do material, como o critério de Cockcroft-Latham;

(iii) Eliminação de elementos (element deletion) quando a deformação ou o dano atingem um valor crítico;

(iv) Monitoramento da razão entre a espessura atual e a espessura inicial da chapa (t_1/t_0).

A abordagem de monitoramento do PEEQ e da razão de espessura é a mais utilizada em estudos paramétricos como o presente, por ser de simples implementação e fornecer resultados qualitativamente corretos para a comparação entre diferentes configurações de processo.

3.6 Simulação Computacional do ISF pelo Método dos Elementos Finitos

3.6.1 Fundamentos do MEF Aplicado ao ISF

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica para a solução aproximada de problemas de valor de contorno descritos por equações diferenciais parciais. Na simulação de processos de conformação de chapas, o MEF é empregado para resolver as equações de equilíbrio mecânico, as equações constitutivas do material e as condições de contato entre ferramenta e chapa. A solução fornece os campos de deslocamento, tensão, deformação e temperatura em cada ponto do domínio discretizado, permitindo a análise detalhada do comportamento da chapa durante todo o processo de conformação.

A simulação do ISF pelo MEF apresenta desafios específicos que a tornam computacionalmente mais exigente que a simulação de processos convencionais de estampagem. Esses desafios incluem:

(i) Necessidade de representar a trajetória completa da ferramenta, que pode compreender centenas ou milhares de voltas helicoidais;

(ii) Tratamento de grandes deformações plásticas localizadas sob a ferramenta;

(iii) Contato localizado e progressivo entre ferramenta e chapa, com mudança contínua das superfícies em contato;

(iv) Avaliação do retorno elástico (springback) após a remoção da ferramenta e o desafixamento da chapa.

JESWIET et al. (2005) discutem detalhadamente esses desafios e as estratégias adotadas pelos diferentes grupos de pesquisa para contorná-los.

Em simulações explícitas de ISF, a confiabilidade dos resultados depende não apenas da malha e do modelo constitutivo, mas também do controle do caráter quase-estático da análise. Como o Abaqus/Explicit resolve as equações de movimento no domínio do tempo, a energia cinética deve permanecer pequena em relação à energia interna durante a maior parte do processo. Caso contrário, o resultado pode representar efeitos dinâmicos artificiais e não a resposta quase-estática esperada para a conformação incremental.

Outro ponto crítico é a definição do contato. A ferramenta deve ser definida como superfície mestre ou corpo rígido analítico, enquanto a chapa atua como superfície deformável. O coeficiente de atrito adotado deve ser mantido constante no estudo paramétrico para que as diferenças observadas entre geometrias e incrementos axiais sejam atribuídas principalmente às variáveis investigadas. Essa padronização é essencial para comparar adequadamente distribuição de espessura, PEEQ, forças de contato e retorno elástico.

3.6.2 Comparação entre Solvers Implícito e Explícito

A escolha entre o solver implícito (Abaqus/Standard) e o solver explícito (Abaqus/Explicit) é uma decisão crítica na simulação do ISF. JESWIET et al. (2005) apresentam uma comparação direta entre os dois solvers para a simulação de um copo simétrico por ISF, cujos resultados são reproduzidos na Tabela 3.3 do presente trabalho. Os dados mostram que o solver implícito fornece maior precisão geométrica e melhor previsão da espessura, mas com tempo de CPU muito maior (7,32 horas versus 0,58 horas para o explícito, em processador de 2,6 GHz). O solver explícito, portanto, é a escolha preferencial para estudos paramétricos extensos, como o proposto no presente trabalho.

Tabela 3.3 – Comparação entre simulações implícita e explícita do ISF pelo Abaqus

Critério	**Solver Implícito**	**Solver Explícito**	**Observação**
Tempo CPU (h)	7,32	0,58	Explícito ~13× mais rápido
Desvio geométrico médio (mm)	1,09	1,82	Implícito mais preciso
Desvio de espessura máx. (%)	11,7	15,6	Implícito mais preciso
Viável para otimização	Não	Sim	Explícito recomendado

Fonte: Adaptado de Bambach et al. (2004) apud Jeswiet et al. (2005).

O solver explícito (Abaqus/Explicit) integra as equações de movimento no tempo por um esquema de diferenças centrais, sem a necessidade de inversão de matrizes globais. Cada incremento de tempo é calculado de forma direta, com custo

computacional por incremento muito menor que o do solver implícito. A principal limitação do método explícito é a necessidade de passo de tempo muito pequeno para garantir a estabilidade numérica, o que implica um número muito grande de incrementos para simular processos de longa duração. Por essa razão, a técnica de escalonamento de massa (mass scaling) é amplamente utilizada para aumentar artificialmente o passo de tempo estável, reduzindo o tempo total de simulação. CERRO et al. (2006) empregaram o Abaqus/Explicit em suas simulações de ISF e obtiveram concordância com dados experimentais com erros inferiores a 5% na previsão da distribuição de espessura e com erros inferiores a 5% nas forças de conformação.

3.6.3 Modelos Constitutivos e Parâmetros de Simulação

O comportamento mecânico do material é representado por um modelo constitutivo elasto-plástico com encruamento isotrópico, descrito pela lei de potência de Hollomon:

$$\sigma = K \times \varepsilon^{n} \qquad \text{(Equação 3.2)}$$

onde σ é a tensão verdadeira, ε é a deformação plástica equivalente, K é o coeficiente de resistência e n é o expoente de encruamento. Esse modelo captura adequadamente o comportamento de endurecimento do material e é amplamente utilizado em simulações de ISF na literatura. CHANG; LI; CHEN (2019) demonstraram que o modelo de Hollomon fornece boa concordância com dados experimentais de força para o ISF de AA 3003 e AA 5052, com desvios máximos inferiores a 6% em relação às medições.

CERRO et al. (2006) utilizaram o modelo de Ramberg-Osgood para representar o comportamento do Al 1050-O em suas simulações, obtendo boa concordância com dados experimentais tanto para a distribuição de espessura quanto para as forças de conformação. Os autores destacam que a modelagem adequada do encruamento do material é fundamental para a precisão da simulação, especialmente em regiões de elevada deformação plástica, onde o endurecimento por deformação tem influência significativa sobre as tensões e deformações locais.

O contato entre a ferramenta e a chapa é modelado pelo algoritmo de penalidade, com comportamento normal de contato rígido (hard contact) e atrito

tangencial governado pelo modelo de Coulomb. O coeficiente de atrito é um parâmetro de grande influência sobre os resultados da simulação, afetando as forças de conformação, a distribuição de tensões e a qualidade superficial das peças. CERRO et al. (2006) adotaram um coeficiente de atrito de 0,1 entre ferramenta e chapa e de 0,15 entre chapa e placa de apoio, valores consistentes com as recomendações de JESWIET et al. (2005) para condições de lubrificação leve.

3.6.4 Discretização da Malha e Técnicas de Refinamento

A discretização da chapa é realizada com elementos de casca reduzidos (S4R), com múltiplos pontos de integração na espessura (tipicamente cinco, segundo a regra de integração de Simpson). JESWIET et al. (2005) relatam que os melhores resultados em termos de precisão de espessura são obtidos com nove pontos de integração na espessura, mas que cinco pontos já fornecem resultados satisfatórios para a maioria das aplicações, com custo computacional significativamente menor. CERRO et al. (2006) empregaram malhas com entre 3.000 e 10.000 elementos de casca reduzida de quatro nós com seis graus de liberdade por nó e cinco pontos de integração na espessura, obtendo boa concordância com dados experimentais para geometrias elípticas e piramidais.

A ferramenta de estampagem é modelada como superfície rígida analítica com geometria hemisférica, o que elimina a necessidade de discretização da ferramenta em elementos finitos, reduz o custo computacional da análise de contato e evita problemas de penetração numérica entre as superfícies. Essa abordagem é consistente com as práticas descritas na literatura e com as recomendações dos manuais do Abaqus para simulações de processos de conformação de chapas.

3.7 Precisão Dimensional

3.7.1 Desvios Geométricos e Estratégias de Compensação

A precisão dimensional é uma das principais limitações do ISF para aplicações que exigem tolerâncias rigorosas. JESWIET et al. (2005) documentam que os desvios típicos obtidos no ISF variam entre ±1,5 mm e ±2 mm para peças simétricas e assimétricas, respectivamente, utilizando trajetórias geradas por módulos CAM convencionais. Os principais fatores que contribuem para esses desvios são o retorno elástico (springback) após a remoção da ferramenta, a distorção geométrica

decorrente da propagação de tensões residuais e os efeitos de sobre-conformação (over-spinning) que resultam em abaulamentos indesejados.

CERRO et al. (2006) demonstraram experimentalmente que a sobreposição entre etapas de conformação (overlapping) tem influência direta sobre a precisão dimensional: maiores valores de sobreposição (60% versus 10%) produzem menores desvios geométricos, ao custo de maior tempo de processamento. Os autores relatam que o modelo MEF desenvolvido no Abaqus/Explicit fornece previsões de desvio geométrico em boa concordância com os dados experimentais para ambos os valores de sobreposição testados, com erros inferiores a 5% em relação às medições realizadas com máquina de medição por coordenadas.

JESWIET et al. (2005) revisam diferentes estratégias de compensação de trajetória propostas na literatura para melhorar a precisão dimensional do ISF. Uma abordagem amplamente adotada consiste em medir a peça formada e comparar a geometria obtida com o modelo CAD, gerando uma nova trajetória corrigida com base nos desvios observados (método iterativo). Os autores citam resultados que mostram reduções de até 70% nos desvios geométricos após uma iteração de correção, utilizando fator de escalonamento de 0,7 para a correção dos desvios em peças de DC04 1,5 mm de espessura.

3.7.3 Trajetória de Ferramenta e Precisão Geométrica

A trajetória de ferramenta é uma variável de processo tão importante quanto o material e o incremento axial. Trajetórias em contorno são simples de gerar e aplicáveis a geometrias diversas, porém podem produzir marcas de degrau e descontinuidades em regiões de mudança de nível. Trajetórias helicoidais proporcionam movimento contínuo, reduzem interrupções e tendem a melhorar o acabamento superficial, mas sua aplicação direta é mais simples em geometrias axisimétricas. Para geometrias poligonais ou assimétricas, a trajetória deve ser verificada cuidadosamente para evitar inversões, cruzamentos e perda de contato com a região de conformação.

3.8 ISF Aplicado à Fabricação de Ferramentas e Moldes

3.8.1 ISF como Tecnologia de Ferramental Rápido

O conceito de ferramental rápido (rapid tooling) refere-se ao uso de processos ágeis e de baixo custo para a produção de moldes e ferramentas, especialmente em fases de prototipagem e produção em pequenos lotes. JESWIET et al. (2005) identificam o ISF como uma das tecnologias de ferramental rápido mais promissoras para chapas metálicas, em razão da capacidade de produzir geometrias complexas sem ferramental dedicado, com prazos de entrega muito menores do que os dos processos convencionais.

3.8.2 Aplicações Específicas e Lacunas na Literatura

A aplicação do ISF especificamente para a fabricação de moldes para rotomoldagem é um campo de pesquisa ainda em desenvolvimento, com poucos trabalhos publicados até o momento. JESWIET et al. (2005) identificam a rotomoldagem como uma das áreas de aplicação potencial do ISF para ferramental rápido, mas não apresentam estudos sistemáticos sobre a viabilidade de geometrias específicas de moldes. A maioria dos estudos disponíveis aborda a fabricação de moldes para termoformagem ou vacuum forming, que apresenta requisitos similares em termos de precisão dimensional e acabamento superficial, mas opera a pressões e temperaturas distintas.

PATEL; GANDHI (2022) destacam que a influência da geometria da seção transversal sobre a formabilidade e os desvios dimensionais é um dos aspectos menos estudados na literatura do ISF, sendo necessários estudos sistemáticos que abordem geometrias variadas e diferentes graus de complexidade geométrica. Os autores observam que a grande maioria dos estudos utiliza cones ou pirâmides de seção quadrada como geometrias de referência, sendo escassos os trabalhos que investigam outras formas de seção transversal, como triângulos, hexágonos ou círculos irregulares, que são comuns em moldes industriais. O presente trabalho pretende contribuir para o preenchimento dessa lacuna

4. METODOLOGIA

4.1 Visão Geral da Metodologia

A estratégia metodológica adotada é de natureza computacional, baseada na simulação numérica do processo de ISF pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando o software Abaqus em sua versão com solver explícito (Abaqus/Explicit). A escolha do Abaqus/Explicit é justificada pela robustez do solver no tratamento de problemas com grandes deformações e contato localizado, pelo custo computacional por incremento significativamente menor em relação ao solver implícito, e pela vasta base de estudos de validação disponível na literatura para esse tipo de problema (CERRO et al., 2006; JESWIET et al., 2005).

O estudo foi estruturado como um planejamento de experimentos computacionais, no qual as variáveis independentes são a geometria da seção transversal (quatro níveis: quadrado, triângulo equilátero, hexágono regular e círculo), com as demais variáveis fixas.

A metodologia foi dividida nas seguintes etapas sequenciais:

(i) Definição e modelagem das geometrias a serem conformadas no software CAD;

(ii) Geração das trajetórias de ferramenta no software CAM;

(iii) Configuração do modelo MEF no Abaqus/Explicit, incluindo definição da malha, do modelo constitutivo, das condições de contorno e dos parâmetros de contato;

(iv) Realização de estudo de convergência de malha;

(v) Execução das 4 simulações principais;

(vi) Pós-processamento e extração dos resultados no Abaqus/Viewer;

(vii) Análise e interpretação dos resultados em relação aos objetivos do trabalho.

O fluxo computacional adotado pode ser dividido em cinco etapas principais: modelagem das geometrias de referência, geração das trajetórias de ferramenta, conversão do código G para amplitudes tabulares do Abaqus, execução das simulações explícitas e pós-processamento dos campos de saída. Essa divisão facilita a rastreabilidade dos resultados, pois permite identificar separadamente erros de geometria, erros de trajetória, instabilidades numéricas e limitações físicas do processo.

Para garantir comparabilidade entre as simulações, todas as combinações de geometria e incremento axial devem utilizar o mesmo material, a mesma espessura inicial, o mesmo raio de ferramenta, o mesmo coeficiente de atrito e os mesmos critérios de pós-processamento. Essa padronização é necessária para que as diferenças de espessura mínima, PEEQ e desvio geométrico sejam atribuídas à forma da peça e ao valor de ΔZ, e não a mudanças simultâneas de múltiplos parâmetros.

4.2 Geometrias Analisadas

4.2.1 Seleção e Justificativa das Geometrias

Foram selecionadas quatro geometrias com diferentes graus de complexidade geométrica para avaliação do processo de ISF: quadrado, triângulo equilátero, hexágono regular e círculo. A seleção foi orientada pela proposta de pesquisa e pelo objetivo de avaliar a influência do número de lados, dos ângulos de vértice e da simetria da seção transversal sobre os desvios dimensionais e sobre a ocorrência de falha. Essa seleção é consistente com as recomendações de Patel e Gandhi (2022), que identificam a falta de estudos com geometrias variadas como uma lacuna importante na literatura do ISF.

O quadrado representa a geometria de menor complexidade entre as formas prismáticas com cantos vivos, apresentando quatro cantos de 90° e quatro faces planas. O triângulo equilátero apresenta três cantos de 60°, mais agudos que os do quadrado, o que representa um desafio maior para o processo em termos de concentração de deformações nos vértices. O hexágono regular, com seis cantos de 120°, apresenta cantos mais suaves que os do quadrado e do triângulo, mas com seis faces a serem conformadas. O círculo, sem cantos, representa a geometria de maior uniformidade de deformação, sendo equivalente à geometria cônica frequentemente utilizada como referência na literatura.

Tabela 4.1 – Especificações das geometrias analisadas nas simulações

Geometria	Area superficial (mm²)	Número de vértices	Ângulo α (°)	Profundidade (mm)	Ângulo da peça (°)
Círculo	17671,459	-	45	50	-
Triângulo equilátero		3			60
Hexágono regular		6			120
Quadrado		4			90

Fonte: Autor.

4.3 Parâmetros de Processo

4.3.1 Parâmetros Fixos

Os parâmetros de processo foram mantidos fixos ao longo de todas as simulações para isolar o efeito da geometria sobre os resultados. O avanço da ferramenta foi fixado em 500 mm/min, valor representativo de condições típicas de ISF com boa lubrificação. O raio de ponta da ferramenta foi fixado em 4 mm, dentro da faixa recomendada pela literatura para chapas de aço de 1,21 mm de espessura (Jeswiet et al., 2005). O coeficiente de atrito de Coulomb foi fixado em $\mu = 0{,}10$, representando condições de lubrificação leve, conforme adotado por Cerro et al. (2006) e consistente com as recomendações de Jeswiet et al. (2005).

Tabela 4.2 – Parâmetros de processo adotados nas simulações

Parâmetro	**Valores Simulados**	**Unidade**
Taxa de incremento axial ΔZ	0,5	mm
Avanço da ferramenta	1000	mm/min
Raio da ponta da ferramenta	4	mm
Espessura inicial da chapa	1,21	mm
Coeficiente de atrito (Coulomb)	0,10	—
Profundidade	50	mm

Fonte: Autor, com base em Jeswiet et al. (2005) e Cerro et al. (2006).

4.4 Material da Chapa

4.4.1 Propriedades Mecânicas Alumínio AA1050-0 Puro.

A chapa utilizada nas simulações é de liga de alumínio AA 1050-O, com espessura inicial de 1,21 mm. Esse material é amplamente utilizado em estudos de ISF na literatura em razão de sua elevada conformabilidade, baixo encruamento e ampla disponibilidade comercial. JESWIET et al. (2005) listam o AA 1050-O entre os materiais mais estudados no ISF, reportando ângulo máximo de conformação de 67,5° para espessura de 1,21 mm, valor superior ao observado para aços de baixo carbono na mesma espessura, o que torna esse material especialmente adequado para a avaliação dos limites geométricos do processo nas geometrias propostas. PATEL; GANDHI (2022) confirmam que o alumínio e suas ligas são os materiais mais frequentemente empregados em pesquisas de ISF, principalmente em razão das menores forças de conformação requeridas e da facilidade de observação dos mecanismos de deformação e fratura.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do AA 1050-0 adotadas nas simulações

Propriedade	**Valor**
Módulo de elasticidade (E)	71 GPa
Coeficiente de Poisson (v)	0,33
Tensão de escoamento (σ_0)	28 MPa
Resistência à tração (σ_u)	76 MPa
Expoente de encruamento (n)	0,25
Coeficiente de resistência (K)	145 MPa
Densidade (ρ)	2705 kg/m³

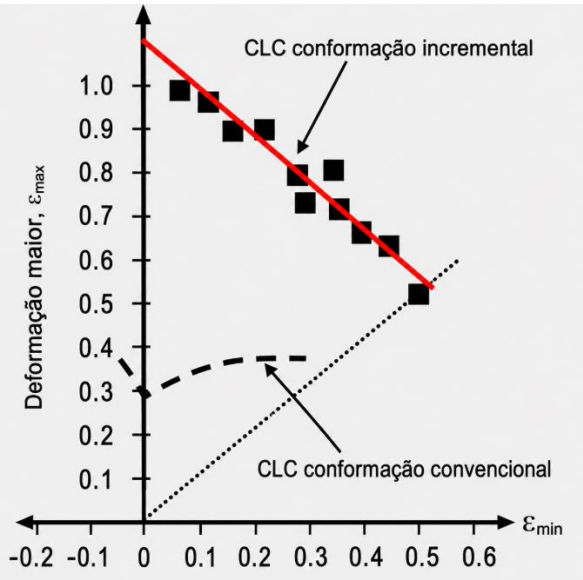
Fonte: Autor.

4.4.2 Modelo Constitutivo e Implementação no Abaqus

O modelo constitutivo elasto-plástico com encruamento isotrópico foi implementado no Abaqus por meio da definição tabular da curva tensão-deformação verdadeira do material. A curva foi gerada a partir da lei de Hollomon (Equação 3.2) com os parâmetros K = 145 MPa e n = 0,25, para deformações plásticas equivalentes entre 0 e 1,5. A parte elástica do comportamento foi modelada com módulo de Young E = 71 GPa e coeficiente de Poisson v = 0,33. A anisotropia planar do material não foi considerada neste estudo, adotando-se modelo isotrópico, em consonância com a

abordagem adotada pela maioria dos trabalhos de simulação de ISF disponíveis na literatura (Cerro et al., 2006; Chang et al., 2019). Também foi utilizada a curva FLC criada por Filice et al. (2002) para prever se o processo pode ser realizado em apenas um passo, Figura 4.1.

Figura 4.1: FLC para espessura de 1,21mm AA1050-0



Fonte: Filice et al. (2002)

4.5 Configuração do Modelo de Elementos Finitos

4.5.1 Modelagem e Discretização da Chapa

A chapa foi modelada como sólido deformável e discretizada com elementos de casca reduzidos do tipo S4R, com cinco pontos de integração na direção da espessura segundo a regra de integração de Simpson. CERRO et al. (2006) utilizaram elementos similares (quatro nós, seis graus de liberdade por nó, cinco pontos de integração) em suas simulações de ISF no Abaqus/Explicit e obtiveram boa concordância com dados experimentais, validando essa abordagem de discretização. O tamanho dos elementos da malha foi definido em 1mm.

A chapa foi modelada com dimensões em planta de 200 mm × 200 mm para todas as geometrias, garantindo que a região de fixação da chapa não interfira na zona de conformação.

4.5.2 Modelagem da Ferramenta

A ferramenta de estampagem foi modelada como superfície rígida analítica com geometria hemisférica e raio de 2 mm, conforme os parâmetros adotados no estudo.

A modelagem como superfície rígida analítica elimina a necessidade de refinamento de malha na ferramenta, reduz o custo computacional e é adequada ao problema, uma vez que a rigidez da ferramenta é muito superior à da chapa conformada.

4.5.3 Condições de Contorno e Carregamento

As quatro bordas da chapa foram fixadas em todos os seis graus de liberdade (translação nas três direções e rotação em torno dos três eixos), simulando a fixação por prensa-chapas rígidos. Essa condição de contorno é representativa da configuração SPIF e é consistente com as práticas descritas por Jeswiet et al. (2005) e Cerro et al. (2006). O movimento da ferramenta foi prescrito por meio de amplitude tabular em três eixos (X, Y e Z), definindo a trajetória helicoidal gerada pelo software CAM a partir do modelo CAD de cada geometria.

4.5.4 Modelo de Contato e Atrito

O contato entre a superfície da ferramenta e a face superior da chapa foi definido como contato geral (General Contact) no Abaqus/Explicit, com comportamento normal de penalidade (hard contact com penalty enforcement) e comportamento tangencial governado pelo modelo de atrito de Coulomb com coeficiente $\mu = 0{,}10$. Esse valor é consistente com o adotado por Cerro et al. (2006) e com as recomendações de Jeswiet et al. (2005) para condições de lubrificação leve com óleo mineral. O contato entre a face inferior da chapa e o suporte não foi considerado, em consonância com a configuração SPIF sem suporte inferior.

4.5.5 Escalonamento de Massa e Controle de Qualidade

A técnica de escalonamento de massa (mass scaling) com fator fixo foi adotada para reduzir o tempo de simulação. O fator de escalonamento foi determinado de modo que o passo de tempo estável do solver explícito seja compatível com tempo de simulação total inferior a 24 horas por caso em computador com 8 núcleos de processamento. O critério de aceitação da qualidade da simulação exige que a razão entre a energia cinética e a energia interna total do sistema seja inferior a 5% ao longo de toda a análise, conforme recomendado por Jeswiet et al. (2005) para garantir o caráter quasi-estático da simulação.

4.6 Geração das Trajetórias de Ferramenta

As trajetórias de ferramenta foram geradas no software Fusion 360 a partir dos modelos CAD de cada geometria. Para cada combinação de geometria foi gerada uma trajetória helicoidal contínua, que percorre a seção transversal da peça em espiral descendente com incremento vertical constante igual a ΔZ por volta completa. A estratégia de trajetória helicoidal foi adotada por ser a mais recomendada na literatura para produção de peças com melhor acabamento superficial e menor ocorrência de marcas de transição entre níveis (Jeswiet et al., 2005; Patel e Gandhi, 2022).

As trajetórias foram exportadas no formato de código G (G-code) e convertidas para o formato de amplitude tabular compatível com o Abaqus, por meio de um script Python criado especificamente para este trabalho. O script lê as coordenadas X, Y e Z de cada ponto da trajetória e gera o arquivo de amplitude correspondente, referenciado na definição do movimento prescrito da ferramenta. A precisão da conversão foi verificada pela comparação visual entre a trajetória gerada no CAM e a trajetória reproduzida no Abaqus antes das simulações definitivas, assegurando que não houve distorções ou erros de conversão.

Durante a conversão das trajetórias, foram considerados apenas os movimentos efetivos de conformação, excluindo deslocamentos rápidos, comandos auxiliares e trechos de aproximação que não contribuem para a deformação plástica da chapa. Essa filtragem evita que o Abaqus reproduza movimentos não físicos da ferramenta sobre a chapa e reduz a possibilidade de instabilidades no contato.

Para cada trajetória, recomenda-se verificar três aspectos antes da simulação definitiva: continuidade do caminho, coerência da profundidade final e centralização da seção conformada em relação ao sistema de coordenadas da chapa. Esse controle é especialmente importante em geometrias poligonais, nas quais pequenas translações ou inversões de trajetória podem gerar gráficos aparentemente distorcidos e dificultar a comparação das seções em diferentes profundidades.

4.7 Critérios de Avaliação dos Resultados

4.7.1 Desvios Dimensionais e Geométricos

Os desvios dimensionais e geométricos foram determinados pela comparação entre as coordenadas dos nós da malha deformada extraídas do arquivo de resultados do Abaqus após a remoção da ferramenta e o retorno elástico da chapa e a geometria

nominal definida no modelo CAD. A comparação foi realizada em seções transversais extraídas em 10 profundidades: 0 mm (borda superior) até 50 mm (superfície inferior). O desvio dimensional foi calculado como a diferença entre a dimensão medida na peça simulada e a dimensão nominal correspondente. O desvio geométrico foi calculado como o afastamento médio dos nós da malha deformada em relação à superfície nominal, calculado ao longo de toda a seção transversal em cada profundidade.

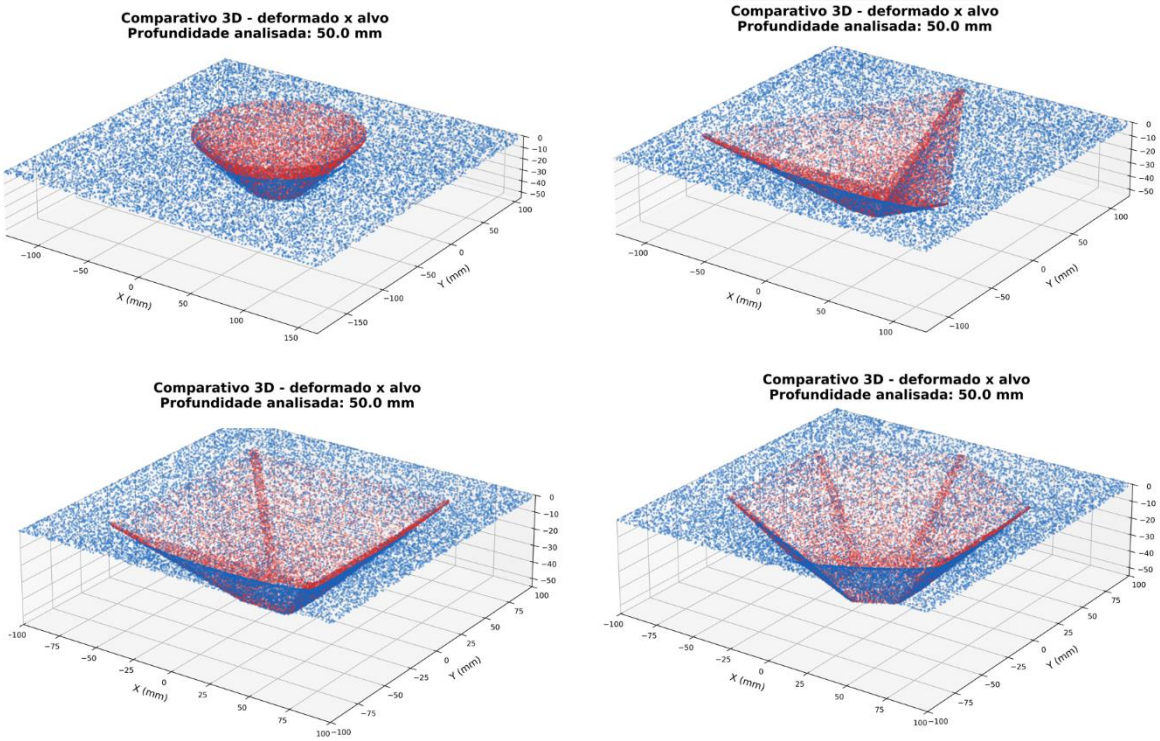
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Organização da Análise dos Resultados

Os resultados obtidos nas simulações computacionais foram organizados de modo a responder diretamente aos objetivos do trabalho, com foco na avaliação dos desvios dimensionais e geométricos em relação aos modelos CAD de referência e na identificação das potencialidades da estampagem incremental para diferentes características geométricas.

As quatro geometrias analisadas foram circular, triangular, quadrada e hexagonal (Figura 5.1). Para cada geometria, foram avaliados os desvios no plano XY, os desvios nos perfis XZ e YZ, o comportamento volumétrico da cavidade e os mapas de erro local de profundidade. Os valores volumétricos apresentados nesta seção foram extraídos dos gráficos gerados no pós-processamento e devem ser interpretados como aproximações visuais, enquanto os valores dos planos e perfis foram transcritos das caixas de resultados das figuras.

Figura 5.1 – Comparativo nuvem de pontos das 4 geometrias analisadas



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

5.2 Geometria Circular

A Tabela 5.1 apresenta os desvios no plano XY para a geometria circular. Esses valores permitem avaliar a diferença entre o perímetro deformado e o perímetro de referência em diferentes profundidades de análise.

Tabela 5.1 – Desvios no plano XY da geometria circular

Prof. (mm)	Erro atual x alvo(mm)	Erro RMS (mm)	Erro máx. (mm)	Tol. Z (mm)
5	6,828	7,167	9,528	±2,00
10	6,295	6,652	9,109	±3,00
15	5,000	8,032	9,315	±4,50
20	7,084	7,139	8,718	±4,50
25	6,980	7,060	8,912	±4,50
30	6,682	7,124	11,332	±3,00
35	4,749	4,839	6,409	±2,00
40	1,914	2,127	3,898	±2,00
45	4,242	4,819	6,512	±2,00
50	1,621	1,925	6,497	±2,00

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.2 reúne os desvios geométricos médios, RMS e máximos nos perfis XZ e YZ da geometria circular. A comparação entre esses planos permite verificar a influência da orientação da seção na reprodução da cavidade.

Tabela 5.2 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria circular

Prof. (mm)	XZ médio	XZ RMS	XZ máx.	YZ médio	YZ RMS	YZ máx.
5	36,657	43,637	95,468	41,024	50,949	118,627
10	34,877	42,058	95,468	39,265	49,669	118,627
15	33,289	40,786	95,452	37,675	48,553	118,609
20	31,449	39,389	95,396	35,527	47,117	118,554
25	29,907	38,195	95,386	33,586	45,929	118,543
30	28,684	37,414	95,386	32,659	45,273	118,543
35	27,202	36,523	95,386	31,101	44,614	118,543

40	25,964	35,885	95,386	29,192	43,572	118,543
45	25,078	35,178	95,386	28,502	43,016	118,543
50	24,297	35,329	95,386	27,626	42,965	118,543

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.3 apresenta o erro volumétrico percentual aproximado para a geometria circular. O erro sinalizado indica se o volume simulado ficou abaixo ou acima do volume alvo, enquanto o erro absoluto expressa a magnitude global da diferença.

Tabela 5.3 – Erro volumétrico percentual da geometria circular

Prof. (mm)	**Erro sinalizado (%)**	**Erro absoluto (%)**
5	-47,0	50,0
10	-34,5	42,0
15	-34,0	45,0
20	-25,0	43,0
25	-20,0	45,0
30	-17,0	49,0
35	-10,0	52,0
40	-5,0	58,0
45	-1,0	66,0
50	-2,5	67,0

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

Para a geometria circular, observa-se que o contorno em planta foi reproduzido com boa aproximação na profundidade final. No plano XY, o menor erro atual em relação ao alvo ocorreu em 50 mm, com 1,621 mm, enquanto o erro RMS foi de 1,925 mm. Entretanto, nas profundidades intermediárias os desvios permaneceram relevantes, indicando que a evolução do perímetro ao longo da conformação não é monotônica.

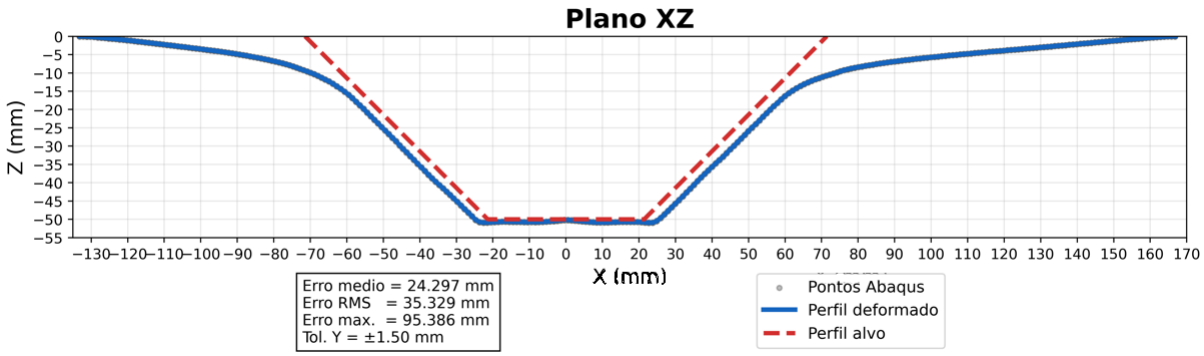
Nos perfis XZ e YZ, os erros médios permanecem elevados quando comparados ao plano XY. Em XZ, o erro médio reduziu de 36,657 mm para 24,297 mm entre 5 mm e 50 mm. Em YZ, a redução foi de 41,024 mm para 27,626 mm. Apesar da redução, os erros máximos se mantiveram altos, indicando que a boa

concordância do contorno superior não garante, isoladamente, reprodução adequada do perfil vertical.

O erro volumétrico sinalizado aproximou-se de zero nas maiores profundidades, atingindo cerca de -2,5% em 50 mm. Contudo, o erro absoluto percentual permaneceu elevado, próximo de 67%. Esse resultado indica compensação entre regiões com excesso e falta de profundidade: o volume global se aproxima do alvo, mas a distribuição local de profundidade ainda apresenta discrepâncias importantes.

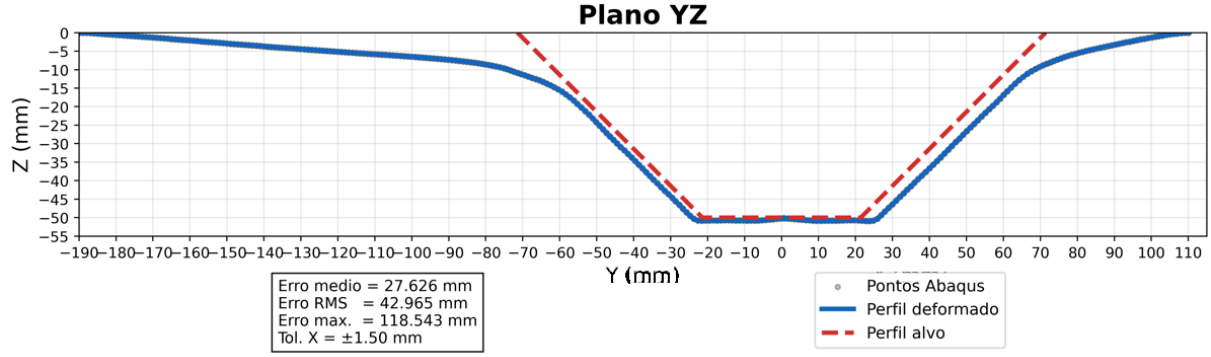
A Figura 5.2, 5.3 e 5.4 apresenta a comparação geométrica da geometria circular na profundidade final de 50 mm, incluindo os planos XY, XZ e YZ.

Figura 5.2 – Comparativo geométrico da geometria circular plano XZ na profundidade de 50 mm



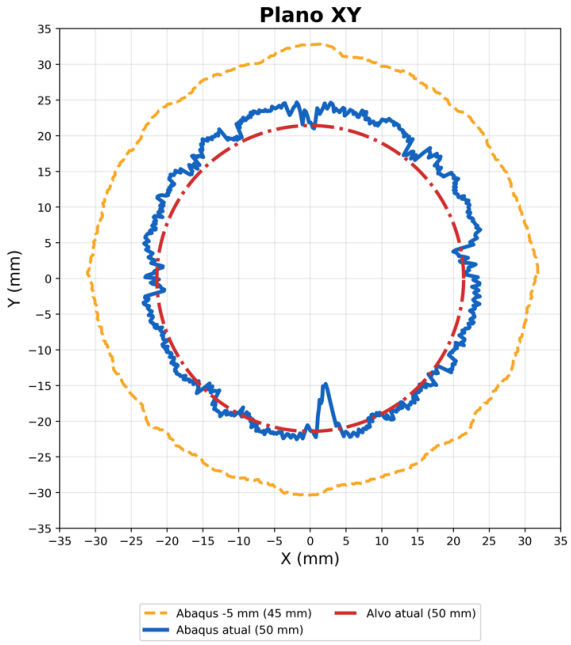
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

Figura 5.3 – Comparativo geométrico da geometria circular plano YZ na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

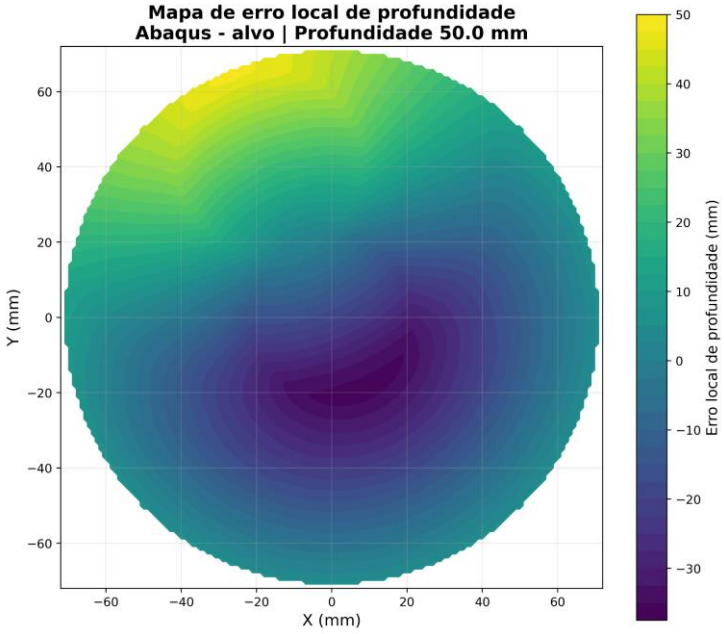
Figura 5.4 – Comparativo geométrico da geometria circular plano XY na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Figura 5.5 apresenta o mapa de erro local de profundidade da geometria circular para 50 mm, permitindo identificar as regiões críticas da cavidade.

Figura 5.5 – Mapa de erro local de profundidade da geometria circular em 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

5.3 Geometria Triangular

A Tabela 5.4 apresenta os desvios no plano XY para a geometria triangular. Esses valores permitem avaliar a diferença entre o perímetro deformado e o perímetro de referência em diferentes profundidades de análise.

Tabela 5.4 – Desvios no plano XY da geometria triangular

Prof. (mm)	Erro médio x alvo (mm)	Erro RMS (mm)	Erro máx. (mm)	Tol. Z (mm)
5	5,135	6,187	15,622	±2,00
10	7,015	7,033	8,552	±4,50
15	8,756	8,800	12,216	±6,75
20	6,604	6,628	7,759	±6,75
25	10,275	10,327	18,157	±10,12
30	10,340	10,384	18,931	±10,12
35	10,706	11,093	19,440	±10,12
40	9,888	10,352	18,862	±10,12
45	7,897	8,680	17,293	±10,12
50	1,085	1,359	4,079	±2,00

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.5 reúne os desvios geométricos médios, RMS e máximos nos perfis XZ e YZ da geometria triangular. A comparação entre esses planos permite verificar a influência da orientação da seção na reprodução da cavidade.

Tabela 5.5 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria triangular

Prof. (mm)	XZ médio	XZ RMS	XZ máx.	YZ médio	YZ RMS	YZ máx.
5	28,156	33,294	62,150	32,098	39,212	76,581
10	26,200	31,323	62,126	27,627	34,692	68,817
15	24,057	29,293	62,150	24,553	31,244	62,589
20	22,892	28,319	62,079	21,678	28,059	62,609
25	21,301	26,787	62,079	19,303	25,538	62,630
30	20,146	25,928	62,079	16,793	23,111	62,526
35	18,987	25,234	62,079	14,633	21,241	62,526

40	17,467	24,370	62,079	12,330	19,480	62,526
45	16,413	23,940	62,079	10,180	18,081	62,526
50	14,495	22,945	62,079	8,342	17,045	62,526

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.6 apresenta o erro volumétrico percentual aproximado para a geometria triangular. O erro sinalizado indica se o volume simulado ficou abaixo ou acima do volume alvo, enquanto o erro absoluto expressa a magnitude global da diferença.

Tabela 5.6 – Erro volumétrico percentual da geometria triangular

Prof. (mm)	Erro sinalizado (%)	Erro absoluto (%)
5	-47,5	54,5
10	-37,0	51,0
15	-29,5	48,0
20	-22,0	44,0
25	-15,5	40,0
30	-8,0	34,5
35	-1,0	28,0
40	+3,5	22,5
45	+8,5	17,5
50	+12,5	14,5

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

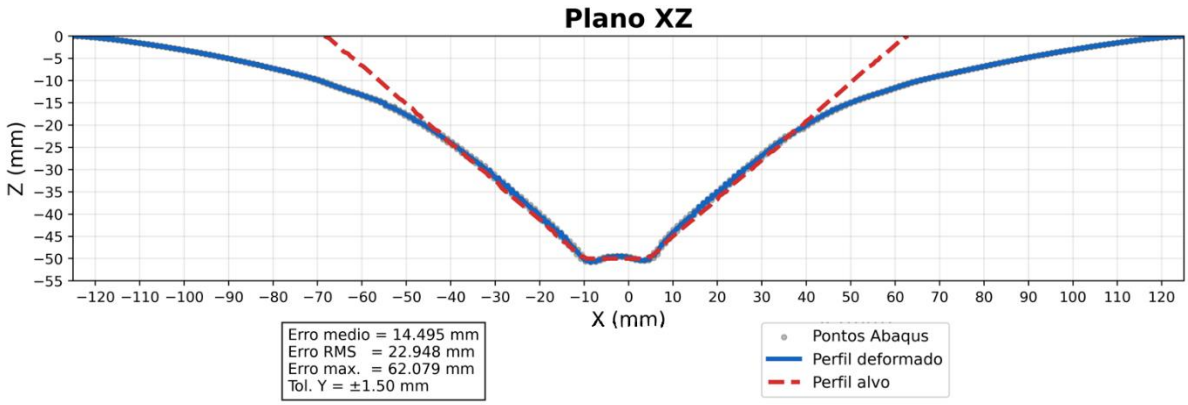
Para a geometria triangular, os resultados indicam maior sensibilidade do processo às regiões com vértices e mudanças bruscas de direção. No plano XY, os erros aumentaram nas profundidades intermediárias, com valores superiores a 10 mm entre 25 mm e 35 mm. Na profundidade final de 50 mm, entretanto, houve melhora expressiva, com erro médio de 1,085 mm e erro RMS de 1,359 mm.

Nos perfis XZ e YZ, os desvios apresentaram redução progressiva com a profundidade. O erro médio em XZ reduziu de 28,156 mm para 14,495 mm, enquanto em YZ passou de 32,098 mm para 8,342 mm. O plano YZ apresentou melhora mais pronunciada, embora os erros máximos tenham permanecido elevados, associados às bordas e aos vértices da seção triangular.

A análise volumétrica mostra que o erro sinalizado passou de aproximadamente -47,5% em 5 mm para +12,5% em 50 mm. O cruzamento próximo de zero ocorreu em torno de 35 mm, indicando que a profundidade final simulada tende a superar o volume alvo. O erro absoluto, embora decrescente, ainda foi de aproximadamente 14,5% em 50 mm, evidenciando limitações na distribuição local de profundidade.

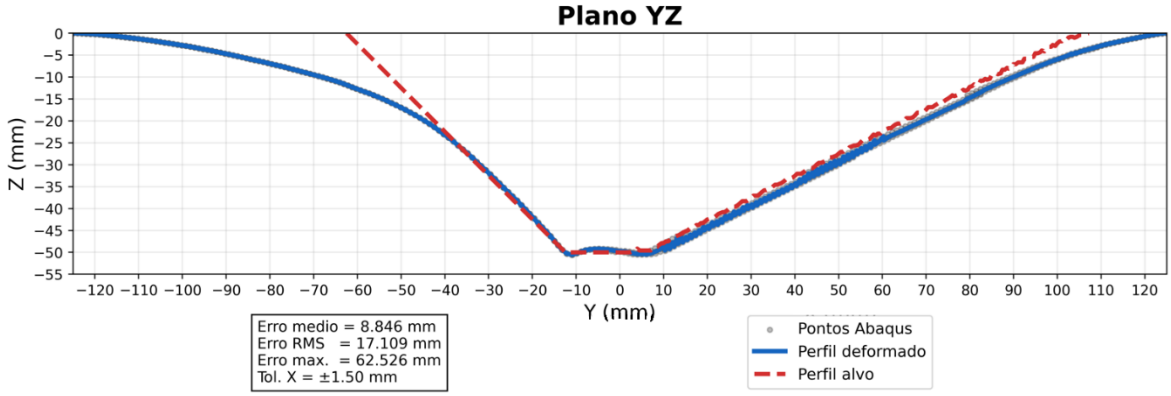
As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam a comparação geométrica da geometria triangular na profundidade final de 50 mm, incluindo os planos XY, XZ e YZ.

Figura 5.6 – Comparativo geométrico da geometria triangular plano XZ na profundidade de 50 mm



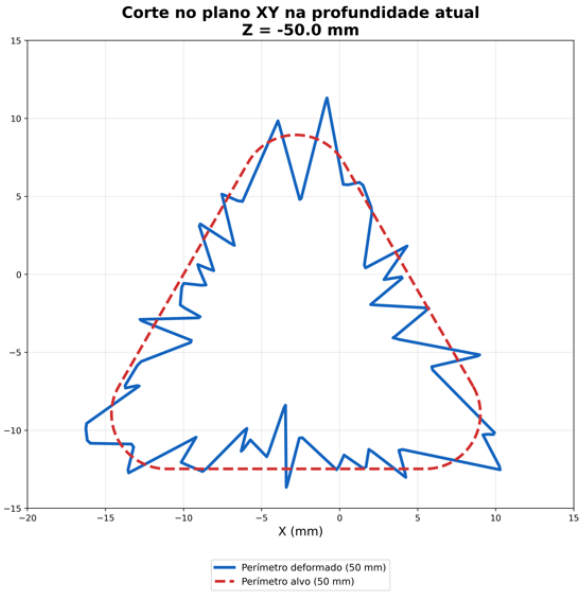
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

Figura 5.7 – Comparativo geométrico da geometria triangular plano YZ na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

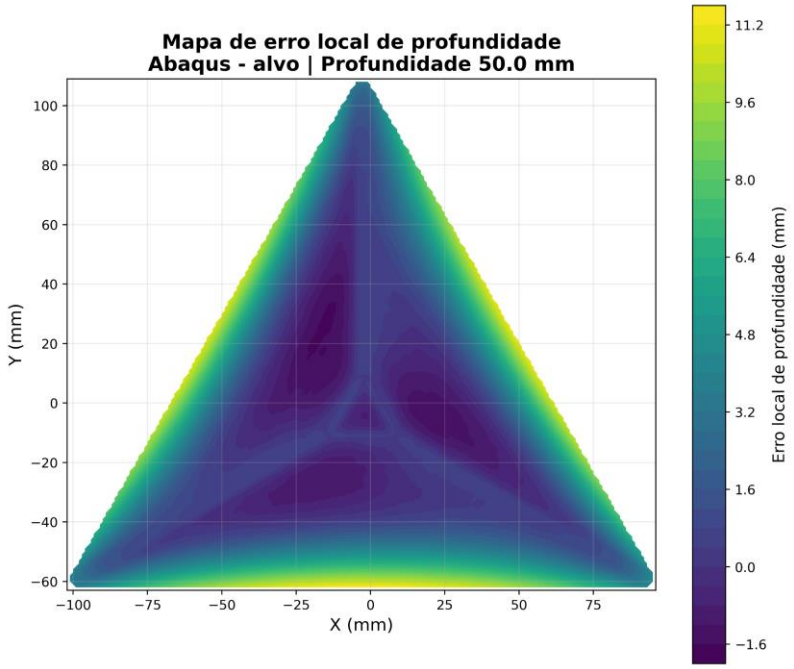
Figura 5.8 – Comparativo geométrico da geometria triangular plano XY na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Figura 5.9 apresenta o mapa de erro local de profundidade da geometria triangular para 50 mm, permitindo identificar as regiões críticas da cavidade.

Figura 5.9 – Comparativo geométrico da geometria triangular na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

5.4 Geometria Quadrada

A Tabela 5.7 apresenta os desvios no plano XY para a geometria quadrada. Esses valores permitem avaliar a diferença entre o perímetro deformado e o perímetro de referência em diferentes profundidades de análise.

Tabela 5.7 – Desvios no plano XY da geometria quadrada

Prof. (mm)	**Erro atual x alvo (mm)**	**Erro RMS (mm)**	**Erro máx. (mm)**	**Tol. Z (mm)**
5	6,117	6,141	7,526	±2,00
10	4,885	4,919	5,954	±3,00
15	5,800	5,865	7,023	±4,50
20	8,500	8,553	10,459	±6,75
25	7,746	7,889	10,281	±6,75
30	6,555	6,558	6,810	±6,75
35	7,514	7,613	9,643	±6,75
40	8,294	8,395	10,454	±6,75
45	6,110	6,154	7,038	±4,50
50	2,840	2,885	3,992	±2,00

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.8 reúne os desvios geométricos médios, RMS e máximos nos perfis XZ e YZ da geometria quadrada. A comparação entre esses planos permite verificar a influência da orientação da seção na reprodução da cavidade.

Tabela 5.8 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria quadrada

Prof. (mm)	**XZ médio**	**XZ RMS**	**XZ máx.**	**YZ médio**	**YZ RMS**	**YZ máx.**
5	24,879	30,172	61,629	24,878	30,170	61,632
10	22,378	27,280	56,728	22,275	27,217	56,735
15	20,253	24,717	51,970	20,155	24,659	51,977
20	18,303	22,369	47,201	18,306	22,375	47,719
25	16,266	20,108	42,472	16,372	20,166	42,471
30	14,269	17,970	37,665	14,265	17,974	37,677
35	12,652	16,235	33,533	12,612	16,205	33,533

40	11,151	14,763	33,533	11,143	14,761	33,533
45	9,141	13,061	33,533	9,473	13,312	33,533
50	7,745	12,032	33,533	7,878	12,147	33,533

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.9 apresenta o erro volumétrico percentual aproximado para a geometria quadrada. O erro sinalizado indica se o volume simulado ficou abaixo ou acima do volume alvo, enquanto o erro absoluto expressa a magnitude global da diferença.

Tabela 5.9 – Erro volumétrico percentual da geometria quadrada

Prof. (mm)	**Erro sinalizado (%)**	**Erro absoluto (%)**
5	-34,0	42,5
10	-28,5	41,8
15	-24,5	40,8
20	-19,0	37,0
25	-14,0	32,0
30	-8,5	26,0
35	-3,5	20,8
40	+0,5	16,0
45	+4,5	11,8
50	+7,8	8,8

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

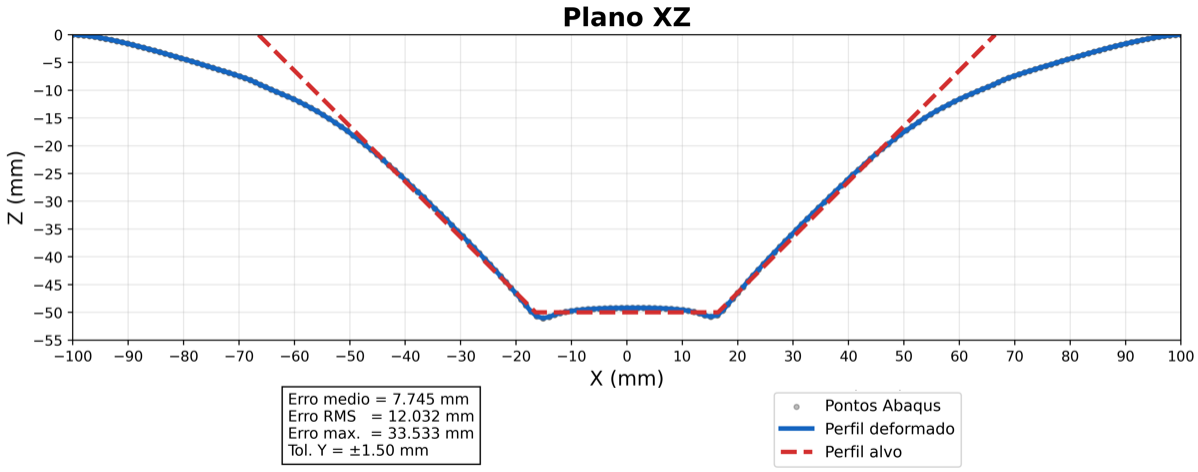
Para a geometria quadrada, o plano XY apresentou desvios elevados em profundidades intermediárias, principalmente em 20 mm e 40 mm, com erros superiores a 8 mm. Na profundidade final de 50 mm, o erro atual em relação ao alvo reduziu para 2,840 mm, indicando melhora importante da reprodução do contorno final.

Os perfis XZ e YZ apresentaram comportamento praticamente simétrico, com reduções progressivas dos erros médios. Em 50 mm, os erros médios foram de 7,745 mm em XZ e 7,878 mm em YZ. Essa proximidade entre os planos indica resposta equilibrada da geometria quadrada nas direções principais, apesar da presença de cantos vivos.

A análise volumétrica mostrou redução contínua do erro absoluto, de aproximadamente 42,5% para 8,8%. O erro sinalizado aproximou-se de zero em torno de 40 mm e tornou-se positivo nas maiores profundidades, atingindo cerca de +7,8% em 50 mm. Assim, a geometria quadrada apresenta boa convergência volumétrica, mas ainda com desvios localizados nas bordas e nos cantos.

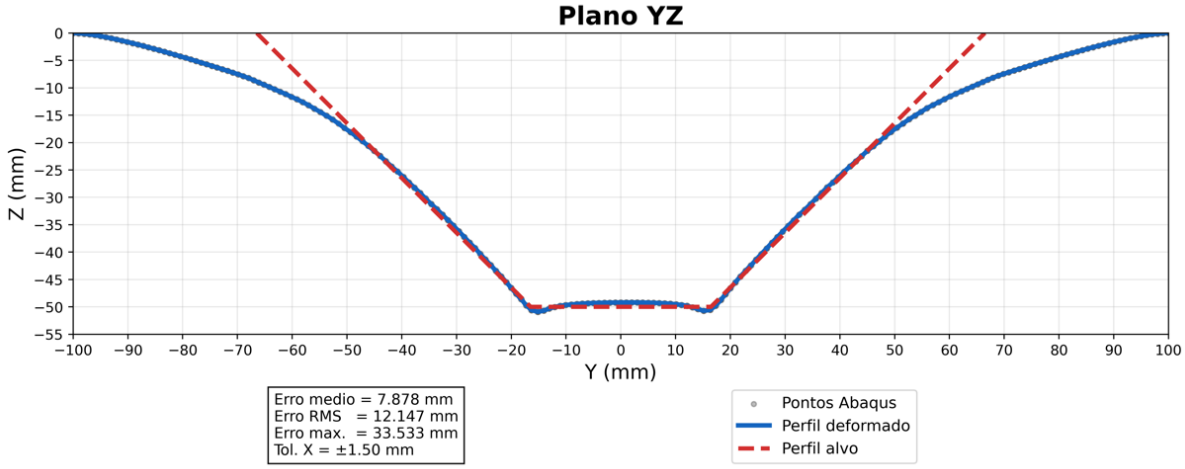
As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam a comparação geométrica da geometria triangular na profundidade final de 50 mm, incluindo os planos XY, XZ e YZ.

Figura 5.10 – Comparativo geométrico da geometria quadrada plano XZ na profundidade de 50 mm



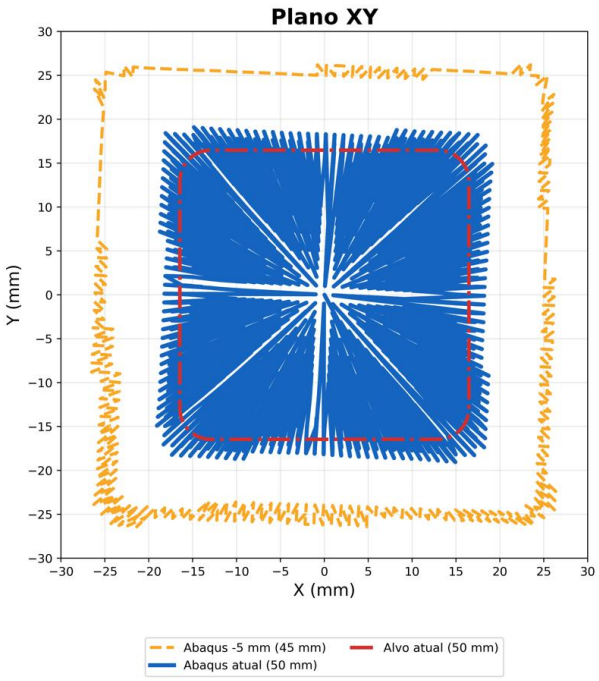
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

Figura 5.11 – Comparativo geométrico da geometria quadrada plano YZ na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

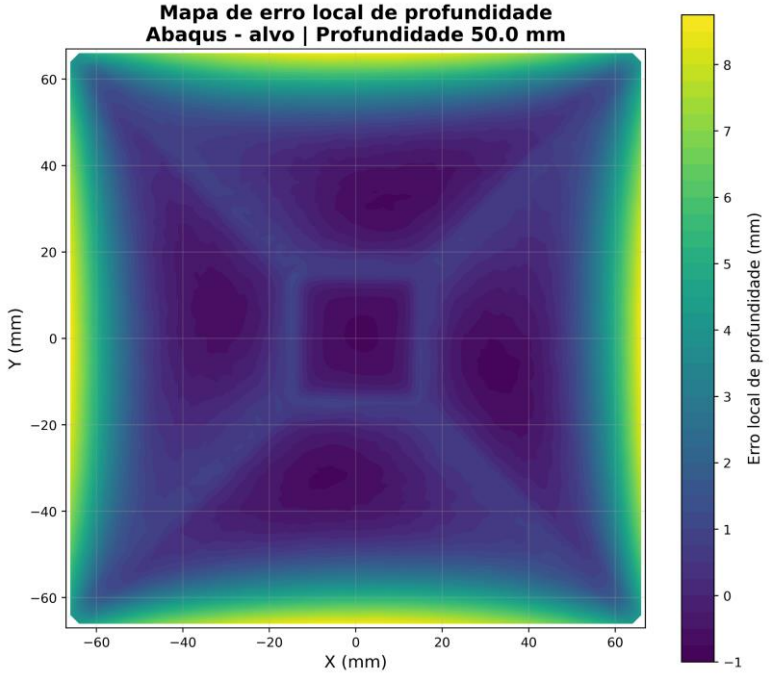
Figura 5.12– Comparativo geométrico da geometria quadrada plano XY na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Figura 5.13 apresenta o mapa de erro local de profundidade da geometria quadrada para 50 mm, permitindo identificar as regiões críticas da cavidade.

Figura 5.13 – Mapa de erro local de profundidade da geometria quadrada em 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

5.5 Geometria Hexagonal

A Tabela 5.10 apresenta os desvios no plano XY para a geometria hexagonal. Esses valores permitem avaliar a diferença entre o perímetro deformado e o perímetro de referência em diferentes profundidades de análise.

Tabela 5.10 – Desvios no plano XY da geometria hexagonal

Prof. (mm)	Erro atual x alvo (mm)	Erro RMS (mm)	Erro máx. (mm)	Tol. Z (mm)
5	3,080	3,148	3,906	±2,00
10	3,144	3,157	3,948	±3,00
15	4,105	4,113	4,721	±4,50
20	5,095	5,127	6,261	±6,75
25	5,660	5,675	7,020	±6,75
30	5,872	5,882	6,923	±6,75
35	5,873	5,888	7,068	±6,75
40	4,255	4,386	6,832	±6,75
45	2,899	2,944	4,385	±4,50
50	2,116	2,332	7,721	±2,00

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.11 reúne os desvios geométricos médios, RMS e máximos nos perfis XZ e YZ da geometria hexagonal. A comparação entre esses planos permite verificar a influência da orientação da seção na reprodução da cavidade.

Tabela 5.11 – Desvios geométricos nos perfis XZ e YZ da geometria hexagonal

Prof. (mm)	XZ médio	XZ RMS	XZ máx.	YZ médio	YZ RMS	YZ máx.
5	26,465	32,615	66,664	29,652	37,729	75,749
10	23,585	29,388	61,768	26,113	33,846	70,274
15	21,177	26,511	56,903	22,982	30,207	64,545
20	18,830	23,737	52,040	19,831	26,641	59,056
25	16,536	21,077	47,127	16,714	22,978	53,228
30	14,407	18,644	42,276	14,026	19,785	47,704
35	12,286	16,280	37,381	11,416	16,575	41,922

40	10,227	14,226	32,169	9,084	13,597	36,129
45	8,547	12,169	28,575	6,902	10,771	30,100
50	7,073	10,730	28,575	4,990	8,197	23,925

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Tabela 5.12 apresenta o erro volumétrico percentual aproximado para a geometria hexagonal. O erro sinalizado indica se o volume simulado ficou abaixo ou acima do volume alvo, enquanto o erro absoluto expressa a magnitude global da diferença.

Tabela 5.12 – Erro volumétrico percentual da geometria hexagonal

Prof. (mm)	**Erro sinalizado (%)**	**Erro absoluto (%)**
5	-34,0	41,7
10	-30,8	42,3
15	-26,2	39,6
20	-20,0	33,5
25	-14,7	26,4
30	-10,8	21,2
35	-7,1	16,7
40	-3,2	12,6
45	-0,1	9,1
50	+3,1	5,8

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

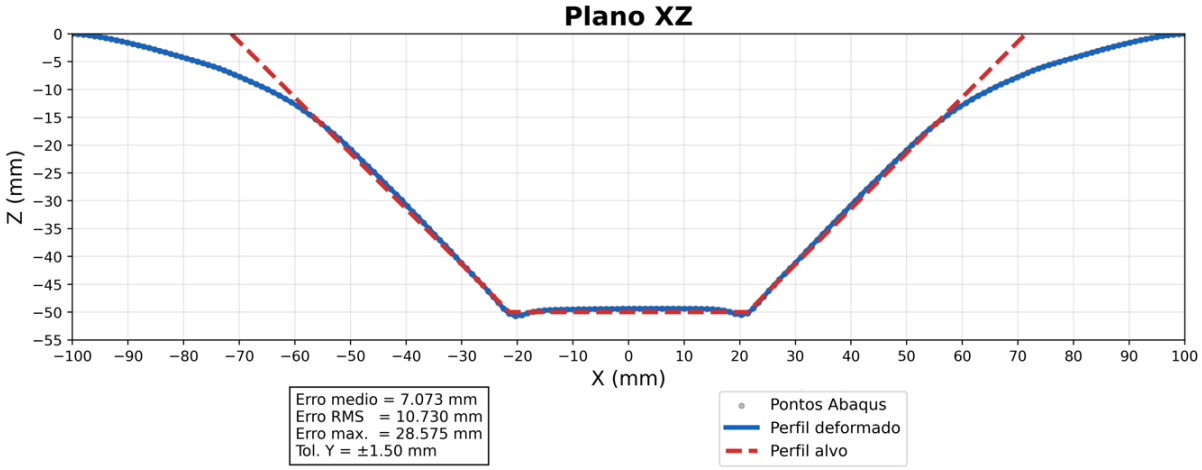
Para a geometria hexagonal, o plano XY apresentou erros menores nas profundidades iniciais e redução expressiva na condição final. Em 50 mm, o erro atual em relação ao alvo foi de 2,116 mm, com erro RMS de 2,332 mm. Os desvios intermediários foram mais elevados entre 20 mm e 35 mm, indicando influência das arestas e das mudanças de direção da trajetória.

Nos perfis XZ e YZ, observou-se redução progressiva e consistente dos desvios. O erro médio em XZ reduziu de 26,465 mm para 7,073 mm, enquanto em YZ caiu de 29,652 mm para 4,990 mm. Esses valores mostram que a geometria hexagonal apresentou boa aproximação dos perfis de referência nas maiores profundidades.

O erro volumétrico sinalizado aproximou-se de zero em 45 mm e foi de aproximadamente +3,1% em 50 mm, enquanto o erro absoluto reduziu para cerca de 5,8%. Esse resultado indica que a geometria hexagonal apresentou a melhor concordância volumétrica entre as geometrias analisadas, embora ainda sejam observados desvios localizados próximos aos vértices e às bordas.

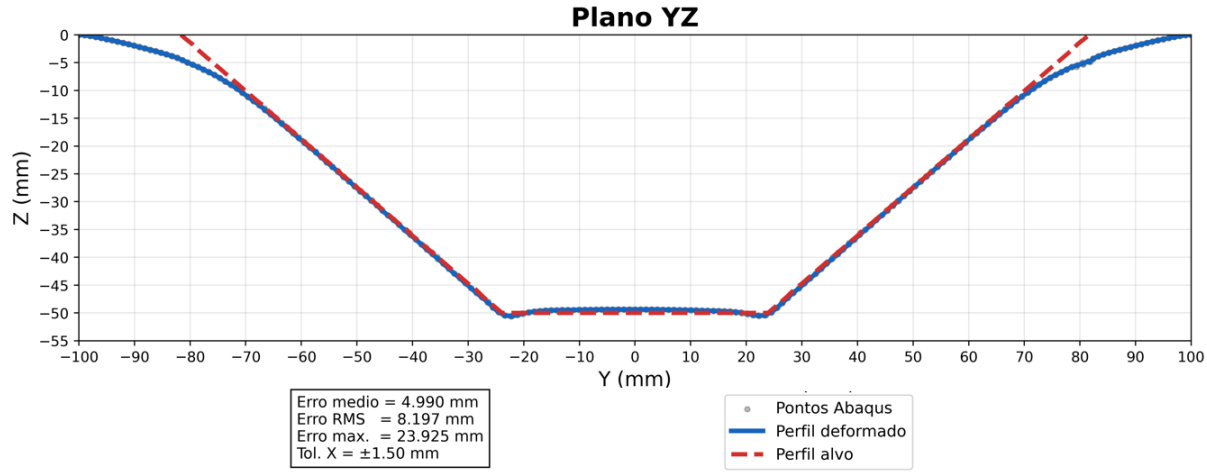
As Figuras 5.14, 5.15 e 5.116 apresentam a comparação geométrica da geometria triangular na profundidade final de 50 mm, incluindo os planos XY, XZ e YZ.

Figura 5.14 – Comparativo geométrico da geometria quadrada plano XZ na profundidade de 50 mm



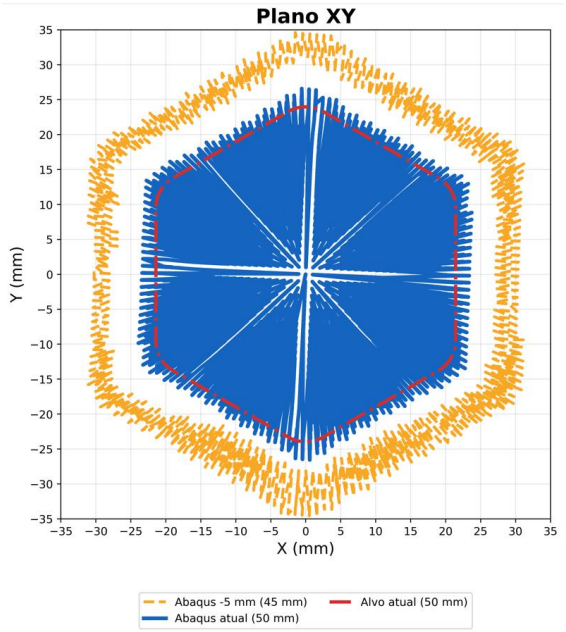
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

Figura 5.15 – Comparativo geométrico da geometria hexagonal plano YZ na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

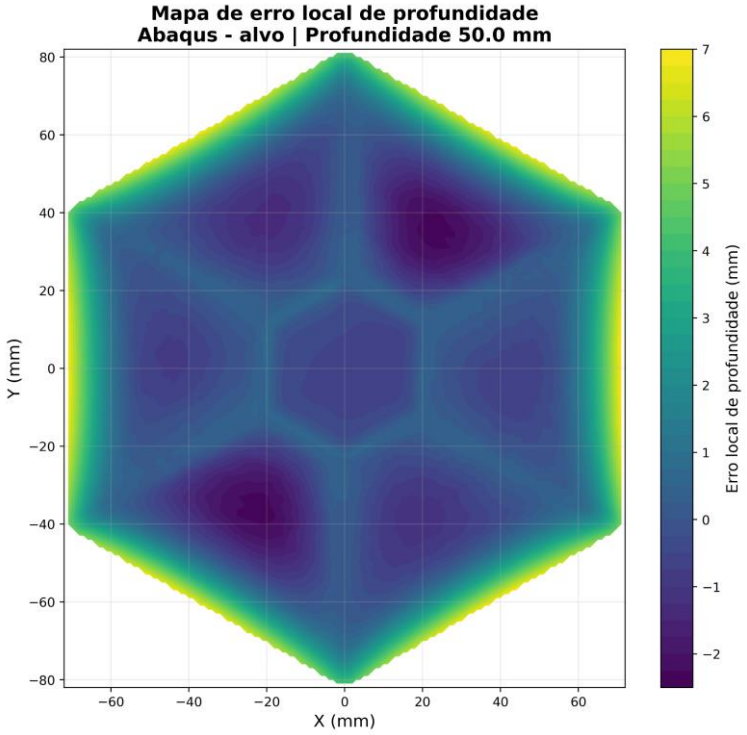
Figura 5.16– Comparativo geométrico da geometria hexagonal plano XY na profundidade de 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

A Figura 5.17 apresenta o mapa de erro local de profundidade da geometria hexagonal para 50 mm, permitindo identificar as regiões críticas da cavidade.

Figura 5.18 – Mapa de erro local de profundidade da geometria hexagonal em 50 mm



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou, por meio de simulação computacional, os desvios dimensionais e geométricos de peças obtidas por estampagem incremental em relação às geometrias especificadas em desenho, considerando seções circular, triangular, quadrada e hexagonal. A análise permitiu estabelecer relações entre a capacidade de reprodução geométrica do processo e as características de cada figura conformada.

A Tabela 6.1 sintetiza os principais resultados obtidos na profundidade final de 50 mm para as quatro geometrias analisadas.

Tabela 6.1 – Síntese comparativa dos resultados finais em 50 mm

Geometria	**Erro XY final (mm)**	**XZ médio final (mm)**	**YZ médio final (mm)**	**Erro volumétrico final (%)**	**Erro absoluto final (%)**
Circular	1,621	24,297	27,626	-2,5	67,0
Triangular	1,085	14,495	8,342	+12,5	14,5
Quadrada	2,840	7,745	7,878	+7,8	8,8
Hexaonal.	2,116	7,073	4,990	+3,1	5,8

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados das simulações.

As principais regiões críticas identificadas foram: distribuição não uniforme de profundidade e assimetria global na geometria circular; vértices, base inferior e arestas inclinadas na geometria triangular; cantos de 90°, bordas e transições parede-fundo na geometria quadrada; e vértices, mudanças de direção e regiões de borda na geometria hexagonal.

A comparação entre as geometrias mostra que a avaliação da estampagem incremental não deve se limitar ao erro no plano XY ou ao volume final da cavidade. A geometria circular apresentou baixo erro no contorno final em planta, porém os maiores desvios nos perfis XZ e YZ e erro absoluto volumétrico elevado, indicando compensações entre regiões com excesso e falta de profundidade. Assim, a proximidade do volume global não representa necessariamente boa fidelidade geométrica local.

A geometria triangular apresentou o menor erro final no plano XY, mas também evidenciou elevada sensibilidade aos vértices e às arestas inclinadas, com erro volumétrico positivo na profundidade final. A geometria quadrada apresentou comportamento equilibrado nos perfis XZ e YZ, com boa redução do erro absoluto volumétrico, mas manteve desvios associados aos cantos de 90° e às regiões de transição entre parede e fundo.

A geometria hexagonal apresentou o melhor equilíbrio geral entre erro volumétrico, erro nos perfis e reprodução do contorno. Embora os vértices e mudanças de direção ainda sejam regiões críticas, os desvios médios finais foram menores que os observados nas demais geometrias poligonais em pelo menos um dos planos de perfil. Dessa forma, entre os casos analisados, a seção hexagonal apresentou maior potencial para aplicação da estampagem incremental na fabricação de moldes, considerando simultaneamente a reprodução geométrica e a aproximação volumétrica.

Os resultados indicaram que todas as geometrias apresentaram aproximação progressiva ao volume de referência com o aumento da profundidade, porém com comportamentos distintos. A geometria hexagonal apresentou o melhor equilíbrio geral entre erro volumétrico final, erro nos perfis e estabilidade geométrica, enquanto a geometria circular mostrou baixo erro no contorno em planta, mas elevada discrepância nos perfis verticais e na distribuição local de profundidade.

As regiões críticas identificadas concentram-se principalmente nos vértices, cantos, bordas e transições entre paredes inclinadas e fundo da cavidade. Nas geometrias poligonais, essas regiões estão associadas às mudanças bruscas de direção do contorno. Na geometria circular, os desvios críticos estão mais relacionados à assimetria global e à distribuição não uniforme da profundidade.

Conclui-se que a estampagem incremental possui potencial para fabricação de moldes de diversas geometrias. Entretanto, para obtenção de maior precisão dimensional, é necessário o estudo de dizentes estratégias de compensação de trajetória e suavização de pontos críticos, principalmente nas regiões citadas anteriormente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora a estampagem incremental seja amplamente estudada na literatura, observa-se que grande parte dos trabalhos se concentra na análise isolada de determinados parâmetros de processo, como incremento vertical, raio da ferramenta, velocidade de avanço, atrito ou espessura da chapa. Dessa forma, ainda há carência de estudos que investiguem de maneira mais extensa e sistemática a influência combinada desses parâmetros sobre os desvios dimensionais, a precisão geométrica e a qualidade final das peças conformadas. Essa lacuna é especialmente relevante quando se consideram geometrias distintas e aplicações voltadas à fabricação de moldes, nas quais pequenas variações nos parâmetros de processo podem alterar significativamente a capacidade de reprodução da geometria especificada em desenho.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se validar experimentalmente as geometrias simuladas mantendo todos os parâmetros adotados, tais como, chapa, ferramenta, trajetória e fixação. Essa validação permitiria calibrar o coeficiente de atrito, retorno elástico e avanço, aumentando a confiabilidade da simulação

Também se sugere uma maior variação de parâmetros incluindo rotação, avanço, lubrificação, diâmetro de ferramenta, espessura de chapa e materiais de diferentes resistências mecânicas.

Outra possibilidade é investigar trajetórias com mais de um passe, trajetórias compensadas e trajetórias baseadas em características geométricas críticas. Essas estratégias podem reduzir desvios em vértices e regiões de maior curvatura, embora aumentem a complexidade de geração do caminho e o tempo de simulação.

Por fim, recomenda-se incorporar critérios adicionais de qualidade, como rugosidade superficial, tensões residuais, consumo energético e tempo de conformação. Esses indicadores são relevantes para avaliar a viabilidade industrial do ISF em comparação com usinagem, fundição e conformação convencional de chapas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, Daniel; SOUSA, Ricardo Alves de; TORCATO, Ricardo; PIRES, Liliana. **Incremental Forming as a Rapid Tooling Process**. Cham: Springer, 2019.

BEN SAID, Lotfi. **The incremental sheet forming; technology, modeling and formability: a brief review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, v. 236, n. 6, p. 2729–2755, 2022.

CERRO, I.; MAIDAGAN, E.; ARANA, J.; RIVERO, A.; RODRÍGUEZ, P. P. **Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process**. Journal of Materials Processing Technology, v. 177, n. 1–3, p. 404–408, 2006.

CHANG, Z.; LI, M.; CHEN, J. **Analytical modeling and experimental validation of the forming force in several typical incremental sheet forming processes**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 140, p. 62–76, 2019.

CUI, X.; LI, J.; MO, J.; FANG, J.; ZHU, Y.; ZHONG, K. **Investigation of large sheet deformation process in electromagnetic incremental forming**. Materials & Design, v. 76, p. 86–96, 2015.

FILICE, L.; FRATINI, L.; MICARI, F. **Analysis of material formability in incremental forming. CIRP Annals**, Manufacturing Technology, v. 51, n. 1, p. 199–202, 2002.

JESWIET, J.; MICARI, F.; HIRT, G.; BRAMLEY, A.; DUFLOU, J.; ALLWOOD, J. **Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. CIRP Annals** – Manufacturing Technology, v. 54, n. 2, p. 88–114, 2005.

JIANG, Z.; EHMANN, K. F.; CAO, J. **Prediction of forming temperature in electrically-assisted double-sided incremental forming using a neural network**. Journal of Materials Processing Technology, v. 302, 117486, 2022.

KAJAL, G.; TYAGI, M. R.; KUMAR, G. **A review on the effect of residual stresses in incremental sheet metal forming used in automotive and medical sectors. Materials Today**: Proceedings, v. 78, p. 524–534, 2023.

KULKARNI, S. S.; MOCKO, G. M. **Experimental investigation and finite element modeling of localized heating in convective heat-assisted single-point incremental forming.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 107, p. 945–957, 2020.

KUMAR, A. **Critical state-of-the-art literature review of surface roughness in incremental sheet forming: a comparative analysis**. Applied Surface Science Advances, v. 23, 100625, 2024.

LA, N.-T.; NGO, Q.-H.; VU, V.-D.; MAI, T.-H.; HO, K.-T. **Optimization of ultrasonic-assisted incremental sheet forming.** Materials, v. 17, n. 13, 3170, 2024.

LI, J.; LI, Y.; YUAN, H.; CHENG, Z.; YU, Y.; GHAFOOR, S.; LI, F. **Multi-stage finite element modeling of the deformation behavior during ultrasonic-assisted incremental sheet forming**. Journal of Computational Science, v. 72, 102077, 2023.

LI, W.; ATTALLAH, M. M.; ESSA, K. **Heat-assisted incremental sheet forming for high-strength materials – a review**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 124, p. 2011–2036, 2023.

MOSECKER, L.; GÖTTMANN, A.; SAEED-AKBARI, A.; BLECK, W.; BAMBACH, M.; HIRT, G. **Deformation mechanisms of Ti6Al4V sheet material during the incremental sheet forming with laser heating**. Key Engineering Materials, v. 549, p. 372–380, 2013.

PATEL, D.; GANDHI, A. **A review article on process parameters affecting incremental sheet forming (ISF). Materials Today**: Proceedings, v. 63, p. 368–375, 2022.

RIOFRIO SABANDO, M. **Evaluación del costo del proceso de estampado incremental de un punto (SPIF) en la fabricación de moldes para rotomoldeo**. 2024. Tesis (Maestría) – Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2024.