

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA - CCET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - PPGEMec**

PAULO HENRIQUE SILVA SANTOS

**Estudo sobre a ocorrência de fraturas de chapas metálicas no
processo de conformação incremental com o emprego de análises
numéricas por elementos finitos.**



São Carlos - SP
2025

PAULO HENRIQUE SILVA SANTOS

Estudo sobre a ocorrência de fraturas de chapas metálicas no processo de conformação incremental com o emprego de análises numéricas por elementos finitos.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Henrique Evangelista.

São Carlos - SP

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Paulo Henrique Silva Santos, realizada em 23/09/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Sergio Henrique Evangelista (UFSCar)

Profa. Dra. Andrea Madeira Kliauga (UFSCar)

Profa. Dra. Luciana Montanari (EESC/USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Dedico esse trabalho a Deus, a minha família, amigos e aos professores que contribuíram com essa jornada.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que em toda a sua sabedoria nos permite enfrentar os desafios e vence-los para alcançar e realizar nossos sonhos.

Agradeço a minha família que me apoiou nessa jornada, com palavras de incentivo, paciência e encorajamento.

Ao meu professor e orientador Sérgio Henrique Evangelista pelos conhecimentos compartilhados, paciência e incentivo.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEMec) pela oportunidade de aprender e compartilhar os conhecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo à pesquisa.

*"Há três métodos para ganhar sabedoria:
primeiro, por reflexão, que é o mais nobre;
segundo, por imitação, que é o mais fácil;
e terceiro, por experiência, que é o mais
amargo".*

(Confúcio)

Resumo

A conformação mecânica de chapas finas metálicas é uma tecnologia crescente e apropriada para suprir as necessidades da indústria por peças de geometrias complexas e baixo custo de fabricação. Para se fabricar tais peças, alguns processos são estudados e desenvolvidos, como usinagem, conformação com matriz e punção e conformação incremental. Na conformação incremental com chapas finas o processo é caracterizado pelo movimento de uma ferramenta com uma ponta de forma esférica ou semiesférica com trajetória programada por uma lógica CNC de modo a percorrer um caminho pré-determinado sobre a superfície de uma chapa com a imposição de deformações plásticas incrementais até a formação do perfil programado. A finalidade do processo incremental é proporcionar a fabricação de peças com uma ampla diversidade de geometrias e perfis sem a utilização de matrizes e punção, o que reduz o custo além de promover a rápida fabricação de peças para protótipos. As tensões e deformações são ajustadas a partir dos parâmetros da máquina, como velocidade de avanço, rotação da ferramenta, lubrificação e refrigeração, por exemplo. Neste trabalho investigou-se a influência do parâmetro de velocidade de rotação da ferramenta no processo de estampagem incremental (EI) a partir dos diagramas de curva limite de conformação (CLC) pelos critérios de trajetória de deformação, estado de deformação final, além de analisar as espessuras, profundidade de estampagem e a triaxialidade de tensões. Para as análises foram realizados experimentos numéricos no programa ABAQUS® pelo método dos elementos finitos com as propriedades do experimento físico disponível no artigo de Magalhães, D., *et al.*, (2025), além de implementar com e sem o modelo de dano dúctil. O material implementado foi uma chapa de alumínio com geometria de 55 x 55 x 1 mm do material híbrido multicamadas de alumínio AA1050/AA7050 produzido por junção por laminação acumulada. Os resultados apontaram que a rotação da ferramenta apresentou pouca influência nos critérios avaliados, assim como houve pouca influência do atrito e da densidade nos casos experimentados, porém foram encontradas diferenças nos resultados com e sem modelo de dano dúctil. Além disso os resultados apontaram que a triaxialidade de tensões não é constante no tempo e existe um gradiente de triaxialidade ao analisar em um no instante do tempo.

Palavras-chave: Conformação incremental; Conformação; Elementos finitos, Critério de dano dúctil.

Abstract

The mechanical forming of thin metal sheets is a growing technology that is well suited to meeting the industry's need for parts with complex geometries and low manufacturing costs. To manufacture such parts, a number of processes are being studied and developed, such as machining, die and punch forming, and incremental forming. In incremental forming with thin sheets, the process is characterized by the movement of a tool with a spherical or semi-spherical tip with a trajectory programmed by CNC logic in order to follow a predetermined path on the surface of a sheet with the imposition of incremental plastic deformations until the programmed profile is formed. The purpose of the incremental process is to enable the manufacture of parts with a wide variety of geometries and profiles without the use of dies and punches, which reduces costs and promotes the rapid manufacture of prototype parts. Stresses and deformations are adjusted based on machine parameters such as feed speed, tool rotation, lubrication, and cooling, for example. This study investigated the influence of the tool rotation speed parameter on the incremental stamping (EI) process based on the forming limit curve (FLC) diagrams using the criteria of deformation trajectory and final deformation state, in addition to analyzing thicknesses, stamping depth, and triaxiality of stresses. For the analyses, numerical experiments were performed in the ABAQUS® program using the finite element method with the properties of the physical experiment available in the article by Magalhães, D., *et al.*, (2025), in addition to implementing it with and without the ductile damage model. The material implemented was an aluminum sheet with a geometry of 55 x 55 x 1 mm of the AA1050/AA7050 aluminum multilayer hybrid material produced by accumulated rolling. The results showed that tool rotation had little influence on the criteria evaluated, as did friction and density in the cases tested, but differences were found in the results with and without the ductile damage model. In addition, the results showed that the triaxiality of stresses is not constant over time and that there is a triaxiality gradient when analyzing at a single point in time.

Keywords: Incremental forming; Forming; Finite elements, Failure criterion.

Lista de Figuras

Figura 1 - Configurações de estampagem incremental. (a) ponto simples - sem apoio. (b) ponto duplo - com apoio.....	4
Figura 2 - Sistema de estampagem incremental de ponto simples. (a) situação inicial. (b) situação final.	4
Figura 3 - Sistema de estampagem incremental de ponto duplo. (a) situação inicial com suporte estático. (b) situação final com suporte estático. (c) situação inicial com suporte específico. (d) situação final com suporte específico.	5
Figura 4 - Variação da temperatura com a rotação em sentido horário (CW) e sentido anti-horário (ACW).....	8
Figura 5 - Exemplo de ferramenta semiesférica utilizada no processo de estampagem incremental.....	10
Figura 6 - Trajetória da ferramenta em espiral.	11
Figura 7 - Modos de deformação da CLC.	14
Figura 8 - Representação do ensaio de Nakazima.	15
Figura 9 - Representação esquemática dos limites de conformação da EI em relação aos de estampagem e estampagem profunda.....	16
Figura 10 - Regiões da CLC.	17
Figura 11 - Direção de corte dos corpos de prova para estudo da anisotropia.	18
Figura 12 - Efeito do encruamento na CLC.....	19
Figura 13 - Representação do conceito fundamental dos elementos finitos.....	20
Figura 14 - Resposta tensão-deformação uniaxial típica de uma amostra de metal. ...	24
Figura 15 - Curva tensão-deformação com degradação progressiva de dano.	26
Figura 16 - Forma tabular.	27

Figura 17 - Fluxograma da metodologia proposta.....	29
Figura 18 - Geometria do conjunto para o experimento numérico.....	31
Figura 19 - Visa de corte do conjunto.....	32
Figura 20 - Dimensões das peças modeladas.....	32
Figura 21 - Gráfico tensão x deformação das chapas multicamadas de AA1050/AA7050.....	34
Figura 22 - Malha adotada para cada componente.	35
Figura 23 - Representação gráfica da trajetória com ângulo inicial de 20° criada no programa e GNU/ Octave.	37
Figura 24 - Representação gráfica da trajetória com ângulo inicial de 25° criada no programa e GNU/ Octave.	37
Figura 25 - Representação gráfica da trajetória com ângulo inicial de 30° criada no programa GNU/ Octave.	37
Figura 26 - Ponto de referência no punção.	38
Figura 27- Sentido de rotação da trajetória e da ferramenta.	38
Figura 28 - Lado externo da chapa para avaliação dos resultados.....	43
Figura 29 - Elemento 1618 que apresenta primeira fratura na condição de ângulo inicial de 20°	43
Figura 30 - Posição dos elementos - ângulo inicial de 20°.....	43
Figura 31 – Trajetórias das deformações para o experimento numérico com angulo inicial de 20°, rotação da ferramenta de 1750 rpm, $\rho = 2,7\text{g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$	44
Figura 32 - Possíveis locais de análise para coleta de dados.	45
Figura 33 - Comparação dos círculos do experimento físico com os elementos do experimento numérico.	45

Figura 34 - Comparação das médias das trajetórias das deformações variando a densidade e o coeficiente de atrito - Angulo inicial de 20° e rotação da ferramenta com 1750 rpm.	46
Figura 35 - Comparação da curva tensão x deformação utilizada e alternativa.	47
Figura 36 - Comparação das médias das trajetórias das deformações variando a curva tensão x deformação - Angulo inicial de 20° e rotação da ferramenta com 1750 rpm.	48
Figura 37 - Comparação das médias das trajetórias das deformações variando a densidade, coeficiente de atrito e curva tensão x deformação - Angulo inicial de 25° e rotação da ferramenta com 1750 rpm.	49
Figura 38 - Profundidade da chapa no momento da fratura.....	49
Figura 39 - Círculos e elementos analisados no experimento numérico com angulo inicial de 20°.	51
Figura 40 - Trajetórias das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 20°.	51
Figura 41 - Estado final de deformação em uma linha no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 20°.	52
Figura 42 - Círculos e elementos analisados no experimento numérico com angulo inicial de 25°.	53
Figura 43 - Trajetórias das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 25°.	53
Figura 44 - Estado final de deformação em uma linha no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 20°.	54
Figura 45 - Círculos e elementos analisados no experimento numérico com angulo inicial de 30°.	55
Figura 46 - Trajetórias das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 30°.	55

Figura 47 - Estado final de deformação em uma linha no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 30°.....	56
Figura 48 - Evolução da espessura do elemento 1618 na condição de ângulo inicial de 20° ao longo do tempo.	57
Figura 49 - Evolução da espessura do elemento 1615 na condição de ângulo inicial de 25° ao longo do tempo.	57
Figura 50 - Evolução da espessura do elemento 1728 na condição de ângulo inicial de 30° ao longo do tempo.	58
Figura 51 - Espessura dos elementos no instante da fratura - ângulo inicial de 20° e 1750 rpm.	58
Figura 52 - Evolução da espessura dos elementos no tempo - ângulo inicial de 20° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.	59
Figura 53 – Triaxialidade geral no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 20°, a) lado interno e b) lado externo.....	61
Figura 54 – Triaxialidade geral no instante 0,7 s antes da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 20°, a) lado interno e b) lado externo.	61
Figura 55 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo - lado interno da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 20°.....	62
Figura 56 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo lado externo da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 20°.....	62
Figura 57 – Triaxialidade geral no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 25°, a) lado interno e b) lado externo.....	63
Figura 58 - Triaxialidade geral no instante 0,9 antes da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 25°, a) lado interno e b) lado externo.	63
Figura 59 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo lado interno da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 25°.....	64

Figura 60 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo lado externo da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 25°	64
Figura 61 - Triaxialidade no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 30°, a) lado interno e b) lado externo.	65
Figura 62 - Triaxialidade no instante 0,9 antes da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 30°, a) lado interno e b) lado externo.	65
Figura 63- Triaxialidade no elemento crítico ao longo do tempo lado interno da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 30°.....	66
Figura 64 - Triaxialidade no elemento crítico ao longo do tempo lado externo da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 30°.....	66
Figura 65 - Posição dos elementos - ângulo inicial de 25°	86
Figura 66 - Trajetórias das deformações para o experimento numérico com angulo inicial de 25°, rotação da ferramenta de 1750 rpm, $\rho = 2,7\text{g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$	86
Figura 67 - Evolução da espessura dos elementos no tempo - ângulo inicial de 25° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.	87
Figura 68 - Posição dos elementos - ângulo inicial de 30°	87
Figura 69 - Trajetórias das deformações para o experimento numérico com angulo inicial de 30°, rotação da ferramenta de 1750 rpm, $\rho = 2,7\text{g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$	87
Figura 70 - Evolução da espessura dos elementos no tempo - ângulo inicial de 30° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.	88

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resumo das principais propriedades de tração.	33
Tabela 2 - Anisotropia dos materiais.	33
Tabela 3 - Evolução de dano implementado.	34
Tabela 4 - Planejamento experimental numérico - velocidades de rotação da ferramenta.	40
Tabela 5 - Planejamento para organização da apresentação dos resultados.	40
Tabela 6 - Comparação da profundidade no momento da fratura.	50
Tabela 7 - Profundidade Δz no experimento com angulo inicial da ferramenta de 20°	60
Tabela 8 - Profundidade Δz no experimento com angulo inicial da ferramenta de 25°	60
Tabela 9 - Profundidade Δz no experimento com angulo inicial da ferramenta de 30°	60
Tabela 10 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da velocidade de rotação da fermenta no processo de EI.	76
Tabela 11 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da velocidade de avanço da fermenta no processo de EI.	77
Tabela 12 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento do incremento vertical na conformabilidade no processo de EI.	78
Tabela 13 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento do diâmetro da ferramenta na conformabilidade no processo de EI.	79
Tabela 14 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito da forma da ponta de ferramenta na conformabilidade no processo de EI.	80

Tabela 15 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito da geometria das peças na conformabilidade no processo de EI.....	80
Tabela 16 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da espessura da chapa na conformabilidade no processo de EI.....	81
Tabela 17 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito das propriedades mecânicas da chapa na conformabilidade no processo de EI.....	82
Tabela 18 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito da trajetória da ferramenta na conformabilidade no processo de EI.....	83
Tabela 19 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da temperatura de conformação na conformabilidade no processo de EI.....	84
Tabela 20 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito das condições de lubrificação na conformabilidade no processo de EI.....	85

Lista de Siglas

ACW	Sentido anti-horário
ARB	Junção por laminação acumulada
CLC	Curva limite de conformabilidade
CLC-EI	Curva limite de conformabilidade da estampagem incremental
CNC	Comando numérico computadorizado
CW	Sentido horário
DEMa	Departamento de Engenharia de Materiais
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
EI	Estampagem incremental
ISO	Organização internacional de padronização
FLD	Diagrama limite de conformação
FLSD	Diagrama de tensão limite de conformação
LMC	Laboratório de Mecânica computacional
MEF	Método dos elementos finitos
MSFLD	Diagrama de limite de conformação de Müschenborn-Sonne
NULEEN	Núcleo de Laboratórios de Ensino de Engenharia
SPIF	Estampagem incremental de ponto único
TPIF	Estampagem incremental de duplo ponto
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
RP	Ponto de referência

Lista de Símbolos

D	Variável de dano geral
d	Deslocamento plástico equivalente
di	Variável de dano escalar
F	Parâmetro de Hill
G	Parâmetro de Hill
H	Parâmetro de Hill
L	Parâmetro de Hill
M	Parâmetro de Hill
N	Parâmetro de Hill
L	Comprimento característico do elemento
n	Coefficiente de encruamento
N_{act}	Conjunto de mecanismos ativos
p	Tensão média [MPa]
q	Tensão de Von Mises [MPa]
r	Anisotropia ou coeficiente Lankford
R_0	Coefficiente de anisotropia na direção 0°
R_{45}	Coefficiente de anisotropia na direção 45°
R_{90}	Coefficiente de anisotropia na direção 90°
\bar{r}	Anisotropia média
\emptyset	Diâmetro [mm]
ε	Deformação
$\bar{\varepsilon}$	Deformação equivalente
ε_1	Deformação principal máxima
ε_2	Deformação principal mínima
ε_{ij}	Deformação plástica
σ	Tensão [MPa]
$\bar{\sigma}$	Tensão equivalente [MPa]
$\bar{\sigma}_{Hill}$	Tensão Equivalente no modelo de Hill [MPa]
σ_{xx}	Tensão normal na direção x [MPa]
σ_{yy}	Tensão normal na direção y [MPa]

σ_{zz}	Tensão normal na direção z [MPa]
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy [MPa]
τ_{xz}	Tensão de cisalhamento no plano xz [MPa]
τ_{yz}	Tensão de cisalhamento no plano yz [MPa]
η	Triaxialidade
λ	Multiplicador plástico
$\bar{\epsilon}_D^{pl}$	Deformação plástica equivalente
$\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$	Taxa de deformação equivalente
ω_D	Acumulo de dano
$\Delta\omega_D$	Incremento de dano
$\bar{\sigma}$	Tensor de tensão efetivo ou não danificado [MPa]
σ_{y0}	Tensão de escoamento no início do dano [MPa]
$\bar{\epsilon}_0^{pl}$	Deformação plástica equivalente no início do dano
$\bar{\epsilon}_f^{pl}$	Deformação plástica equivalente na falha
G_f	Dissipação de energia
\bar{u}^{pl}	Deslocamento plástico efetivo
Δz	Profundidade da chapa [mm]

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivo Geral.....	2
1.2.	Objetivos específicos	2
2.	Revisão bibliográfica	3
2.1.	Processos de estampagem incremental	3
2.2.	Parâmetros da estampagem incremental	6
2.2.1.	Rotação da ferramenta	7
2.2.2.	Velocidade de avanço XY	8
2.2.3.	Incremento vertical	9
2.2.4.	Parâmetros da ferramenta	9
2.2.5.	Geometria da peça.....	10
2.2.6.	Trajetória da ferramenta.....	11
2.2.7.	Temperatura de formação	12
2.2.8.	Condições de lubrificação.....	12
2.2.9.	Curva limite de conformação.....	13
2.3.	Elementos finitos	19
2.4.	Modelo de dano.....	22
2.4.1.	Modelo de iniciação do dano	25
2.4.2.	Modelo de evolução do dano	26
3.	Materiais e métodos	29
3.1.	Métodos.....	29

3.2.	Materiais - Modelo de Elementos Finitos	30
3.3.	Planejamento experimental numérico.....	39
4.	Resultados e Discussão	42
4.1.	Resultados preliminares	42
4.2.	Resultados principais	50
4.3.	Resultados complementares.....	60
5.	Conclusão.....	68
6.	Sugestões de trabalhos futuros.....	70
	Referências.....	71
	ANEXO I.....	76
	APÊNDICE I	86

1. Introdução

É crescente a necessidade da ampliação da fronteira do conhecimento com o desenvolvimento de novos processos e técnicas de fabricação que atendam a setores específicos e emergentes do mercado e da indústria, como por exemplo, o setor médico, ortopédico, automobilístico e a indústria aeroespacial (Lopes, 2013).

Para atender esse mercado um dos processos já solidificado e difundido é o processo de conformação mecânica que é uma técnica amplamente utilizada. Em seu conceito fundamental deforma o material sólido no regime plástico, modificando a geometria até a forma desejada (Bresciani *et al.* 2011).

A modificação ocorre por meio da aplicação de forças externas utilizando ferramentas e matrizes específicas para a fabricação de peças. São exemplos de conformação mecânica os processos de laminação, trefilação, forjamento e conformação de chapas (Bresciani *et al.* 2011).

Um dos processos desenvolvidos é a estampagem incremental (EI), esse processo é realizado sem a utilização de matrizes e punções, assim reduzindo o custo de fabricação do ferramental para o processo e ampliando a possibilidade de fabricação de diversas geometrias com o mesmo ferramental. Em contrapartida é um processo de baixa produtividade mais adequado a pequenos lotes ou peças de protótipos (Kumar Y. e Kumar, 2015).

Apesar do conceito de fabricação estabelecido, o processo EI requer novos estudos dos seus parâmetros que influenciam no limite de conformação e na ocorrência de falhas por afinamento ou trincas. Esses parâmetros são estudados a partir de experimentos físicos ou numéricos, e um dos métodos numéricos é a análise por elementos finitos, que buscam prever o comportamento do material durante o processo conformação incremental (Fish e Belytschko, 2009).

1.1. Objetivo Geral

Identificar por meio de análises numéricas os melhores ajustes de velocidade de rotação da ferramenta no processo de conformação incremental de chapas finas multicamadas de alumínio AA1050/AA7050, com o propósito de entender como esse parâmetro interfere na ocorrência de fraturas no contexto de modelo de dano e de curva limite de conformação.

1.2. Objetivos específicos

- Analisar o comportamento do material em diferentes configurações de experimentos numéricos, variando os valores do parâmetro de velocidade rotação do processo de estampagem incremental implementado no programa ABAQUS®;
- Gerar os diagramas de curva limite de conformação das diferentes configurações dos parâmetros de velocidade de rotação, plotando nos gráficos os valores das deformações principais encontrados nos experimentos numéricos;
- Estimar o limite de processo até a falha segundo análises por elementos finitos, analisando os diagramas criados a partir das informações de deformação coletadas dos experimentos numéricos realizados no programa ABAQUS®;
- Identificar a influência da velocidade de rotação da ferramenta sobre a ocorrência de trincas por afinamento, comparando as trajetórias de deformação para cada caso estudado no contexto da curva limite de conformação.

2. Revisão bibliográfica

Nessa seção é apresentada uma pesquisa bibliográfica sobre os conceitos básicos relacionados ao tema. São apresentados conceitos sobre processos de conformação, mecânica do dano e elementos finitos.

2.1. Processos de estampagem incremental

Dada a crescente necessidade de fabricar produtos em tempos menores, com baixos custos, peças únicas ou peças de protótipos, surgem novos processos de fabricação de prototipagem rápida, que atenda as demandas do mercado (Lopes, 2013).

Em concordância, Sergio (2023) justifica a criação de novos processos de fabricação para obter produtos de maneiras mais rápidas, menos onerosas, com mais qualidade e de produtividade sustentável. Neste contexto o estudo sobre o processo de conformação incremental de chapas está crescente devido a sua flexibilidade e fácil aplicação.

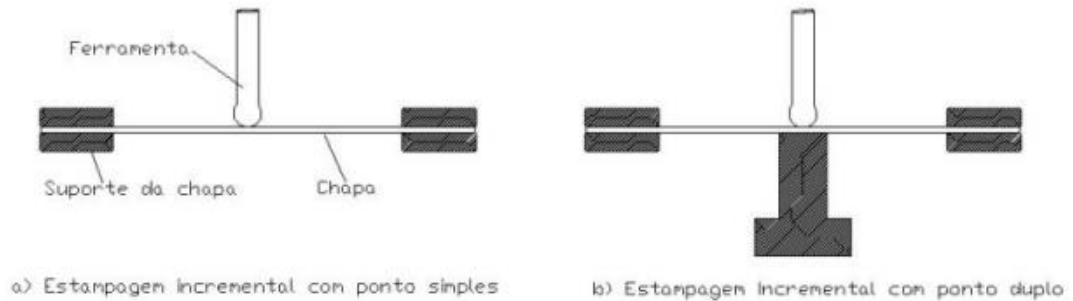
Lopes (2013) e Sérgio (2023) concordam que o processo de estampagem incremental (EI) é uma tecnologia de deformação local e progressiva. Diferente dos processos tradicionais de estampagem profunda a geometria final é gerada pela trajetória de uma ferramenta pequena e simples com passos axiais incrementais que deformam a chapa metálica que está fixada por um prensa chapas.

Por não necessitar de matrizes e ferramentas específicas o processo de conformação incremental torna-se flexível para produzir produtos personalizados, rápida entrega dependendo da peça e elevado potencial de aplicação na fabricação de protótipos e pequenos lotes, porém não recomendado para fabricação de grandes lotes e alta produtividade Além de que esse processo requer menos forças de conformação, assim reduzindo a capacidade e tamanho de máquinas e equipamentos.

No processo de conformação incremental a chapa metálica é conformada por uma ou duas ferramentas com ponta semiesférica que deforma o material de forma localizada e progressiva, e seu trajeto é controlado por um braço robótico ou uma máquina CNC. Kumar Y. e Kumar (2015) descrevem dois processos de conformação incremental, a estampagem incremental de contato único (SPIF) (*Single Point Incremental Forming*) que utiliza uma

ferramenta, e processo incremental de contato duplo (TPIF) (*Two point incremental forming*) que utiliza duas ferramentas, conforme apresentado na Figura 1.

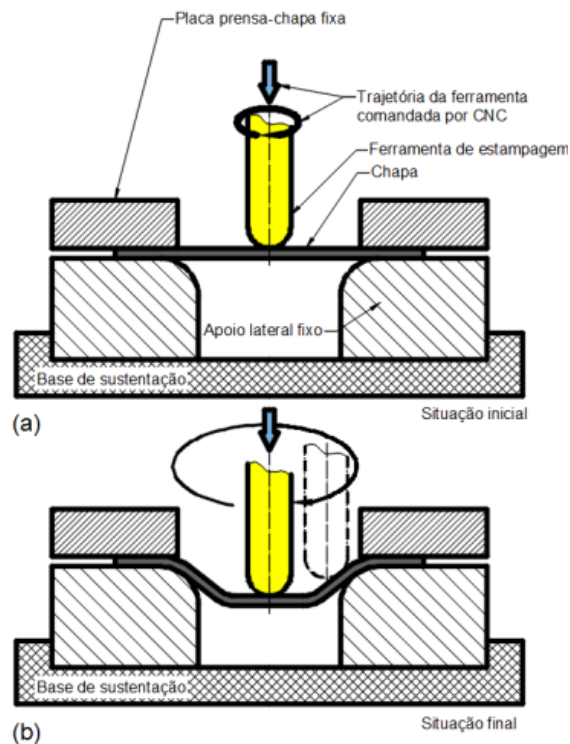
Figura 1 - Configurações de estampagem incremental. (a) ponto simples - sem apoio. (b) ponto duplo - com apoio.



Fonte: Silva, 2017.

O conceito de estampagem incremental de contato único ou ponto simples, está em realizar a conformação da chapa de forma livre sem o apoio de suporte ou contra ferramenta. O processo ocorre a partir do contato da ferramenta semiesférica com a superfície da chapa e ao realizar movimentos axiais incrementais negativos (vertical para baixo), e gradativos conformam a chapa, como apresenta a Figura 2.

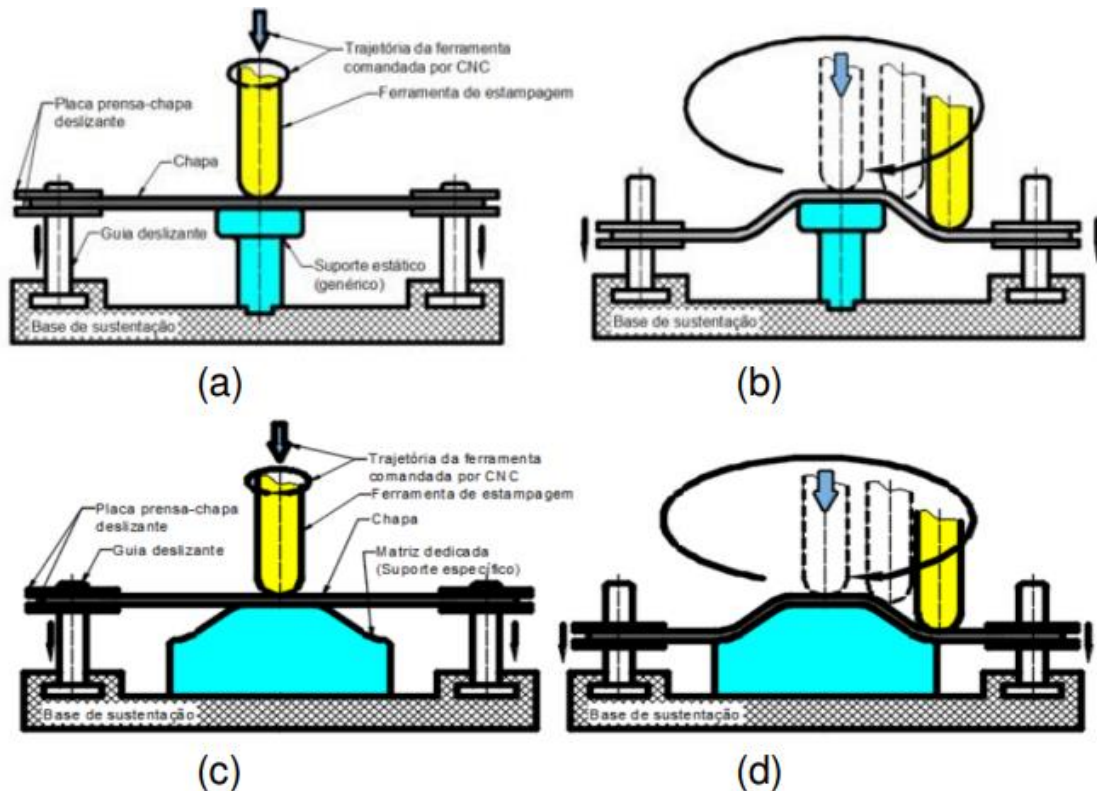
Figura 2 - Sistema de estampagem incremental de ponto simples. (a) situação inicial. (b) situação final.



Fonte: Editado de Maximiliano, 2016.

O conceito de estampagem incremental com ponto duplo utiliza-se da forma fundamental do processo de ponto único e acrescenta um apoio rígido na parte inferior da chapa, inserido como uma contra ferramenta. Além disso o processo de ponto duplo pode ser de dois tipos, conforme apresentado na Figura 3 (Jeswiet e Young, 2005).

Figura 3 - Sistema de estampagem incremental de ponto duplo. (a) situação inicial com suporte estático. (b) situação final com suporte estático. (c) situação inicial com suporte específico. (d) situação final com suporte específico.



Fonte: Editado de Maximiliano, 2016.

Na estampagem incremental de ponto duplo estático a ferramenta movimentada-se de forma similar a técnica de ponto único, porém a chapa e o suporte da chapa se movimentam verticalmente por um sistema de guias lineares sobre um suporte estático que auxilia na conformação do material. O conceito dessa técnica é promovido pelo suporte estático que cria uma forma de apoio na chapa atuando como um punção fictício, além de determinar a forma final da peça, conforme apresentado na figura 3 (a) e (b).

Por sua vez, a estampagem incremental com matriz específica, figura 3 (c) e (d), utiliza-se do mesmo conceito supracitado da técnica de conformação incremental duplo estático. Porém nesse modelo utiliza-se uma matriz dedicada com a forma geométrica final da peça.

Essa matriz comumente é fabricada em materiais maciços de baixo custo, como por exemplos materiais poliméricos ou resina.

2.2. Parâmetros da estampagem incremental

De acordo com Bishnoi (2022) algumas das principais aplicações da estampagem incremental estão no setor automotivo, área médica e outros campos como coletores solares e a indústria aeroespacial, melhor descrito a seguir:

- Setor automotivo: Grandes empresas como Honda, Toyota, Aston Martin e Amino Corporation que desenvolveram inúmeras peças de suas linhas de produto, como para-lamas, capô, painel interno e etc (Hagan e Jeswiet, 2003), (Tekkaya *et al.*, 2015).
- Setor médico: O processo de estampagem incremental na fabricação de implantes possui algumas vantagens como prototipagem rápida, implantes personalizáveis e únicos. Além do menor custo de fabricação em relação a outros processos, como por exemplo um implante maxilo facial de titânio Araújo *et al.* (2013), implantes de joelho de titânio Oleksik *et al.* (2009), prótese craniana de material polimérico Bagudanch *et al.*, (2015), entre outros como Centeno *et al.* (2017), Fiorentino *et al.* (2012), Centeno *et al.* (2017) e Boulila *et al.* (2017).
- Outros setores: Na indústria aeroespacial o processo de estampagem incremental é utilizado em peças de aviões de caça, foguetes e ônibus espaciais, aeronaves, aviões de carga e aviões de passageiros, (Gupta *et al.* 2019). E em outra aplicação como na área de coletores solares é utilizado para aletas absorvedoras, devido a propriedades como estruturas leves e alto amortecimento de vibrações (Schreiber e Schaeffer, 2019).

Dada a versatilidade de aplicação do processo de estampagem incremental é notório o potencial de fabricação de peças e componentes em diversas áreas por sua qualidade de conformação, redução de custos, redução de desperdícios de materiais e a boa adaptabilidade para diferentes materiais e formas geométricas (Cheng, Z. *et al.*, 2020).

No entanto para perfis e formas mais complexas e materiais mais difíceis de conformar alguns aspectos como a qualidade superficial e a precisão geométrica necessitam de otimizações, desta maneira é necessário estudos e experimentos para identificar os melhores

parâmetros de conformação para o processo de estampagem incremental (Cheng, Z *et al.*, 2020).

Centeno *et al.* (2017), fabricaram uma prótese craniana de material polimérico utilizando os métodos de estampagem incremental de ponto simples e dois pontos. Eles concluíram que o processo de conformação incremental possui alto potencial para produzir formas mais complexas.

Existem alguns parâmetros a serem controlados no processo de estampagem incremental, alguns se assemelham aos de usinagem, como avanço cartesiano XY, incremento vertical ou avanço vertical em Z, rotação, diâmetro e trajetória da ferramenta. Outros parâmetros são específicos do processo de conformação, como retorno elástico, conformabilidade e ductilidade da chapa (Silva, 2017).

Desta maneira, baseado no artigo de Bishnoi (2022), na tese de doutorado Silva (2017) e no artigo do Mcanulty *et al.* (2017), que catalogaram e identificaram os parâmetros de conformação incremental, serão abordados a seguir os principais e mais relevantes parâmetros e sua influência no processo de estampagem incremental. No anexo I estão as tabelas com os parâmetros catalogados por esses autores.

2.2.1. Rotação da ferramenta

A rotação da ferramenta durante o processo de estampagem incremental é objeto de discussão, afinal alguns autores relatam uma melhora na conformabilidade do material como Xu *et al.* (2013), e outros autores que é necessário encontrar um valor ótimo da velocidade de rotação da ferramenta como Wang Z. *et al.* (2020). A rotação da ferramenta gera atrito e esse atrito produz calor, assim tornando a chapa mais dúctil e, portanto, mais fácil de ser conformada, além da influência na rugosidade e qualidade superficial das peças conformadas, pois ferramentas estacionárias são prejudiciais para a qualidade superficial, como demonstradas por Durante *et al.* (2009), Obikawa *et al.* (2009) e Xu *et al.* (2013).

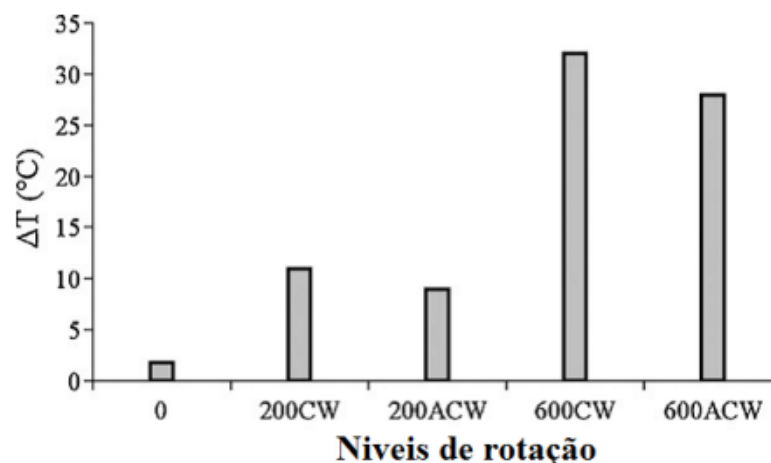
Xu, D. *et al.* (2013), realizaram uma série de experimentos nos quais a rotação da ferramenta variou entre 0 e 7000 rpm e os experimentos apontaram que de modo geral a conformabilidade do material melhorou com o aumento da velocidade de rotação.

Ainda de acordo com Xu, D. *et al.* (2013), a conformabilidade do material é determinada tanto pelo atrito quanto pelo aquecimento, assim com rotações de 0 a 1000 rpm o atrito é o principal fator para a mudança da conformabilidade, de 2000 a 7000 rpm o efeito térmico é a principal razão para a melhora da conformabilidade.

Quando a velocidade de rotação da ferramenta está acima de 3000 rpm as máximas temperaturas são altas o suficiente para ativar a recristalização dinâmica do material, assim a maleabilidade do material não é só influenciada pelo amolecimento da chapa, mas também pela influência do refinamento da microestrutura do material (Xu, D. *et al.*,2013).

Durante *et al.* (2009) estudaram a influência da temperatura de acordo com a rotação da ferramenta no processo de estampagem incremental, variando a ferramenta sem rotação, com 200 rpm e 600 rpm no sentido horário e anti-horário de acordo com a Figura 4.

Figura 4 - Variação da temperatura com a rotação em sentido horário (CW) e sentido anti-horário (ACW)



Fonte: Editado de Durante et al., 2009.

A figura 4 apresenta que a temperatura de trabalho não ultrapassou os 60 °C no pico de rotação da ferramenta a 600 rpm no sentido horário, além disso essa temperatura não interfere nas propriedades do lubrificante ou da chapa conformada. Entretanto, Durante *et al.* (2009) afirmam que a força de conformação tende a diminuir com o aumento da velocidade de rotação.

2.2.2. Velocidade de avanço XY

A velocidade de avanço é dada em mm/min e é a distância percorrida pela ferramenta sobre a peça por unidade de tempo e representa o movimento da ferramenta em relação a peça.

O parâmetro de velocidade de avanço tem influência direta no tempo de trabalho para a fabricação da peça e no acabamento superficial (Silva, 2017). Em relação ao tempo de trabalho quanto maior a velocidade de avanço menor será o tempo de fabricação.

Entretanto em relação a qualidade superficial e a conformabilidade da chapa, o aumento da velocidade de avanço provoca uma diminuição na conformabilidade e prejudica a qualidade superficial da chapa. Assim o aumento na velocidade de avanço sem o melhor dimensionamento pode ser desfavorável para o processo e necessita ser otimizado (Bishnoi, 2022), (Mcanulty. *et al.*,2017).

2.2.3. Incremento vertical

O incremento vertical, também denominado como tamanho do passo vertical é a distância a qual a ferramenta se move verticalmente para baixo após finalizar um passe ou *loop* no plano, mesmo nível ou em espiral (Bishnoi, 2022).

O incremento vertical tem um impacto significativo no tempo de formação da peça e na conformabilidade do material. Desta maneira esse impacto necessita ser estudado para encontrar a melhor configuração entre tempo de formação da peça e na conformabilidade do material (Mcanulty. *et al.*, 2017).

Alguns autores defendem que aumentar o tamanho do passo é prejudicial para o processo pois diminui a capacidade de conformação. Outros autores indicam que é de suma importância encontrar o valor ótimo desse parâmetro, pois seu efeito de interação com outros parâmetros ainda é uma lacuna no entendimento do processo de estampagem incremental (Bishnoi, 2022).

2.2.4. Parâmetros da ferramenta

O diâmetro e o formato da ponta da ferramenta possuem grande influência no processo de conformação incremental. O diâmetro da ferramenta utilizada depende da geometria da peça, do menor raio côncavo e outras características da peça a ser conformada, além da influência na qualidade superficial, forças de conformação e tempo de estampagem de acordo com a área de contato (Silva, 2017). A Figura 5 a apresenta um exemplo de ferramenta semiesférica utilizada no processo de estampagem incremental.

Figura 5 - Exemplo de ferramenta semiesférica utilizada no processo de estampagem incremental.



Fonte: Marim, T., 2022.

Segundo Bishnoi (2022), as pesquisas apresentam que ferramentas com menor raio ou diâmetro de ponta melhoram a conformabilidade em relação as ferramentas com diâmetros maiores, pois com o aumento do tamanho da ferramenta se aumenta a área de contato, assim a deformação não permanece localizada (Silva, 2017), conforme apresentado na Tabela 13 e na Tabela 14 do anexo I.

Em continuidade, Bishnoi (2022) relata que o efeito do material da ferramenta sobre os parâmetros da estampagem incremental não foi estudado, investigado ou relatado nos artigos analisados.

2.2.5. Geometria da peça

Ao estudar a geometria da peça alguns fatores são considerados, como profundidade máxima de formação até a falha, ângulo de conformação máximo, formatos e entre outros. Além disso Bishnoi (2022), agrupou estudos sobre a influência da geometria das peças, o aumento da espessura das chapas e as propriedades mecânicas, respectivamente, no processo de estampagem incremental, conforme apresentado na Tabela 15, Tabela 16 e na Tabela 17 do anexo I.

A geometria apresentou uma forte influência na conformabilidade devido aos ângulos e inclinações, profundidade, cantos, geometria quadrada ou circular e etc., não havendo um consenso da melhor geometria, mas sim de sua influência na conformabilidade (Bishnoi, 2022).

No aspecto da espessura da chapa os estudos e pesquisas indicam que o aumento da espessura melhora a conformabilidade e alguns pesquisadores alcançaram valores ótimos, variando as espessuras das chapas de 0,28 mm a 2,1 mm (Bishnoi, 2022).

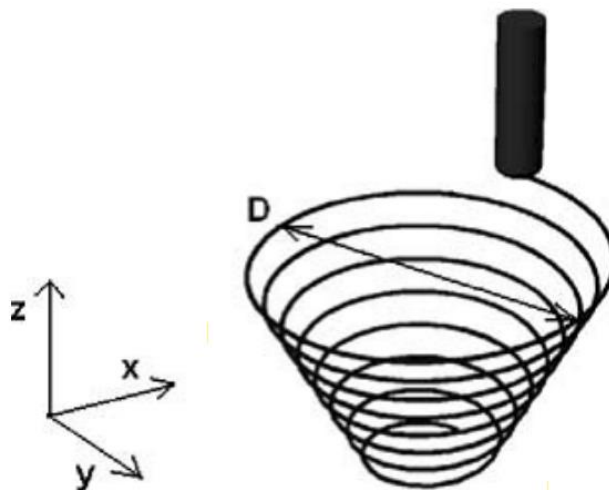
As propriedades do material têm influência na conformabilidade dada as teorias fundamentais da mecânica, como coeficiente de endurecimento, redução da área de tração, alongamento percentual, assim sendo característico de cada estudo e material (Bishnoi, 2022).

2.2.6. Trajetória da ferramenta

O caminho ou trajetória da ferramenta desempenha um significativo fator no processo de estampagem incremental, com sua influência na qualidade, precisão e tempo de estampagem. (Silva, 2017).

Bishnoi (2022), listou aspectos, geometrias e estratégias de trajetória da ferramenta utilizada por alguns autores, conforme apresentado conforme apresentado na Tabela 18 do anexo I. Alguns autores utilizam a trajetória em espiral conforme a Figura 6, pois reduz significativamente o tempo de processamento, uma vez que a velocidade do incremento vertical Z é a mesma do deslocamento no plano XY (Silva, 2017).

Figura 6 - Trajetória da ferramenta em espiral.



Fonte: Filice et al., 2002.

2.2.7. Temperatura de formação

A temperatura tem grande influência nos materiais, tornando-os mais macios, dúcteis, maleáveis e diminuindo sua dureza.

O aumento da temperatura diminui as forças necessárias para conformação, assim como afetam significativamente as condições de lubrificação, microestrutura, atrito e as propriedades mecânicas dos materiais (Bishnoi, 2022).

De acordo com Bishnoi (2022), alguns autores utilizam alguns métodos de aquecimento, como laser, atrito, elétrico e etc., e concluíram que com o aumento da temperatura ocorre uma melhora na conformabilidade do material, conforme apresentado na Tabela 19 do anexo I.

2.2.8. Condições de lubrificação

Na estampagem incremental a lubrificação desempenha um papel importante no processo, pois reduz significativamente o atrito entre a ferramenta e a chapa, reduz o calor, reduz o desgaste da ferramenta e melhora a conformabilidade do material (Silva, 2017), (Bishnoi, 2022).

Segundo Daleffe e Lacerda (2008), os lubrificantes utilizados no processo de estampagem incremental têm as seguintes funções:

- Absorção de calor provocado pela deformação da chapa na área de contato;
- Redução de atrito entre a chapa e a ferramenta;
- Redução do desgaste da ferramenta;
- Redução das forças de trabalho exercida pela ferramenta;
- Aumento na qualidade superficial da peça.

Utilizando uma variedade de óleos, graxas, lubrificantes sólidos, condições secas, alguns autores constataram que a aplicação de lubrificantes em comparação ao processo seco melhora em aspectos de redução de forças de atrito, aumento da conformabilidade e redução de geração de calor por atrito (Bishnoi, 2022).

Apesar da diversidade e quantidade de estudos relativos aos parâmetros do processo de conformação incremental é notório a carência de posições afirmativas sobre tais. Uma vez que

ao longo dos anos os autores não encontram um consenso sobre tais parâmetros, assim se atribui a cada estudo as suas respectivas conclusões sendo positivas, negativas ou neutras.

2.2.9. Curva limite de conformação

A conformabilidade dos materiais metálicos pode ser traduzida como a capacidade do material em sofrer deformações plásticas até alcançar uma geometria determinada sem ocorrência de defeitos ou falhas. Essa capacidade pode ser expressa em diagramas, conhecido como curva limite de conformabilidade (CLC), que apresenta quantitativamente a conformabilidade do material (Banabic *et al.*, 2013).

De acordo com Spisak e Stachowicz (1995), a (CLC) apresenta se uma operação de estampagem é crítica ou não, pois fornece uma estimativa do quão próximo o material está da falha.

Em concordância, Evangelista (2000) e Kazula *et al.*, (2002), concordam que esses diagramas são ferramentas importantes pois apresentam os aspectos da conformabilidade do material e podem ser utilizados como critérios de falha, uma vez que indicam os limites de deformações que as chapas metálicas suportam em um determinado processo de conformação. Além disso a (CLC) é um meio que permite prever quais deformações conduzirão o material até a falha por meio de estratégias de deformações (Ávila e Vieira, 2003).

Uma curva limite de conformabilidade é construída a partir da aquisição de pontos de deformações principais máximas (ϵ_1) e mínimas (ϵ_2) do corpo de prova que estejam na região de defeito a partir de alguns ensaios de conformabilidade (Evangelista, 2000). Esses testes são ensaios mecânicos para avaliar o comportamento do material durante o processo para previsão de defeitos.

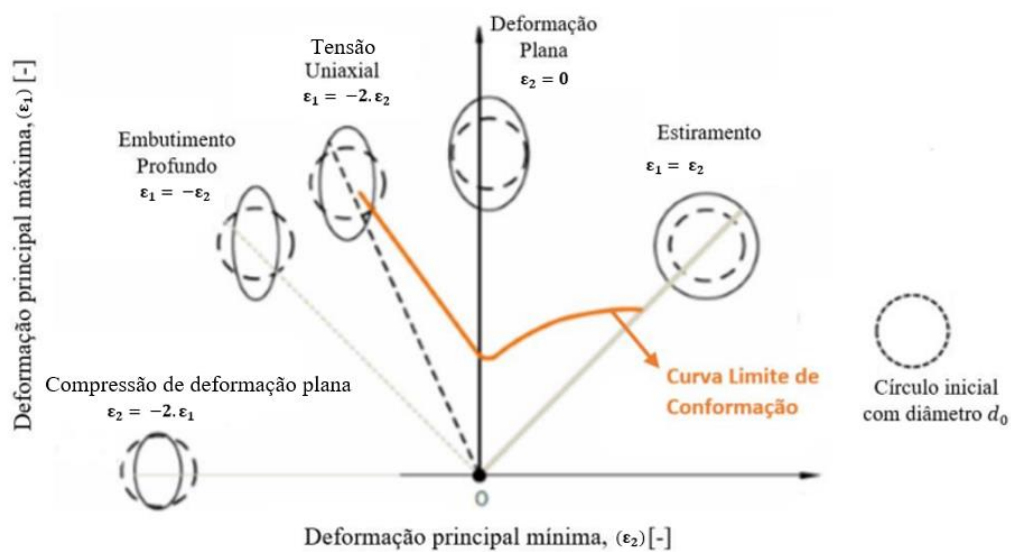
Em chapas metálicas os ensaios podem ser classificados em dois tipos: intrínsecos e simulativos. Os intrínsecos mensuram as características básicas dos materiais e os simulativos estudam os materiais com deformações semelhantes aos processos reais de conformação (Evangelista, 2000).

No campo de ensaios simulativos, Goodwin (1968), Nakazima *et al.* (1968) e Keeler (1996) propuseram um método para determinar uma curva limite. O método foi baseado por pares de deformações principais ligadas a modos diferentes de deformação plástica.

Desenvolvidos sob condições de estados biaxiais de tensão do tipo “tração-tração”, “tração-compressão” e “compressão-compressão”.

Esses ensaios utilizam da técnica de impressão de grades de círculos na superfície dos corpos de prova que após a deformação tornam-se elipses. Ao medir as deformações de comprimento e largura, (ϵ_1) e (ϵ_2), das elipses é possível plotar a CLC, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Modos de deformação da CLC.

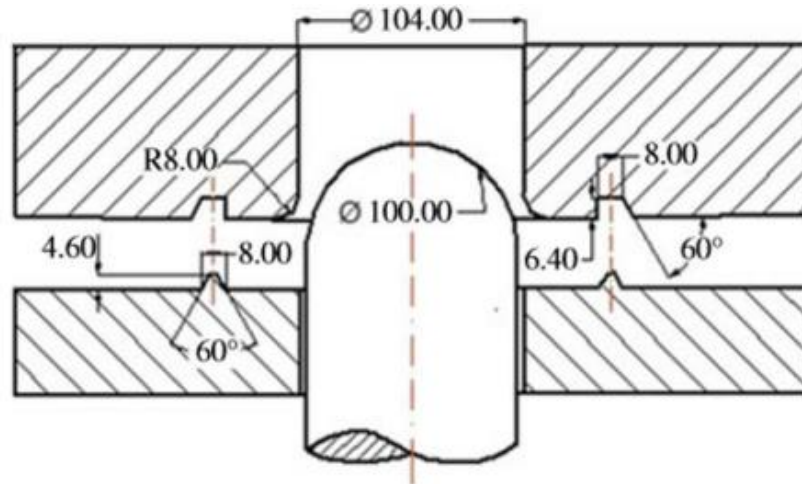


Fonte: Editado de Najmeddin, 2013.

Goodwin (1968) realizou seus ensaios simulando condições típicas de deformações dos processos de embutimento, tensões de tração e compressão, que resultou em dados de deformações críticas localizadas ao lado esquerdo da curva CLC.

O aprimoramento desse procedimento experimental foi realizado por Nakazima *et al.* (1968), que ensaiaram as amostras retangulares com larguras distintas até a ruptura. As amostras foram presas entre a matriz e o prensa chapas e estampadas por um punção hemisférico de raio constante de 100 mm de diâmetro, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Representação do ensaio de Nakazima.



Fonte: Li, F.F, 2014.

Apesar do ensaio proposto inicialmente utilizar tiras retangulares, o aprimoramento do teste possibilita ensaiar corpos de prova entalhados para forçar a estricção na região central do corpo de prova e aumentar a deformação no sentido da largura (Da Rocha *et al.*, 2022).

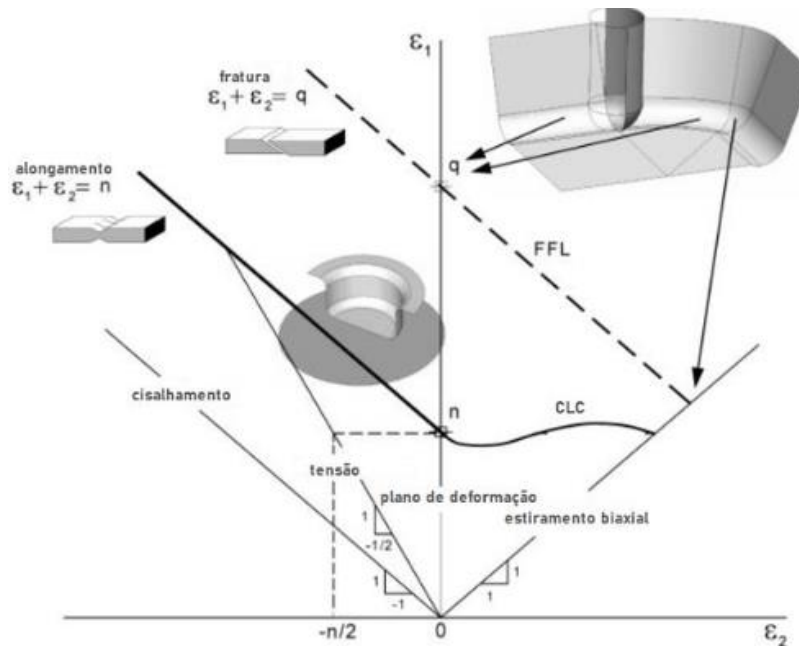
O ensaio de Nakazima é adotado em investigações para determinar o limite de conformação de chapas metálicas, pois engloba a análise de deformações de estiramento e embutimento. Assim descreve as deformações críticas em ambos os lados da curva de limite de conformação (Da Rocha *et al.*, 2022).

Keeler (1996) utilizou corpos de prova circulares e punções esféricos com raios diferentes para alterar a trajetória das deformações. Entretanto o teste desenvolvido por Keeler (1996) apresenta dados relativos ao lado direito da CLC, caracterizada por tensões uniaxiais e/ou biaxiais do tipo tração-tração.

Jeswiet, J. *et al.*, (2005) e Ham, M. e Jeswiet, J. (2007) sugeriram uma metodologia para a CLC do processo de estampagem incremental por meio de uma aproximação numérica e com variação de alguns parâmetros como geometria e espessura do material, velocidade de rotação e diâmetro da ferramenta e incremento vertical.

A Figura 9 apresenta o novo limite de conformabilidade da EI proposto por Martins, P. A. F, *et al.* (2008), baseado na teoria de membrana, combinado com análise de tensões e deformações, afinamento da chapa e atrito.

Figura 9 - Representação esquemática dos limites de conformação da EI em relação aos de estampagem e estampagem profunda.



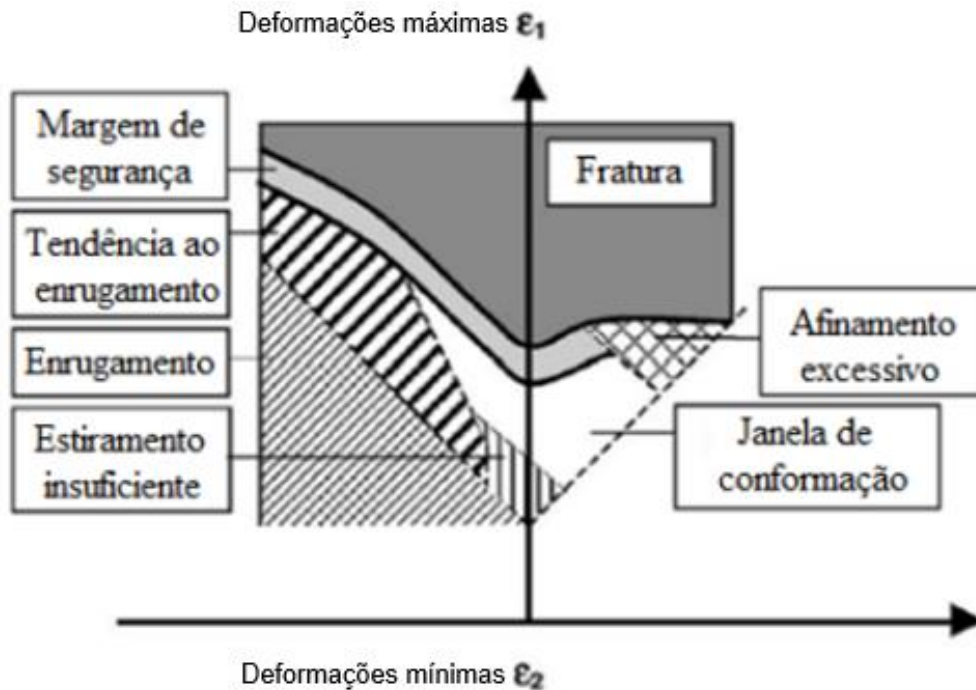
Fonte: Editado de Martins, P. A. F, et al. 2008.

A posição da curva CLC-EI está acima da curva CLC convencional devido ao seu maior limite de conformabilidade, o que torna o processo de estampagem incremental desejável para conformação de componentes de chapas metálicas, porém é necessário entender o comportamento dos parâmetros, falhas e defeitos para extrair a máxima capacidade da EI, conforme indicado por McAnulty *et al.* (2017).

Durante o processo de conformação de chapas metálicas existe a ocorrência de defeitos inerentes dos processos. Defeitos como ruptura, afinamento excessivo (estricção), enrugamento, estiramento insuficiente ou uma degradação da qualidade superficial (Bastos, 2009). Qualquer um desses defeitos pode ser considerado como um critério de limite de conformabilidade (Da Rocha *et al.*, 2022).

Assim conforme a Figura 10, uma (CLC) é um diagrama construído de maneira empírica para descrever o ponto geométrico das deformações que ocorrem em chapas metálicas, especificando as regiões seguras ou críticas do material durante do processo de conformação.

Figura 10 - Regiões da CLC.



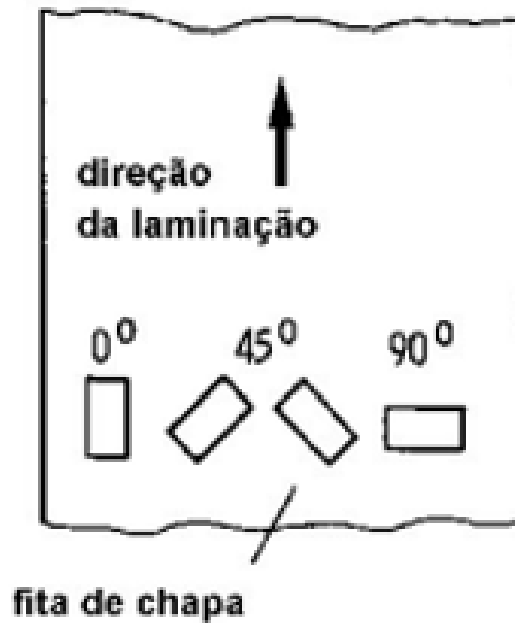
Fonte: Editado de Holmberg et al., 2003.

Assim como em outros diagramas existem fatores que influenciam o comportamento da curva CLC. Ao deslocar a CLC para cima aumenta-se o grau de estampabilidade ou ao deslocar a CLC para baixo se reduz o grau de estampabilidade. Alguns autores como Da Rocha *et al.*, (2022), Bresciani *et al.* (2011), descreveram os seguintes fatores de influência:

- Espessura;
- Atrito;
- Direção de laminação;
- Anisotropia (r);
- Pré-deformação;
- Tamanho do grão;
- Coeficiente de encruamento;
- Velocidade de deformação.

A anisotropia (r) ou coeficiente Lankford é definido como a razão entre as deformações principais na direção da largura e espessura do material. De acordo com Bresciani *et al.* (2011) a anisotropia tem influência no comportamento das propriedades do material dependendo da direção analisada, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Direção de corte dos corpos de prova para estudo da anisotropia.



Fonte: Schaeffer, 1999.

Para efeito de modelagem numérica, é comum associar estes parâmetros de Lankford com parâmetros associados a modelos implementados em programas computacionais. Por exemplo, a associação destes com os parâmetros do modelo de Hill 1948 se dá pela equação (1) da Tensão Equivalente no Modelo de Hill tomada como função de escoamento $f(\sigma_{ij})$.

$$\bar{\sigma}_{Hill} = \sqrt{\left[H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + G(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 \right] + 2(N\tau_{xy}^2 + M\tau_{xz}^2 + L\tau_{yz}^2)} \quad (1)$$

sendo que os parâmetros de Hill são:

$$F = \frac{R_0}{R_{90}(1+R_0)} \quad (2)$$

$$G = \frac{1}{(1+R_0)} \quad (3)$$

$$H = \frac{R_0}{(1+R_0)} \quad (4)$$

$$N = \frac{(R_0+R_{90})(1+2R_{45})}{2R_{90}(1+R_0)} \quad (5)$$

$$L = M = 1 \quad (6)$$

Neste sentido, a relação entre as componentes de tensão e de deformação deverão ser tais que o modelo de material respeite a relação constitutiva inferida a partir de ensaios padronizados, tal como o ensaio de tração. Dentre as formas possíveis para se acomodar estes

cálculos das componentes, destaca-se a Regra da Normalidade, dada pela relação entre as componentes na equação (7):

$$\varepsilon_{ij} = \lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (7)$$

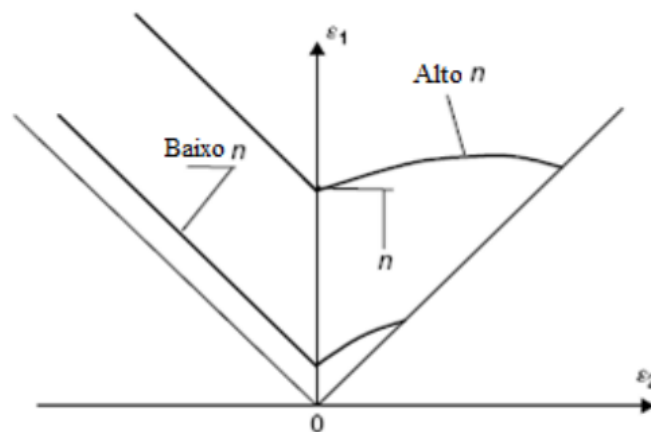
Com,

$$\lambda = \frac{3}{2} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\varepsilon}} \quad (8)$$

No caso, aplica-se a equação $\bar{\sigma}_{Hill}$ em $f(\sigma_{ij})$.

A Figura 12 apresenta a influência do coeficiente de encruamento (n), descrevendo que quanto maior o valor de n, maior será a conformabilidade. Porém se o encruamento for excessivamente alto a chapa metálica entrará na região de fratura, por isso a importância de estudar e entender o fator de encruamento no processo de conformação.

Figura 12 - Efeito do encruamento na CLC.



Fonte: Editado de Marciniak, 2002.

2.3. Elementos finitos

Da perspectiva da engenharia o método de elementos finitos (MEF) pode ser definida como um método para resolver problemas de engenharia, como análise de tensões, escoamento de fluídos, transferência de calor, eletromagnetismo, através do uso de um computador (Fish e Belytschko, 2009).

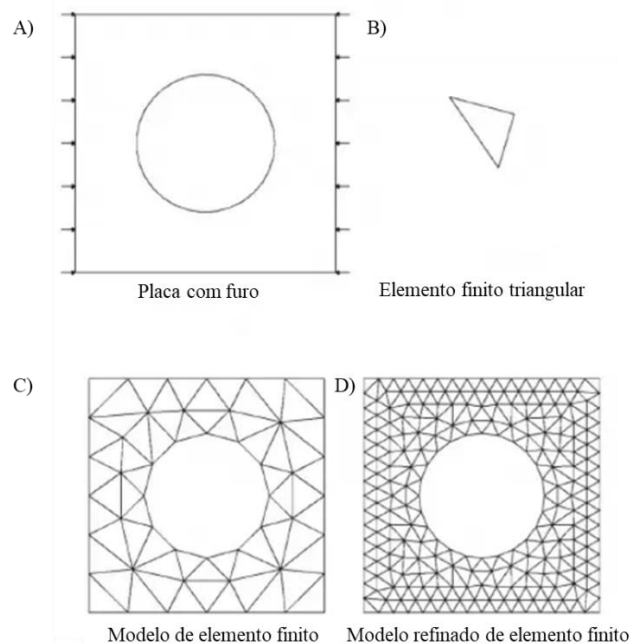
Da perspectiva da matemática o MEF pode ser entendido como uma resolução aproximada de equações diferenciais que descrevem fenômenos da engenharia e ciência, ou seja, uma aproximação numérica dos fenômenos estudados (Fish e Belytschko, 2009).

Ainda de acordo com Fish e Belytschko (2009) e Sobrinho (2006), milhões de engenheiros e cientistas em todo o mundo utilizam o MEF para analisar e prever o comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico de sistemas, tanto na etapa de projeto quanto na análise de desempenho.

Em concordância, Alves (2000) relata que a correta utilização do método dos elementos finitos é útil para evitar gastos excessivos em ferramental inerentes a execução de projeto, dado a capacidade de prever os comportamentos dos fenômenos. O MEF é um grande diferencial para reduzir prazos e enxugar custos, assim proporcionando uma alta competitividade para as empresas que o utilizam.

O conceito fundamental do MEF é dividir o corpo, ou estrutura estudada, em elementos finitos e que são conectados por “nós”, o conjunto de elementos e nós é chamado de malha, como apresentado na Figura 13 (Fish e Belytschko, 2009).

Figura 13 - Representação do conceito fundamental dos elementos finitos.



Fonte: Editado de Fish e Belytschko, 2009.

A Figura 13 (a), apresenta um modelo de placa com furo, (b) um elemento triangular, (c) a representação da placa com os elementos e (d) a placa com os elementos refinados.

A essa malha são atribuídas as propriedades de material, além da especificação dos carregamentos, contato, condições de contorno e outras informações. A partir do entendimento

do comportamento de cada elemento da malha é possível entender o comportamento geral da estrutura estudada.

O MEF é uma técnica de simulação numérica, que pode ser realizada através do uso de programas de computação, Fish e Belytschko (2009), como o MSC Nastran (2021), Ansys (2024), LS-DYN (Hallquist *et al.*, 2000) e o ABAQUS 6.14, (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014).

Desta maneira o MEF pode ser definido em três etapas diferentes de acordo com Huebner *et al.*, (2001) e Fish e Belytschko (2009) e são elas:

- Pré-processamento (*pre processing*): Preparação e análise do problema a partir da definição dos parâmetros de entrada como materiais, geometria, carregamentos, modelagem, condições físicas e condições de contorno;
- Solução (*Solver*): Nesta etapa o programa realiza o cálculo matemático das equações diferenciais conforme parâmetros inseridos na etapa inicial. Esta etapa também é conhecida como caixa preta (*Black box*) (Khennane, 2013).
- Pós- processamento (*post processing*): Apresenta ao analista os resultados da simulação numérica e é possível apontar e analisar os parâmetros críticos do sistema.

Para a etapa inicial de pré-processamento cabe ao usuário inserir as informações das condições iniciais:

- Geometria da peça e do ferramental, caso exista na análise;
- Malha: Tipo de elemento, discretização e refinamento;
- Propriedades mecânicas e suas associações com a malha:
 - Tipos de propriedades mecânicas consideradas;
 - Valores de entrada para relação constitutiva;
 - Valores para modelo de contato;
 - Valores para modelo de dano.
- Carregamentos;
- Condições de contato;
- Premissas de modelagem;
- Forma de análise de resultados.

Dada a versatilidade e aplicabilidade do MEF é possível abranger áreas como a mecânica estrutural, transferência de calor, procedimentos cirúrgicos, vibrações, eletromagnetismo, usinagem e conformação de chapas metálicas.

Para experimentos numéricos do processo de conformação de chapas metálicas Hallquist *et al.* (2000), apontaram alguns problemas mecânicos de alta complexidade que o MEF pode simular, como:

- Deformações geométricas: Precisão dimensional, retorno elástico, regiões críticas, afinamento e etc.;
- Deslocamentos nodais em relação ao tempo transcorrido: Caminho das deformações, deslocamentos plásticos do material e etc.;
- Vibrações e frequências das estruturas;
- Gradientes de tensões: Cargas, acúmulo de tensões e etc.;
- Gradiente de temperatura;
- Previsão de falhas e defeitos: Regiões de ruptura, regiões seguras, regiões de enrugamento e etc.

A aplicação do MEF é ampla, sua aplicabilidade é versátil e auxilia na solução de problemas complexos em pouco tempo, pois promove uma redução de custos de fabricação, otimização dos parâmetros do processo e aumenta a confiança e a qualidade das peças no produto final.

2.4. Modelo de dano

A integridade estrutural e o desempenho dos componentes metálicos são cruciais para a indústria. Entender como esses metais se comportam torna-se necessário para melhorar a conformabilidade e a trabalhabilidade desses materiais. Prever com precisão o início do estiramento localizado é primordial para evitar falhas prematuras e garantir confiança desses materiais (S. Zhou. *et al.*, 2025).

O desenvolvimento de modelos de dano é essencial para prever e entender o dano e a fratura em chapas metálicas. Nos últimos anos alguns modelos constitutivos de materiais foram desenvolvidos para prever danos e fraturas dúcteis (Zeng, C. *et al.*, 2024).

O dano dúctil é um fenômeno conhecido, pois é um declínio progressivo das propriedades mecânicas quando um metal dúctil é submetido a deformação plástica. O mecanismo que pode causar a falha devido ao dano dúctil envolve o crescimento, coalescência de microvazios e a nucleação que leva a formação e propagação de microfissuras até a completa fratura do material (NEZHAD, M. S. S.; ABOUTALEBI, F. H, 2024).

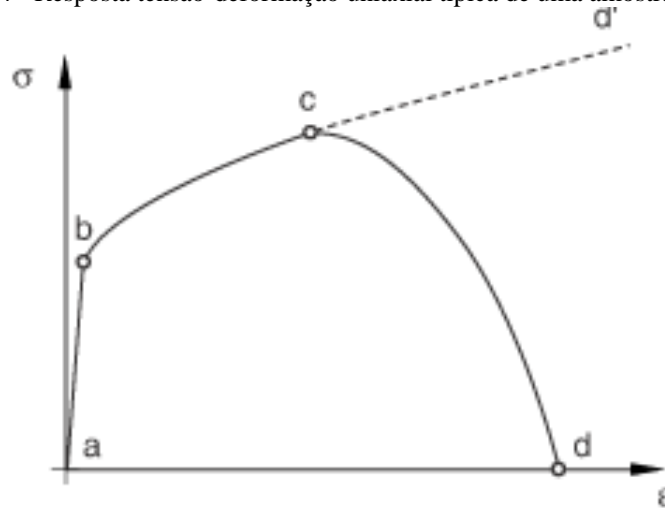
Desta maneira, a previsão do comportamento de danos dúcteis dos materiais é essencial para projetar e desenvolver produtos e processos confiáveis. Dado o significativo impacto do dano dúctil aos limites de conformabilidade de chapas finas, integra-lo ao modelo constitutivo é essencial (NEZHAD, M. S. S.; ABOUTALEBI, F. H, 2024).

Apesar dos estudos sobre a modelagem computacional do comportamento mecânico de metais dúcteis, as complexidades no comportamento mecânico continuam a desafiar os modelos existentes. Desta maneira o modelo deve prever com precisão o comportamento do material em diferentes condições de carga (NEZHAD, M. S. S.; ABOUTALEBI, F. H, 2024).

O ABAQUS® é um programa computacional baseado no método dos elementos finitos e oferece uma estrutura geral para modelagem de falhas dos materiais, o que permite a implementação de mecanismos que atuam isoladamente ou simultaneamente. Desta maneira o programa ABAQUS® apresenta a falha do material como a perda completa da capacidade de carga, assim resultando na progressiva degradação da rigidez do material, desta forma o processo de degradação da rigidez é modelado ao utilizar a mecânica dos danos (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014).

A Figura 14 apresenta a resposta de um metal durante um ensaio de tração simples. O objetivo é demonstrar como ocorre o processo de modelagem de falha do programa ABAQUS®.

Figura 14 - Resposta tensão-deformação uniaxial típica de uma amostra de metal.



Fonte: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.

Em que,

- σ é a tensão;
- ϵ é a deformação;
- Trecho a-b: Resposta elástica linear;
- Trecho b-c: Escoamento plástico com encruamento;
- Trecho c-d: Redução acentuada da capacidade de carga até a ruptura;
- Trecho c-d': Resposta do material na ausência do dano.

No ponto c, é identificado o estado do material no início do dano, ou seja, o critério de início do dano, além desse ponto no trecho c-d a tensão-deformação é governada pela evolução da degradação da rigidez na região de localização da deformação (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014).

Desta maneira o programa ABAQUS® especifica o mecanismo de falha em quatro partes distintas:

- A definição dos valores de tensão-deformação do material, não danificada, trecho a-b-c-d';
- Critério de iniciação de dano – ponto c;
- Uma lei de evolução de dano – trecho c-d;
- Escolha do valor de exclusão do elemento para remoção quando a rigidez do material esteja totalmente degradada.

2.4.1. Modelo de iniciação do dano

De acordo com o mecanismo que pode causar a falha do metal dúctil, o programa ABAQUS® dispõe de um modelo de dano e falha progressiva para metais dúcteis, e esse modelo possui alguns critérios de dano dúctil para implementar ao modelo, critérios como, critério dúctil, utilizado neste trabalho, critério de cisalhamento, diagrama limite de conformação (FLD), diagrama de tensão limite de conformação (FLSD) e diagrama de limite de conformação de Müschenborn-Sonne (MSFLD) (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014).

O critério abordado nesta pesquisa será o critério de dano dúctil, que prevê o início do dano devido a nucleação, crescimento e coalescência de vazios. Este critério assume que a deformação plástica equivalente no início do dano é uma função da taxa de deformação e da triaxialidade, conforme a equação (9) a seguir.

$$\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl}) \quad (9)$$

Em que,

- $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ é a deformação plástica equivalente no início do dano;
- η é a triaxialidade de tensão;
- $\dot{\epsilon}^{pl}$ é a taxa de deformação equivalente.

A triaxialidade de tensão é dada pela razão entre a pressão média (p) sobre a tensão equivalente de Von Mises (q), conforme a equação (10) a seguir.

$$\eta = -p/q \quad (10)$$

Para que o critério de iniciação do dano seja atendido é necessário que as condições das equações (11) e (12) sejam satisfeitas.

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}_D^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl})} = 1 \quad (11)$$

$$\Delta\omega_D = \int \frac{\Delta\bar{\epsilon}_D^{pl}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl})} \geq 0 \quad (12)$$

Em que,

- ω_D é o acumulo do dano;
- $\Delta\omega_D$ é o incremento do dano.

2.4.2. Modelo de evolução do dano

Para que o dano ocorra, após a sua iniciação é necessário aplicar a lei de evolução do dano, que descreve a taxa de degradação da rigidez do material quando atingido o critério de iniciação do dano (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014).

O programa ABAQUS® assume que a redução da rigidez do material associada a cada mecanismo de falha ativo pode ser representada por uma variável escalar de dano $d_i (i \in N_{act})$, em que N_{act} representa o conjunto de mecanismos ativos. Além disso durante a análise o tensor de tensão do material é concedido pela equação (13) de dano escalar.

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (13)$$

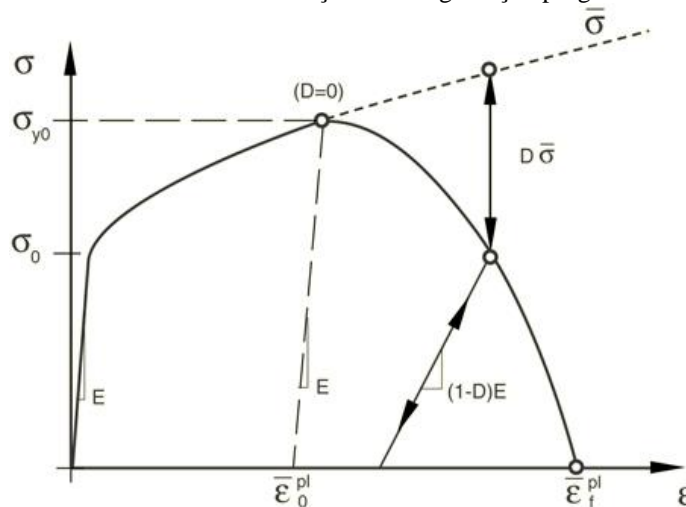
Em que,

- σ é o tensor de tensão no material;
- D é a variável de dano geral;
- $\bar{\sigma}$ é o tensor de tensão efetivo ou não danificado calculado no incremento atual.

Desta maneira quando o valor de D é igual a 1 significa que o material perdeu sua capacidade de carga, além disso a variável D captura o efeito combinado de todos os mecanismos ativos e é calculado a partir das variáveis individuais escalar de dano d_i (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014).

A Figura 15 apresenta o comportamento da tensão-deformação de um material que sofre dano no contexto da variável de dano geral.

Figura 15 - Curva tensão-deformação com degradação progressiva de dano.



Fonte: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.

A Figura 15 apresenta σ_{y0} como a tensão de escoamento no início do dano e $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ como a deformação plástica equivalente no início do dano. Além disso $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ é a deformação plástica equivalente na falha, ou seja, quando o valor de D é igual a 1.

A máxima degradação do material é definida pelo valor da variável de dano geral D, em que é possível especificar valores diferentes de 1, desta maneira quando atingir o valor especificado em D o elemento será excluído.

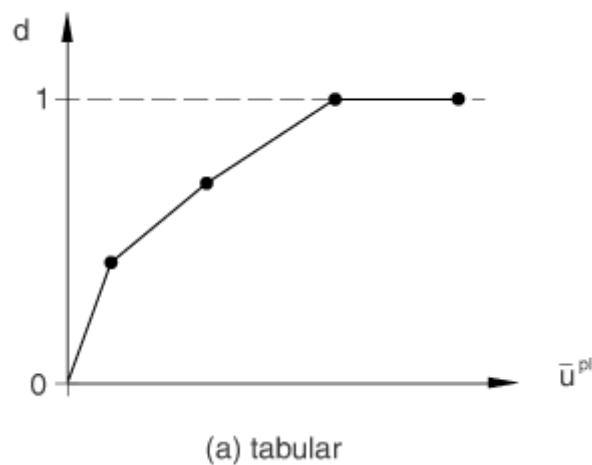
O valor da deformação plástica equivalente na falha $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ é dependente do comprimento característico do elemento da malha, desta maneira não pode ser usado como parâmetro material para a lei da evolução do dano, desta maneira a lei de evolução do dano é especificada nos termos de dissipação de energia G_f ou em termos de deslocamento plástico equivalente \bar{u}^{pl} , que será utilizado neste trabalho.

Quando o critério de iniciação de dano é atingido o deslocamento plástico efetivo \bar{u}^{pl} , é definido pela equação (14) de evolução.

$$\dot{\bar{u}}^{pl} = L \dot{\bar{\epsilon}}^{pl} \quad (14)$$

Em que L é o comprimento característico do elemento da malha de elementos finitos. A evolução da variável de dano pode ser especificada na forma exponencial, linear ou tabular e neste trabalho será utilizada a forma tabular, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Forma tabular.



Fonte: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.

Em que a variável de dano é diretamente especificada como uma função tabular de deslocamento plástico equivalente d , conforme a equação (15) a seguir (Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014).

$$d = d(\bar{u}^{pl}) \quad (15)$$

A partir dessas formulações e implementações é dado o modelo de dano implementado no programa ABAQUS®.

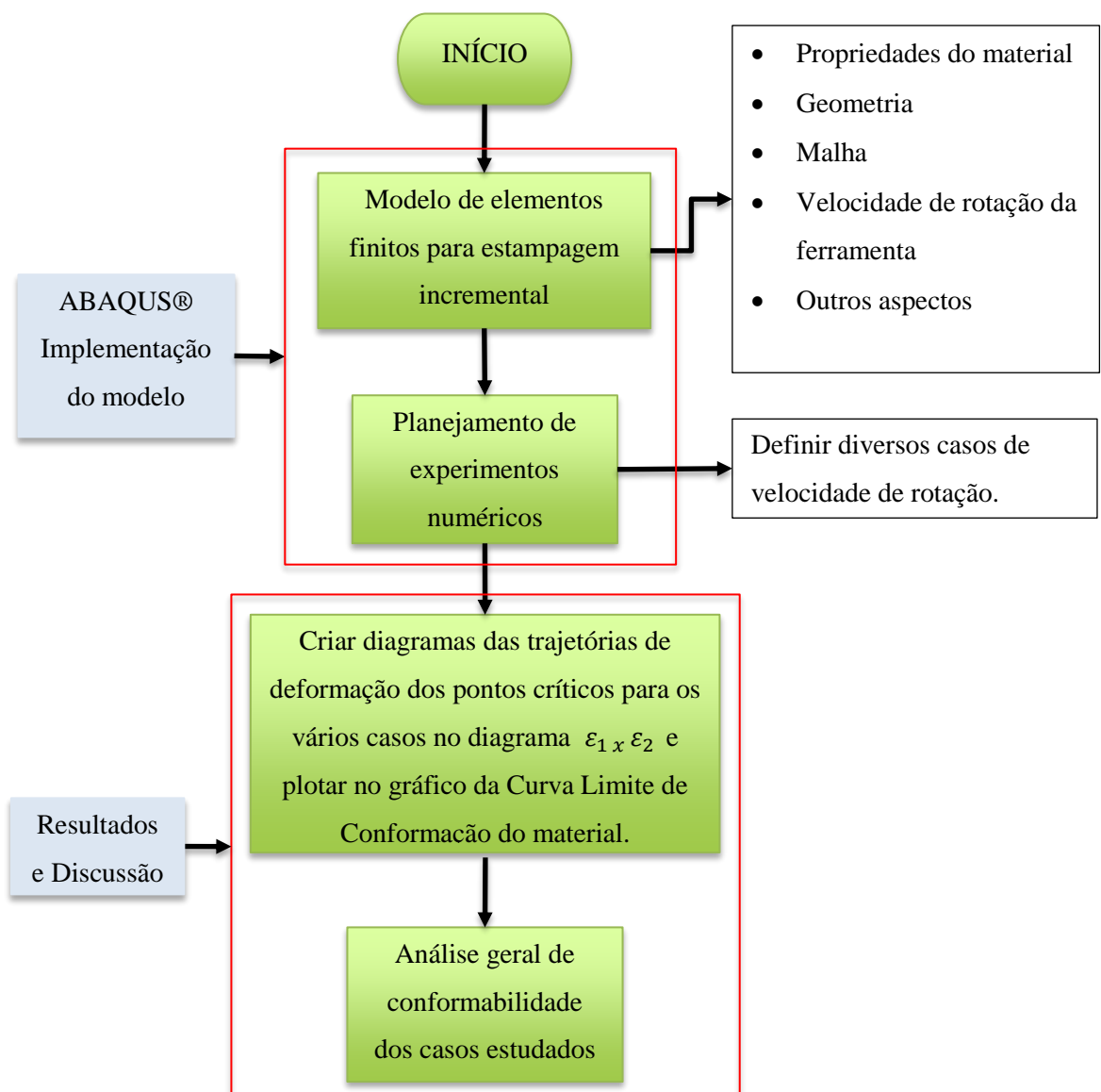
3. Materiais e métodos

Nesta sessão serão abordados os materiais e métodos utilizados para contemplar o objetivo geral e os específicos proposto, para tal serão explanados o material, programas e processo de metodologia da pesquisa.

3.1. Métodos

O processo metodológico proposto é para definir as etapas necessárias para alcançar os objetivos com qualidade e eficiência, otimizando o tempo de cada etapa conforme a Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Autor.

A seguir a explicação de cada etapa do processo metodológico, apresentando no fluxograma da Figura 17.

- Implementar no programa ABAQUS® o modelo de estampagem incremental, inserindo informações pertinentes ao experimento numérico como: Geometria, propriedades do material, malha, velocidades de rotação e outros aspectos do experimento numérico;
- Planejar experimentos numéricos com algumas velocidades de rotação;
- Coletar os dados de deformação dos pontos críticos para os vários casos estudados e plotar em diagramas de deformações $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$;
- Plotar o diagrama limite de conformação do material nos mesmos diagramas de deformação $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$;
- Analisar os diagramas da CLC e $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$ sobre a conformabilidade do material para os diversos casos estudados.

Dada a quantidade de parâmetros de suma importância para o processo de estampagem incremental, esta pesquisa investigou somente o parâmetro da velocidade de rotação da ferramenta e sua influência no processo.

3.2. Materiais - Modelo de Elementos Finitos

O experimento numérico será realizado utilizando o programa ABAQUS® / CAE 6.14 da empresa francesa *Dassault Systèmes*, instalados no laboratório LMC/Nuleen do DEMec - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

A seguir será apresentado os aspectos e parâmetros implementados nos experimentos numéricos neste programa. Alguns parâmetros são impostos pelo experimento físico realizado por Magalhães, D., *et al.*, (2025) e pelo material AA1050/AA7050 produzido por junção por laminação acumulada, ARB (*accumulative roll bonding*) pré-aquecido à temperatura de 450°. Outros aspectos são convencionados pelo modelo implementado e pelas limitações do programa.

O modelo geométrico deve seguir os componentes do experimento físico, desta maneira foram modelados os seguintes componentes geométricos no programa ABAQUS®:

- Chapa metálica;

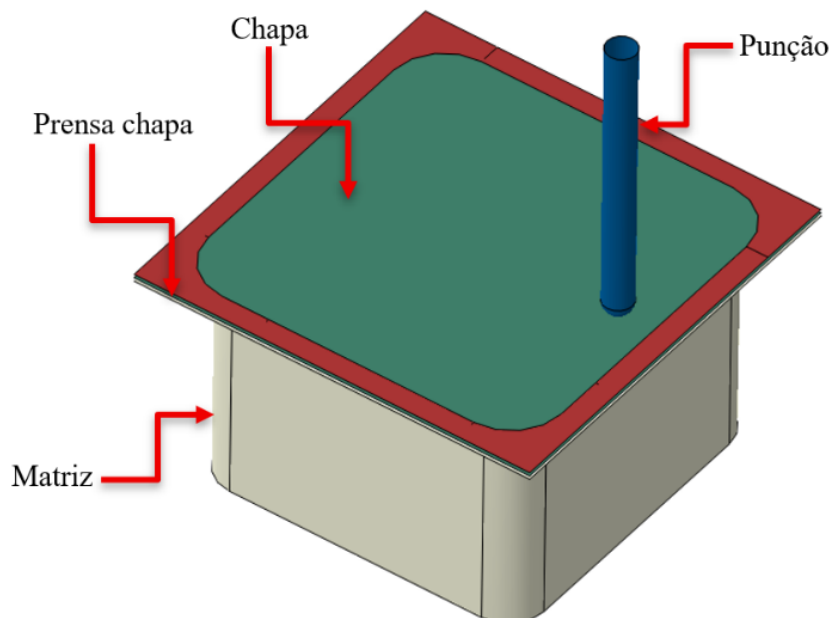
- Matriz;
- Prensa chapas;
- Punção.

A chapa de alumínio possui dimensões de 55 mm x 55mm x 1 mm de espessura. A matriz possui dimensões de 55 x 55 mm externo na região de apoio da chapa com recorte central de 45 mm x 45 mm e altura total de 30 mm. O prensa chapas possui dimensões de 55 mm x 55 mm com recorte central de 49 mm x 49 mm. O punção é uma ferramenta com ponta semiesférica de \varnothing 4 mm responsável por aplicar incrementos verticais que deformam a chapa ao longo do eixo Z, conforme a Figura 18, Figura 19 e a Figura 20.

A chapa foi fixada entre a matriz e o prensa chapas que atua com o intuito de estabilizar e restringir o deslocamento da chapa enquanto é deformada por um punção.

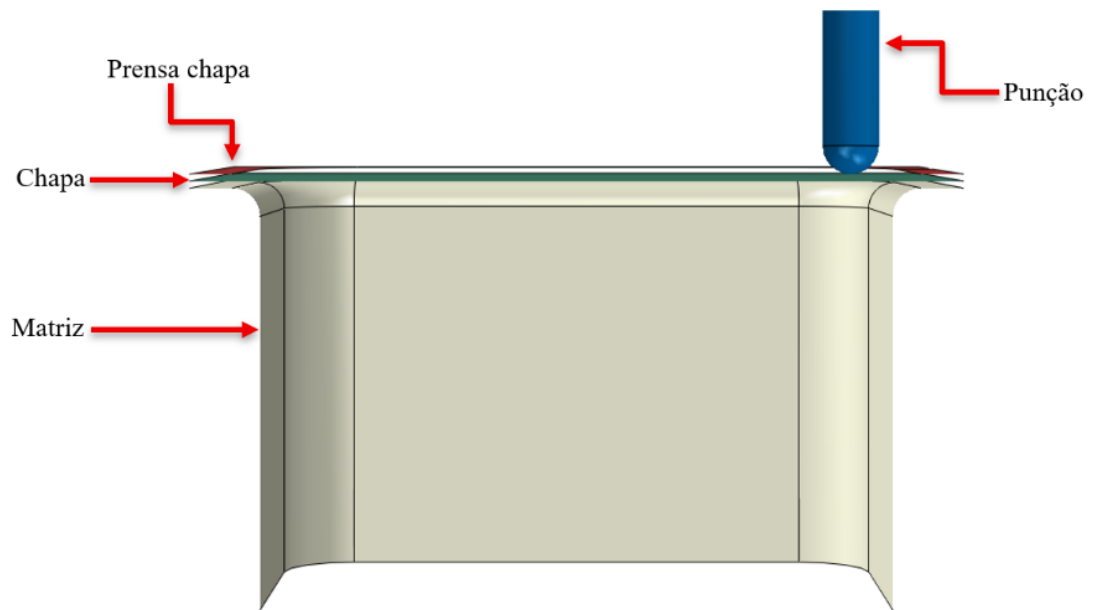
A ferramenta, prensa chapas e matriz foram modelados com o pressuposto de uma análise de corpo rígido, desta maneira não sofrem deformações. A chapa metálica foi modelada como objeto de corpo deformável, ou seja, sofre deformações. Além disso todos os itens foram modelados somente como superfície e a chapa de alumínio como casca (*shell*).

Figura 18 - Geometria do conjunto para o experimento numérico.



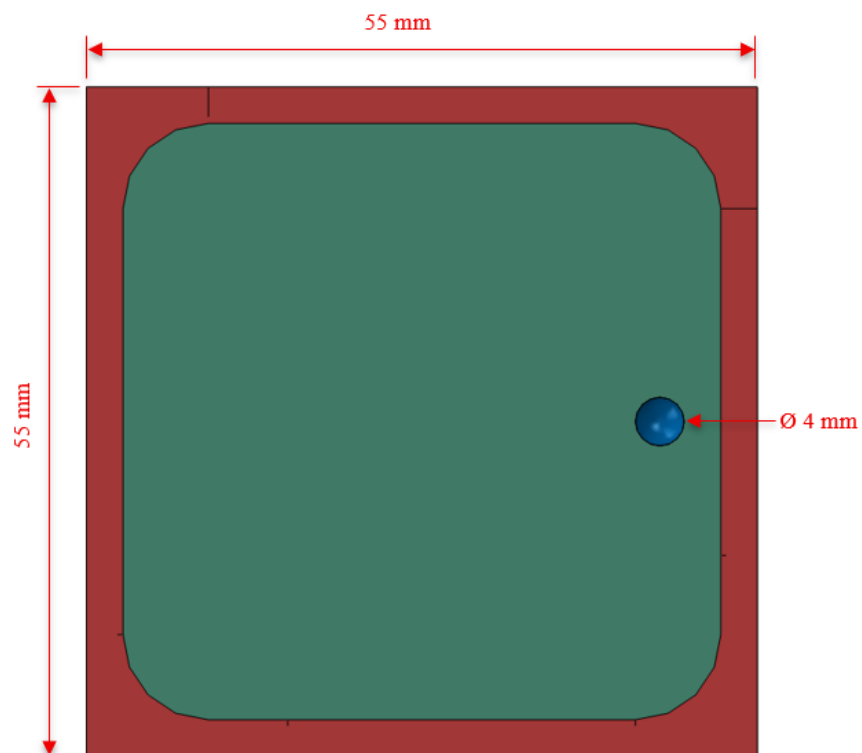
Fonte: Autor.

Figura 19 - Visa de corte do conjunto.



Fonte: Autor.

Figura 20 - Dimensões das peças modeladas.



Fonte: Autor.

Os dados obtidos sobre o material híbrido multicamadas de alumínio AA1050/007050 foram fornecidos em parceria com o DEMa – Departamento de Engenharia de Materiais da

Universidade Federal de São Carlos. As propriedades da chapa de multicamadas AA1050/AA7050 inseridas no experimento numérico foram as seguintes, conforme artigo de Magalhães, D., *et al.*, (2025):

- O material é considerado anisotrópico:
 - Valores de anisotropia conforme Tabela 2;
- Módulo de Young (E): 70000.0 MPa;
- Coeficiente de Poisson: 0.3;
- Densidade: 2,7 g/cm³;
- Os valores da curva tensão x deformação foram inseridos de acordo com os dados da Figura 21.

Esta pesquisa utilizou as propriedades mecânicas do material híbrido multicamadas produzido à 450°C, estampados com a ferramenta nos ângulos iniciais de 20°, 25° e 30°. Os valores das propriedades mecânicas são apresentados na Tabela 1 e as propriedades referentes as informações de anisotropia são apresentadas na Tabela 2, parâmetros que serviram como entrada aos parâmetros do modelo de anisotropia de Hill (1948).

Tabela 1 - Resumo das principais propriedades de tração.

Propriedades de tração	450 (0°)
Tensão de escoamento YS (MPa)	262
Limite de resistência a tração UTS (MPa)	288
Alongamento uniforme ϵ_{1f}	0.04
Coefficiente de resistência K (MPa)	332
Coefficiente de encruamento (n)	0.05

Fonte: Editado de Magalhães, D., et al, 2025.

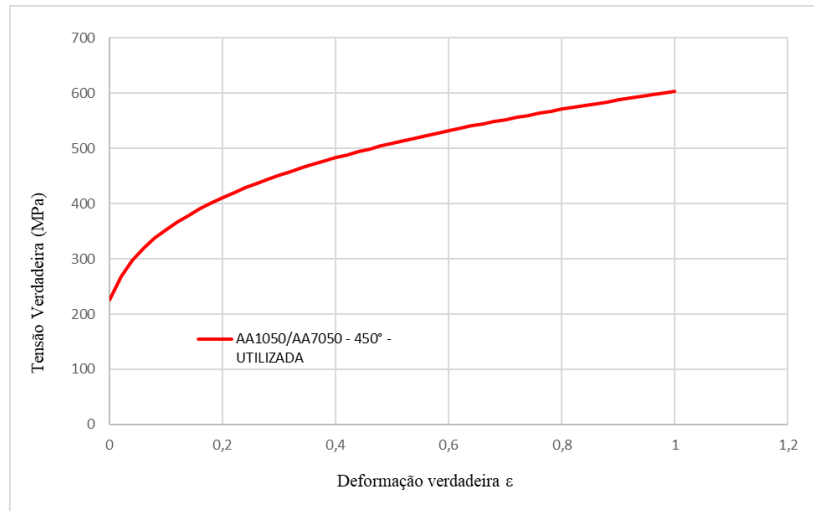
Tabela 2 - Anisotropia dos materiais.

Material	HM 450° C
r_0	1.18
r_{45}	1.22
r_{90}	1.05
\bar{r}	1.20
Δr	0.10

Fonte: Editado de Magalhães, D., et al, 2025.

O gráfico de tensão x deformação das chapas multicamadas de AA1050/AA7050 é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Gráfico tensão x deformação das chapas multicamadas de AA1050/AA7050.



Fonte: Editado de Magalhães, D., et al, 2025.

O modelo de dano implementado para o experimento numérico é o modelo dúctil com critério de dano dúctil. A seguir os valores do modelo de dano implementado no experimento numérico.

- Deformação de fratura ($\bar{\epsilon}_D^{pl}$): 0,155
- Triaxialidade (η): 0,6;
- Taxa de deformação equivalente ($\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$): $0,001 s^{-1}$

Os valores da evolução do dano, D e ($\dot{\bar{u}}^{pl}$) são apresentados na Tabela 3. O modelo implementado da evolução da variável de dano foi o modelo tabular.

Tabela 3 - Evolução de dano implementado.

Evolução de danos	
Variável de dano (D)	Deslocamento ($\dot{\bar{u}}^{pl}$)
0	0
0,188258481	0,11970037
0,405034689994431	0,15693537
0,99	0,22125037

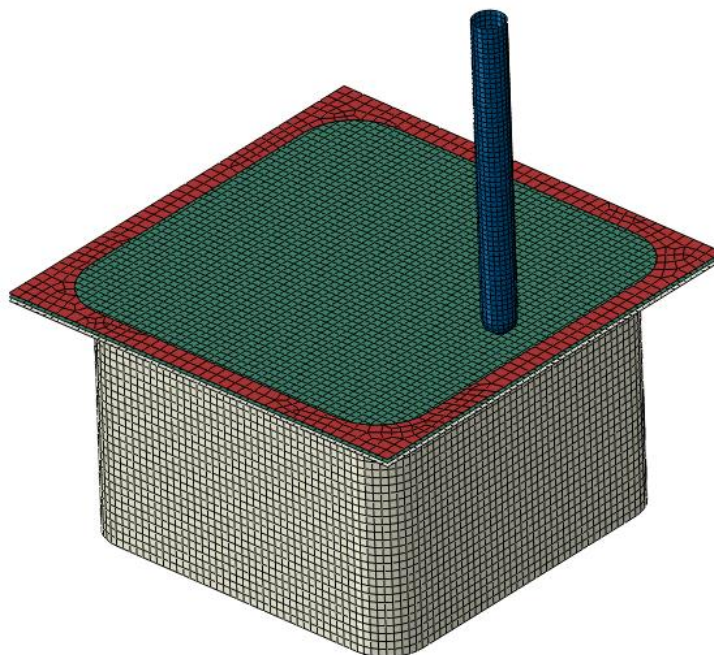
Fonte: Autor.

A chapa multicamadas é um material heterogêneo, ou seja, é composto por chapas de AA1050 e AA7050. O modelo implementado no programa ABAQUS® considera o material como homogêneo, ou seja, como apenas um único material idealizado conforme a anisotropia global inferida pelos parâmetros da Tabela 2. Além disto, o encruamento idealizado ao modelo

atendeu à curva da Figura 21 que foi filtrada para que a evolução fosse monotonicamente crescente. No ensaio real, notaram-se vários ciclos de carregamento e descarregamento e se fosse mantido assim, o programa ABAQUS® não apresentaria condição para executar os cálculos.

A malha atribuída para cada componente do conjunto foi definida de acordo com a aplicação de cada peça no modelo implementado. A Figura 22 apresenta o modelo com as malhas implementadas e a seguir apresenta-se a definição de malha para cada componente.

Figura 22 - Malha adotada para cada componente.



Fonte: Autor.

- Chapa de alumínio (deformável):
 - Modelo tipo casca (*Shell*) – SR4: Elemento quadrilátero linear em casca com 4 nós, seis graus de liberdade por nó e integração reduzida;
 - Quantidade de elementos: 3136 elementos.
- Matriz (não deformável):
 - Modelo de objeto de corpo rígido – R3D4: Elemento quadrilátero linear 3D com 4 nós;
 - Modelo de objeto de corpo rígido – R3D3: Elemento triangular linear 3D com 3 nós;
 - Quantidade de elementos: 6256 elementos R3D4, 16 elementos R3D3.

- Prensa chapas (não deformável):
 - Modelo de objeto de corpo rígido – R3D4: Elemento quadrilátero linear 3D com 4 nós;
 - Modelo de objeto de corpo rígido – R3D3: Elemento triangular linear 3D com 3 nós;
 - Quantidade de elementos: 389 elementos R3D4, 10 elementos R3D3.
- Punção (não deformável):
 - Modelo de objeto de corpo rígido – R3D4: Elemento quadrilátero linear 3D com 4 nós;
 - Modelo de objeto de corpo rígido – R3D3: Elemento triangular linear 3D com 3 nós;
 - Quantidade de elementos: 1280 elementos R3D4, 2 elementos R3D3.

O programa ABAQUS® exige que seja inserido um valor inicial para o tamanho global do elemento para cada componente e para a chapa de alumínio foi implementada um valor de 1 mm.

A máxima degradação do material da chapa de alumínio foi definida em 0,95 ou seja, quando o elemento perder 95% da rigidez ele será eliminado do experimento numérico.

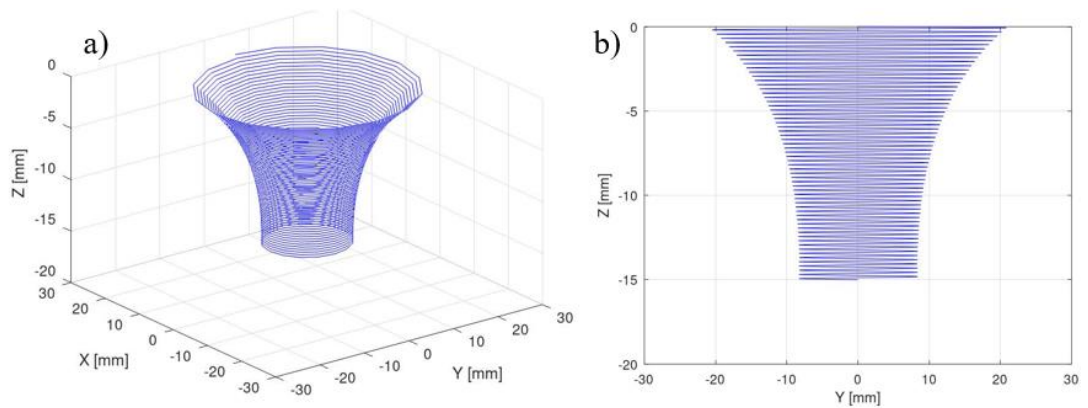
De acordo com os experimentos realizados por Magalhães, D., *et al.*, (2025), para o material multicamadas AA1050/AA7050 à temperatura de 450°C, foram realizados três experimentos com três trajetórias helicoidais diferentes, variando-se o ângulo de inclinação inicial da ferramenta em 20°, 25° e 30° em relação a horizontal.

Em todos os casos a configuração da trajetória foi estipulada da seguinte forma:

- Diâmetro inicial: 42 mm;
- Incremento angular: 0,5° por volta;
- Incremento vertical Δz : 0,25 mm/volta.

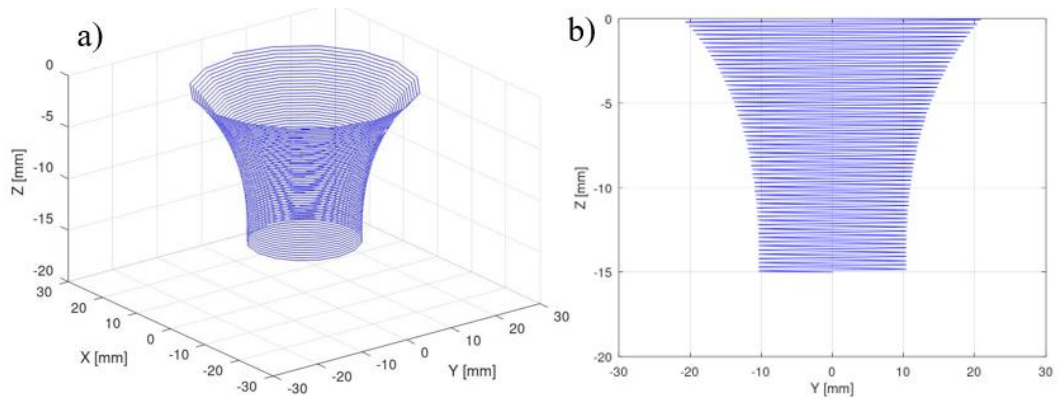
As trajetórias em helicoides foram desenvolvidas com o auxílio do programa GNU/Octave para gerar coordenadas e assim ser possível implementar no programa ABAQUS®. A Figura 23 (a) e (b), a Figura 24 (a) e (b) e a Figura 25 (a) e (b), apresentam as trajetórias geradas no GNU/Octave.

Figura 23 - Representação gráfica da trajetória com ângulo inicial de 20° criada no programa e GNU/*Octave*.



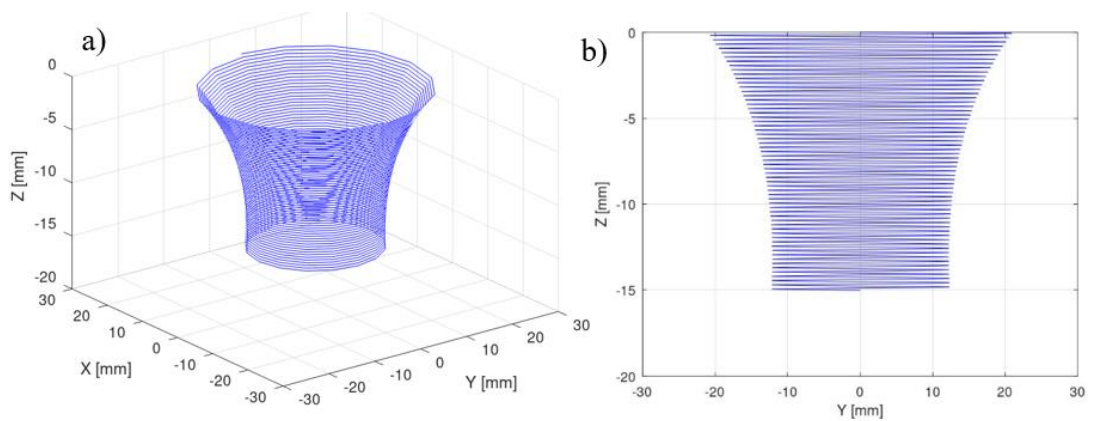
Fonte: Autor.

Figura 24 - Representação gráfica da trajetória com ângulo inicial de 25° criada no programa e GNU/*Octave*.



Fonte: Autor.

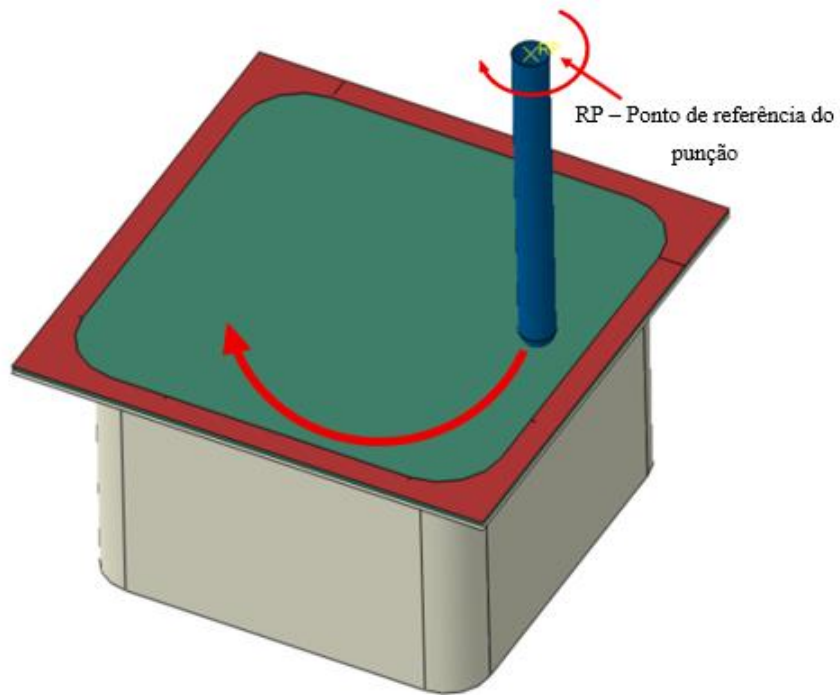
Figura 25 - Representação gráfica da trajetória com ângulo inicial de 30° criada no programa GNU/*Octave*.



Fonte: Autor.

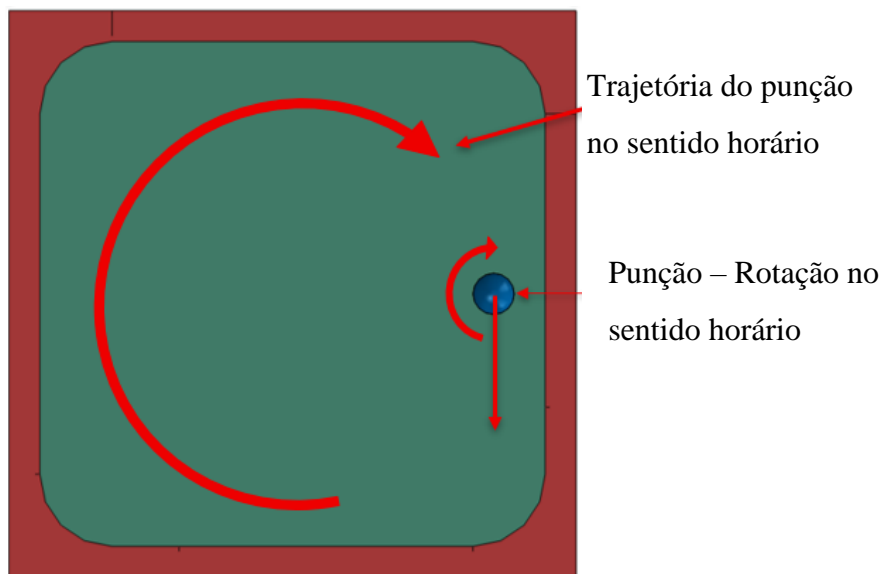
A ferramenta descreve movimento de rotação e translação ambas em sentido horário, conforme apresentado na Figura 26 e na Figura 28. Para o punção é inserido um ponto de referência “RP” em que foi atribuído os valores das coordenadas X, Y e Z das trajetórias helicoidais, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Ponto de referência no punção.



Fonte: Autor.

Figura 27- Sentido de rotação da trajetória e da ferramenta.



Fonte: Autor.

O modelo de contato adotado entre os componentes é do tipo superfície a superfície com deslizamento finito. Como o valor dos coeficientes de atrito entre os componentes são desconhecidos, foram atribuídos os seguintes coeficientes de atrito, conforme a lei de Coulomb e formulado utilizando o método de penalização.

- Matriz e chapa:
 - Coeficiente de atrito: 0,05.
- Prensa chapa e chapa:
 - Coeficiente de atrito: 0,08.
- Punção e chapa:
 - Coeficiente de atrito: 0,1.

O algoritmo implementado foi o de integração explícita no tempo, sendo que foram salvos nos arquivos de resultados um número de passos igual a 13, 19 e 17 respectivamente para os casos com ângulos de 20, 25 e 30 graus, que nesse número de passos se referem até a primeira fratura.

Em termos das condições térmicas, o modelo foi configurado para representar o problema isotérmico à temperatura ambiente. Não foram implementadas tensões residuais que fossem presentes devido ao processo de fabricação das chapas.

3.3. Planejamento experimental numérico

O planejamento dos experimentos numéricos em relação a rotação da ferramenta parte de um valor de rotação de 1750 rpm, que é a velocidade de rotação utilizada no experimento físico por Magalhães, D., *et al.*, (2025). Outros valores sugeridos contemplam a condição de não rotação e a condição de máxima rotação aplicável em uma máquina CNC comum, tal qual a destes autores citados. Além destas, foi proposto um caso intermediário de valor de rotação para haver uma abrangência adequada de toda a faixa de trabalho. Desta maneira as rotações implementadas nos experimentos numéricos combinadas com os ângulos iniciais das trajetórias estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Planejamento experimental numérico - velocidades de rotação da ferramenta.

EXP. N°	ÂNGULO INICIAL (°)	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (RPM)
1	20°	0
2		1750
3		6000
4		10000
5	25°	0
6		1750
7		6000
8		10000
9	30°	0
10		1750
11		6000
12		10000

Fonte: Autor.

Os experimentos numéricos iniciais foram realizados com 1750 rpm para validar o modelo implementando, ajustando a sensibilidade do modelo em função das propriedades do material e aspectos gerais do programa ABAQUS®. Após validação os experimentos numéricos foram implementados sem rotação e com as rotações de 6000 e 10000 rpm.

O planejamento para organização de apresentação dos resultados tem como objetivo assegurar uma abordagem organizada para a condução dos experimentos e posterior análise dos dados obtidos. A estruturação em três grupos experimentais, definidos pelos ângulos iniciais da ferramenta de 20°, 25° e 30°, associada às diferentes velocidades de rotação da ferramenta (0, 1750, 6000 e 10000 rpm), permite avaliar a influência da velocidade de rotação da ferramenta sobre o comportamento do material durante o processo. O planejamento é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Planejamento para organização da apresentação dos resultados.

CATEGORIA	OBJETIVO	VARIÁVEIS	CASOS APLICADOS
Resultados Preliminares	Validação do modelo	Densidade	Ângulo inicial da ferramenta: 20°, 25° e 30° e Rotação da Ferramenta: 1750 rpm
		Atrito	
		Material	
Resultados Principais	Análise da influencia da rotação da ferramenta	CLC com $\epsilon_1 \times \epsilon_2$	Todos os casos
		Espessura da chapa no instante da fratura	
		Espessura dos elementos ao longo do experimento	
Resultados Complementares	Análise das variáveis de influência	Triaxialidade em um instante	Todos os casos
		Triaxialidade o longo do experimento	

Fonte: Autor.

A organização de apresentação dos resultados foi dividida em três categorias que visa garantir clareza na apresentação e na interpretação dos dados:

- **Resultados Preliminares:** referem-se aos estudos realizados para validação do modelo numérico, buscando confirmar consistência entre as propriedades de modelo e os seus efeitos obtidos e assim, assegurar a confiabilidade dos resultados subsequentes;
- **Resultados Principais:** destinados à análise dos parâmetros críticos para a compreensão da influência da velocidade de rotação da ferramenta para na falha por afinamento ou trinca. O foco principal está em se avaliar as curvas CLC pelas deformações plásticas principais (ϵ_1 x ϵ_2) e evolução da espessura ao longo do experimento e a espessura da peça no instante da fratura.
- **Resultados Complementares:** complementam a análise com informações sobre a evolução da triaxialidade de tensões durante o processo. Essa avaliação é relevante para oferecer subsídios aos mecanismos de falha envolvidos e as condições que levam à ruptura do material.

As discussões gerais serão feitas à medida em que os resultados forem sendo apresentados.

4. Resultados e Discussão

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos dos experimentos numéricos conforme apresentando no planejamento para organização dos resultados.

4.1. Resultados preliminares

Com o objetivo de validar o modelo numérico implementado, foram realizados alguns experimentos numéricos variando a densidade, coeficiente de atrito e uma curva tensão x deformação alternativa, nas condições do experimento físico, ou seja, com ângulos iniciais de 20, 25 e 30 graus e com a rotação da ferramenta em 1750 rpm.

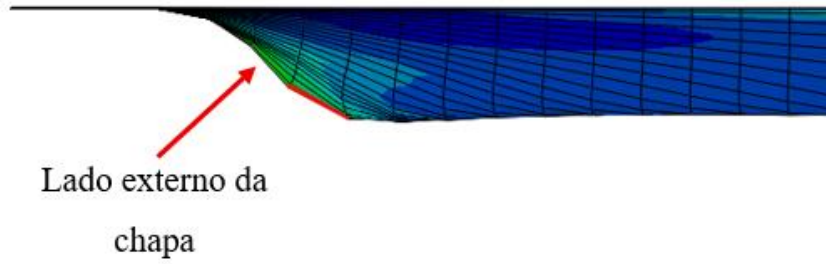
A taxa de deformação ($\dot{\epsilon}^{pl}$) foi mantida constante com o valor de $0,001 \text{ s}^{-1}$ que é a taxa de deformação do ensaio de tração dos corpos de prova do material híbrido multicamadas AA1050/AA7050, pois de acordo com o artigo de Magalhães, D., et al., (2025) os experimentos físicos foram realizados com uma velocidade linear (velocidade de avanço XY) igual a 125 mm/min. Desta maneira, ao calcular a taxa de deformação a partir da deformação plástica equivalente dos experimentos numéricos sobre o tempo total de estampagem, encontrou-se valores próximos a taxa de deformação do ensaio de tração.

As deformações plotadas na CLC do artigo de Magalhães, D., et al., (2025), apresentam as deformações em um estado final de deformação analisadas em uma linha, partindo da borda até o centro da chapa, ou seja, as deformações foram coletadas após a estampagem incremental.

Nos resultados preliminares foram analisadas as trajetórias de deformação ao longo do tempo, ou seja, coletando os dados de deformação para cada instante do experimento numérico.

Os dados foram coletados da parte externa da chapa em que ocorre principalmente o esforço de tração no momento em que a ferramenta passa sobre o elemento, conforme apresentado na Figura 28. As diferenças dos dados entre lado externo e interno serão abordadas nos resultados complementares.

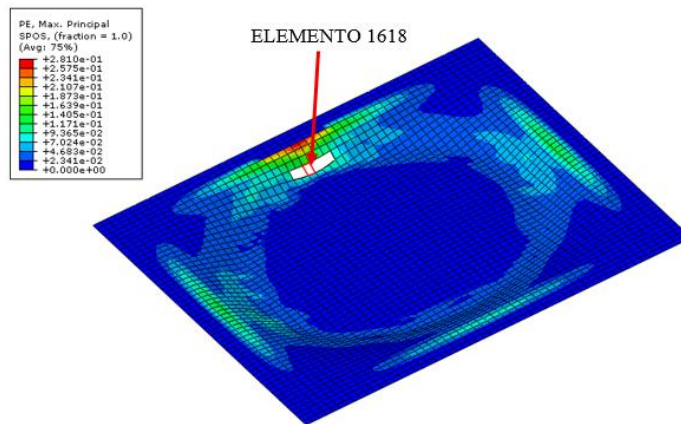
Figura 28 - Lado externo da chapa para avaliação dos resultados.



Fonte: Autor.

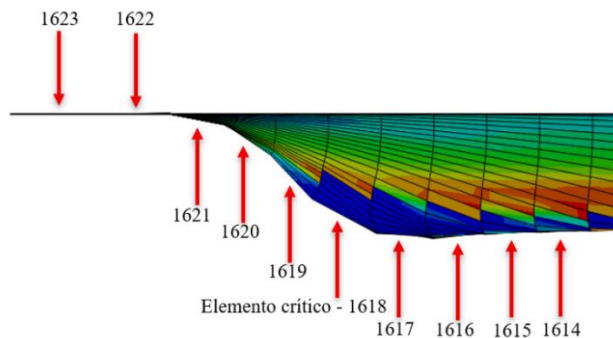
Além dos dados do lado externo da chapa, todos os resultados a seguir foram coletados do elemento crítico, ou seja, o elemento em que apresenta a primeira fratura no experimento numérico conforme a Figura 29. Também foram analisados alguns elementos adjacentes ao elemento crítico, posicionados na mesma linha que formam a geometria do modelo, conforme apresentado na Figura 30. A Figura 29 e a Figura 30 são do experimento numérico com ângulo inicial de 20°. Os elementos analisados nos experimentos numéricos com ângulo inicial de 25° e 30° estão no apêndice I.

Figura 29 - Elemento 1618 que apresenta primeira fratura na condição de ângulo inicial de 20°.



Fonte: Autor.

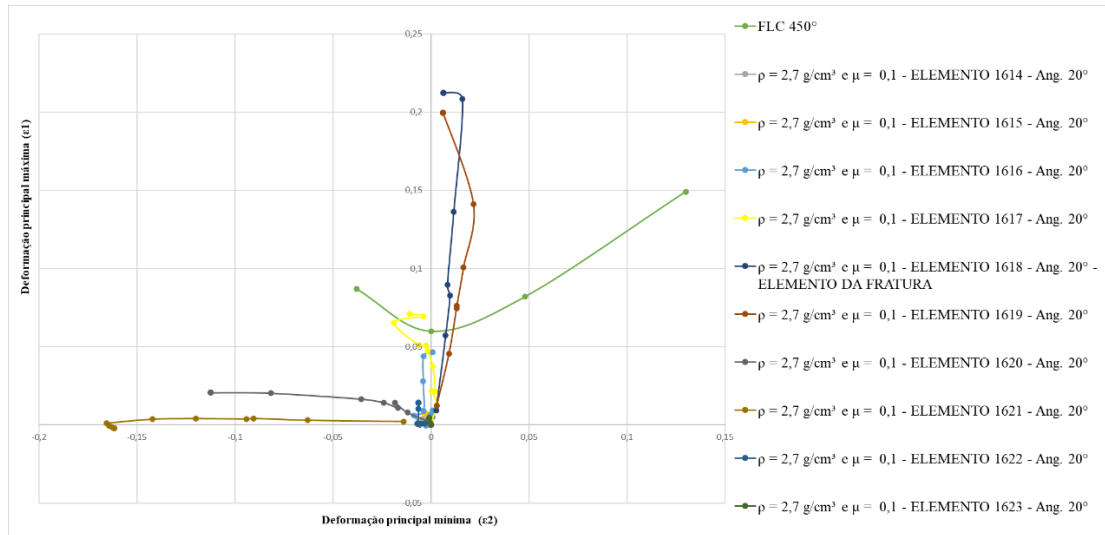
Figura 30 - Posição dos elementos - ângulo inicial de 20°.



Fonte: Autor.

A Figura 31 apresenta as trajetórias de deformações dos elementos analisados para o experimento numérico com densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$, coeficiente de atrito de $0,1$, ângulo inicial da ferramenta de 20° e rotação da ferramenta de 1750 rpm .

Figura 31 – Trajetórias das deformações para o experimento numérico com ângulo inicial de 20° , rotação da ferramenta de 1750 rpm , $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$.



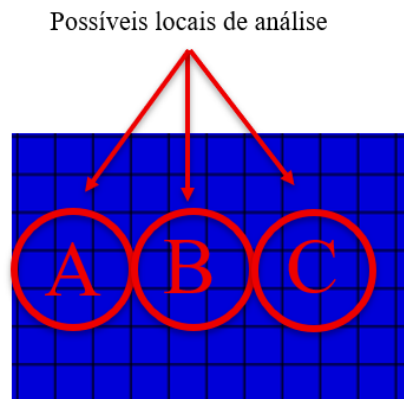
Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Figura 31, cada elemento seguiu uma trajetória de deformação única, algumas apresentaram um direcionamento para o primeiro quadrante e outras para o segundo quadrante da CLC.

No experimento numérico é analisado o comportamento de cada elemento e por imposição do programa ABAQUS® é necessário inferir um valor para o tamanho global inicial dos elementos, nesta pesquisa foi inferido o tamanho de 1 mm para cada elemento da malha da chapa de alumínio.

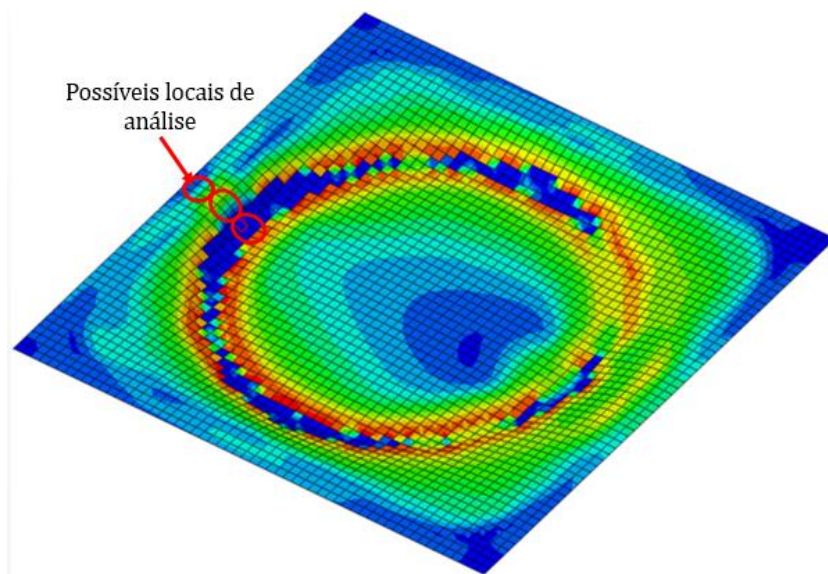
No experimento físico são impressos círculos na chapa de alumínio com aproximadamente 3 mm de diâmetro para posterior análise das deformações desses círculos. Ao comparar o experimento numérico com o experimento físico antes do processo de deformação, cabem 9 elementos de 1 mm do experimento numérico para cada círculo impresso na chapa no experimento físico, conforme apresentado na Figura 32 e na Figura 33.

Figura 32 - Possíveis locais de análise para coleta de dados.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Comparação dos círculos do experimento físico com os elementos do experimento numérico.



Fonte: Autor.

A redução da região de análise das deformações que experimento numérico permite, devido ao método dos elementos finitos, justifica as diferentes trajetórias de deformações apresentadas na Figura 31.

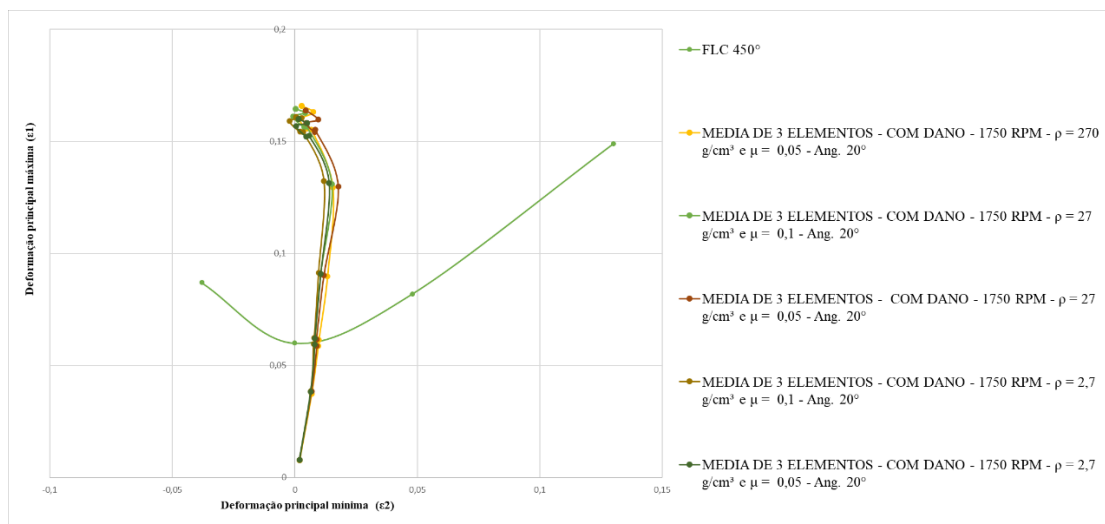
A análise das deformações do experimento físico é realizada com a melhor resolução disponível, ou seja, com o menor diâmetro das circunferências impressas na chapa de alumínio. Porém as trajetórias de deformação de cada elemento do experimento numérico, indicam a hipótese de que se aumentar a resolução da aquisição dos dados do experimento físico, ou seja, diminuir a região de análise a menor área possível, se espera perceber a sensibilidade das trajetórias de deformações, além de que se pode obter outras informações e condições não

percebidas anteriormente, uma vez que a análise dos resultados podem ocorrer nos círculos A, B ou C, conforme a Figura 32.

Assim, buscou-se uma melhor aproximação da análise dos resultados do experimento numérico em compromisso com o método de análise realizado nos experimentos físicos. Desta maneira os resultados preliminares foram analisados pelas médias entre três elementos, sendo o elemento que apresenta a primeira fratura, um elemento antes e um elemento depois, seguidos na mesma linha.

Diante disso, foram plotadas na Figura 34 as trajetórias das deformações principais máximas e mínimas no plano da chapa com as alterações de densidade e coeficiente de atrito para o experimento numérico com ângulo inicial da ferramenta de 20° e rotação da ferramenta com 1750 rpm. As trajetórias foram plotadas a partir da média entre 3 elementos, sendo o elemento que sofre a fratura (elemento 1618), um elemento antes (elemento 1619) e um elemento depois (elemento 1617), conforme apresentado na Figura 30.

Figura 34 - Comparação das médias das trajetórias das deformações variando a densidade e o coeficiente de atrito - Angulo inicial de 20° e rotação da ferramenta com 1750 rpm.



Fonte: Autor.

A Figura 34 apresenta que a densidade e o coeficiente de atrito inferem pouca influência ao deslocar as trajetórias para a esquerda ou direita, mas que para os experimentos realizados todas as curvas seguem o mesmo critério monotonicamente crescente para a direita e uma inversão de trajetória para a esquerda ao se aproximar do momento da fratura.

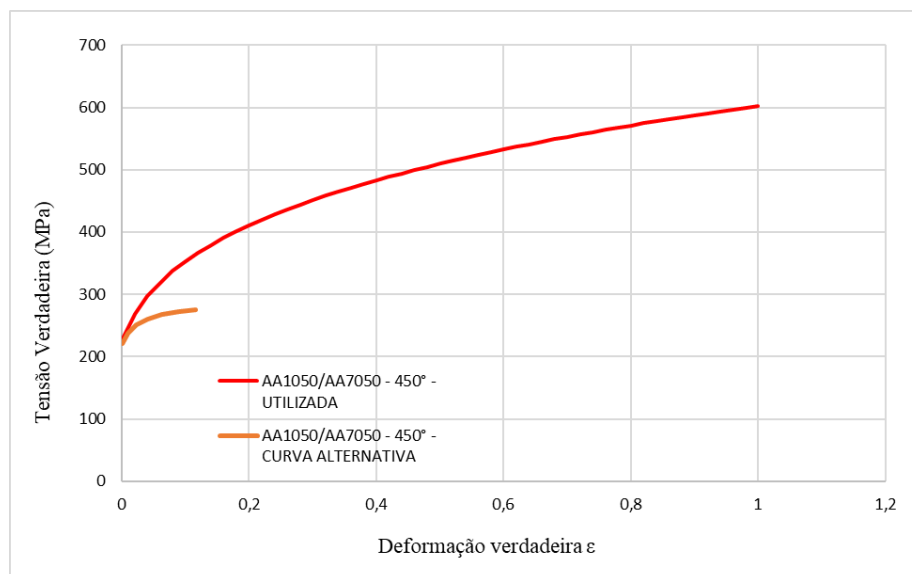
A variação da densidade para o experimento numérico visa reduzir o tempo total de simulação numérica exigido do computador. No entanto, essa abordagem pode comprometer a

fidelidade dos resultados, especialmente em análises sensíveis às propriedades do material. As densidades implementadas para validação do modelo foram de $\rho = 270 \text{ g/cm}^3$, $\rho = 27 \text{ g/cm}^3$ e $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$.

A alteração do coeficiente de atrito foi implementada com o intuito de avaliar sua influência no experimento numérico e o comportamento da trajetória da deformação. Os coeficientes de atrito implementados foram de $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,05$.

Com o intuito de avaliar como as propriedades do material influenciam no comportamento do modelo implementado, foram realizados alguns experimentos numéricos com uma curva de tensão x deformação alternativa do material híbrido multicamadas de alumínio AA1050/AA7050. Essa curva alternativa é referente a outro corpo de prova do mesmo material, produzido com pré-aquecimento a 450° C e ensaiado nas mesmas configurações do ensaio de tração. A curva alternativa do material está apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Comparação da curva tensão x deformação utilizada e alternativa.

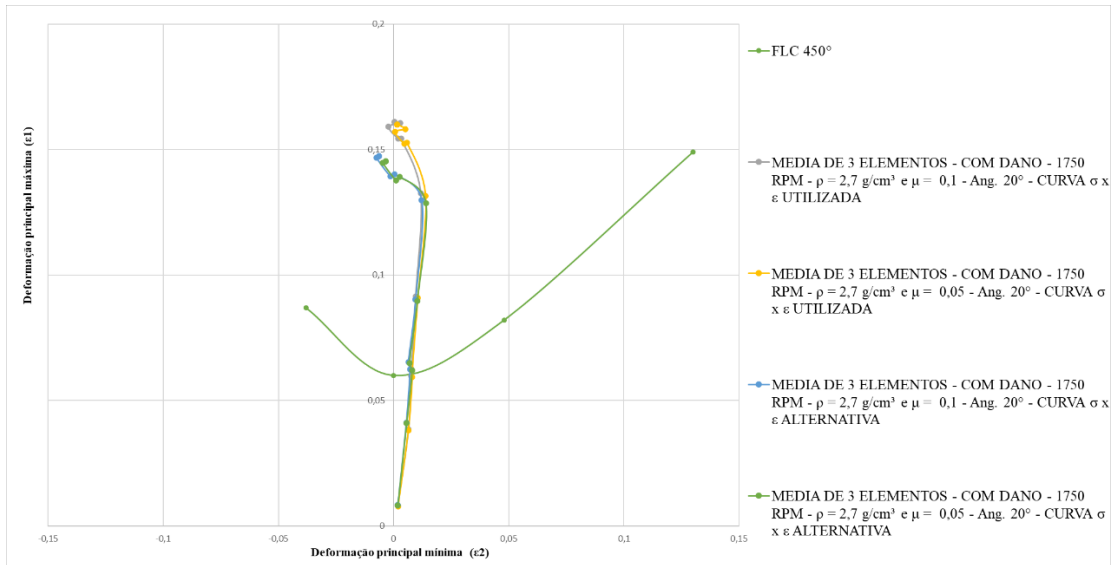


Fonte: Editado de Magalhães, D., et al, 2025.

Além da implementação do material alternativo, também foram simulados casos com variação do coeficiente de atrito com o objetivo de estudar a influência desses parâmetros simultaneamente, conforme apresentado na Figura 36 e Figura 37.

O experimento numérico do gráfico apresentado na Figura 36 foi implementado com ângulo inicial de 20° , rotação da ferramenta com 1750 rpm, $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,05$.

Figura 36 - Comparação das médias das trajetórias das deformações variando a curva tensão x deformação - Ângulo inicial de 20° e rotação da ferramenta com 1750 rpm.

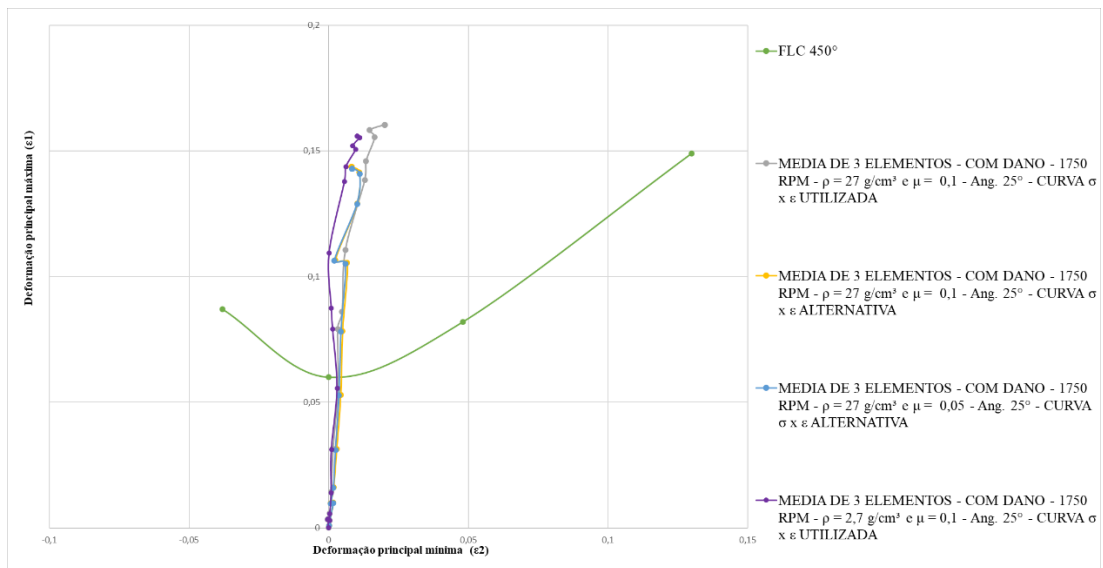


Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 36 apresenta que o coeficiente de atrito foi pouco influente nos casos analisados, porém ao aproximar-se do instante da fratura a diferença entre os materiais provocou alteração e distanciou as trajetórias que inicialmente foram monotonicamente crescente para a direita e apresentaram uma inversão para a esquerda, sendo que essa inversão ocorreu primeiro para o material alternativo.

O experimento numérico do gráfico apresentado da Figura 37 foi implementado com ângulo inicial de 25°, rotação da ferramenta com 1750 rpm, $\rho = 27 \text{ g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,05$.

Figura 37 - Comparação das médias das trajetórias das deformações variando a densidade, coeficiente de atrito e curva tensão x deformação - Angulo inicial de 25° e rotação da ferramenta com 1750 rpm.

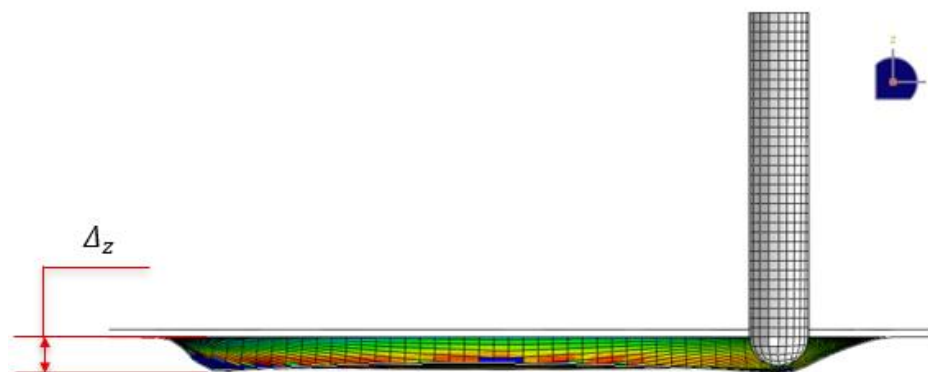


Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 37 apresenta que o coeficiente de atrito e as curvas tensão x deformação não foram influentes em alterar a direção ou distanciamento das trajetórias de deformação para os experimentos numéricos analisados, sendo que o experimento numérico com densidade de 2,7 g/cm³ e coeficiente de atrito de 0,1 apresentou uma curva crescente para a esquerda e uma inversão para a direita ao se aproximar do instante da fratura.

Além da análise das trajetórias das deformações na CLC, também se verificou a profundidade da chapa (Δz) no momento da fratura, conforme apresentado na Figura 38 e na Tabela 6.

Figura 38 - Profundidade da chapa no momento da fratura.



Fonte: Autor.

Tabela 6 - Comparação da profundidade no momento da fratura.

CONDIÇÃO	DENSIDADE (g/cm ³)	ATRITO	MATERIAL	PROFUNDIDADE (Δz)
ÂNGULO INICIAL DE 20°	$\rho = 270$	$\mu = 0,1$	UTILIZADO	4,792 mm
	$\rho = 270$	$\mu = 0,05$	UTILIZADO	2,708 mm
	$\rho = 27$	$\mu = 0,1$	UTILIZADO	2,965 mm
	$\rho = 27$	$\mu = 0,05$	UTILIZADO	2,708 mm
	$\rho = 2,7$	$\mu = 0,1$	UTILIZADO	2,708 mm
	$\rho = 2,7$	$\mu = 0,05$	UTILIZADO	2,708 mm
	$\rho = 2,7$	$\mu = 0,1$	ALTERNATIVO	2,5 mm
	$\rho = 2,7$	$\mu = 0,05$	ALTERNATIVO	2,5 mm
	EXPERIMENTO FÍSICO			

Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Tabela 6 o Δz momento da fratura para os experimentos numéricos foi distante do Δz do experimento físico.

Essa diferença pode estar associada as propriedades do modelo de dano implementadas no modelo numérico e pode ser explicada, em partes pelo fato do modelo de dano dúctil implementado ser para materiais homogêneos. O material multicamadas de alumínio AA1050/AA7050 é heterogêneo e as falhas podem ter acontecido de forma progressiva, sendo o comportamento dúctil (alumínio AA1050) o principal fator influente que pode ter aumentado o limite de conformabilidade percebido quando comparado com o material modelado.

Desta maneira os experimentos numéricos para avaliar a influência da velocidade de rotação da ferramenta foram implementados com o material da curva tensão x deformação da Figura 21, $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$.

4.2. Resultados principais

Um dos critérios para avaliar a influência da velocidade de rotação da ferramenta no experimento numérico é a trajetória da deformação plotadas no diagrama CLC. Desta maneira com o modelo validado, foram implementados os casos sem rotação, com 1750, 6000 e 10000 rpm para os ângulos iniciais da ferramenta em 20, 25 e 30 graus.

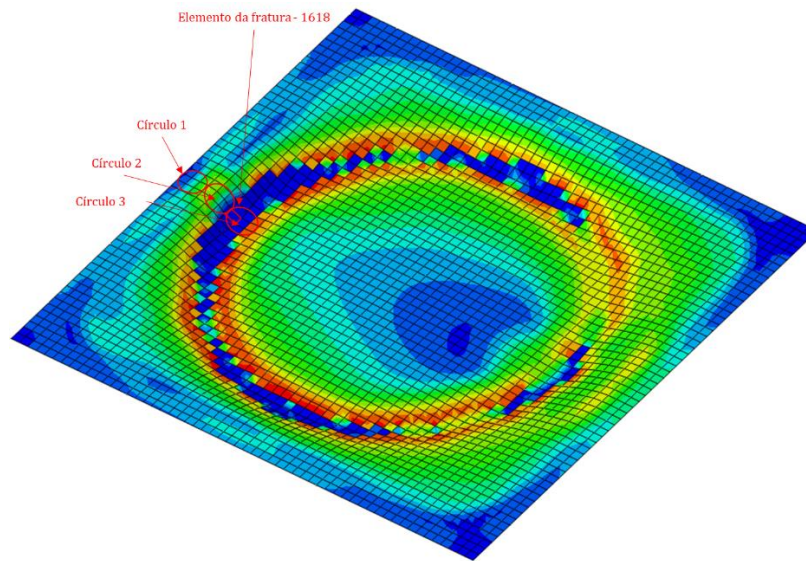
Como supracitado, as deformações plotadas na CLC do artigo de Magalhães, D., *et al.*, (2025), apresentam as deformações em um estado final de deformação analisadas em uma linha, partindo da borda até o centro da chapa, ou seja, as deformações foram coletadas após a estampagem incremental.

Neste tópico dos resultados principais, foram analisadas o estado de deformação final dos experimentos numéricos a partir das médias de 9 elementos que cabem em um círculo de

3 mm de diâmetro e comparado com os dados dos experimentos físicos, além disso também foram analisadas as trajetórias de deformação ao longo do tempo.

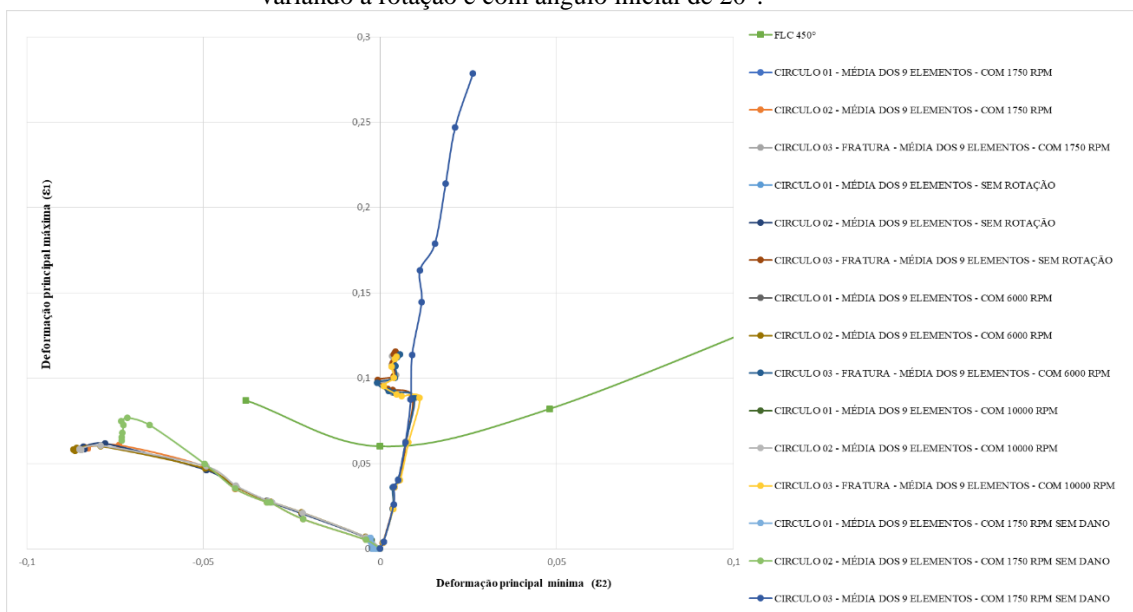
Para os experimentos com ângulo inicial da ferramenta de 20°, a Figura 39 apresenta o local onde foram analisados a médias dos elementos e a Figura 40 apresenta as trajetórias das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa com e sem rotação da ferramenta.

Figura 39 - Círculos e elementos analisados no experimento numérico com angulo inicial de 20°.



Fonte: Autor.

Figura 40 - Trajetórias das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 20°.

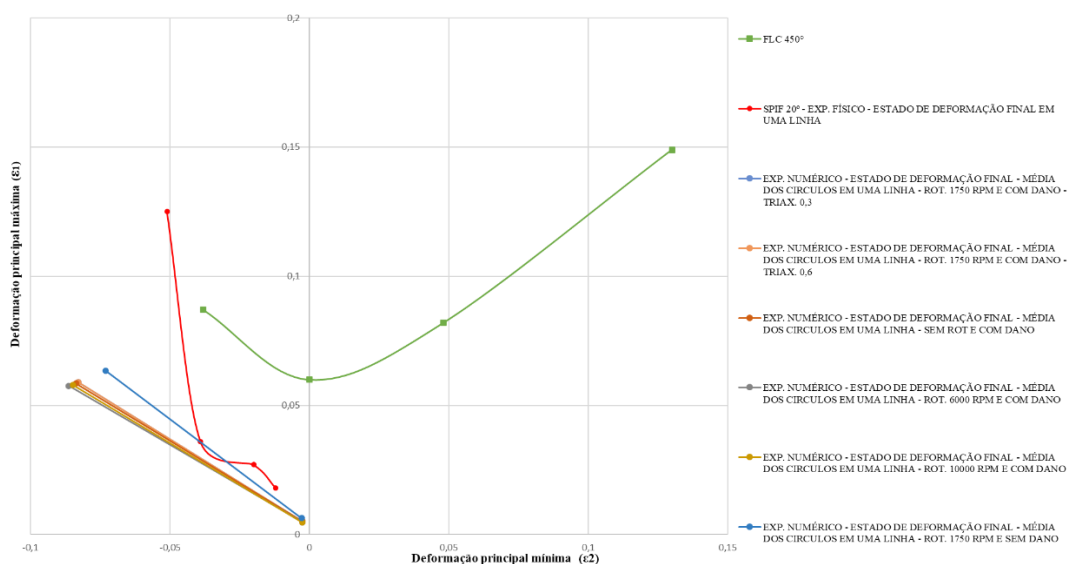


Fonte: Autor.

O diagrama da Figura 40 apresenta que as trajetórias de deformações médias de todos os casos estudados possuem o comportamento de evolução crescente, e que cada região analisada apresenta um direcionamento único, sendo que o círculo 2 anterior a fratura direciona-se para o segundo quadrante da CLC e o círculo 3 que é a região da fratura direciona-se monotonicamente crescente para o primeiro quadrante, além disso evidencia que para as rotações implementadas houve pouca diferença perceptível nas trajetórias de deformações da chapa de alumínio.

A Figura 41 apresenta o estado de deformação final dos experimentos numéricos e do experimento físico, ou seja, analisando as deformações após o processo de estampagem incremental para o ângulo inicial da ferramenta de 20° com e sem rotação da ferramenta.

Figura 41 - Estado final de deformação em uma linha no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 20°.



Fonte: Autor.

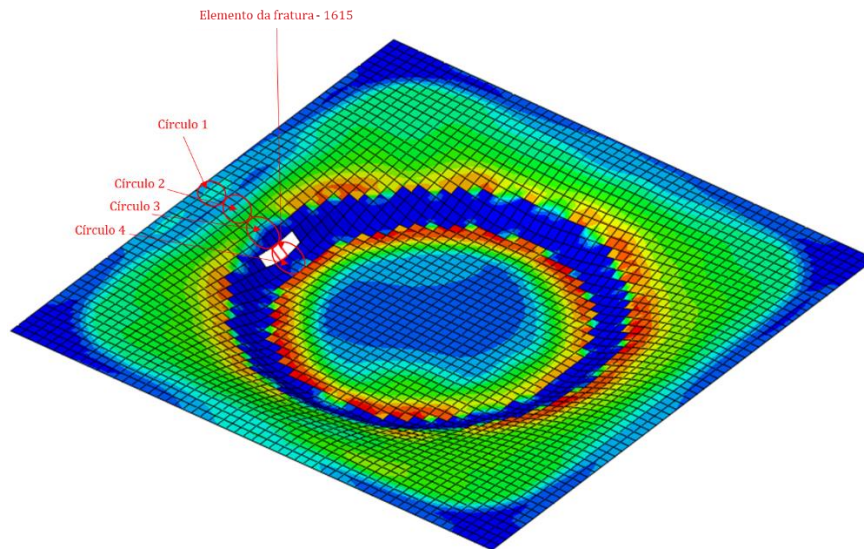
A Figura 41 apresenta que as curvas do estado final de deformação dos experimentos numéricos estão no mesmo quadrante da curva do experimento físico, além da direção monotonicamente crescente, o que indica uma aproximação entre o modelo implementado e o experimento físico. Porém a rotação da ferramenta não apresentou influencia perceptível nesses experimentos numéricos realizados.

O experimento numérico sem a implementação do modelo de dano foi realizado com a rotação da ferramenta em 1750 rpm. Para os experimentos sem danos as trajetórias de deformações plásticas apresentam um comportamento inicialmente semelhante aos modelos

com dano, porém ao longo do processo ocorre um descolamento do padrão das trajetórias, que evidencia a influência do modelo de dano implementado.

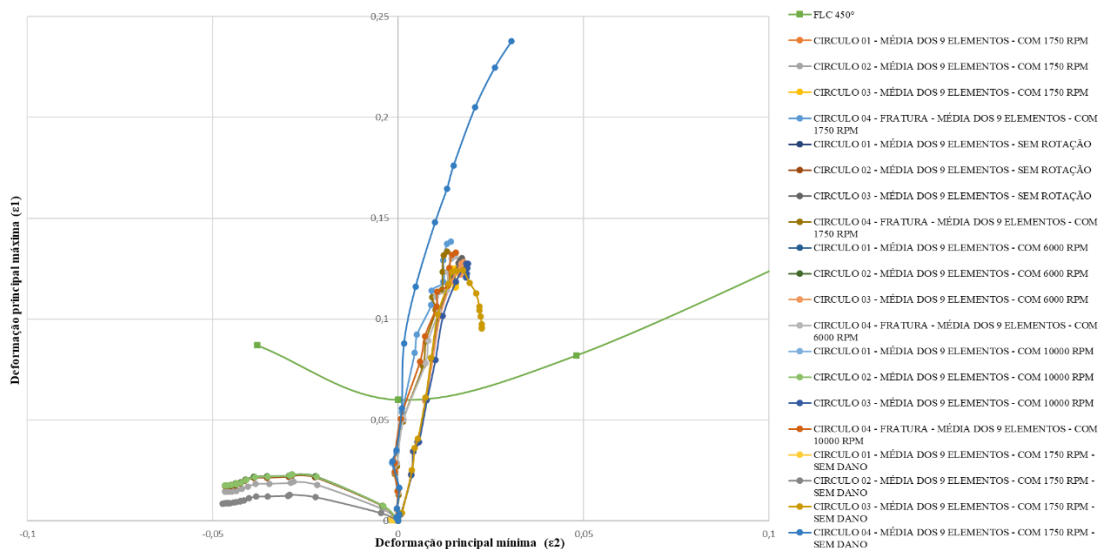
Para o experimento numérico com ângulo inicial da ferramenta de 25° , a Figura 42 aponta o elemento crítico e o local onde foram analisados a médias dos elementos e a Figura 43 apresenta as trajetórias das deformações médias.

Figura 42 - Círculos e elementos analisados no experimento numérico com ângulo inicial de 25° .



Fonte: Autor.

Figura 43 - Trajetórias das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 25° .



Fonte: Autor.

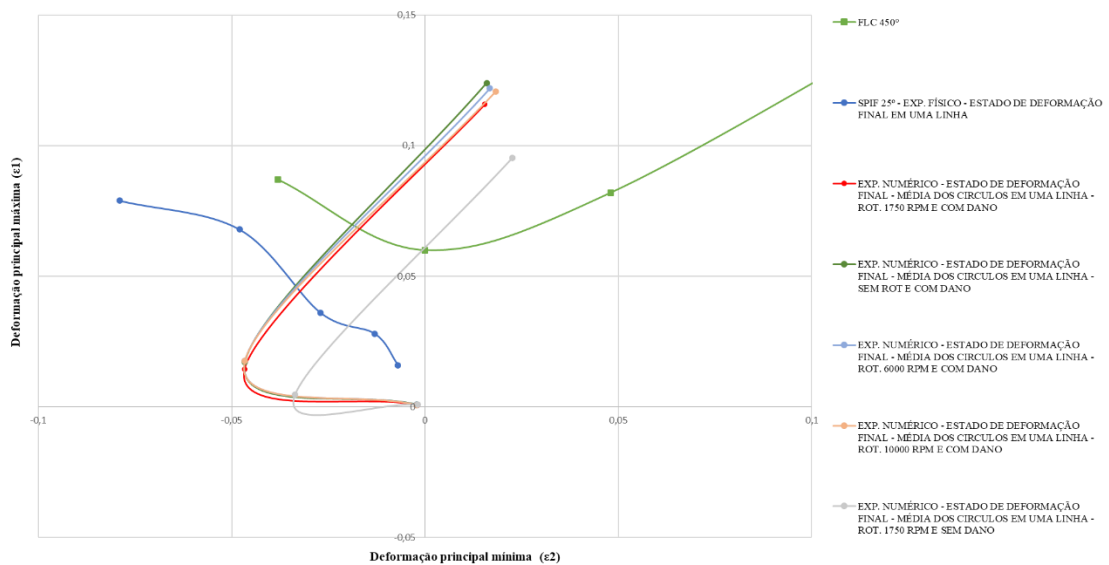
O diagrama da Figura 43 apresenta que as trajetórias de deformações médias de cada região analisada apresentam um direcionamento único, sendo que os círculos 4 e 3 que são as

regiões onde ocorre a fratura e a região imediatamente anterior, respectivamente, apresentam um comportamento monotonicamente crescente para a direita no primeiro quadrante da CLC.

O círculo 2 que é a região mais próxima a borda da chapa apresenta um comportamento para a esquerda no segundo quadrante da CLC, evidenciando que cada região deforma de maneiras diferentes. Além disso, para esses experimentos numéricos a rotação da ferramenta foi mais influente provocando um distanciamento entre as trajetórias de deformação.

A Figura 44 apresenta o estado de deformação final dos experimentos numéricos e do experimento físico, para o ângulo inicial da ferramenta de 25° com e sem rotação da ferramenta.

Figura 44 - Estado final de deformação em uma linha no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 20°.



Fonte: Autor.

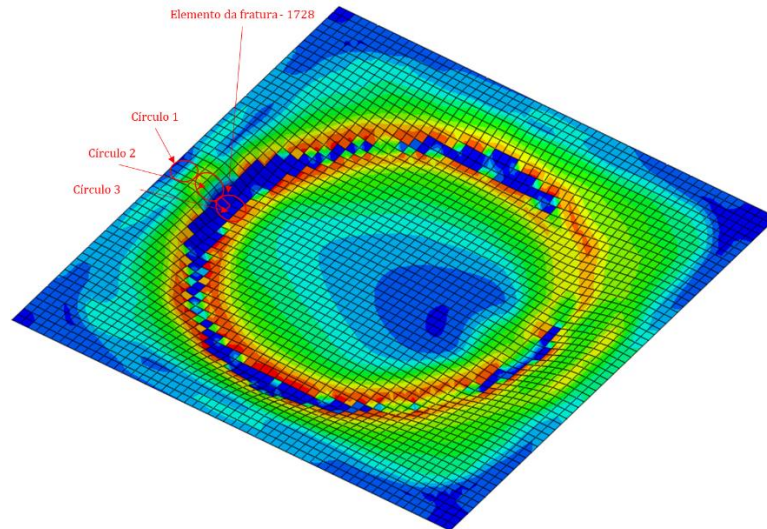
A Figura 44 apresenta que o estado de deformação dos experimentos numéricos não se aproximou do estado de deformação final do experimento físico. Além disso as curvas permaneceram inicialmente no segundo quadrante, porém inveteram-se para a direita. A rotação da ferramenta apresentou pouca influência nas curvas e curva mais destoante foi a com o modelo sem danos.

De maneira similar aos experimentos numéricos com ângulo inicial de 20° o modelo com ângulo inicial de 25° sem a implementação do modelo de dano foi realizado com a rotação da ferramenta em 1750 rpm, além disso também ocorreu um descolamento do padrão das

trajetórias com dano ao longo dos experimentos numéricos e evidencia a influência dos dados inferidos no modelo de dano.

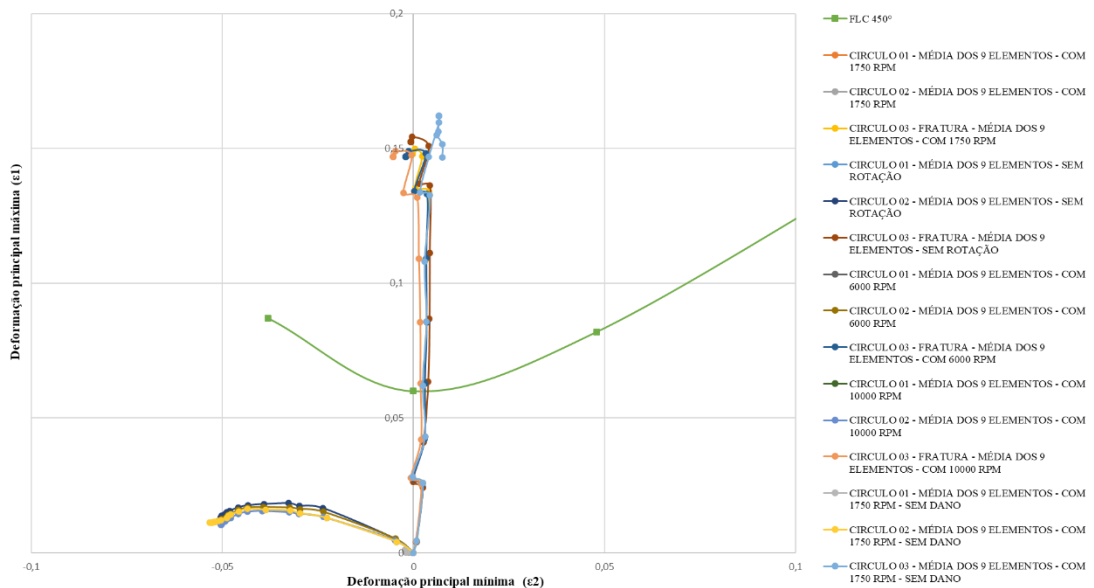
Para o experimento numérico com ângulo inicial da ferramenta de 30°, a Figura 45 aponta o elemento crítico e o local onde foram analisados a médias dos elementos e a Figura 46 apresenta as trajetórias das deformações médias.

Figura 45 - Círculos e elementos analisados no experimento numérico com ângulo inicial de 30°.



Fonte: Autor.

Figura 46 - Trajetórias das deformações plásticas principais máximas e mínimas no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 30°.

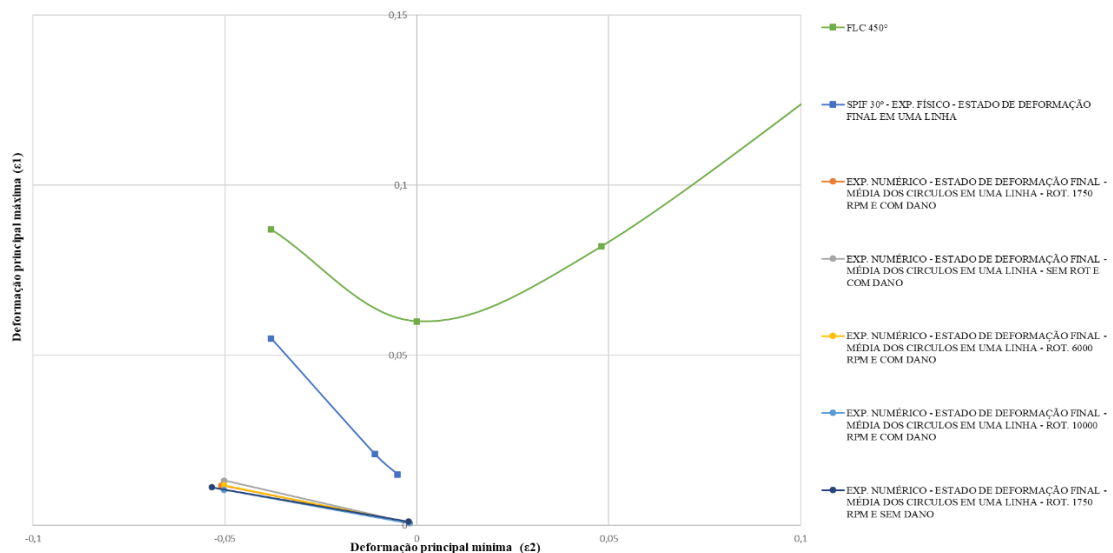


Fonte: Autor.

Similarmente aos experimentos numéricos com ângulo inicial da ferramenta de 20 e 25 graus, as trajetórias de deformação para cada região analisada seguiu um direcionamento único, sendo que para o círculo 3 que é a região da fratura a trajetória seguiu crescente para o primeiro quadrante da CLC, enquanto o círculo 2 direcionou-se para o segundo quadrante. Além disso a rotação da ferramenta e a implementação do modelo de dano não apresentaram influência significativa para alterar as trajetórias de deformações.

A Figura 47 apresenta o estado de deformação final dos experimentos numéricos e do experimento físico, para o ângulo inicial da ferramenta de 30° com e sem rotação da ferramenta.

Figura 47 - Estado final de deformação em uma linha no plano da chapa variando a rotação e com ângulo inicial de 30°.



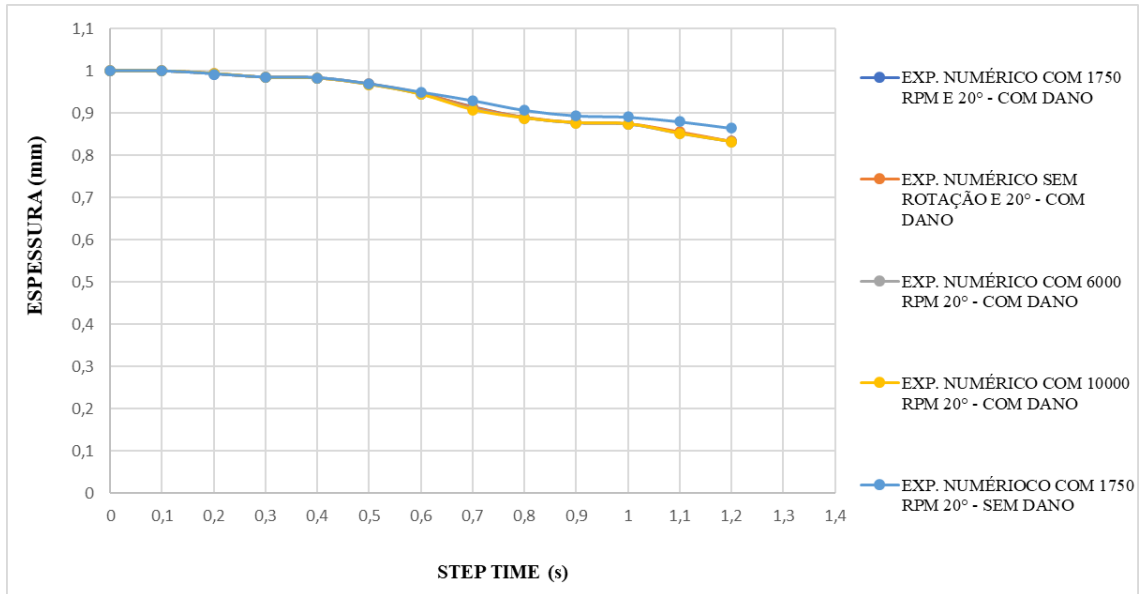
Fonte: Autor.

A Figura 47 apresenta que as curvas do estado de deformação final para o experimento com ângulo inicial da ferramenta de 30° mantiveram-se no segundo quadrante da CLC, mas distantes da curva do experimento físico. Nesses experimentos não houve alteração significativa nas trajetórias com e sem o modelo de dano implementado, assim como não se percebeu influência da velocidade de rotação da ferramenta.

Os experimentos numéricos também buscaram avaliar como a velocidade de rotação influencia o comportamento da espessura da chapa de alumínio. Foram plotados em gráficos o comportamento da espessura ao longo do tempo e o comportamento da espessura da chapa no instante da fratura.

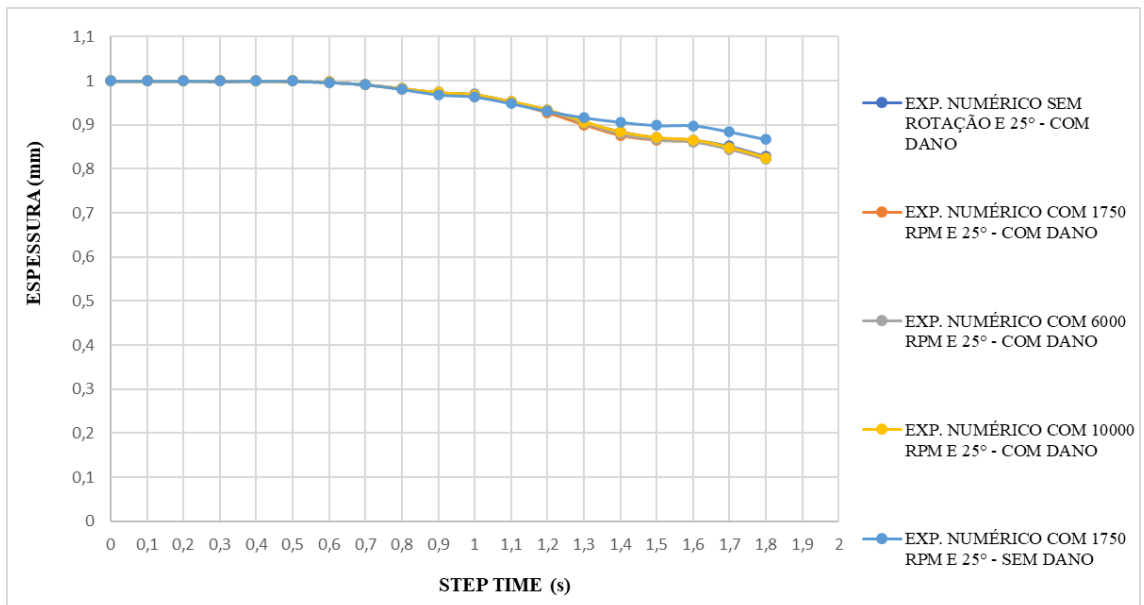
A Figura 48, a Figura 49 e a Figura 50 apresenta a evolução da espessura da chapa analisada em seu elemento crítico com variação da velocidade de rotação da ferramenta para os ângulos iniciais da ferramenta de 20, 25 e 30 graus, respectivamente.

Figura 48 - Evolução da espessura do elemento 1618 na condição de ângulo inicial de 20° ao longo do tempo.



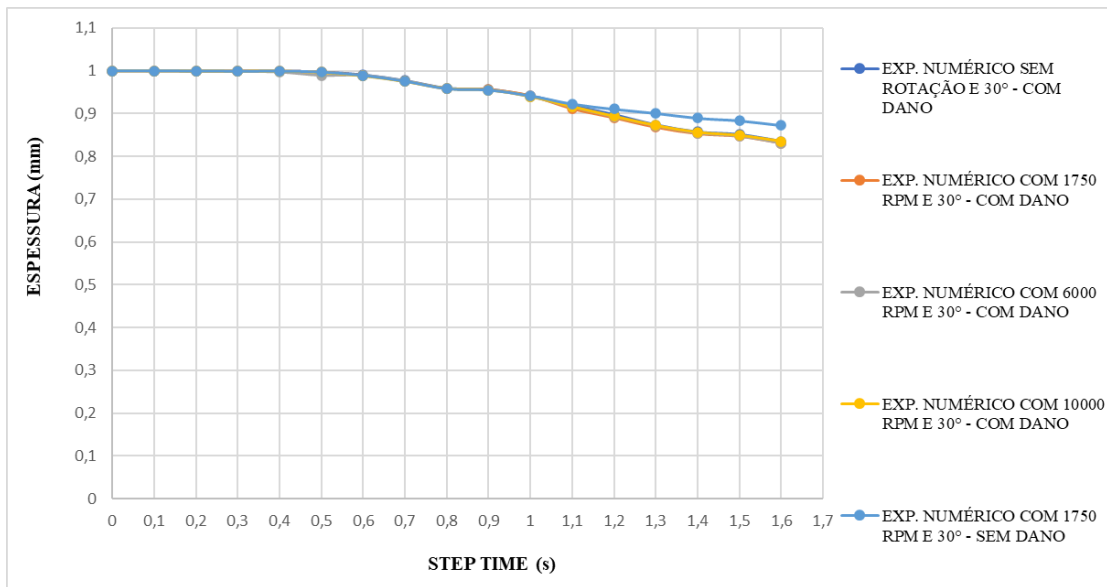
Fonte: Autor.

Figura 49 - Evolução da espessura do elemento 1615 na condição de ângulo inicial de 25° ao longo do tempo.



Fonte: Autor.

Figura 50 - Evolução da espessura do elemento 1728 na condição de ângulo inicial de 30° ao longo do tempo.

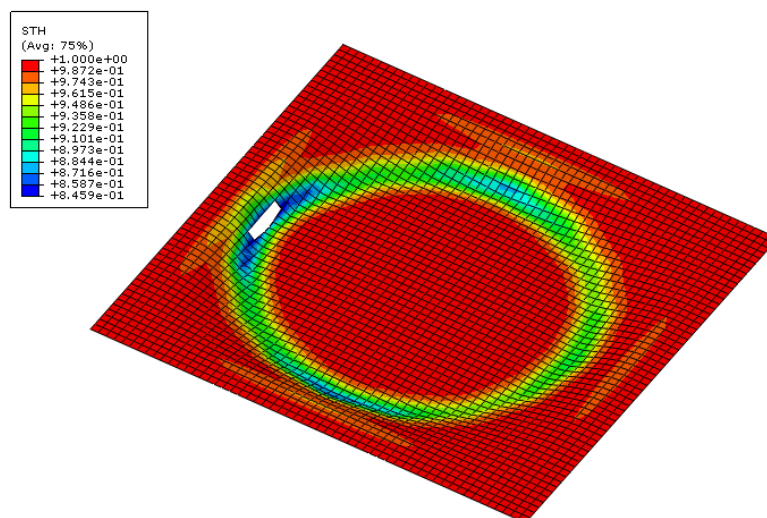


Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Figura 48, Figura 49 e na Figura 50, a rotação da ferramenta não apresentou influência na evolução da espessura da chama metálica, pois para todos os casos a espessura do elemento crítico ao longo do tempo foi a mesma. Porém quando comparado com o modelo sem danos existe uma diferença aparente entre as espessuras ao longo do tempo.

Também foi avaliado a espessura da chapa metálica no instante da fratura para o experimento numérico com ângulo inicial da ferramenta de 20° e rotação de 1750 rpm, conforme a Figura 51, que apresenta um gradiente de espessuras ao longo da chapa de alumínio.

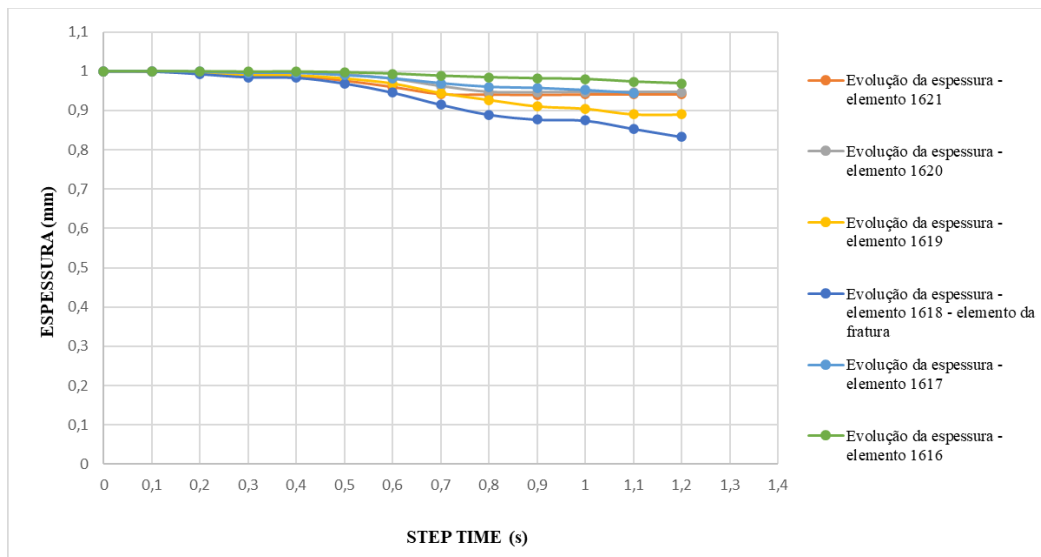
Figura 51 - Espessura dos elementos no instante da fratura - ângulo inicial de 20° e 1750 rpm.



Fonte: Autor.

Além disso para o experimento numérico com ângulo inicial da ferramenta de 20° e rotação de 1750 rpm foi avaliado a espessura da chapa metálica o longo do tempo, avaliando outros elementos ligados ao elemento crítico. A Figura 52 apresenta a evolução da espessura desses elementos ao longo do tempo.

Figura 52 - Evolução da espessura dos elementos no tempo - ângulo inicial de 20° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.



Fonte: Autor.

A Figura 52 apresenta que o elemento crítico é o que possui maior afinamento, seguido pelos elementos diretamente ligados a ele. No entanto os elementos mais próximos ao prensa chapas e os elementos que não sofreram a passagem da ferramenta apresentaram pouco afinamento. No apêndice I estão os gráficos com a evolução dos elementos para os ângulos iniciais da ferramenta de 25 e 30 graus.

Outro critério de avaliação sobre a influência da velocidade de rotação da ferramenta nos experimentos numéricos foi a profundidade da estampagem até o momento da primeira fratura. A Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9, apresentam a profundidade da estampagem com e sem rotação para os casos com ângulo inicial da ferramenta de 20, 25 e 30 graus, respectivamente.

Tabela 7 - Profundidade Δz no experimento com angulo inicial da ferramenta de 20°

CONDIÇÃO	ROTAÇÃO DA FERRAMENTA	PROFUNDIDADE (Δz)
ÂNGULO INICIAL DA FERRAMENTA - 20°	SEM ROTAÇÃO	2,689 mm
	1750 RPM	2,964 mm
	6000 RPM	2,694 mm
	10000 RPM	2,693 mm
	EXP. FÍSICO	10 mm

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Profundidade Δz no experimento com angulo inicial da ferramenta de 25°.

CONDIÇÃO	ROTAÇÃO DA FERRAMENTA	PROFUNDIDADE (Δz)
ÂNGULO INICIAL DA FERRAMENTA - 25°	SEM ROTAÇÃO	3,937 mm
	1750 RPM	3,936 mm
	6000 RPM	3,942 mm
	10000 RPM	3,931 mm
	EXP. FÍSICO	11,25 mm

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Profundidade Δz no experimento com angulo inicial da ferramenta de 30°.

CONDIÇÃO	ROTAÇÃO DA FERRAMENTA	PROFUNDIDADE (Δz)
ÂNGULO INICIAL DA FERRAMENTA - 30°	SEM ROTAÇÃO	3,509 mm
	1750 RPM	3,513 mm
	6000 RPM	3,509 mm
	10000 RPM	3,514 mm
	EXP. FÍSICO	6,50 mm

Fonte: Autor.

Conforme apresentado nas tabelas acima a profundidade da estampagem dos experimentos numéricos em relação aos experimentos físicos evidenciam uma notória discrepância com erros de 73%, 65% e 46% para os casos com 20, 25 e 30°, respectivamente, e como supracitado nos resultados preliminares o motivo dessa discrepância pode ser explicado devido ao modelo homogêneo implementado. Desta maneira a profundidade da estampagem necessita de mais investigações para se obter valores mais próximo aos valores reais dos experimentos físicos.

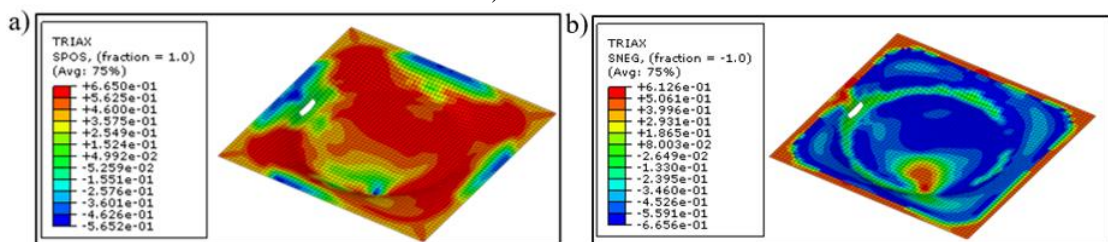
4.3. Resultados complementares

Os resultados complementares focam no levantamento dos dados e análise da triaxialidade durante o experimento numérico da estampagem incremental para fornecer suporte à compreensão dos mecanismos de falha e das condições que provocam a ruptura do material.

Desta maneira foram analisados a triaxialidade ao longo do tempo, no instante da fratura e em um instante anterior a fratura, e os valores obtidos foram retirados dos elementos críticos, ou seja, os elementos que apresentam a primeira fratura.

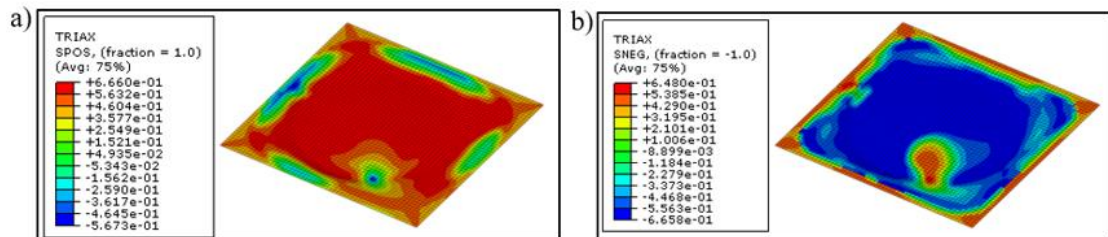
A Figura 53 e a Figura 54 apresentam o gradiente da triaxialidade no momento da fratura e o gradiente em um momento anterior a fratura, no instante 0,7 s. Ambas analisadas no lado externo e lado interno da chapa nos experimentos com ângulo de inclinação inicial da ferramenta de 20° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.

Figura 53 – Triaxialidade geral no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 20°, a) lado interno e b) lado externo.



Fonte: Autor.

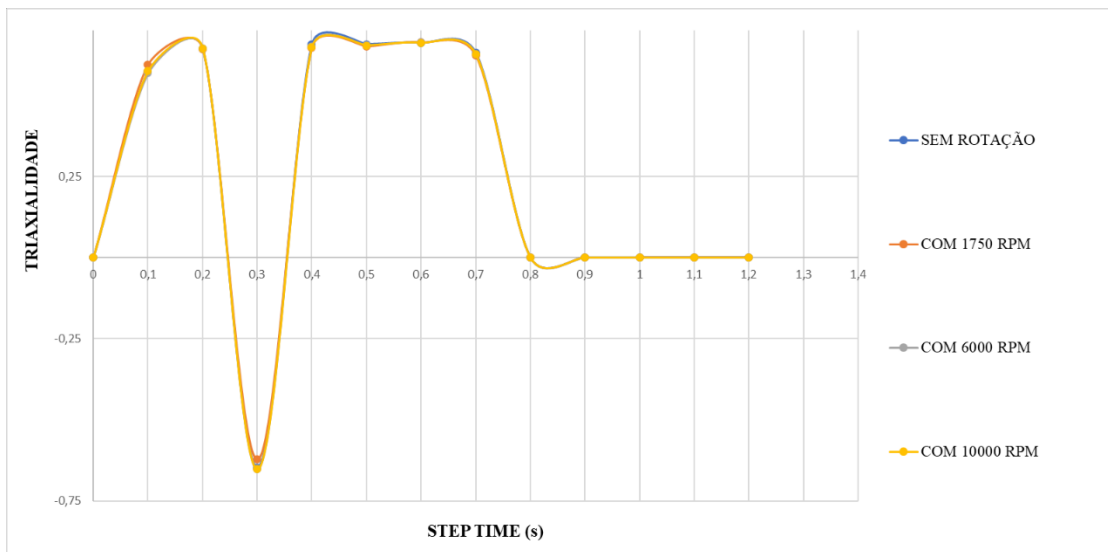
Figura 54 – Triaxialidade geral no instante 0,7 s antes da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 20°, a) lado interno e b) lado externo.



Fonte: Autor.

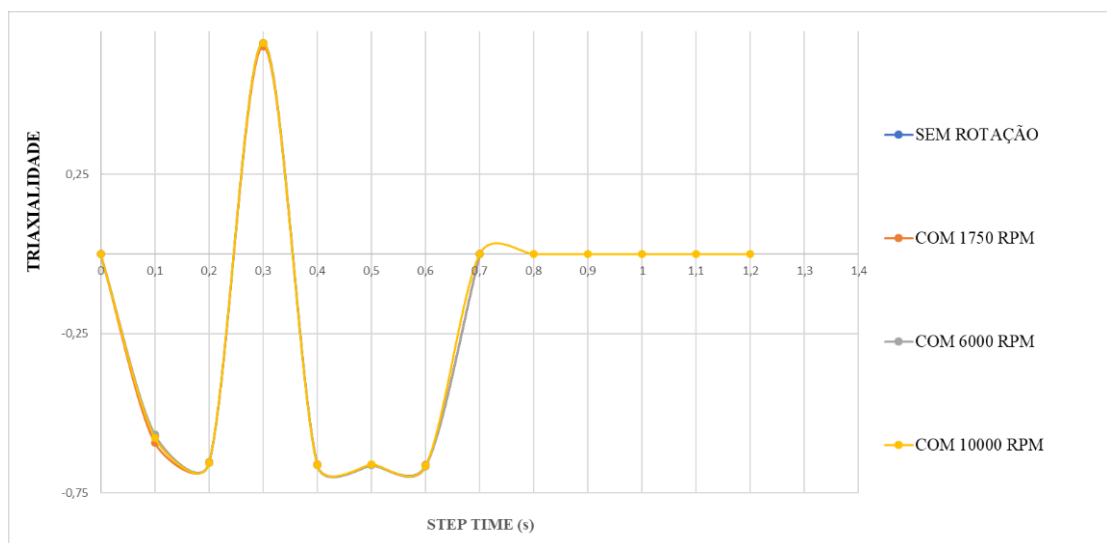
A Figura 55 e a Figura 56 apresentam os gráficos da evolução da triaxialidade ao longo do tempo, analisadas no elemento crítico (elemento que apresenta a primeira fratura), no lado interno e lado externo, respectivamente, no experimento numérico com ângulo de inclinação inicial da ferramenta de 20°, sem e com rotação da ferramenta.

Figura 55 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo - lado interno da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 20°.



Fonte: Autor.

Figura 56 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo lado externo da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 20°.



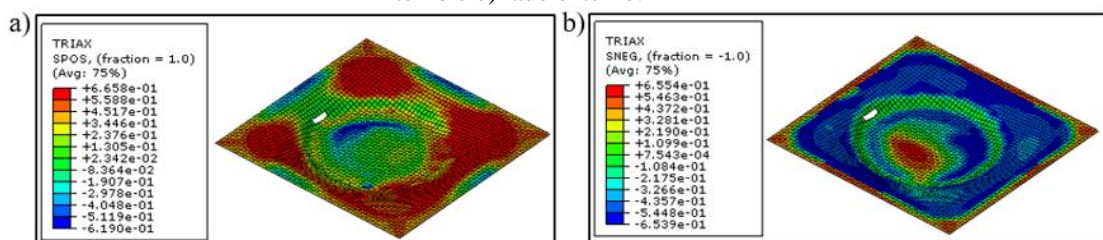
Fonte: Autor.

Essas figuras e gráficos apontam um gradiente da triaxialidade e que ela não é constante no tempo. Além disso as informações apresentadas na Figura 55 e na Figura 56 sugerem que a fratura se inicia pelo lado externo da chapa uma vez que a triaxialidade chega ao valor de 0 primeiro quando comparada com o lado interno.

A rotação da ferramenta não proporciona alteração significativa na triaxialidade. Além disso quando a ferramenta passa sobre o elemento analisado ocorre a inversão de sinal, por exemplo no instante 0,3 s do gráfico da Figura 55 e da Figura 56.

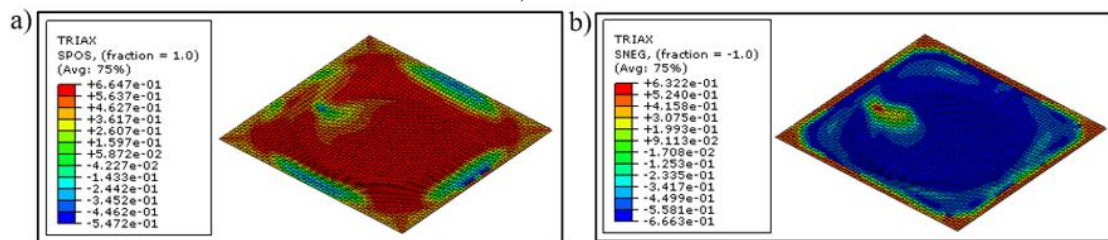
A Figura 57 e a Figura 58 apresentam o gradiente da triaxialidade no momento da fratura e o gradiente em um momento anterior a fratura, no instante 0,9 s. Ambas analisadas no lado externo e lado interno da chapa nos experimento com ângulo de inclinação inicial da ferramenta de 25° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.

Figura 57 – Triaxialidade geral no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 25°, a) lado interno e b) lado externo.



Fonte: Autor.

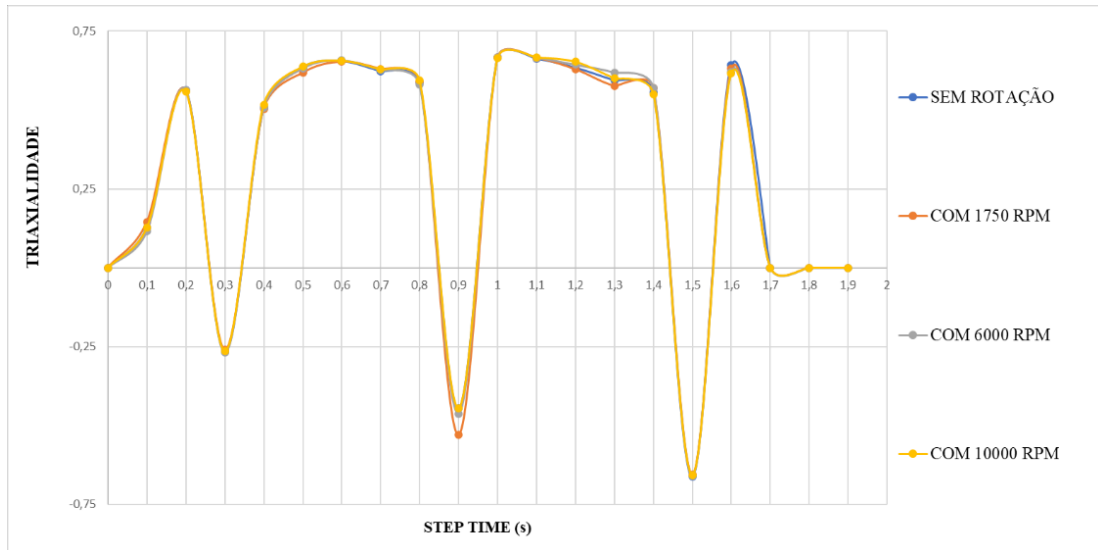
Figura 58 - Triaxialidade geral no instante 0,9 antes da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 25°, a) lado interno e b) lado externo.



Fonte: Autor.

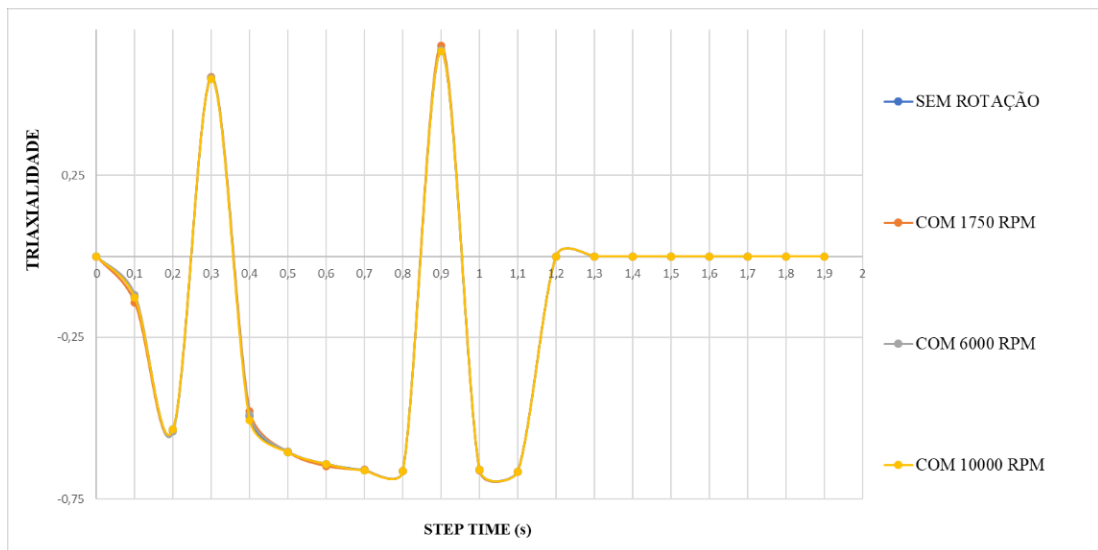
A Figura 59 e a Figura 60 apresentam os gráficos da evolução da triaxialidade ao longo do tempo, analisadas no elemento crítico (elemento que apresenta a primeira fratura), no lado interno e lado externo, respectivamente, no experimento numérico com ângulo de inclinação inicial da ferramenta de 25°, sem e com rotação da ferramenta.

Figura 59 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo lado interno da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 25°.



Fonte: Autor.

Figura 60 - Triaxialidade do elemento crítico ao longo do tempo lado externo da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 25°.



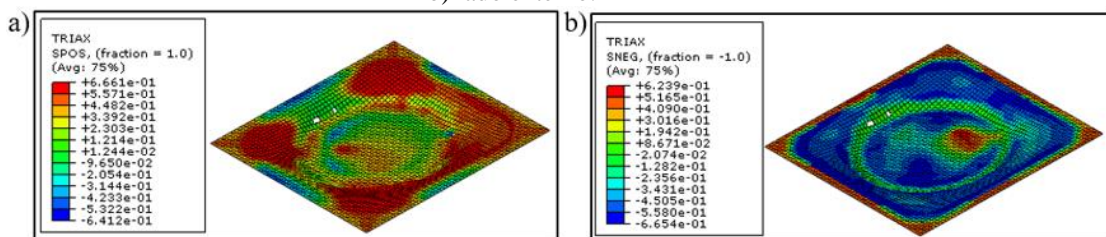
Fonte: Autor.

Essas figuras e gráficos também mostram um gradiente da triaxialidade e que a ela não é constante no tempo. As informações apresentadas também sugerem que a fratura se inicia pelo lado externo da chapa e que a rotação da ferramenta não proporciona alteração significativa. Da mesma maneira quando a ferramenta passa sobre o elemento analisado ocorre a inversão de sinal da triaxialidade, por exemplo no gráfico da Figura 60 nos instantes 0,3 s e 0,9 s.

Quando o ângulo de inclinação da posição da ferramenta é de 25°, o gráfico da Figura 59 apresenta uma diferença da triaxialidade devido a rotação da ferramenta, sendo evidenciada nos instantes 0,9, 1,2 e 1,3 segundos analisadas pelo lado interno da chapa.

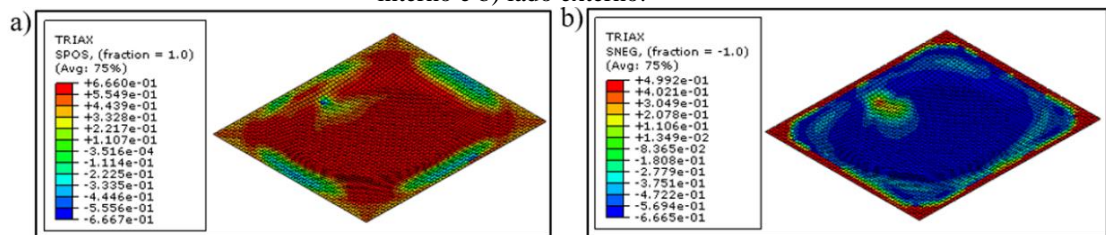
A Figura 61 e a Figura 62 apresentam o gradiente da triaxialidade no momento da fratura e o gradiente em um momento anterior a fratura, no instante 0,9 s. Ambas analisadas no lado externo e lado interno da chapa no experimento numérico com ângulo de inclinação inicial da ferramenta de 30° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.

Figura 61 - Triaxialidade no instante da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 30°, a) lado interno e b) lado externo.



Fonte: Autor.

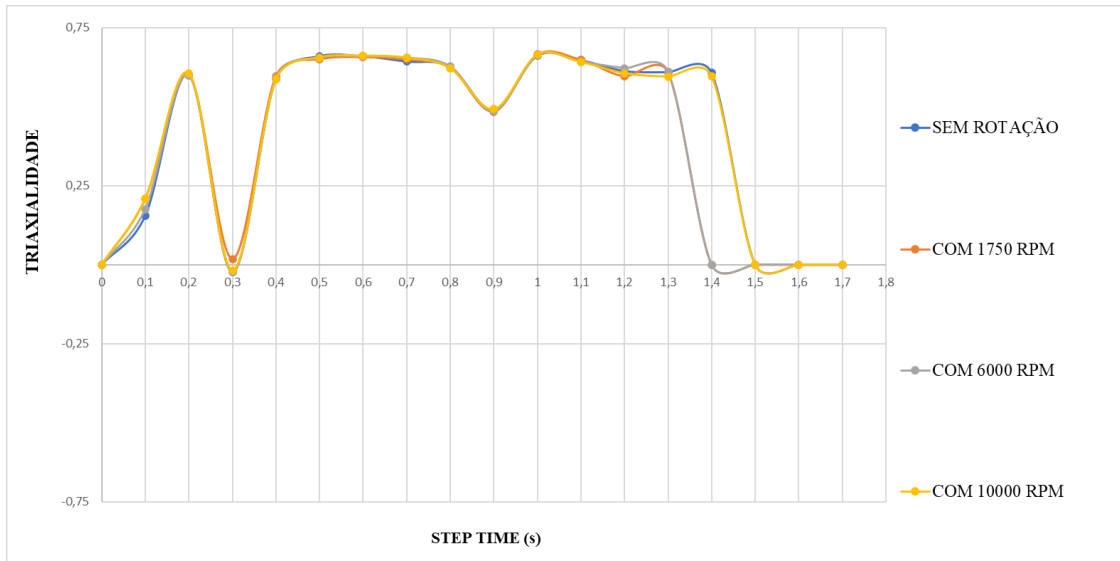
Figura 62 - Triaxialidade no instante 0,9 antes da fratura com ângulo inicial da ferramenta: 30°, a) lado interno e b) lado externo.



Fonte: Autor.

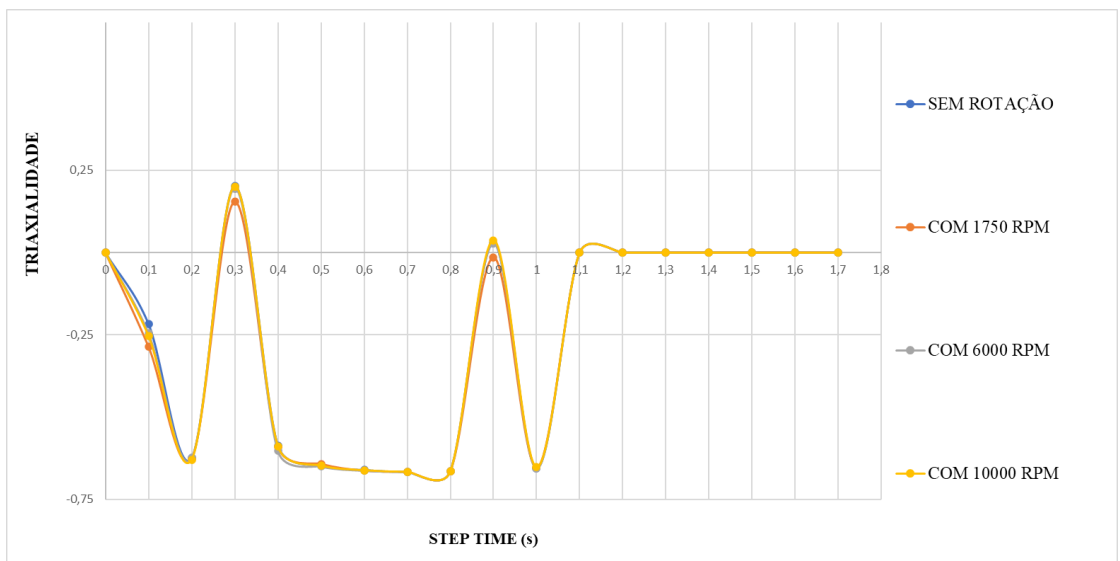
A Figura 63 e a Figura 64 apresentam os gráficos da evolução da triaxialidade ao longo do tempo, analisadas no elemento crítico (elemento que apresenta a primeira fratura), no lado interno e lado externo, respectivamente, no experimento numérico com ângulo de inclinação inicial da ferramenta de 30°, sem e com rotação da ferramenta.

Figura 63- Triaxialidade no elemento crítico ao longo do tempo lado interno da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 30°.



Fonte: Autor.

Figura 64 - Triaxialidade no elemento crítico ao longo do tempo lado externo da chapa – ângulo inicial da ferramenta: 30°.



Fonte: Autor.

Igualmente as análises anteriores com o ângulo da posição da ferramenta em 20° e 25°, as figuras e gráficos também apontam um gradiente da triaxialidade e que a ela não é constante no tempo, também sugerem que a fratura se inicia pelo lado externo da chapa. Da mesma maneira quando a ferramenta passa sobre o elemento analisado ocorre a inversão de sinal da triaxialidade, por exemplo nos instantes 0,3s e 0,9s do gráfico da Figura 64.

Embora a rotação da ferramenta não tenha apresentado influência significativa geral sobre a triaxialidade, o gráfico da Figura 63 evidencia alterações nos instantes de 1,4 s e 1,5 s,

indicando que a fratura no lado interno da chapa ocorre mais tardiamente na ausência de rotação e também quando a ferramenta opera a 10.000 rpm.

5. Conclusão

Dada a aplicabilidade do processo de estampagem incremental é importante entender os parâmetros de funcionamento do processo e o comportamento do material a ser conformado, com o objetivo de avaliar e estimar os melhores parâmetros a serem utilizados no processo de estampagem incremental.

A partir dessa premissa este trabalho buscou avaliar a influência da velocidade de rotação da ferramenta em um processo de estampagem incremental implementada no programa de simulação numérica ABAQUS®. Com variação do ângulo da posição inicial da ferramenta em 20°, 25° e 30° em relação a horizontal e implementação do modelo sem rotação e com rotação da ferramenta em 1750, 6000 e 10000 rpm.

Diante das hipóteses assumidas, das condições gerais de estudo e de implementação do modelo, no contexto dos experimentos numéricos, os resultados apontaram que para os modelos implementados a rotação da ferramenta não apresentou influência significativa nos parâmetros avaliados, sendo as trajetórias das deformações plásticas, curvas do estado de deformação final, espessura da chapa e profundidade de estampagem. Porém as curvas de deformações plásticas médias do estado de deformação final para o ângulo inicial da ferramenta de 20° dos modelos implementados com o modelo de dano obtiveram-se uma boa aproximação em relação a curva do experimento físico.

Assim, a investigação da influência da rotação da ferramenta permanece relevante, uma vez que a literatura abordada nesta pesquisa não apresenta consenso sobre seu efeito na conformabilidade e os melhores ajustes da velocidade de rotação, sendo especificado para cada caso estudado, além disso os resultados obtidos neste trabalho não permitem confirmar sua contribuição para uma melhora da conformabilidade do material.

Os resultados das trajetórias das deformações para cada elemento indicam a relevância dos experimentos numéricos como preparação para os experimentos físicos, pois ao apresentar trajetórias de deformação diferentes para cada elemento analisado sugere-se que a região de análise do experimento físico pode apresentar comportamentos diferentes, assim os experimentos numéricos podem indicar regiões, parâmetros e dados de interesse a serem investigados nos experimentos físicos.

Também indicam a importância de se apontar a área analisada e melhorar a resolução da aquisição dos dados nos experimentos físicos, com a hipótese de se verificar a sensibilidade das trajetórias das deformações e de que se pode obter outras informações e condições não percebidas anteriormente.

Além disso, os modelos implementados apontam um gradiente da triaxialidade, seja em um momento ou ao longo do tempo. Diante disso os resultados dessa pesquisa auxiliam em seu entendimento, uma vez que ela se mostrou inconstante devido as tensões que variam durante o processo de estampagem incremental e também na possibilidade de que a fratura se inicie pelo lado externo da chapa de alumínio.

Desta maneira esta pesquisa analisou o comportamento do material híbrido multicamadas de alumínio AA1050/AA7050 em diferentes configurações de experimentos numéricos, gerou os diagramas das CLCs e trajetórias das deformações plásticas, curvas do estado de deformação final e identificou que para os modelos implementados a rotação da ferramenta não apresentou uma real influência nos experimentos numéricos e parâmetros avaliados.

6. Sugestões de trabalhos futuros

Diante os resultados obtidos e do desenvolvimento desta pesquisa, propõem-se algumas sugestões para estudos futuros.

- Implementar outros modelos de dano disponíveis no software ABAQUS®;
- Implementar um modelo utilizando o material híbrido multicamadas de alumínio AA1050/AA7050 fabricado com pré-aquecimento à temperatura de 500 °C.
- Realizar experimentos físicos com variação da velocidade de rotação da ferramenta, com o objetivo de avaliar a influência da velocidade de rotação da ferramenta.
- Implementar um modelo no programa ABAQUS® utilizando a chapa como elemento sólido com o objetivo de flagrar a abertura da fratura.
- Realizar experimentos numéricos variando a velocidade de rotação da ferramenta e avaliar um conjunto maior de elementos para entender o comportamento das deformações em uma escala maior.

Referências

- ALVES, F. A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo. 2000
- ANSYS. **Ansys – Brasil | Software de Simulação de Engenharia**. 2024. Disponível em: <https://www.ansys.com/>.
- ARAÚJO, R. *et al.* Single point incremental forming of a medical implant. **Key Engineering Materials**. Portugal, v. 554–557, p. 1388–1393, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1388.
- ÁVILA, A.F.; VIEIRA, E. L. S. Proposing a better limit diagram prediction: a comparative study. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 141, p. 101-208. 2003.
- BAGUDANCH, I. *et al.* Manufacturing of Polymeric Biocompatible Cranial Geometry by Single Point Incremental Formin. **Procedia Engineering**. V. 132, p. 267–273, 2015. ISSN: 1877-7058, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.494.
- BANABIC, D. *et al.* Development of a new procedure for the experimental determination of the Forming Limit Curves. **Cirp Annals: Manufacturing Technology**. Cluj-Napoca, p. 255-258, 2013.
- BASTOS, A. L. **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação**. 2009. Dissertação (mestrado), Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, SP, 2009. 149p.
- BISHNOI, P; CHANDNA, P. Formability of Aluminum Alloys During Single Point Incremental Forming: A review. **International Journal of Manufacturing, Material, and Mechanical Engineering**. India, v. 12, n. 1, p. 1-26, 2022. DOI: 10.4018/IJMMME.296277.
- BOULILA, A. *et al.* Contribution to a biomedical component production using incremental sheet forming. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. V. 95, p. 2821–283, 2017. DOI: 10.1007/s00170-017-1397-4.
- BRESCIANI E. F., SILVA, I. B., BATALHA, G. F., BUTTON, S. T. **Conformação Plástica dos Metais**. São Paulo: Campinas, 2011.
- CENTENO, G. *et al.* A functional methodology on the manufacturing of customized polymeric cranial prostheses from CAT using SPIF. **Rapid Prototyping Journal**. V. 23, n. 4, p. 771–780, 2017. DOI: 10.1108/RPJ-02-2016-0031.
- CENTENO, G. *et al.* Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming. **Procedia Engineering**. Espanha, v, 183, p. 180-187, 2017. ISSN: 1877-7058 DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.059.
- CHENG, Z. *et al.* Incremental sheet forming towards biomedical implants: a review. **Journal of Materials Research and Technololy**. V. 4, n. 4, p 7225-7251, 2020. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.096.

DA ROCHA, Rafael Pandolfo et al. Determinação das curvas limite de conformação dos aços inoxidáveis Aisi 304 e Aisi 430 para diferentes condições superficiais de lubrificação: Determination of the forming limit curves of Aisi 304 and Aisi 430 stainless steels for different surface lubrication conditions. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 7, p. 54251-54273, 2022.

DALEFFE, A.; LACERDA, J. Estudo do processo de estampagem incremental em chapa de alumínio puro. Revista Vincci – **Periódico Científico do UniSATC**. V. 1, n.1, p. 99-119, 2016. Disponível em: <https://revistavincci.satc.edu.br/index.php/Revista-Vincci/article/view/73>

DASSAULT SYSTÈMES SIMULIA CORP. Abaqus 6.14 documentation. Providence, RI, 2014. Disponível em: <http://62.108.178.35:2080/v6.14/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

DURANTE, M. *et al.* The influence of tool rotation on an incremental forming process. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 209, n. 9, p. 4621–4626, 2009. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.11.028.

EVANGELISTA, S. H. **Diagramas de limite de conformação aplicados à análise por elementos finitos de um processo de estampagem em chapas metálicas**. 2000. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2000. 154 p.

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. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61499-1.

FIorentino, A.; MARZI, R.; CERETTI, E. Preliminary results on Ti incremental sheet forming (ISF) of biomedical devices: Biocompatibility, surface finishing and treatment. **International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems**. Italia, v. 5, n. 1, p. 36–45, 2012. DOI: 10.1504/IJMMS.2012.046146.

FISH, J; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Tradução e revisão técnica Ricardo Nicolau Nassar Koury, Luiz Machado. – Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

GOODWIN, G. M. **Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop**. SAE Transactions. p. 380-387, 1968.

GUPTA, P.; SZEKERES. A.; JESWIET, J. Design and development of an aerospace component with single-point incremental forming. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. V.103, p. 3683–3702, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-03622-4.

HAGAN, E.; JESWIET, J. A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture**. V. 217, n 2, p. 213–225, 2003. DOI: 10.1243/095440503321148858.

HALLQUIST, J. O. *et al.* LS-DYNA vs. 950 User Manual. Livemore Software Technology Corp. 2000. Disponível em: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf. Acesso em 09 de jul. de 2024.

HAM, M; JESWIET, J Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. **CIRP Annals**. V. 54, n. 2, p. 88-114, 2005. ISSN: 0007-8506. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60021-3.

HAM, M; JESWIET, J. Forming limit curves in Single Point Incremental Forming. **CIRP Annals**. V. 56, n. 1, p. 277-280, 2007. ISSN: 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.064.

HOLMBERG, S.A et al. **Evaluation of Sheet Metal Formability by Tensile Tests**. Department of Structural Mechanics. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2003.

HUEBNER, K. H. *et al.* **The Finite Element Method for Engineers**. John Wiley & Sons, 2001. ISBN: ISBN 0-471-37078-9.

JESWIET, J.; YOUNG, D. Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture**. V. 219, n. 4, p. 359–364, 2005. DOI: 10.1243/095440505X32210.

KAZULA, W.; KIM, I.; BLECK, W. Determination of forming limit stress diagram for the characterization of material for sheet metal forming. **Advanced Engineering Materials**. n. 4, p. 191-195, abril 2002.

KEELER, S. **Determination of Forming Limits in Automotive Stampings**. SAE Transactions. p. 1-9, 1966.

KHENNANE, A. **Introduction To Finite Element Analysis Using Matlab And Abaqus**. Taylor & Francis Group, 2013. ISBN: 13: 978-1-4665-8021-3.

KUMAR Y., KUMAR S. Incremental Sheet Forming (ISF). In: Narayanan R., Dixit U. (eds) **Advances in Material Forming and Joining. Topics in Mining. Metallurgy and Materials Engineering. Springer**. n. 26, p. 29 – 46, abr. 2015. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-2355-9_2 . Acesso em: 25 de nov. de 2023.

LI, F.F. et al. **Experimental and theoretical study on the hot forming limit of 22MnB5 steel**. *Int J Adv Manuf Technol*, v. 71, p. 297–306, 2014.

LOPES, T. F. S. **Estampagem Incremental: Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rótula**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.

MAGALHÃES, D. *et al.* Investigation of single point incremental forming parameters and forming limit curves prediction for heterostructured aluminum sheets. **Materials Characterization**. V.223, p. 114993, 2025. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.114993.

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

MARIM, T. E. Processo de estampagem incremental do alumínio QQ-A-250/5 (2024-T3). 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São carlos, 2022.

MARTINS, P. A. F, et al. Theory of single point incremental forming. **CIRP Annals**. V. 57, n. 1, p. 247-252, 2008. ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.047.

MAXIMILIANO, G. **Estampagem incremental de múltiplos passes em chapa de latão C268**. 2016. (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica) – UFRGS, Porto Alegre, 2016.

MCANULTY, T. *et al.* Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. V. 16, p. 43-54, 2017. ISSN: 1755-5817. DOI: 10.1016/j.cirpj.2016.07.003.

MSC Nastran 2021 - High Performance Computing User's Guide – MSC Software Corporation 2021. Disponível em: https://documentation-be.hexagon.com/bundle/MS_C_Nastran_2021_High_Performance_Computing_User_Guide/raw/resource/enus/MS_C_Nastran_2021_High_Performance_Computing_User_Guide.pdf.

NAJMEDDIN, A.; JAVADIMANESH, A. Theoretical and Experimental Analysis of deep drawing cylindrical cup. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**. v. 1, p. 336-342, 2013.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. **Study on the Formability of Steel Sheets**. Yamata Technical Report, v. 264, p. 8517-8530, 1968.

NEZHAD, M. S. S.; ABOUTALEBI, F. H. A 2D Lode improved Lemaitre's ductile damage model for damage prediction in ductile sheet metals under various loading conditions. **Engineering Failure Analysis**. V, 164, 108609, 2024. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108609.

OBIKAWA, T., SATOU, S., HAKUTANI, T. Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 49, n. 12-13, p. 906-915, out. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695509001382>.

OLEKSIK, V. S. *et al.* Numerical simulation of the incremental forming process for knee implants. **X international Conference on Computational Plasticity- COMPLAS X**, 2009, Barcelona. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265479015_NUMERICAL_SIMULATION_OF_THE_INCREMENTAL_FORMING_PROCESS_FOR_KNEE_IMPLANTS. Acesso em: 09/07/2024.

S. ZHOU. et al. A crystal plasticity-damage coupled finite element framework for predicting mechanical behavior and ductility limits of thin metal sheets. **International Journal of Plasticity**. V, 187, 104267, 2025. DOI: 10.1016/j.ijplas.2025.104267.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica. Brasil: Imprensa Livre**, 1999. 167 p.

SCHREIBER, R. G.; SCHAEFFER, L. Manufacture of absorber fins for solar collector using incremental sheet forming. **Journal of Materials Research and Technology**. V. 8, n. 1, p. 1132–1140, 2019. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.07.018.

SERGIO, P., et al. Method for prediction of forming limit height in multistep incremental forming with real-time decision making. **Journal of Manufacturing processes**. n. 85, p. 246-261, Jan. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612522008313>. Acesso em: 25 de nov. de 2023.

SILVA, P. DA. **Estampagem incremental de ponto simples: uma análise de conformabilidade baseada em mediação de força, desgaste de ferramenta e aquecimento**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SOBRINHO, A. S. C. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Rio de Janeiro. 2006.

SPISAK, E; STACHOWICZ, F. Deformation analysis of large autobody panel. *Journal of Materials Processing Technology*. V.53, p. 817-826, 1995.

TEKKAYA, A. E.; HOMBERG W.; BROSIUS A. 60 Excellent inventions in metal forming. In 60 Excellent Inventions in Metal Forming. **Springer Vieweg**. 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-46312-3.

WANG, Z. *et al.* Experimental investigations on friction stir assisted single point incremental forming of low-ductility aluminum alloy sheet for higher formability with reasonable surface quality. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 277, p. 116488, 2020. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116488.

XU, D. et al. Mechanism investigation for the influence of tool rotation and laser surface texturing (LST) on formability in single point incremental forming. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. V. 73, p. 37–46, 2013. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.06.007

ZENG, C. et al. A rate-dependent damage mechanics model for predicting plasticity and ductile fracture behavior of sheet metals at high strain rates. **Engineering Fracture Mechanics**. V. 306, 110217, 2024. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110217.

ANEXO I

Tabela 10 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da velocidade de rotação da ferramenta no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	LIGA DE ALUMÍNIO	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA FERRAMENTA (RPM)	EFEITO NA CONFORMABILIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO			OBSERVAÇÕES
			AUMENTO	REDUÇÃO	IDEAL	
Pandivelan et al., 2014	AA5052	300, 450 e 600			X	450 rpm é o valor ideal de rotação da ferramenta.
Khalatbari et al., 2015	AA3003-H12	0 - 3000			X	3000 rpm é o valor ótimo.
Ham & Jeswiet, 2006	AA3003	100, 600	X			
Pandivelan et al., 2018	AA5052	300, 450 e 600			X	O valor mínimo da velocidade de avanço e a velocidade máxima de rotação foram ótimos.
Shanmuganatan, S. P; Kumar, S. V. S., 2014	AA3003	2000, 3500 e 5000			X	5000 rpm é o valor ideal da velocidade de rotação da ferramenta.
Alinaghian et al., 2017	AA6061	800 - 1600			X	A 1600 rpm a velocidade máxima do fuso pode ser alcançada.
Z. Wang et al., 2020	AA2024-T e AA5052-H32	0 - 6000			X	A velocidade ideal do eixo foi de 4500 - 6000 rpm.
Obikawa et al., 2009	Alumínio	0 - 20000	X			
Xu et al., 2013	AA5052	0 - 7000	X			
Buffa et al., 2013	AA1050-O, AA1050-H24 e AA6082-T6	100 - 10000	X			A conformabilidade não foi afetada pelo tratamento térmico.
Borrego et al., 2016	AA7075	0 e 1000			X	

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 11 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da velocidade de avanço da fermenta no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	LIGA DE ALUMÍNIO	VELOCIDAD DE AVANÇO (mm/min)	EFEITO NA CONFORMABILIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO			OBSERVAÇÕES
			AUMENTO	REDUÇÃO	IDEAL	
Pandivelan et al., 2014	AA5052	300, 600, 900			X	900 mm/min é o valor ideal da velocidade de avanço.
Bhattacharya et al., 2011	AA5052	40, 60, 80				Velocidade de avanço foi um fator insignificante
Khalatbari et al., 2015	AA3003-H12	800 - 5000				
Ham & Jeswiet, 2006	AA3003	1270 e 2540		X		
G. Hussain et al., 2010	AA2024-O e AA2024 pre envelhecidos	373 - 4500		X		A formabilidade do AA2024 recozido não foi afetada e diminui no AA2024 pré envelhecido.
Pandivelan et al., 2018	AA5052	120, 200 e 280			X	O valor mínimo de velocidade de avanço foi ótimo para a máxima formabilidade.
Z. Liu & Li, 2019	Compósito de Al-Cu	1000 - 4000		X		
Shanmuganatan & Senthil Kumar, 2014	AA3003	100, 1500 e 2000			X	2000 mm/min foi o valor ótimo
Bastos R. N. P. et al., 2016	AA1050-H111, DP600, DP780 e DP1000	1500 - 12000				O aumento da velocidade de avanço reduz a conformabilidade nos aços, mas a liga de alumínio foi insensível aos desvios da velocidade de avanço.
Alinaghian et al., 2017	AA6061	40 - 80			X	A velocidade de avanço de 40 mm/min resultou em máxima conformabilidade.
Azhiri et al., 2020	AA6061	40 - 80		X		
Z. Wang et al., 2020	AA2024-T e AA5052-H32	600 - 2000			X	Os valores ótimos de velocidade de avanço foram de 1500 - 2000 mm/min

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 12 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento do incremento vertical na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	LIGA DE ALUMÍNIO	INCREMENTO VERTICAL (mm)	EFEITO NA CONFORMABILIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO				OBSERVAÇÕES
			AUMENTO	REDUÇÃO	INSIGNIFICANTE	IDEAL	
Y. H. Kim & Park, 2002	AA1050	0.1, 0.3 e 0.5		X			
Bhattacharya et al., 2011	AA5052	0.2, 0.5 e 0.8					Primeiro aumenta e depois diminui.
Z. Liu et al., 2013	AA7075-O	0.2 e 0.5	X				
Khalatbari et al., 2015	AA3003-H12	0.1, 0.36, 0.49, 0.62 e 0.88				X	Ótimo em 0.49 mm
Filice et al., 2006	AA1050-O	0.3 e 0.1		X			
Ham & Jeswiet, 2006	AA3003-O	0.0508, 0.127 e 0.254		X			
Manco & Ambrogio, 2010	AA6082-T6	0.3 e 0.1			X		
G. Hussain et al., 2010	AA2024-O e AA2024 pre envelhecidos	0.08, 0.36, 0.78, 1.2, e 1.48		X			
Do et al., 2017	AA5052	0.4, 0.7 e 1				X	Ótimo em 0.4 mm
Mulay et al., 2017b	AA5052-H32	0.2, 0.4 e 0.6				X	Ótimo em 0.2 mm
Xiao et al., 2019	AA7075-O	0.3, 0.5 e 0.7		X			
Kumar et al., 2019	AA2024-O	0.2, 0.5 e 0.8		X			

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 13 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento do diâmetro da ferramenta na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	LIGA DE ALUMÍNIO	DIÂMETRO/RAIO DA PONTA DA FERRAMENTA (mm)	EFEITO NA CONFORMABILIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO			OBSERVAÇÕES
			AUMENTO	REDUÇÃO	IDEAL	
Li et al., 2014	AA7075	10,20 e 30	X			
Maji & Kumar, 2020	AA5083	6, 8 e 10				A formabilidade primeiro aumenta e depois diminui
Y. H. Kim & Park, 2002	AA1050	5, 10 e 15			X	10 mm de diâmetro mostra melhor conformabilidade.
Adams, D. W, 2013	AA3003-O	5.08, 10.16 (Hemisférico); 5.08, 2.54 (Raio da extremidade plana)				A formabilidade primeiro aumenta e depois diminui
Ham & Jeswiet, 2006	AA3003	4.7625 e 12.7		X		
Ham & Jeswiet, 2007	AA5754, AA5182 e AA6451	4.7625, 6.35 e 9.525		X		
Kumar et al., 2019	AA2024-O	7,52, 11,6, 15,66 (Ferramenta hemisférica); 1,40, 2, 1,98, 2,85, 1,85, 3,76 (raio final plano)	X			
Carrino, Giuliano, et al., 2006	Alumínio	2.5 e 5	X			
Ziran et al., 2010	AA3003-O	4,6,10 (diâmetro hemisférico); 1,2,3 (Raio final plano)				A conformabilidade primeiro aumenta e depois diminui.
G. Hussain et al., 2013	AA2024-O	3.5, 5.12, 6.752 e 10				A conformabilidade diminui quando a espessura inicial da chapa (T0) foi de 0,9mm e aumenta quando T0 foi de 3mm. Ótimo R / T0 = 2.
Al-Ghamdi & Hussain, 2015	AA2024-O, AA2024T6, AA1060-O, AA1060H2, AA5083-O, Aço DS e Cu H59	1, 1.5, 1.8, 2.2.2, 2.5, 3 e 3.5				A conformabilidade primeiro aumenta e depois diminui. Ótimo R / T0 = 2.2.
Mulay et al., 2017a	AA5052 H32	8, 10 e 12		X		
Pandivelan et al., 2018	AA5052	8, 10 e 12		X		

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 14 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito da forma da ponta de ferramenta na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	LIGA DE ALUMÍNIO	FORMA DA FERRAMENTA	FERRAMENTA PREFERIDA
Parque Y. H. Kim, 2002	AA1050	Ferramenta hemisférica e bola.	Ferramenta de bola
Adams, D. W., 2013	AA3003-O	Ângulo, Plano, Hemisférico, Parabólico.	Parabólico
Lu et al., 2014	AA1100, AA2024, AA5052 e AA6111	Terminação hemisférica e fim de bola de rolo oblíquo.	Bola com ponta oblíqua
Kumar et al., 2019	AA2024-O	Extremidade plana, extremidade hemisférica.	Ponta hemisférico
Ziran et al., 2010	AA3003-O	Extremidade plana, extremidade hemisférica.	Ferramentas de extremidade plana com raio inferior
Vanhove et al., 2019	AA5754	Ferramenta elíptica e ferramenta hemisférica com inclinação.	Ferramenta elíptica.

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 15 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito da geometria das peças na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	LIGA DE ALUMÍNIO	INTERVALO DE PARÂMETROS	EFEITO NA CONFORMABILIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO			OBSERVAÇÕES
			AUMENTO	REDUÇÃO	IDEAL	
Shim & Park, 2001	AA1050	Círculo, Triângulo, Quadrado, Quadrado com cantos redondos, Pentágono, Hexágono			X	A profundidade máxima de formação pode ser alcançada em círculo.
G. Hussain et al., 2007	Liga de Al (LY12M)	Generatrix Exponencial, Circular, Parabólico e Elíptico			X	Generatrix exponenciais apresentam maior valor de formabilidade.
Ham & Jeswiet, 2007	AA6451, AA5182 e AA5754	Cúpula, Cone, Pirâmide			X	A formabilidade foi maior em forma de pirâmide e menor em forma de cúpula.
Ham & Jeswiet, 2006	AA3003	Diâmetro da Base (mm): 101.6 e 158.75 Profundidade (mm):				A formabilidade foi insensível a ambos os parâmetros.
Malwad & Nandedkar, 2014	AA8011	Ângulo de parede: 55°, 65°, 75°		X		Maior conformabilidade em chapas quando o valor do ângulo de parede da peça estava abaixo de 75°.

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 16 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da espessura da chapa na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	LIGA DE ALUMÍNIO	CATEGORIA DE PARÂMETROS	INTERVALO DE PARÂMETROS	EFEITO NA CONFORMABILIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO			OBSERVAÇÕES
				AUMENTO	REDUÇÃO	IDEAL	
Jeswiet & Young, 2005	AA3003 e AA5754	Espessura da chapa	1.02 e 1.21 mm	X			
Pandivelan et al., 2014	AA5052	Espessura da chapa	0.8 - 1.2 mm	X			A conformabilidade máxima com 1,2 mm de espessura da folha foi alcançada.
Bhattacharya et al., 2011	AA5052	Espessura da chapa	0.28, 0.49 e 0.71 mm	X			
Ham & Jeswiet, 2007	AA6451, AA5182 e AA5754	Espessura da chapa, material	AA6451: 0.8 - 1.545 mm AA5182: 0.93 - 1.5 mm			X	A conformabilidade foi maior no nível médio de espessura da folha e menor em nas folhas de AA6451.
Ham & Jeswiet, 2006	AA3003 e AA5754	Espessura da chapa	0.81, 1.2, 2.1 mm	X			
Mulay et al., 2017a	AA5052 H32	Espessura da chapa	0.8 - 1.2 mm			X	A conformabilidade foi maior no nível médio da espessura da folha.
Do et al., 2016	AL3004	Propriedade da chapa	Plano e em relevo			X	A conformabilidade da folha em relevo é maior do que a folha plana.
Jeswiet et al., 2002	AA3003	Espessura da chapa	0.8, 1.3 e 2.1 mm	X		X	
Abd Ali et al., 2019	Al/aço inoxidável (SUS) bimetélico	Arranjo de folhas	Al/SUS - SUS/Al	X			A formabilidade aumentou quando a camada do SUS estava no lado superior.

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 17 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito das propriedades mecânicas da chapa na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	MATERIAL	PROPRIEDADES MECÂNICAS	EFEITO NA CONFORMABILIDADE			OBSERVAÇÕES
			AUMENTO	REDUÇÃO	IDEAL	
Fratini et al., 2004	Cobre, latão, aços, AA1050-O e AA6114-T4	Coefficiente de resistência, resistência a tração, coeficiente de endurecimento por deformação, índice de anisotropia normal e alongamento percentual.	X			A conformabilidade foi maior nos materiais que apresentaram maior coeficiente de endurecimento por deformação e maior percentual de alongamento
Ghulam Hussain et al., 2010	AA2024O	Rigidez.		X		
Al-Ghamdi e Hussain, 2015	AA2024-O, AA2024-T6, AA 1060-O, AA1060 H2, AA5083-O, aço DS, Cobre H59	Tensão de escoamento, resistência a tração, alongamento percentual, coeficiente de resistência, expoente de endurecimento por deformação e redução da área de tração.	X			A conformabilidade do material é diretamente proporcional à redução da área de tração.
Abd Ali et al., 2019	Al/aço inoxidável (SUS) bimetalico.	Módulo de Young, resistência ao escoamento, resistência à tração, coeficiente de endurecimento, expoente de endurecimento por deformação e redução da área à tração.	X			A formabilidade aumentou quando a camada do SUS estava no lado superior. A conformabilidade das chapas bicamadas é governada pela redução da área de tração da camada superior.
G. Hussain et al., 2009	Ligas de alumínio, aço, latão, cobre e titânio	Tensão de escoamento, resistência a tração, alongamento percentual, coeficiente de resistência, expoente de endurecimento por deformação, anisotropia e redução da área por tração.			X	A redução da área à tração pareceu ser a única propriedade principal que influenciou a conformabilidade em SPIF.
Ghulam Hussain et al., 2012	AA2024-O, AA2024T, Cu-H28, AA1060H24 e AA1060-O	Redução da área na fratura por tração, expoente de endurecimento e alongamento da tração	X			A formabilidade foi altamente sensível à redução da área na fratura por tração.

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 18 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito da trajetória da ferramenta na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	MATERIAL	ESTRATÉGIA DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA	GEOMETRIA DA PEÇA	OBSERVAÇÕES
T. J. Kim & Yang, 2000	Alumínio	2.5 D e espiral. Passe único e passe duplo.	Taça Elipsoidal e Taça Trevo	A estratégia de conformação de dupla passagem pode ser usada para melhorar a formabilidade.
Skjoedt et al., 2007	Aço ou alumínio	Perfil e passe único helicoidal	Pirâmide, Cone e Silenciador	O caminho da ferramenta espiral foi vantajoso em relação ao caminho da ferramenta do perfil na melhora da conformabilidade sem marcas de cicatriz nas geometrias formadas.
J. R. Dufloy, Verbert, et al., 2008	AL3003-O, AA3103, e Ti Grau 2	Perfil multi-etapa	Cilíndrico, Não Rotativo e Complexo	A aplicação de percurso de várias etapas aumenta a conformabilidade do material.
Do et al., 2016	AA3004	Perfil para dentro e para fora	Pirâmide	A formabilidade é melhor em folhas 3D (em relevo) do AA3004 é melhor quando o caminho para fora é usado para a formação.
Kitazawa et al., 1996	Alumínio	Perfil para dentro e para fora	Eliptico, Circular e cônico	Maior conformabilidade foi alcançada com a estratégia de caminho de ferramentas internas.
Yamashita et al., 2008	Assumido	Perfil e deslocamento helicoidal do ponto de partida do loop	Pirâmide quadrangular	Para melhorar a conformabilidade, a ferramenta deve viajar de maneira helicoidal e recuada no canto sugerido do produto.
Rauch et al., 2009	AA5086	Caminho de ferramenta programado CAM inteligente	Pirâmide	O caminho da ferramenta programada CAM inteligente melhorou a formabilidade.
Z. Liu et al., 2014	AA7075-O	Para fora, horário e anti horário Passe único e Multipasse	Taça elipsoidal e forma livre	A aplicação de toolpath de várias etapas aumenta a conformabilidade do material.
Lingam et al., 2016	AA8011 e AA5052	Multi-passe interno	Perfil escalonado	SPIF de vários estágios com caminho de ferramenta interno mostra melhoria na conformabilidade de ligas de alumínio.
Mohanty et al., 2017	Simulação	Perfil (circular e quadrado) e helicoidal (Assimétrico)	Circular, Quadrado e Assimétrico	Usando a simulação MATLAB e o manipulador robótico contínuo, o projeto do caminho de ferramentas para três tipos de geometrias de componentes de chapa metálica foi eficientemente produzido para ISF.
Zhu & Li, 2018	AA1060	Caminhos de ferramentas inclinados multidirecionais e direcionais únicos, com matrizes de suporte	Complexo	As peças com ângulo de formação superior a 90° podem ser facilmente formadas em estágio único através do caminho de ferramentas ISF CNC de 5 eixos.
J. Wang et al., 2019	AA1060	Caminho da ferramenta espiral de diâmetro igual	Frustum cônico	A conformabilidade aumenta com a aplicação do caminho da ferramenta de diâmetro igual.
Nirala & Agrawal, 2020	AA6061-T6	Caminho da ferramenta baseado em geometria fractal (FGBIT). Caminho da ferramenta espiral e constante Z	Copo Quadrado	A melhora na conformabilidade das peças foi notada com o uso do novo FGBIT.

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

Tabela 19 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito do aumento da temperatura de conformação na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	MATERIAL	ESTRATÉGIA DE FORMAÇÃO	OBSERVAÇÕES
J. R. Duffou, Callebaut, et al., 2008	AA5182 e 65Cr2	Aquecimento local dinâmico	A conformabilidade foi melhorada.
Göttmann et al., 2011	TiAl6V4	Aquecimento assistido por laser	A conformabilidade foi melhorada.
Golovashchenko & Krause, 2005	AA 6111-T4	Tratamento térmico (tempo 15s a 120s e faixa de temperatura 250-300 °C)	As amostras AA6111 a 250 °C por 30s proporcionaram recuperação aceitável para aumentar a conformabilidade e podem ser uma alternativa mais econômica do que a conformação a quente.
G. Hussain et al., 2010	AA 2024	Recozimento e pré-envelhecimento	As folhas AA2024 recozidas apresentam maior (aprox. 30%) de conformabilidade.
Xiao et al., 2019	AA7075-T6	Aquecimento (faixa de temperatura 20-200 °C)	A formabilidade do AA7075 não foi significativamente afetada pela formação da faixa de temperatura de 20° C a 80° C, mas depois disso a formabilidade aumentou rapidamente com o aumento da temperatura de formação até 200 °C.
Shanmuganatan, S. P; Kumar, S. V. S, 2014	AA3003-O	Aquecimento por atrito	Maior velocidade da ferramenta aumenta a conformabilidade.
Buffa et al., 2013	AA1050O, AA1050H24 e AA6082-T6	Aquecimento por atrito	Máxima melhora na conformabilidade foi notada nas folhas de AA6082-T6.
J. R. Duffou et al., 2007	TiAl6V4 e 65Cr2	Aquecimento a Laser	A conformabilidade foi melhorada.
Ambrogio et al., 2012	AA2024-T3, AZ31B-O e Ti6Al4V	Conformação elétrica a quente	Observou-se melhora na conformabilidade em três ligas leves utilizadas na indústria aeronáutica.
Otsu et al., 2014	A2017-T3	Aquecimento por atrito	Maior velocidade da ferramenta aumenta a conformabilidade.
Lehtinen et al., 2015	AA1050, cobre e DC04	Aquecimento local	Melhora máxima do ângulo de parede nas folhas de cobre e nenhuma melhora no ângulo da parede para as folhas de DC04.
Mohammadi et al., 2016	AA2024-T3	Recozimento, têmpera e aquecimento assistido por laser	O recozimento permite aumentar o ângulo de conformabilidade em 41% em relação às chapas temperadas. A formação assistida por laser melhora a conformabilidade.
Gatea et al., 2017	6092Al/SiCp compósito	Recozimento de condição T6 e O	A conformabilidade foi melhorada em folhas de AMC após condições de tratamento térmico com O.
Ghaferi et al., 2019	AA6061	Ciclos de tratamento térmico	O ciclo de tratamento térmico (a - recozimento; b - SPIF; c - aquecimento em solução sólida; d - envelhecimento) pode aumentar a formabilidade da pirâmide AA6061.
Vahdani et al., 2019	Ti-6Al-4V, AA6061 e DC01	SPIF eletricamente quente	O SPIF eletricamente quente melhorou a conformabilidade de todos os três materiais.

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

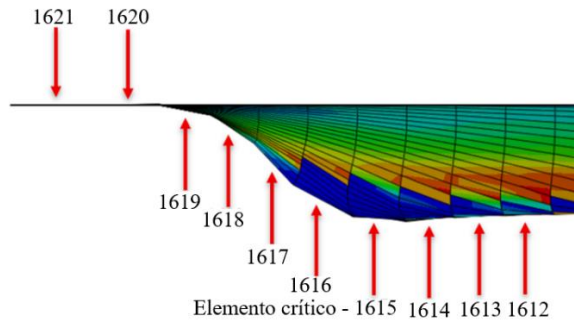
Tabela 20 - Relação de publicações relevantes sobre o efeito das condições de lubrificação na conformabilidade no processo de EI.

PUBLICAÇÕES	MATERIAL	CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO	OBSERVAÇÕES
Parque Y. H. Kim, 2002	AA1050	Com e sem lubrificação	Pouca quantidade de atrito é favorável para a melhoria da conformabilidade.
Lu et al., 2014	AA1100, AA2024, AA5052 e AA6111	Reduza o atrito usando a ferramenta de esfera de rolo oblíqua	Aumento do atrito, a conformabilidade das ligas de alumínio diminui.
Obikawa et al., 2009	Folhas de alumínio	Lubrificação hidrodinâmica (água)	Observou-se aumento na conformabilidade das folhas de alumínio.
Xu et al., 2013	AA5052-H32	Ferramenta com a superfície texturizada a laser (LST) (aumento do atrito)	A diminuição da conformabilidade das chapas AA5052 devido à ferramenta LST e aumento do atrito.
Vahdani et al., 2019	Ti6Al4V, AA6061 e DC01	Grafite, MoS ₂ , antigripante à base de grafite, antigripante à base de cobre	O grafite foi o lubrificante ideal para atingir a máxima conformabilidade.
Carrino, Di Meo, et al., 2006	AA1050-O	Sem lubrificação, lubrificação padrão e lubrificação contínua	A diminuição da conformabilidade pode ser observada apenas para grande variação das forças de atrito (lubrificadas contra condições secas).
Gulati et al., 2016	AA6063	Seco, refrigerante e graxa	A graxa era o lubrificante ideal para atingir a máxima conformabilidade.
Amini et al., 2017	AA1050-O	Com e sem lubrificação e ferramenta ultra-sônica assistida por vibração	A conformabilidade aumentou muito (48%) quando o SPIF assistido por vibração ultra-sônica foi feito na presença de um lubrificante.
Baruah et al., 2017	AA5052	Seco, graxa e óleo	A graxa era o lubrificante ideal para atingir a máxima conformabilidade
Oraon e Sharma, 2020	AA3003	Seco e grafite	Uma melhora na formabilidade do AA3003 foi observada com o uso de lubrificante.
Chen et al., 2019	AA6061 e AISI304	Sem lubrificação, óleo da máquina e MoS ₂	MoS ₂ foi o lubrificante ideal para atingir a máxima conformabilidade em AA6061
Chang Chen, 2020	AA2024 e AA7075	Lubrificação em três folhas SPIF	Não foi observado efeito da lubrificação na formabilidade das folhas AA2024 e AA7075.

Fonte: Editado de BISHNOI, 2022.

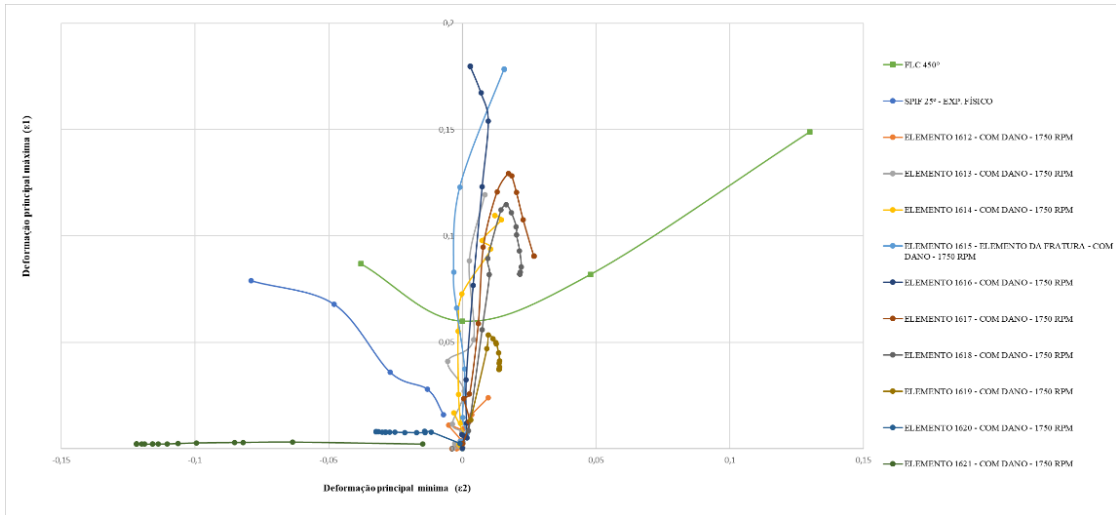
APÊNDICE I

Figura 65 - Posição dos elementos - ângulo inicial de 25°.



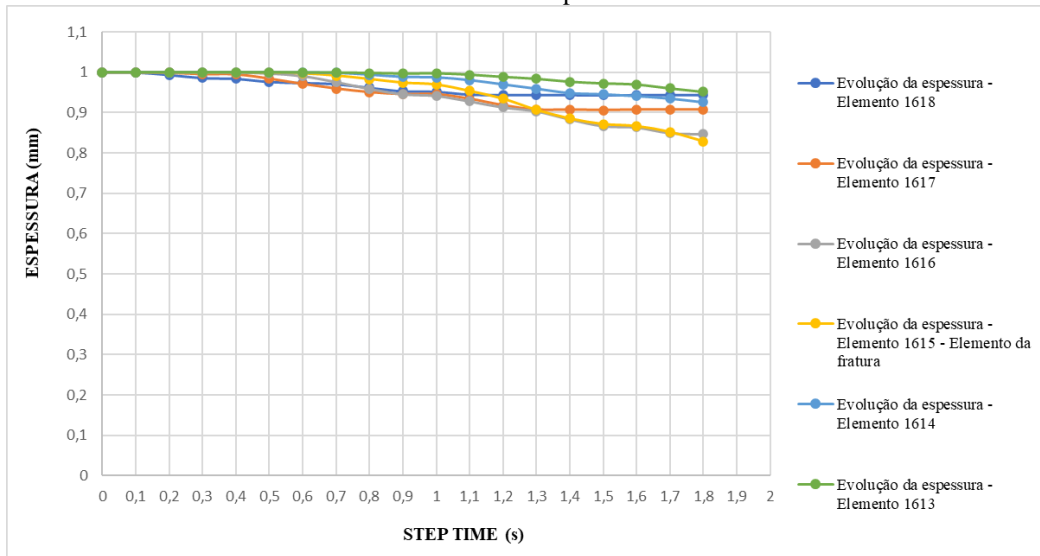
Fonte: Autor.

Figura 66 - Trajetórias das deformações para o experimento numérico com ângulo inicial de 25°, rotação da ferramenta de 1750 rpm, $\rho = 2,7\text{g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$.



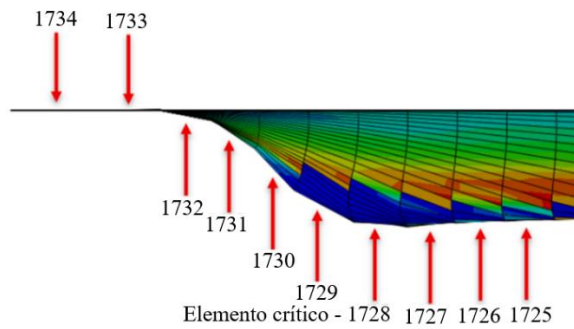
Fonte: Autor.

Figura 67 - Evolução da espessura dos elementos no tempo - ângulo inicial de 25° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.



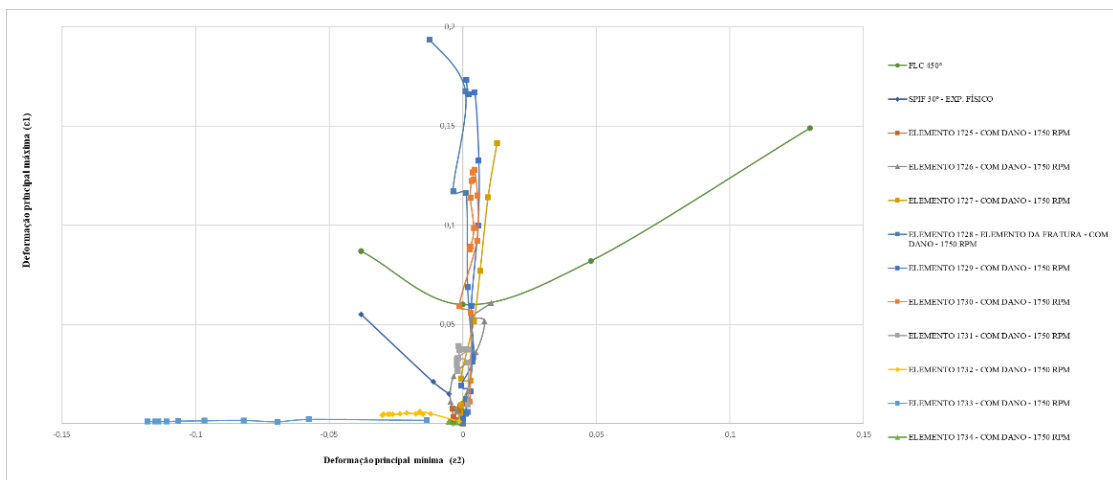
Fonte: Autor.

Figura 68 - Posição dos elementos - ângulo inicial de 30°.



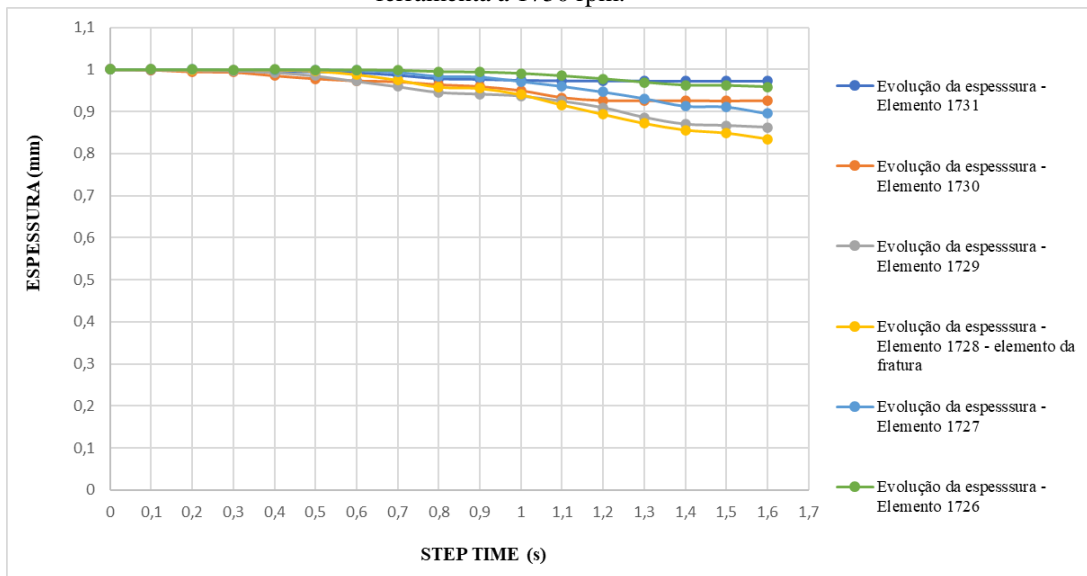
Fonte: Autor.

Figura 69 - Trajetórias das deformações para o experimento numérico com ângulo inicial de 30°, rotação da ferramenta de 1750 rpm, $\rho = 2,7\text{g/cm}^3$ e $\mu = 0,1$.



Fonte: Autor.

Figura 70 - Evolução da espessura dos elementos no tempo - ângulo inicial de 30° e rotação da ferramenta a 1750 rpm.



Fonte: Autor.