



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

CATIA CHIAMULERA YAMAUCHI

**Estudo da Influência do Tratamento Térmico
Prévio na Estampagem Incremental de
Chapas de Alumínio AA7475**

CAMPINAS
2019

CATIA CHIAMULERA YAMAUCHI

Estudo da Influência do Tratamento Térmico Prévio na Estampagem Incremental de Chapas de Alumínio AA7475

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Tonini Button

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA
ALUNA CATIA CHIAMULERA YAMAUCHI, E
ORIENTADA PELO PROF. DR. SERGIO TONINI
BUTTON

**CAMPINAS
2019**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Y148e Yamauchi, Catia Chiamulera, 1990-
Estudo da influência do tratamento térmico prévio na estampagem incremental de chapas de alumínio AA7475 / Catia Chiamulera Yamauchi. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Sergio Tonini Button.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Conformação de metais. 2. Ligas de alumínio. 3. Engenharia mecânica. I. Button, Sergio Tonini, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Titulo em outro idioma: Study of the influence of prior heat treatment on incremental forming of AA7475 aluminum sheets

Palavras-chave em inglês:

Metal forming

Aluminum alloys

Mechanical engineering

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestra em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Sergio Tonini Button [Orientador]

Anselmo Eduardo Diniz

Luciana Montanari

Data de defesa: 21-11-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-1106-8356>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0461066917838455>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MANUFATURA E MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Estudo da Influência do Tratamento Térmico Prévio na Estampagem Incremental de Chapas de Alumínio AA7475

Autor: Catia Chiamulera Yamauchi

Orientador: Prof. Dr. Sergio Tonini Button

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Sergio Tonini Button
Instituição: FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Instituição: FEM/UNICAMP

Profa. Dra. Luciana Montanari
Instituição: EESC/USP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 21 de novembro de 2019.

Dedicatória

À Deus, à minha amada família, em especial ao Lucas pelo incentivo e ao Hugo, que ainda não chegou ao mundo, mas é luz e alegria em nossas vidas.

Agradecimentos

A minha jornada acadêmica começa em Santa Catarina, na UFSC, onde me graduei como engenheira de materiais em 2013. Mudei de cidade e em 2014 iniciei os preparativos para o mestrado em Engenharia Mecânica na Unicamp e chegou a hora de agradecer aos que contribuíram para a realização desta conquista.

Em primeiro lugar, à Deus, porque nada me faltou e por ter permitido que com determinação, alcançasse meus sonhos superando os desafios e a saudade da família.

Aos meus pais Lucindo e Maria Angelina, por todos os sacrifícios e esforços e por acreditarem e depositarem confiança nos meus sonhos.

Ao meu marido Lucas, meu melhor amigo e incentivador, por me proporcionar vivências maravilhosas, ainda mais agora sendo mãe do Hugo.

Ao prof. Dr. Sérgio Tonini Button, por ser meu orientador e pela oportunidade fornecida, além da sua paciência durante este longo período de mestrado.

Meus agradecimentos ao pessoal do trabalho, em especial ao Vinícius e ao Gabriel, por jamais negarem apoio quando solicitei. E não foram poucas as solicitações!

Aos meus gestores Evandro, Rodrigo e Vicente, e à empresa que trabalho, pelo incentivo ao desenvolvimento pessoal e acadêmico e por acreditarem na importância deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e, por fim, à UNICAMP pelo suporte oferecido.

Resumo

A estampagem incremental de chapas é um processo em que as peças sofrem deformações localizadas causadas por uma ferramenta com geometria simples (esférica ou hemisférica). A ferramenta é fixada em uma máquina CNC (com três ou mais graus de liberdade) e percorre um caminho pré-definido ao longo da chapa com avanço vertical (incremento). Para a fabricação de geometrias simples e simétricas, um prensa-chapa é utilizado como sistema de fixação. Para geometrias complexas, é usado um molde fabricado com materiais de baixo custo ou, até mesmo, pequenos suportes. Esse processo normalmente é utilizado para fabricação de pequenos lotes, para fabricação de protótipos ou para projetos específicos. Neste trabalho foi conduzido um estudo para avaliar como diferentes condições de tratamento térmico da liga AA 7475 e diferentes níveis de incremento afetam a viabilidade de aplicação desse processo de conformação em produtos da indústria aeronáutica. Para isto, uma peça representativa foi projetada e algumas variáveis de resposta foram analisadas, tais como redução de espessura, dureza, rugosidade superficial e condições metalográficas. Com os resultados obtidos após os ensaios, pode-se afirmar que é possível aplicar a estampagem incremental de chapas de alumínio AA7475 em diferentes condições de tratamento térmico em produtos aeronáuticos. No entanto, algumas condições testadas apresentaram retorno elástico elevado. As reduções de espessura dos corpos de prova atingiram valores próximos à 30% sem o aparecimento de trincas ou fraturas e a rugosidade apresentou valores inferiores para o incremento de 1 mm quando comparado com o incremento de 0,5mm.

Palavras chaves: conformação mecânica, ligas de alumínio, conformação incremental.

Abstract

Incremental sheet forming is a process in which parts undergo local deformation by a tool with simple geometry (spherical or hemispherical). The tool is fixed on a CNC machine (with three or more degrees of freedom) and travels a predefined path along the vertical direction (known as increment). For the manufacture of simple and symmetrical geometries, a simple sheet clamping system is used. For complex geometries, a mold made from low cost materials or even small supports is used. This process is usually applied for manufacturing of small batches, prototypes or for specific projects. An evaluation was carried out considering different heat treatment conditions of the AA 7475 alloy and different increment levels in order to observe the feasibility of applying this forming process in aeronautical industry products. For this analysis, a representative part was designed, and some response variables were analyzed, such as thickness reduction, hardness, surface roughness and metallographic conditions. With the results obtained in the tests, it can be stated that it is possible to apply the incremental forming of AA7475 aluminum sheets under different heat treatment conditions in aeronautical products. However, some conditions tested showed high springback. The thickness reduction of the specimens reached values close to 30% without the appearance of cracks or fractures and the roughness presented lower values for 1 mm increment when compared to the 0.5 mm increment.

Keywords: metal forming, aluminum alloys, incremental forming.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Comparação conceitual entre três tipos de conformação de chapas. Adaptado de Uheida <i>et al.</i> , 2016.	13
Figura 2 - Centro de estampagem incremental do IBF RWTH Aachen. Fonte: Conrads <i>et al.</i> , 2016.	14
Figura 3 – Campo de aplicação da conformação incremental. Adaptado de TRZEPIECIŃSKI, <i>et al.</i> , 2018.	16
Figura 4 - Estrutura utilizada no desenvolvimento e apresentação deste trabalho.	17
Figura 5 - Representação da estampagem incremental simples. Adaptado de Jeswiet <i>et al.</i> (2005).	20
Figura 6 - Representação da conformação com suporte. Adaptado de Jeswiet <i>et al.</i> (2005)...	20
Figura 7 - Representação da estampagem incremental com suporte (a) e trajetória da ferramenta (b). Adaptado de MATSUBARA (1994).	22
Figura 8 - Representação da estampagem incremental simples. Adaptado de DALEFFE <i>et al.</i> , (2013).	23
Figura 9 - Integração de estiramento com estampagem incremental e recorte de contorno. (IBF – RWTH Aachen).	26
Figura 10 - Exemplo de ferramentas de aço carbono cementadas, com diferentes diâmetros. Da esquerda para direita: 6mm, 10mm, 30mm e uma ferramenta com a ponta de material polimérico. Fonte: HIRT (2004) in JESWIT <i>et al.</i> , (2005).	30
Figura 11 - Força na estampagem incremental de peças cônicas com diferentes ângulos de conformação. Adaptado de DUFLOU <i>et al.</i> (2005).	33
Figura 12 – Força na estampagem incremental de peças cônicas com alteração do diâmetro da ferramenta. Adaptado de DUFLOU <i>et al.</i> (2005).	33
Figura 13 - Variação da rugosidade superficial em relação ao passo incremental. Adaptado de Jeswit <i>et al.</i> (2005).	36
Figura 14 - Variação da rugosidade superficial em função do passo incremental, do raio da ferramenta e do ângulo de conformação. Adaptado de Jeswit <i>et al.</i> (2005).	36
Figura 15 - Representação geral de um processo. Adaptado de Montgomery (2012).	41
Figura 16 – Representação da forma geométrica escolhida para este estudo.	46
Figura 17 – Principais dimensões da peça escolhida para este estudo.	46
Figura 18 – Representação do método de coleta do tamanho de grão conforme ASTM E112.	48
Figura 19 - Representação da primeira fase do planejamento experimental deste trabalho. ...	52
Figura 20 – Representação da montagem da peça sobre o molde.	53
Figura 21 – Molde utilizado para o estudo de estampagem incremental.	53
Figura 22 – Representação da peça planificada com regiões sobressalentes para fixação no molde.	54
Figura 23 – Processo de gravação eletroquímica utilizado neste estudo.	55
Figura 24 – Peça fixada sobre o molde com pinos.	56
Figura 25 – Peça conformada com 6000 psi (41,37 MPa) que apresentou trinca.	56
Figura 26 - Corpo de prova em AA7475-T761 que sofreu ruptura durante a estampagem incremental direta.	57
Figura 27 – Conjunto corpo de prova e ferramental montados sobre a mesa da máquina fresadora.	57
Figura 28 – Ferramenta utilizada e suas principais dimensões em milímetros.	58

Figura 29 - Demonstração das regiões de coleta dos dados.....	59
Figura 30 – Regiões transversal (A) e longitudinal (B) ao movimento do punção de estampagem incremental.....	60
Figura 31 – Análise de descontinuidades com luz ultravioleta em um corpo de prova após o líquido penetrante.....	62
Figura 32 – Dados comparativos entre deformação verdadeira da estampagem incremental e CLC do AA 7475-O.....	63
Figura 33 - Dados comparativos entre deformação verdadeira da estampagem incremental e CLC do AA 7475-T761.....	63
Figura 34 – Exemplo da coleta da nuvem de pontos e comparação com o desenho 3D (forma geométrica em azul).	65
Figura 35 – Valores máximos de retorno elástico encontrados em cada condição do ensaio..	65
Figura 36 – Imagens de cada corpo de prova sobre o molde após a estampagem incremental: a) Condição O, b) W e c) T761.	66
Figura 37 – Gráfico da porcentagem de redução de espessura para os corpos de prova com incremento de 0,5 mm.....	67
Figura 38 - Gráfico da porcentagem de redução de espessura para os corpos de prova com incremento de 1,0 mm.....	67
Figura 39 – Gráfico da dureza após estampagem incremental e tratamento térmico.	68
Figura 40 – Gráfico da rugosidade média (Ra) dos corpos de prova em cada condição de ensaio.....	69
Figura 41 – Gráfico do tamanho de grão na direção transversal (A) à trajetória de estampagem incremental.....	70
Figura 42 - Gráfico do tamanho de grão na direção longitudinal (B) à trajetória de estampagem incremental.....	71
Figura 43 – Gráfico da espessura da camada de <i>clad</i> na região transversal (A) ao sentido de conformação.....	72
Figura 44 – Corte transversal da amostra com matéria prima AA 7475-O. Ataque químico: Nital 5%.....	73
Figura 45 – Corte transversal da amostra com matéria prima AA 7475-W. Ataque químico: Nital 5%.....	73
Figura 46 - Corte transversal da amostra com matéria prima AA 7475-T761. Ataque químico: Nital 5%.....	74
Figura 47 – Dimensões da camada de <i>clad</i> para a liga AA 7475-O após estampagem incremental. Ataque químico: Nital 5%.....	74
Figura 48 - Dimensões da camada de <i>clad</i> para a liga AA 7475-W após estampagem incremental. Ataque químico: Nital 5%.....	75
Figura 49 - Dimensões da camada de <i>clad</i> para a liga AA 7475-T761 após estampagem incremental. Ataque químico: Nital 5%.....	75

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Sistema de designação de ligas de alumínio.	38
Tabela 2 – Designação das ligas de alumínio quanto ao tratamento térmico.	39
Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga AA 7475 em diferentes condições de tratamento térmico.....	45
Tabela 4 – Dados consolidados da análise da estampagem incremental na liga AA7475 em diferentes condições de tratamento térmico e incrementos.....	61

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	16
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1 Diferentes técnicas de estampagem incremental.....	19
2.2 Estampagem incremental com suporte.....	21
2.3 Estampagem incremental simples	22
2.4 Vantagens da estampagem incremental e suas limitações	23
2.5 Outros processos envolvendo estampagem incremental	26
2.6 Equipamentos e parâmetros do processo	28
2.7 Parâmetros do material da chapa.....	34
2.8 Alumínio e suas ligas	37
2.9 Tratamento térmico das ligas de alumínio	39
3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	41
3.1 Caracterização e definição do problema	42
3.2 Escolha dos fatores de influência e níveis.....	43
3.3 Seleção das variáveis de resposta	47
3.4 Definição do modelo de planejamento experimental	51
4 METODOLOGIA	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
6 CONCLUSÃO	76
Referências	80
Referências Eletrônicas	84
ANEXO A – Detalhamento da coleta das variáveis de resposta.....	86
ANEXO B – Tabela de dados com desvio padrão	87

1 INTRODUÇÃO

Estampagem com prensas e dobramento são hoje as tecnologias mais comuns para conformação de chapas e são utilizadas para produção em massa. Nesses processos, o projeto das ferramentas é muito importante para garantir os requisitos desejáveis para o produto. Porém, com o crescimento industrial, a fabricação em pequenos lotes e com projetos customizados de protótipos também passou a concorrer com a fabricação em massa (KHARE e PANDAGALE, 2014).

Para ilustrar de forma qualitativa os processos de estampagem incremental, convencional e hidroconformação, a Figura 1 apresenta uma comparação conceitual destas três tecnologias de conformação de chapas. As avaliações de 1 para ruim a 5 para muito bom são atribuídas a cada um dos aspectos listados na figura: flexibilidade, complexidade, tempo de ciclo, precisão e custo do molde.

Para Uheida *et al.* (2016), toda tecnologia tem suas próprias vantagens e desvantagens. Elas não podem substituir uma a outra em todas as aplicações, no entanto, as comparações de custos e benefício entre elas sempre ocorrerão.

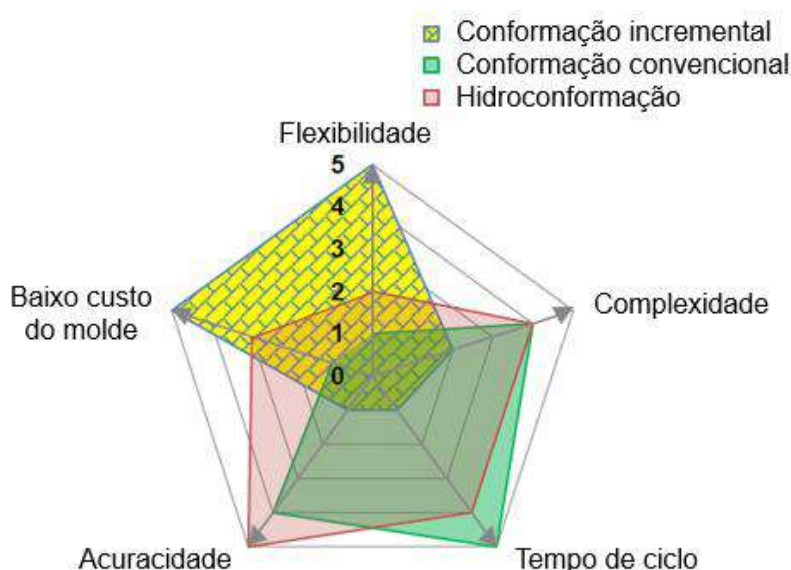


Figura 1 - Comparação conceitual entre três tipos de conformação de chapas. Adaptado de Uheida *et al.*, 2016.

O baixo custo do molde quando comparado com as outras tecnologias de conformação de chapas e a flexibilidade do processo são os pontos fortes da estampagem incremental, enquanto tempo de ciclo, complexidade e precisão são as vantagens da conformação convencional e da hidroconformação.

Para produção de pequenos lotes, os processos de estamparia tradicionais não são recomendados, já que normalmente exige-se alto custo de ferramentas e máquinas (PARK e KIM, 2003). Dentro deste contexto, surgiu a estampagem incremental, também conhecida pelo seu acrônimo em inglês ISF (*Incremental Sheet Forming*), na qual ocorre a conformação com trajetória definida em programação de máquinas CNC (*Comando Numérico Computadorizado*) de modo que inúmeras geometrias assimétricas possam ser fabricadas.

A estampagem incremental é uma tecnologia de conformação de chapas que ocorre de forma gradual, a partir de uma trajetória pré-definida pela programação de máquinas com comando numérico computadorizado (Figura 2).

Essa tecnologia tem sido desenvolvida durante as últimas décadas e devido à elevada quantidade de parâmetros que esse processo possui, muitos estudos têm sido conduzidos (McANULTY *et al.*, 2017).

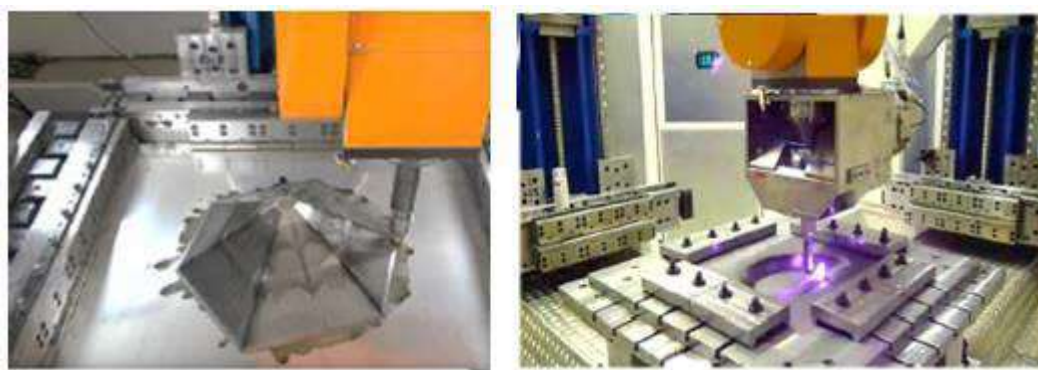


Figura 2 - Centro de estampagem incremental do IBF RWTH Aachen. Fonte: Conrads *et al.*, 2016.

Khare e Pangadale (2014) comentam que a estampagem incremental não é um processo para ser aplicado em larga produção, porém é muito eficiente para pequenos lotes. Como a trajetória de conformação acontece de forma gradual, o tempo de fabricação de um produto por estampagem incremental é superior ao tempo de uma conformação convencional.

Pequenos lotes são utilizados quando a demanda do produto é baixa. Um exemplo para comparação de tamanho de lotes é pensar na produção fabril de automóveis populares que possuem altas demandas de venda (várias unidades por hora) com a produção fabril de aeronaves (várias unidades por mês). Para não acumular peças em estoque por períodos longos, uma estratégia comum é a utilização de pequenos lotes de fabricação.

Esta situação remete à necessidade de processos de manufatura para atender a fabricação de todas as peças. Normalmente, na conformação de peças aeronáuticas são utilizadas tecnologias como a hidroconformação que permite conformar ao mesmo tempo diferentes peças com moldes que poderão ser posicionados no interior da máquina, dependendo da demanda necessária.

Independentemente do tamanho do lote, para atender requisitos dimensionais e poder garantir a qualidade da peça, moldes de conformação, gabaritos de conferição e de furação são necessários para produzir essas peças. Estes kits de moldes e gabaritos são exclusivos para cada peça. Devido à elevada precisão exigida na fabricação, eles costumam ter um custo elevado, que conseqüentemente encarece o produto. Quanto maior a quantidade de peças produzidas, mais rápida é a depreciação desses kits de moldes e gabaritos, o que gera maior lucratividade ao longo do tempo.

Na indústria aeronáutica também é comum a produção de peças customizadas ou de baixa cadência que, mesmo em menor volume de fabricação, necessitam atender os requisitos do produto, tais como elevada resistência mecânica e resistência à fadiga, tolerâncias dimensionais e baixa rugosidade superficial para garantir forças de arrasto menores durante o voo e, conseqüentemente, maior eficiência da aeronave (KIRIDENA, *et al.*, 2018) e (TRZEPIECIŃSKI, *et al.*, 2018).

Desta forma, torna-se custoso adquirir um kit de moldes e gabaritos para o uso esporádico ou ainda, uma única vez. Há casos em que se deseja um protótipo capaz de ter características iguais ou muito semelhantes ao produto, pois a manufatura aditiva pode não atender todos os requisitos.

Na Figura 3, Trzeiecinski *et al* (2018) ilustram a aplicação da conformação incremental e os seus campos de aplicação, ao se comparar o tamanho das peças, a quantidade a ser fabricada e o finalidade do produto.

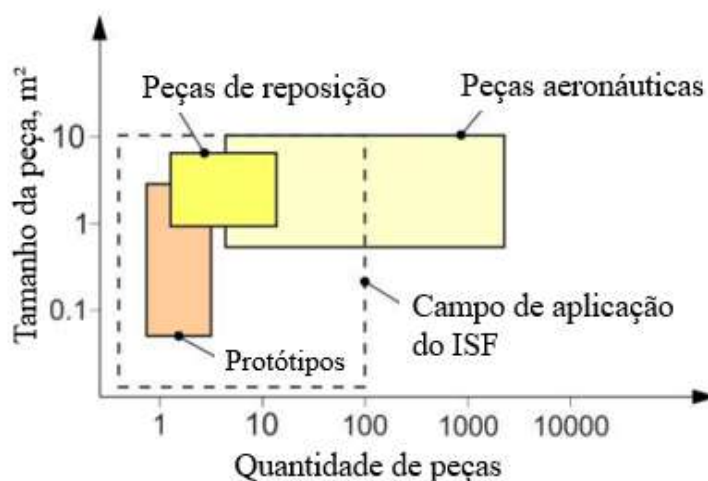


Figura 3 – Campo de aplicação da conformação incremental. Adaptado de TRZEPIECIŃSKI, *et al.*, 2018.

Desta forma, a estampagem incremental torna-se atrativa para pequenos lotes, que é essencialmente os casos de peças de reposição, protótipos ou ainda peças personalizadas, pois nem sempre necessita de um molde de apoio para a fabricação. Quando há a necessidade de um molde de apoio na estampagem incremental, ele costuma ter um custo inferior aos moldes de conformação, pois normalmente é mais leve, menos resistente e pode ser fabricado com materiais poliméricos ou de madeira. Além disso, o tempo de espera entre o projeto da peça e a sua concepção é menor, pois depende apenas da matéria-prima da peça e de uma programação em máquinas CNC. Caso o projeto necessite alterações, elas são fáceis de serem feitas para obter uma nova peça, bastando alterar a programação.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar e avaliar a aplicação da tecnologia de estampagem incremental em uma indústria aeronáutica para a fabricação de uma peça representativa. Deseja-se avaliar o comportamento das propriedades mecânicas e físicas da peça quando são alterados parâmetros de processo e da matéria prima em ensaios de fabricação.

Com os dados resultantes desses ensaios, deseja-se inferir se esse processo é capaz de garantir a fabricação de peças protótipos ou de peças especiais sob demanda, de forma a atingir os requisitos desejáveis em um produto para uso em aeronaves.

Os objetivos específicos que surgiram ao longo do estudo são listados a seguir:

- 1) Avaliar por ensaio não destrutivo o aparecimento de microtrincas após a estampagem incremental de corpos de prova e avaliar a microestrutura a fim de garantir que o produto esteja apto para suportar esforços mecânicos;
- 2) Estudar o comportamento do processo e os requisitos dimensionais em uma mesma liga de alumínio, porém com diferentes condições de tratamento térmico (AA7475-T761, AA7475-W e AA7475-O), a fim de avaliar a necessidade de tratamento térmico antes ou após o processo de estampagem incremental, além de alterações nos requisitos finais do produto.
- 3) Avaliar a condição da superfície do corpo de prova quando os parâmetros do processo são alterados. Rugosidades ou ondulações provocam aumento no coeficiente de atrito e consequentemente diminuem a eficiência da aeronave caso esta peça esteja em contato com o ambiente externo.

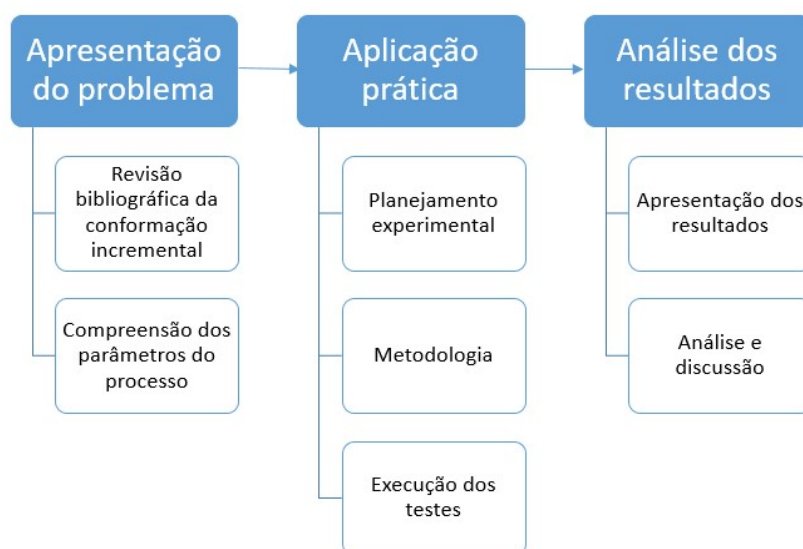


Figura 4 - Estrutura utilizada no desenvolvimento e apresentação deste trabalho.

A fim de apresentar a metodologia de trabalho para se atingir os objetivos propostos, o texto da dissertação foi organizado em seis capítulos divididos em tópicos estruturados mostrados na Figura 4.

No Capítulo dois é apresentada a revisão bibliográfica sobre a estampagem incremental e os requisitos do processo, além de informações sobre as vantagens e desvantagens da tecnologia. Também é feita uma revisão bibliográfica sobre o alumínio, suas ligas e tratamentos térmicos. Em seguida, no Capítulo 3 é apresentado o planejamento experimental no qual se define a geometria do produto representativo, sua matéria-prima e os parâmetros variáveis do processo.

No Capítulo 4, a metodologia e a execução dos ensaios são apresentadas, seguido pelo Capítulo 5 no qual os resultados obtidos são apresentados e analisados em relação aos seguintes requisitos:

- a) Condição física do corpo de prova quanto ao aparecimento de trincas;
- b) Rugosidade superficial;
- c) Tolerâncias dimensionais;
- d) Dureza;
- e) Redução da espessura do corpo de prova.
- f) Microestrutura dos corpos de prova.

Por fim, no Capítulo 6 é apresentada a conclusão deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A estampagem incremental conceitua-se a partir de uma deformação local na chapa metálica causada por uma ferramenta com geometria simples (esférica ou hemisférica).

No processo, a ferramenta é fixada em uma máquina CNC, com três ou mais graus de liberdade (eixos X, Y e Z) e percorre um caminho pré-definido ao longo da chapa com avanço incremental. Para geometrias simples e simétricas, normalmente não são usados moldes de apoio. Já para geometrias complexas, pode ser usado um molde fabricado com materiais de baixo custo ou até mesmo pequenos suportes. Os prendedores da chapa normalmente são fabricados de forma simples e atendem diversos projetos (KOPAC e ZAMPUS, 2005).

A preparação dos recursos para se iniciar o processo consiste em se montar o molde sobre a mesa de uma máquina CNC e dispor a chapa e o prendedor sobre o molde. A trajetória a ser executada pela ferramenta é definida por programação *off-line* no ambiente CAD (*Computer Aided Design*). Normalmente, a trajetória escolhida é espiral com avanço de profundidade. Se a geometria da peça é complexa, ferramentas de suporte ou moldes são usados embaixo da chapa (KHARE e PANDAGALE, 2014).

2.1 Diferentes técnicas de estampagem incremental

Várias técnicas de conformação de metais foram desenvolvidas nos últimos anos devido aos seguintes avanços:

- 1) Trajetórias de ferramentas controladas por computador;
- 2) Conformação simétrica controlada em tornos de repuxo;
- 3) Utilização de programação CNC e simuladores em softwares CAD.

Isto tem possibilitado avanços nos estudos de forma significativa, levando à capacidade de se conformar formas assimétricas de baixo custo, sem moldes caros (SILVA E MARTINS, 2014).

De forma genérica, pode-se dizer que a estampagem incremental é um processo no qual o produto é conformado a partir de deformações localizadas por uma ferramenta simples que se move progressivamente por uma determinada trajetória (FILIP e NEAGOE, 2010).

Na Figura 5 são apresentados dois princípios de funcionamento: a estampagem incremental simples (a) na qual a ferramenta se desloca no eixo vertical para baixo e a chapa é sustentada e presa por um prensa-chapa; e (b) na qual há a atuação de uma contra-ferramenta que se desloca no mesmo sentido que a ferramenta principal, sendo a estampagem normalmente executada com dois robôs.

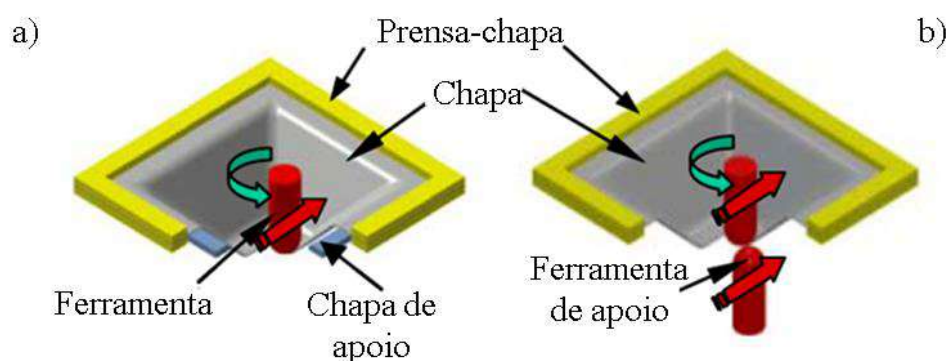


Figura 5 - Representação da estampagem incremental simples. Adaptado de Jeswiet *et al.* (2005).

A Figura 6 mostra as duas representações mais comuns da estampagem incremental com suporte; em (a) é usado um suporte simples, que tem a função de suspender a chapa durante o processo e, em (b), é usado um molde com a geometria completa do produto.

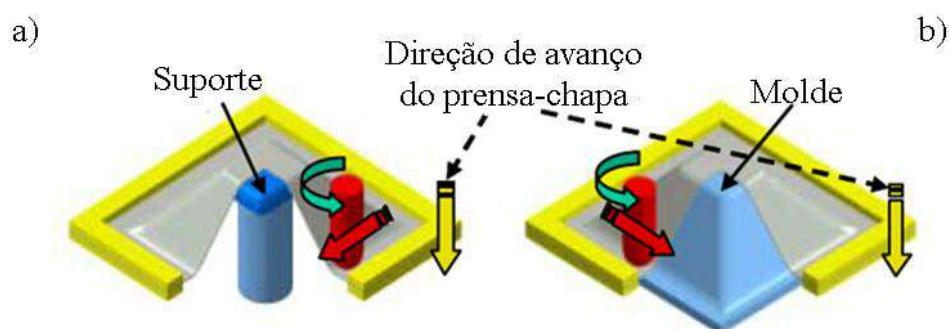


Figura 6 - Representação da conformação com suporte. Adaptado de Jeswiet *et al.* (2005).

Resumidamente, a estampagem incremental pode ser definida como:

- 1) Um processo de conformação de chapas metálicas;

- 2) Possui uma ferramenta de conformação sólida e de pequeno porte;
- 3) Raramente possui moldes grandes e dedicados;
- 4) Durante o processo, a ferramenta mantém contato contínuo com a chapa metálica;
- 5) Possui uma ferramenta que se move sob controle em pelo menos três diferentes eixos;
- 6) Pode produzir formas geométricas assimétricas.

2.2 Estampagem incremental com suporte

A estampagem incremental com suporte é o método que utiliza uma ferramenta de apoio no lado oposto da chapa. Nesse caso, um suporte parcial, ou um molde, é utilizado como facilitador na fabricação de peças complexas quando se deseja uma tolerância dimensional mais precisa.

Normalmente utilizado para fabricação de peças das indústrias automobilística e aeronáutica, o processo de estampagem incremental com uso de molde ainda é vantajoso, pois os custos de fabricação desses moldes, cuja atuação é apenas como suporte, são inferiores aos moldes de conformação por estampagem. Esse processo é conhecido como o TPIF (*Two Point Incremental Forming*), pois o molde pode ser classificado como a ferramenta de apoio (SILVA e MARTINS, 2014).

Mais detalhadamente, o método TPIF, mostrado na Figura 7, consiste em um prensa-chapa, que prende a chapa metálica e permite o movimento descendente com percurso incremental da ferramenta na direção do eixo Z. No centro fica localizado um suporte estacionário (normalmente um molde parcial) que atua como um ponto de sustentação à medida que a chapa vai sendo conformada.

Para evitar a torção da chapa enquanto a ferramenta a conforma e fornecer uma contrapressão, há uma placa de suporte embaixo da chapa. Este suporte parcial pode ser substituído por um suporte com a geometria igual à do produto e assim, atuar como um molde (similar ao molde de uma prensa) sobre o qual a chapa é conformada incrementalmente (JESWIT *et al.*, 2005).

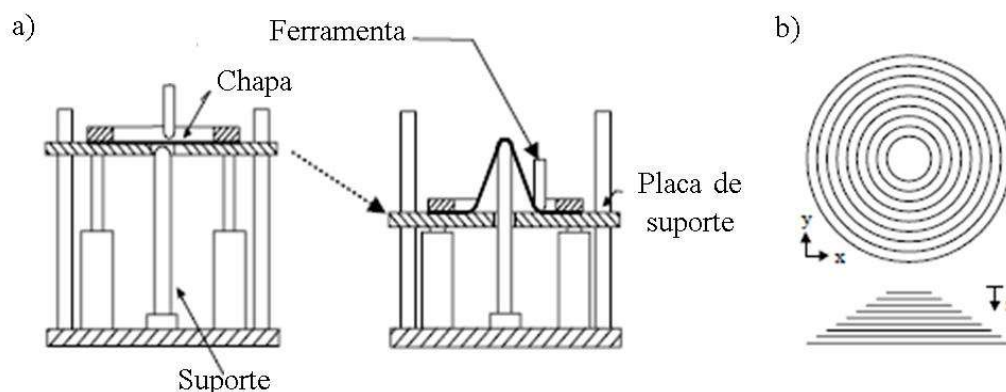


Figura 7 - Representação da estampagem incremental com suporte (a) e trajetória da ferramenta (b). Adaptado de MATSUBARA (1994).

2.3 Estampagem incremental simples

Em inglês, (*Single Point Incremental Forming – SPIF*) é o método de estampagem incremental simplificado, no qual a chapa é presa por um dispositivo e uma ferramenta é acoplada à máquina CNC. A ferramenta se move na superfície da chapa por uma trajetória definida no CAD e desta maneira acontece a conformação do material (SILVA e MARTINS, 2014).

Cronologicamente, esse processo surgiu após o TPIF, quando se tornou aparente que qualquer fresadora CNC usada em conjunto com um software de programação da trajetória seria capaz de conformar chapas metálicas incrementalmente. (JESWIT, *et al.* 2005).

Na estampagem incremental de ponto simples (Figura 8) a chapa a ser conformada é firmemente fixada em um prendedor que pode realizar movimentos controlados na direção vertical, ou seja, paralela ao eixo Z de um sistema CNC. Enquanto a conformação está ocorrendo, elementos de fixação distribuídos ao redor da chapa impedem seu movimento, criando assim uma deformação plástica na chapa.

Acoplada ao fuso de um dispositivo CNC, uma ferramenta com ponta semiesférica ou esférica inicia a estampagem incremental por meio de movimento contínuo na superfície da chapa e gradualmente, por incrementos verticais, realiza a conformação (DALEFFE *et al.*, 2013).

Na Figura 8, S_0 e S_1 representam respectivamente as espessuras inicial e final da chapa e ϕ representa o ângulo para conformação.

Jeswit *et al.* (2005) comentam que pelo fato da conformação ocorrer sem um suporte de apoio no lado oposto da chapa, diferentes padrões de tensão são gerados e são mais difíceis de se prever.

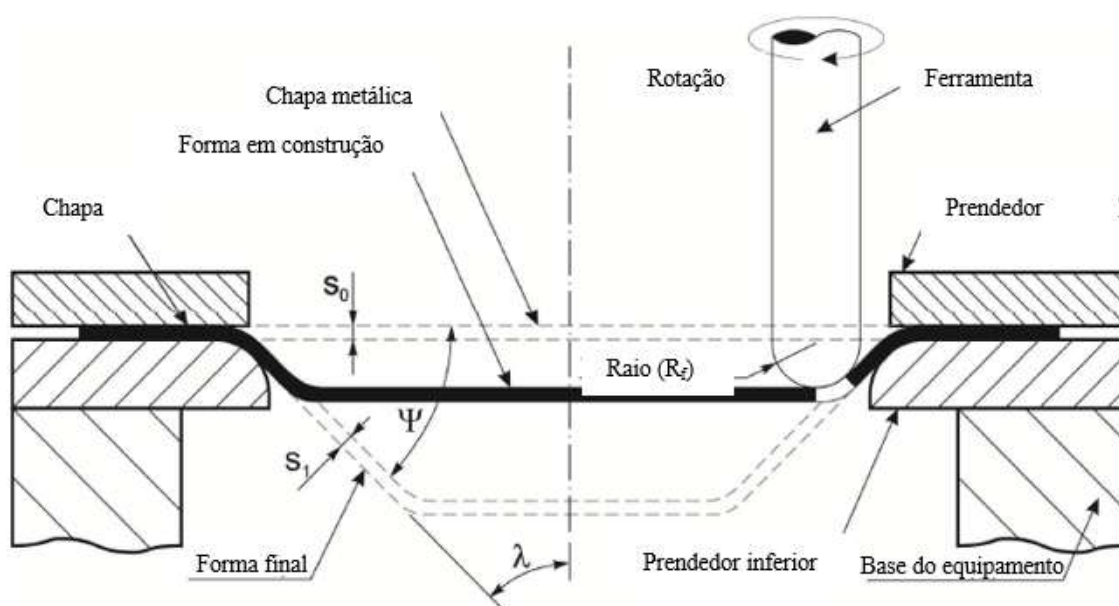


Figura 8 - Representação da estampagem incremental simples. Adaptado de DALEFFE *et al.*, (2013).

Há ainda outra variação na estampagem incremental simples na qual uma ferramenta móvel do lado oposto da chapa segue a trajetória da ferramenta principal, atuando como suporte. Neste tipo de conformação, a atuação de duas ferramentas permite um maior controle da conformação localizada e melhora a conformabilidade e acurácia das peças. Uma das ferramentas, normalmente a superior, atua como ferramenta principal, promovendo a deformação localizada enquanto a ferramenta inferior oferece sustentação à chapa (PENG *et al.*, 2019).

Nesse método, a possibilidade de fratura do material diminui e torna possível a fabricação de pequenos ângulos (MEIER *et al.*, 2009) e (PENG *et al.*, 2019).

2.4 Vantagens da estampagem incremental e suas limitações

Araghi *et al.* (2011), Filip e Neagoe (2010) e Peng *et al.*, (2019) discorrem sobre as principais vantagens e limitações da estampagem incremental:

Vantagens da estampagem incremental

- Alta flexibilidade quando comparada com os métodos de estampagem profunda. Para fabricar um novo produto basta uma máquina CNC, uma ferramenta de conformação, a programação CNC e, não menos importante, o conhecimento de parâmetros tais como velocidade de avanço, incremento e lubrificação;
- Custos de *setup* são praticamente nulos, pois basta usar uma ferramenta com geometria simples, com ponta esférica ou semiesférica, para atender a maioria dos casos;
- Não é necessário o uso de uma máquina específica. Normalmente, uma máquina de usinagem com controle numérico atende à maioria dos casos;
- É um método de baixo custo para fabricação de peças novas, sem custo de fabricação de moldes e até mesmo para retrabalho de peças antigas no qual os moldes muitas vezes não estão mais disponíveis;
- Possui também uma taxa de deformação superior ao processo clássico de estampagem profunda devido ao estado de tensão criado pelo uso de deformação localizada;
- Por precisar apenas de uma programação de máquina CNC e poucos recursos para adaptar as ferramentas à máquina, a estampagem incremental é excelente para fabricação rápida de protótipos;
- Mudanças na geometria de um produto podem ser rapidamente fabricadas e validadas por esse processo, sem envolver elevados custos de modificação, como normalmente ocorre em moldes de estampagem;
- As zonas localizadas de deformação plástica e a natureza incremental do processo contribuem para aumentar a conformabilidade de materiais difíceis de se conformar;
- O tamanho da peça é limitado apenas pelo tamanho da máquina. As forças não aumentam proporcionalmente à dimensão do produto porque a zona de contato e o avanço incremental permanecem pequenos.

Limitações da estampagem incremental

Apesar das vantagens relatadas, a estampagem incremental possui também algumas limitações, dependendo do ponto de vista do fabricante.

- A primeira delas é a baixa produtividade devido ao elevado tempo de fabricação de cada produto. Como a conformação acontece em função da trajetória da ferramenta, a estampagem incremental pode levar minutos ou horas, dependendo do tamanho e complexidade, enquanto os processos convencionais levam segundos para conformar o produto;
- O estiramento localizado na chapa gera uma redução da espessura e consequentemente pode levar ao aparecimento de uma trinca quando o limite de deformação é excedido.
- Em alguns materiais, sempre que a ferramenta se move e cria deformações elástico-plásticas, o efeito *springback* (retorno elástico) pode ser observado, o que torna difícil prever a compensação necessária para produzir um produto que atenda às especificações de tolerância geométrica;
- Deformações cíclicas acumulam tensões residuais que desencadeiam o retorno elástico após as operações de corte e consequentemente podem provocar desvios nas dimensões requeridas para o produto.
- Há ainda a necessidade de mais conhecimento teórico para prever com precisão o comportamento da deformação localizada e melhorar a compreensão do processo, mesmo que análises de elementos finitos tenham sido aplicadas.

Como consequência dos limites do processo, peças complexas requerem estratégias de conformação dedicadas para diminuir a redução de espessura da chapa e para melhorar a precisão da peça. No entanto, não existe uma metodologia padronizada na qual uma estratégia de deformação adequada possa ser definida.

As estratégias de conformação com base em análise de elementos finitos ainda são demoradas devido ao longo tempo de processo. Assim, a produção de peças baseia-se na experiência ou na otimização de tentativa e erro do processo, o que torna o planejamento muito incerto para muitas aplicações industriais.

Uma alternativa interessante para compensar as desvantagens da estampagem incremental é combiná-la com outros processos de conformação e/ou mecanismos físicos (ARAGUI *et al.*, 2011).

2.5 Outros processos envolvendo estampagem incremental

Um dos principais limitantes da tecnologia de estampagem incremental é o elevado tempo de fabricação. Devido à conformação acontecer localmente, ocorre um consumo de tempo considerável, chegando a levar mais de meia hora para conformar 1m² de chapa, dependendo ainda da qualidade desejada da superfície. Esse alto consumo de tempo não é favorável no ambiente industrial, então muitos pesquisadores se encarregaram de estudar processos híbridos, o que garante flexibilidade na conformação e redução do tempo de fabricação (ARAGHI *et al.*, 2009).

Um dos exemplos mais comuns é a combinação de estiramento com estampagem incremental (IBF – RWTH Aachen). Neste processo, também indicado para lotes pequenos, é possível produzir uma gama de peças em um tempo de processo significativamente reduzido e com uma precisão geométrica aprimorada em comparação a um processo realizado apenas por estampagem incremental.

Para tanto, foi desenvolvido um centro multifuncional de processamento de chapas (Figura 9) no qual toda a cadeia de processamento da chapa, incluindo a produção de ferramentas de conformação, a própria conformação e as operações subsequentes de corte e furação podem ser realizadas.



Figura 9 - Integração de estiramento com estampagem incremental e recorte de contorno.
(IBF – RWTH Aachen).

Para se conseguir produtos com elevada precisão geométrica neste processo integrado, estratégias de conformação e avaliação do comportamento do material durante a conformação foram desenvolvidas. As ferramentas de simulação numérica foram usadas para previsão do processo. O objetivo foi alcançar a precisão geométrica necessária e, ao mesmo tempo, uma boa qualidade de superfície com o menor esforço de planejamento possível (ARAGHI *et al.*, 2011).

Além disso, as possibilidades de um tratamento térmico local durante a estampagem incremental foram investigadas. Usando um laser óptico integrado à máquina, a chapa é aquecida apenas na zona de deformação incremental. Isso permite conformar materiais de alta resistência que dificilmente podem ser conformados à temperatura ambiente (HIRT *et al.*, 2015).

Outros processos surgiram ao longo do tempo para investigar a conformabilidade de chapas de forma incremental ou local. Alguns exemplos que serão comentados a seguir são o *shot peening*, a conformação por jato d'água e a conformação com laser.

No caso do *shot peening* a chapa metálica é atingida repetidamente por uma elevada quantidade de pequenas esferas de aço fundido, vidro ou materiais cerâmicos. O tamanho destas esferas pode variar entre 0,125 mm a 5 mm de diâmetro. Esse processo é usado tradicionalmente para criar tensões compressivas na superfície de produtos.

Trabalhos mais recentes têm mostrado a capacidade de se usar o *shot peening* para conformar ambas geometrias, convexas e côncavas, a partir de um processo com jatos simultâneos em ambos os lados da peça, o que resulta em uma melhor deformação enquanto que um equilíbrio entre a energia cinética fornecida de ambos os lados garante a curvatura especificada no produto (XIAO *et al.*, 2018). Isto abre perspectivas para uma ferramenta de moldagem flexível para superfícies grandes, simples ou com dupla curvatura, caracterizadas por grandes raios.

A conformação por jato d'água é relativamente um processo novo e tem potencial para atuar como uma ferramenta na estampagem incremental simples (SPIF). Desde a década de 80, quando começou a ser utilizado, o corte por jato d'água tem sido amplamente difundido, porém Jurisevic *et al.* (2003) usaram jato d'água para conformar chapas de forma incremental e concluíram ser necessário um volume maior de água (de até 50L/min) quando comparado com o corte e pressões de até 50 MPa para causar deformações significativas em uma chapa de alumínio AA6082 com 0,5 mm de espessura.

A conformação com laser é uma tecnologia desenvolvida na década de 90, com promissora capacidade de conformar geometrias assimétricas em chapas metálicas, na qual uma pequena área da chapa é aquecida repetitivamente em um processo de aquecimento e resfriamento ao longo de uma trajetória selecionada. A chapa curva-se em uma direção preferencial, dependendo da tensão residual. Recentemente, sistemas de controle em circuito fechado foram desenvolvidos para melhorar a eficácia deste processo de conformação. No entanto, ainda é um processo embrionário que tem sido estudado em diversas pesquisas para posterior aplicação industrial (GAO *et al.*, 2016).

2.6 Equipamentos e parâmetros do processo

Máquinas para estampagem incremental

Em geral, todas as máquinas de três eixos com controle CNC são adequadas para executar a estampagem incremental pois apresentam características favoráveis como alta velocidade, grande volume de trabalho e rigidez.

A seguir são listadas algumas máquinas que podem ser usadas para a estampagem incremental. Na maioria dos casos, elas podem ser usadas em outros processos como a usinagem e, portanto, são máquinas multiuso (JESWIT *et al.*, 2005).

- Fresadoras CNC de três ou mais eixos;
- Máquinas construídas especialmente para a finalidade;
- Robôs;
- Plataformas Stewart e *hexapods*.

Os robôs industriais podem suportar um grande volume de trabalho, são ágeis, porém apresentam baixa rigidez e forças máximas de trabalho limitadas.

Um caso especial de uma aplicação com robô é utilizá-lo para conformar incrementalmente por movimentos de martelamento, ao invés de uma ferramenta rígida com contato direto em uma trajetória. Isto pode ser considerado benéfico em um robô industrial para compensar parcialmente a falta de rigidez do braço do robô.

Já o uso da plataforma Stewart oferece infinitos graus de liberdade e pode ser acoplada a uma fresadora mais simples (SOUSA *et al.*, 2014).

Fresadoras CNC são normalmente utilizadas e dividem-se em alguns modelos com as principais características (JESWIT *et al.*, 2005):

- **Fresadoras de pórtico:** atendem grande volume de trabalho, altas taxas de velocidade, forças elevadas e normalmente são caras;
- **Fresadoras com mesa fixa:** possuem disponibilidade para grandes volumes de trabalho, limitação em função das dimensões da mesa, baixo custo e menor rigidez;
- **Fresadora de bancada:** disponíveis em quase todas as oficinas, têm baixo custo, são relativamente pequenas, logo têm baixo volume de trabalho e menor rigidez.

Ferramentas para estampagem incremental

Geralmente, são usados dois tipos de ferramentas para a estampagem incremental. O primeiro tipo é uma ferramenta hemisférica em que o formato arredondado é fabricado no próprio corpo da ferramenta. O segundo tipo é uma ferramenta esférica, no formato de uma ponta de caneta, na qual se usa uma esfera de aço de maior dureza que rotaciona livremente na ponta da ferramenta que a acomoda.

Experimentalmente, a ferramenta com ponta esférica promove acabamento superficial de melhor qualidade, já que a esfera rotaciona com menor atrito do que a ponta hemisférica.

Até os dias de hoje, as ferramentas são produzidas pelos próprios usuários e não são disponíveis no mercado para compra, assim como também não há um sistema de normatização, visto que o processo ainda está em desenvolvimento.

O diâmetro da ponta da ferramenta (Figura 10) pode variar conforme a aplicação. Os maiores diâmetros são para peças maiores, e isto requer mais força na máquina, pois a área de contato é maior. O diâmetro também influencia na qualidade da superfície podendo ou não causar ondulações, dependendo do incremento usado. Segundo Jeswit *et al.* (2005), os diâmetros mais utilizados são aqueles próximos a 12 mm.



Figura 10 - Exemplo de ferramentas de aço carbono cementadas, com diferentes diâmetros. Da esquerda para direita: 6mm, 10mm, 30mm e uma ferramenta com a ponta de material polimérico. Fonte: HIRT (2004) in JESWIT *et al.*, (2005).

As ferramentas normalmente são fabricadas com aço e na região onde há contato, é feito um tratamento de endurecimento da superfície, como exemplo, a cementação, com a finalidade de reduzir o desgaste e consequentemente aumentar a vida útil da ferramenta.

Esta configuração atende à maioria das aplicações de estampagem incremental. Em alguns casos, ferramentas com a ponta em material polimérico são usadas para evitar reações químicas com o material da chapa e isto ajuda a aumentar a qualidade da superfície. O desgaste das ferramentas deve ser levado em consideração e por isso, utilizar lubrificação pode aumentar consideravelmente a vida útil delas (JESWIT *et al.*, 2005).

Além da preocupação sobre o aquecimento por atrito, há uma preocupação com a rugosidade da chapa conformada, que pode ser influenciada pelo tamanho da ferramenta, atrito, incremento e pela trajetória.

Quando a qualidade da superfície é uma preocupação, a velocidade relativa pode ser controlada ou uma ferramenta projetada especificamente para esta finalidade pode ser usada como, por exemplo, uma ferramenta que possui uma esfera na ponta, suportada por fluido de pressão, que pode girar livremente em todas as direções e, assim, diminuir o atrito com a chapa.

Velocidade de rotação da ferramenta

Em alguns casos, a velocidade rotacional é aumentada para que a conformabilidade da peça aumente devido à geração de calor local entre a chapa e ferramenta, causada pelo atrito.

Segundo Micari *et al.*, 2004, o aumento da velocidade rotacional também colabora para a redução dos efeitos do atrito na interface ferramenta-chapa (MICARI *et al.*, 2004 in JESWIT *et al.*, 2005). Porém em seu trabalho, SILVA *et al.*, 2008, analisa a deformação, as fraturas e as forças envolvidas na conformação incremental simples de um componente cônico e descarta a influência da velocidade rotacional da ferramenta e seu efeito sobre o atrito gerado, sendo considerado apenas em condições extremas, tais como o uso ou não de lubrificantes.

Alguns materiais sofrem transformações na sua microestrutura quando aquecidos. Então, caso estas transformações devam ser evitadas, um cuidado maior deve ser tomado a fim de minimizar o atrito.

Lubrificação

Nos experimentos de Bramley (2001), foram ensaiadas quatro condições de ferramentas e lubrificação: ferramentas hemisférica e esférica e o uso ou não de lubrificante e concluiu-se que o uso de ferramenta esférica sem lubrificante gerou boa conformabilidade porque o atrito da ferramenta com a chapa aumentou a pressão diminuindo o estado de tensão da chapa. Como resultado, reduziu-se a ocorrência de fraturas. No entanto, se o atrito da ferramenta com a chapa aumenta consideravelmente, ocorre fratura. Em situações em que não é possível o uso de lubrificantes, o uso de uma ferramenta com ponta esférica promove a diminuição do atrito e consequentemente a geração de calor.

Azevedo *et al.* (2015) avaliou o uso de 5 diferentes lubrificantes (divididos entre pastas e óleos) em dois tipos de materiais: alumínio AA1050 representando um material dúctil e o aço PD780 representando um material menos dúctil. Os testes foram conduzidos em um corpo de prova cônico através da conformação incremental simples. Eles observaram que apesar do lubrificante não ser um dos principais parâmetros que garantem a formabilidade de uma peça através da conformação incremental, há sim uma grande influência principalmente em relação à rugosidade da superfície. Eles concluíram que quanto maior a dureza do material a ser conformado, menor é a necessidade de viscosidade do lubrificante.

O uso de um lubrificante adequado pode aumentar a qualidade superficial, reduzir as forças de conformação e prevenir o desgaste da ferramenta (AZEVEDO, *et al.*, 2015).

Incremento

O incremento ou passo incremental (Δz) é outro importante parâmetro da estampagem incremental. Ele define o quanto de material será deformado a cada trajetória. Ham (2006) mostra que o aumento ou diminuição do incremento não exerce efeitos significativos na conformabilidade da peça. Porém, pequenos incrementos geram aumento no tempo de manufatura final das peças.

Bhattacharya *et al.* (2011) concluíram que pequenos incrementos promovem uma superfície com baixa rugosidade, no entanto, o incremento pode ser definido em função dos requisitos desejados para o produto: formato, textura e rugosidade superficial.

Forças na estampagem incremental

Duflou *et al.* (2005) trazem algumas conclusões de outros estudos nos quais as forças na estampagem incremental foram estudadas. Foi observado que, ao aumentar-se o passo incremental Δz , o diâmetro da ferramenta e o ângulo de conformação, as forças totais na ferramenta de conformação e, consequentemente na máquina, também aumentam.

Já um aumento no diâmetro da ferramenta tem um impacto substancial na magnitude da força necessária para conformar uma determinada peça. Embora possa melhorar o acabamento da superfície e reduzir o tempo de produção, permitindo maiores incrementos sem afetar a qualidade da superfície, aumentos significativos no diâmetro da ferramenta resultam em forças muito maiores e podem se tornar um fator limitante.

Quando o ângulo de conformação aumenta, as forças são maiores. Nesse estudo de Duflou *et al.* (2005), as forças foram medidas durante a fabricação de chapas de alumínio AA3003-O de 1,21 mm de espessura em dois tipos distintos de estampagem incremental: SPIF (estampagem incremental simples) e TPIF (estampagem incremental com suporte).

Nas figuras a seguir são apresentados os dados de força para diferentes ângulos de conformação de uma peça cônica com passo incremental de 0,5mm, diâmetro da ferramenta de 10mm e velocidade de avanço de 2000 mm/min (Figura 11) e as forças quando o diâmetro da ferramenta é alterado (Figura 12).

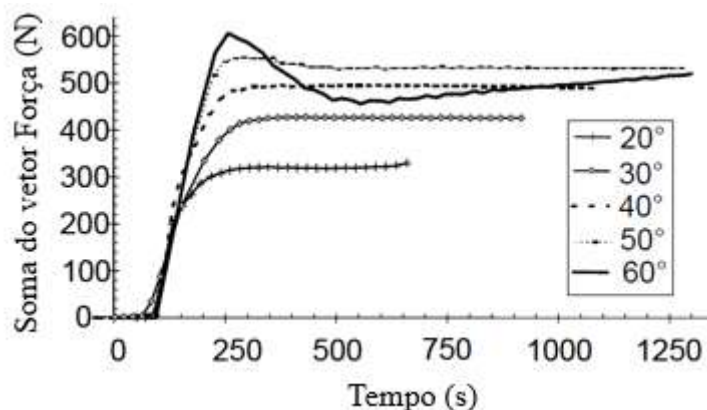


Figura 11 - Força na estampagem incremental de peças cônicas com diferentes ângulos de conformação. Adaptado de DUFLOU *et al.* (2005).

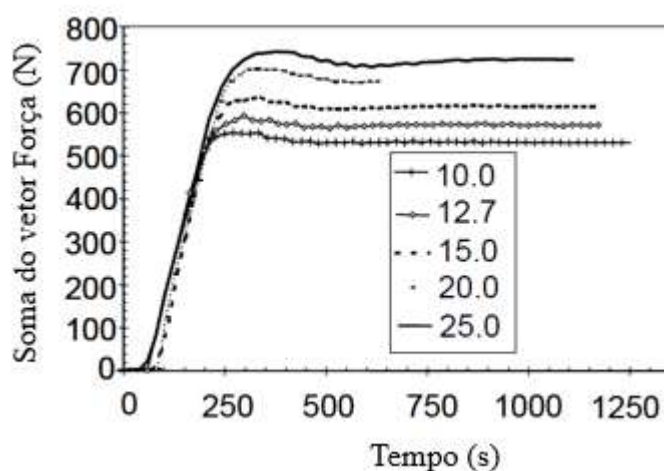


Figura 12 – Força na estampagem incremental de peças cônicas com alteração do diâmetro da ferramenta. Adaptado de DUFLOU *et al.* (2005).

Esses autores concluíram que:

1. Nos maiores ângulos de conformação, as forças de pico podem ser observadas nas regiões das peças onde as falhas ocorrem;
2. Ao aumentar o tamanho do passo incremental, Δz , as forças aumentam;
3. Maiores diâmetros das ferramentas aumentam significativamente as forças de conformação.

Prendedores ou prensa-chapas

Khare e Pandagale (2014) explicam que o prendedor ou prensa-chapa é um dispositivo fabricado pelo usuário para fixar a chapa durante a estampagem incremental. Existem dois métodos mais comuns: o prendedor fixo, no qual a chapa é fixada com parafusos ou outro método semelhante e, o prendedor com esferas de aço que mantêm a chapa presa.

Em alguns casos, o prendedor com esferas permite que o material escoe suavemente conforme é solicitado, evitando a formação de trincas e, conseqüentemente, a fratura do material.

Já Jeswit *et al.* (2005) acrescentam que o prensa-chapa rígido é adequado quando o processo aplicado é a estampagem incremental simples (SPIF) enquanto que um prensa-chapa móvel, com avanço vertical é mais apropriado para o uso na estampagem incremental com suporte (TPIF).

2.7 Parâmetros do material da chapa

Distribuição da espessura durante a deformação por cisalhamento

Segundo Araghi *et al.* (2011), prever a redução de espessura quando há apenas deformação por cisalhamento é relativamente fácil (Expressão 1):

$$S_I = S_0 \sin \varphi \quad (\text{Expressão 1})$$

Onde S_I é a espessura final, S_0 a espessura inicial e φ é o ângulo de parede. No entanto, isto só é válido quando o material tem liberdade para escoar sem atuação de um prensa-chapa, por exemplo.

Como é possível observar na Expressão 1, se o ângulo de parede é reduzido até 30°, então a espessura cai pela metade. Se for desejável acima de 30°, então é provável que haja formação de trincas no material. Para ultrapassar estes limites, normalmente se usam técnicas que envolvem deformação por cisalhamento e conformação com um suporte no lado oposto da ferramenta em contato com a chapa. Nesses casos, as equações de predição da redução de espessura se tornam mais complexas e necessitam de métodos computacionais para analisar o comportamento da conformação.

Em 2005, Hirt *et al.* realizaram um experimento baseado na fabricação de uma caixa de alumínio com 200x200x60mm. A fabricação se deu em 15 etapas a fim de evitar o aparecimento de trincas. A espessura inicial do material era de 1,5mm e após 7 horas de fabricação, a espessura final caiu mais da metade e o menor valor encontrado foi de 0.6mm.

Anisotropia planar

Quando as propriedades do material são diferentes dependendo da direção solicitada, o material possui característica anisotrópica. Em chapas, esta característica é chamada de anisotropia planar. Quando a chapa é manufaturada por processos de laminação, a direção de laminação e a direção transversal são formadas devido à característica do processo (MARCINIAK *et al.*, 2002).

Durante a análise experimental do trabalho de Kim e Park (2002) com uma chapa recozida de alumínio 1050 com 3 milímetros de espessura, observou-se que o diâmetro da ferramenta provoca alterações nas deformações da chapa.

Ao se utilizar uma ferramenta de 5 milímetros de diâmetro, a tensão nos grãos adjacentes foi mais significativa, ou seja, a deformação na direção transversal da chapa foi maior do que na direção de laminação.

De forma contrária, ao se utilizar uma ferramenta com diâmetro de 15mm, a direção de laminação sofreu deformações maiores. Porém, quando o experimento foi conduzido com uma ferramenta de 10 milímetros de diâmetro, as deformações em ambas as direções foram similares, o que levou à conclusão do melhor estado de conformabilidade das amostras ensaiadas (HOMOLA *et al.*, 2014)

Rugosidade superficial

A rugosidade superficial é uma grande preocupação em um produto. Na estampagem incremental, os principais fatores na determinação da rugosidade superficial são o tamanho do incremento ou passo incremental, Δz e o raio da ferramenta. Dois exemplos são mostrados na Figura 13, onde Δh_1 e Δh_2 representam as alturas quando o passo incremental é alterado.

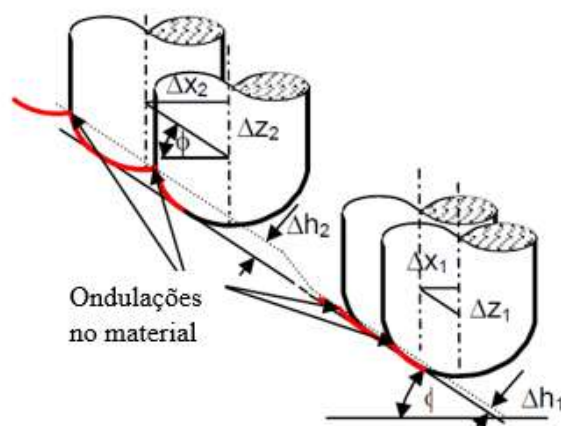


Figura 13 - Variação da rugosidade superficial em relação ao passo incremental. Adaptado de Jeswit *et al.* (2005).

Outros estudos avaliaram os efeitos do passo incremental, Δz , do ângulo de conformação, ϕ , e raio da ferramenta sobre a rugosidade superficial, concluindo-se que esses parâmetros estavam inter-relacionados como mostra a Figura 14 e, que com a combinação correta de parâmetros, a rugosidade (R_z) superficial poderia ser facilmente reduzida.

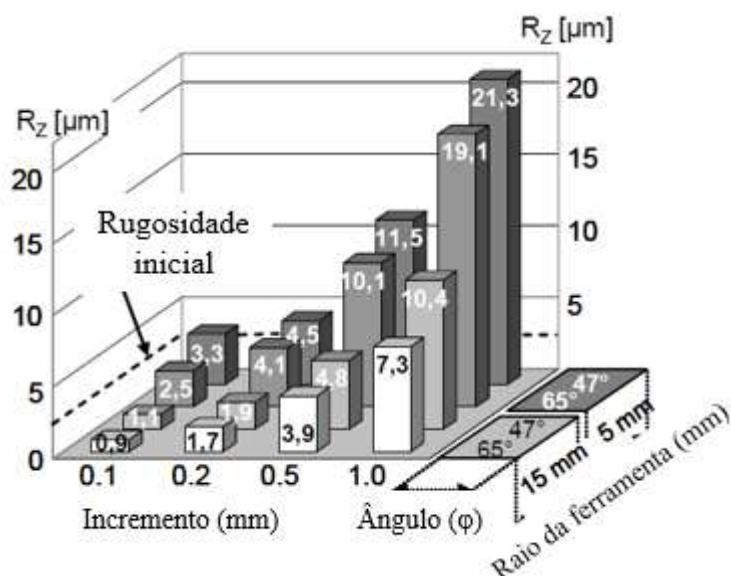


Figura 14 - Variação da rugosidade superficial em função do passo incremental, do raio da ferramenta e do ângulo de conformação. Adaptado de Jeswit *et al.* (2005).

A rotação da ferramenta também pode afetar a rugosidade superficial. Devido principalmente ao atrito, a rugosidade é maior quando são usadas ferramentas hemisféricas e

estacionárias, ou seja, que não exercem movimento de rotação enquanto percorrem a trajetória. Ao diminuir o movimento relativo entre a ferramenta e a chapa, a rugosidade superficial pode ser reduzida, o que também reduz a incidência de desprendimento de material devido a tensões repetidas sobre a mesma superfície (HAGAN e JESWIT, 2004). Em alguns casos, pode acontecer também um efeito indesejável na superfície, conhecido como “casca de laranja” que normalmente ocorre pela influência do passo incremental, Δz , e ângulo de conformação, ϕ , quando há deformações plásticas elevadas e influência de características do material da chapa como textura e condições microestruturais (DUFLOU *et al.*, 2005).

2.8 Alumínio e suas ligas

Os principais critérios na escolha de materiais para fabricação de produtos na indústria aeronáutica e aeroespacial estão relacionados a propriedades como:

- Elevada resistência à fadiga;
- Elevada resistência à corrosão;
- Elevada resistência mecânica;
- Baixa densidade;

Desta forma, os materiais que mais se encaixam nestes critérios são o alumínio, titânio, madeira, a fibra de vidro e a fibra de carbono.

O alumínio é o primeiro material da lista por ser mais amplamente usado em diferentes partes de uma aeronave, tais como fuselagem, asas e interiores.

O alumínio puro possui uma estrutura cristalina cúbica de face centrada, densidade de 2,69 g/cm³, ponto de fusão de 660 °C e é um bom condutor térmico e elétrico. No entanto, seu uso é frequentemente combinado com outros materiais a fim de maximizar a obtenção de propriedades físicas e mecânicas (TOTTEN e MACKENZIE, 2003).

Os principais elementos de liga adicionados ao alumínio são cobre, manganês, silício, magnésio e zinco. Outros elementos também são adicionados em menores proporções para promover um refinamento do grão ou ainda para desenvolver propriedades especiais.

A combinação de materiais para obtenção de ligas de alumínio foi aplicada não apenas na fabricação de aeronaves, como também foram desenvolvidas ligas específicas para cada aplicação, como mostrado na Tabela 1.

Como há uma grande variedade de combinações de ligas, a Associação do Alumínio (*Aluminum Association*) desenvolveu sistemas de designação destas ligas a fim de identificar a condição metalúrgica de cada uma delas.

Tabela 1 – Sistema de designação de ligas de alumínio.

SÉRIE DA LIGA	PRINCIPAL ELEMENTO QUÍMICO DA LIGA
1XXX	99% alumínio, no mínimo
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série ainda não usada

Fonte: TOTTEN e MACKENZIE, 2003.

Este sistema de designação consiste em quatro dígitos sendo que o primeiro identifica o principal elemento químico da liga. O segundo dígito, se for diferente de 0, indica que houve modificação na liga básica. O terceiro e quarto dígitos identificam, de forma arbitrária, uma liga específica dentro do agrupamento.

As ligas de alumínio consideradas aeronáuticas são as das séries 2XXX e 7XXX, pois possuem como principal característica a elevada resistência mecânica, que aliada à baixa densidade do material e à facilidade na conformação, transformam o alumínio em uma das melhores opções para a fabricação de componentes e estruturas para aeronaves.

Ligas de alumínio da série 2XXX possuem como principal elemento de liga o cobre, e muitas vezes contêm adição de manganês, magnésio e zinco em menores proporções. As propriedades de resistência mecânica dessa liga são obtidas pelo endurecimento por precipitação. O cobre promove o aumento de resistência mecânica e dureza. A liga possui boa resistência mecânica e boa resistência à corrosão.

As ligas de alumínio da série 7XXX contêm adição de zinco e magnésio e possuem a mais alta resposta ao endurecimento por envelhecimento. Esta liga possui densidade inferior a

série 2XXX e uma boa resistência à fragilização por corrosão sob tensão e tenacidade à fratura. Por conta destas características, é comum o seu uso em regiões críticas das aeronaves, tais como as asas (TOTTEN e MACKENZIE, 2003).

2.9 Tratamento térmico das ligas de alumínio

A especificação das ligas de alumínio não é completa enquanto não houver a classificação da condição metalúrgica da liga, ou seja, seu tratamento térmico. Da mesma forma que a *Aluminum Association* criou a designação das ligas, também criou a designação do tratamento térmico empregado, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Designação das ligas de alumínio quanto ao tratamento térmico.

DESIGNAÇÃO BÁSICA	SIGNIFICADO
O	Ligas recozidas. Ligas foram tratadas até a sua completa recristalização produzindo a menor resistência mecânica
F	Ligas como fabricadas. Se aplica a produtos conformados sem nenhum controle térmico ou controle das condições de trabalho a frio
H	Ligas trabalhadas a frio a fim de aumentar a resistência mecânica. Podem possuir algum tratamento térmico ao final do encruamento.
W	Ligas tratadas termicamente. Trata-se de uma condição instável aplicada a algumas ligas que espontaneamente envelhecem à temperatura ambiente após tratamento térmico de solubilização seguido de um rápido resfriamento para manter uma solução supersaturada.
T	Ligas tratadas termicamente. São ligas que passam por solubilização, algumas vezes seguida de encruamento a fim de produzir uma têmpera estável diferente de F ou O. A letra T é sempre seguida por um dígito, conforme exemplos abaixo.
T62	Liga de alumínio solubilizada e envelhecida pelo usuário.
T7	Liga de alumínio solubilizada e estabilizada (super-envelhecida).
T761	Liga de alumínio tratada solubilizada e envelhecida a fim de garantir melhor resistência à corrosão. Condição aplicada à chapas.

Fonte: TOTTEN e MACKENZIE, 2003

Ligas de alumínio que permitem a aplicação de tratamentos térmicos são altamente desejáveis nas indústrias de manufatura, pois é possível trabalhar com o material em diferentes condições, com a finalidade de atender as características geométricas e as condições requeridas durante a conformação, por exemplo. A seguir são apresentados alguns tratamentos térmicos comuns para ligas de alumínio (TOTTEN e MACKENZIE, 2003):

- Homogeneização;
- Recozimento;
- Solubilização;
- Têmpera;
- Envelhecimento natural;
- Endurecimento por precipitação (envelhecimento artificial).

Desta forma, na manufatura de ligas tratáveis termicamente, é possível solubilizar o material para facilitar a operação de conformação, pois haverá menor resistência mecânica durante o processo e, posteriormente, envelhecer a fim de aumentar a resistência mecânica da peça e obter as propriedades desejadas para o produto.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

É comum no ambiente de pesquisa, seja na indústria ou no laboratório, encontrar dificuldades em estabelecer as condições adequadas para a realização dos experimentos e para a avaliação dos resultados obtidos. Normalmente os pesquisadores não contam com elevado tempo disponível para realizar grande número de ensaios ou ensaiar infinitas possibilidades até mesmo porque os recursos costumam ser escassos.

Dentro desta perspectiva, o planejamento experimental ajuda a definir o que medir e como realizar esta medição, a fim de garantir que os experimentos sejam conduzidos de forma a permitir a reprodutibilidade sob condições controladas e obter-se resultados confiáveis. Para isto, o planejamento experimental ajuda a definir os equipamentos, instrumentos, materiais e condição de ensaios a serem executados (BUTTON, 2017).

Para Montgomery (2012), um experimento planejado é um ensaio, ou série de ensaios, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a observar e identificar mudanças correspondentes na saída.

O processo, como mostra a Figura 15, pode ser descrito como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transformam um material de entrada em um produto de saída que pode ter respostas ou características da qualidade. No que se refere às variáveis de processo, elas podem ser controláveis ou não-controláveis, estas últimas também são conhecidas como ruído e podem ser desconhecidas.

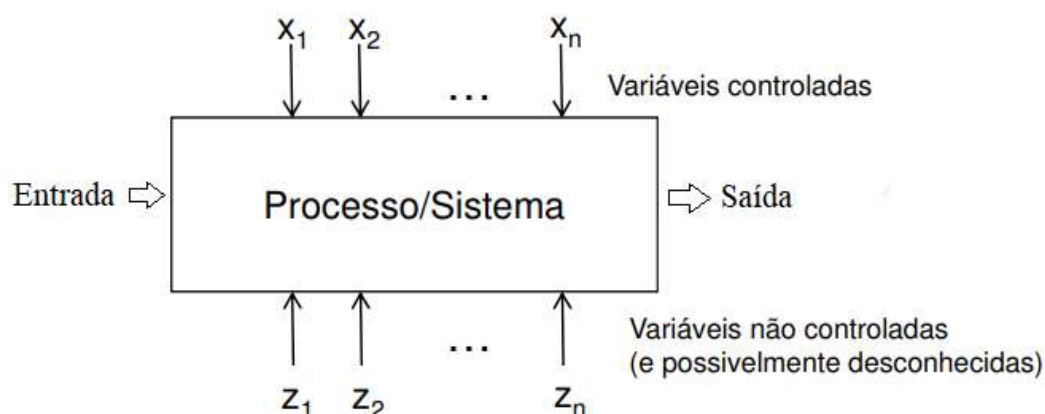


Figura 15 - Representação geral de um processo. Adaptado de Montgomery (2012).

Segundo Rozenfeld e Tahara (2017), o planejamento experimental é uma técnica utilizada para definir quais dados, quantidade e em que condições devem ser coletados, com a finalidade de garantir uma precisão estatística adequada na resposta e o menor custo.

Desta forma, considera-se uma técnica de elevada importância para a indústria pois sua utilização permite resultados mais confiáveis com menor custo financeiro e de tempo, parâmetros cada vez mais importantes dada a competição entre as empresas.

O planejamento experimental pode ser aplicado no desenvolvimento de novos produtos, no qual a qualidade dos resultados dos ensaios pode conduzir a um produto com desempenho superior e no desenvolvimento de novos processos, para maior controle e domínio dos parâmetros.

Os dois principais aspectos do planejamento experimental tratam do delineamento experimental e a instrumentação necessária para realização dos ensaios. No delineamento experimental deseja-se determinar o número adequado de experimentos que permita obter resultados com um dado grau de confiabilidade enquanto a escolha dos instrumentos permite monitorá-los e obter os resultados adequados a partir destes experimentos (BUTTON, 2017).

Em seu artigo publicado em 1993, Coleman e Montgomery propõem algumas etapas citadas a seguir, para o desenvolvimento de um planejamento de experimentos no ambiente industrial, que serão descritos ao longo desta Seção:

- Caracterização e definição do problema;
- Escolha dos fatores de influência e níveis;
- Seleção das variáveis de resposta;
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento;
- Condução do experimento;
- Análise dos dados;
- Conclusões e recomendações.

3.1 Caracterização e definição do problema

Um problema traz consigo a alusão de ser algo ruim, porém muitas vezes pode ser uma oportunidade de introduzir um novo processo ou produto cuja motivação é fundamentada na inovação, melhores resultados e na perpetuidade de uma empresa.

Um relato claro do problema e dos objetivos do experimento costuma contribuir substancialmente para uma melhor compreensão do processo e para uma eventual solução do problema (MONTGOMERY, 2012).

Dentro deste contexto, os problemas ou dificuldades que este trabalho apresenta são resumidos e apresentados nos tópicos a seguir:

- 1) Necessidade de produção de protótipos funcionais com rapidez e baixo custo;
- 2) Elevado custo de moldes de fabricação e aferição de produtos com baixa cadência de fabricação;
- 3) Necessidade de respostas rápidas às modificações de projetos;
- 4) Necessidade de produtos com tolerâncias geométricas cada vez mais restritas;
- 5) Empresas cada vez mais competitivas e inovadoras.

Com isso, o objetivo deste trabalho é identificar a viabilidade de aplicação da estampagem incremental pela fabricação de uma peça representativa da indústria aeronáutica. Para observar se há a viabilidade, é necessário avaliar o comportamento das propriedades mecânicas e físicas da peça quando são alterados parâmetros de processo e da matéria prima. Com os dados resultantes destes experimentos, deseja-se inferir se este processo é capaz de produzir peças que atendam aos requisitos desejáveis para uso em aeronaves.

Desta forma, a pergunta que define o objetivo deste trabalho é: “É possível aplicar a estampagem incremental de chapas e garantir o uso destes produtos em aeronaves?”

3.2 Escolha dos fatores de influência e níveis

Segundo Montgomery (2012), o pesquisador que conduz o experimento deve escolher os fatores que devem variar, os intervalos nos quais estes fatores terão variação e os níveis específicos de cada rodada de ensaios que será feita. Para isto, é necessário conhecimento teórico e experiência prática.

Escolhas inadequadas, tanto dos fatores como dos níveis, podem implicar o uso demasiado de recursos, como também, podem comprometer os resultados do experimento (TOLEDO *et al.*, 2013).

Neste trabalho foram investigados dois fatores: a condição de tratamento térmico da matéria-prima e o incremento da ferramenta na trajetória de conformação, que estão detalhados a seguir.

Matéria-prima: para este trabalho foi escolhido o alumínio AA7475 em três condições de tratamento térmico: T761, O e W. A decisão por essa liga nessas três condições implica no processo de fabricação e no requisito do produto.

Ligas da série 7XXX e 2XXX são ligas conhecidas como aeronáuticas, devido ao seu intenso uso na fabricação de aviões. A condição de tratamento térmico T761 indica uma liga tratada pelo fornecedor da matéria-prima já em sua condição final. Apresenta dureza elevada, menor alongamento e maior tensão de escoamento quando comparada com a matéria-prima na condição O.

Ligas na condição O são excelentes para conformação, pois apresentam baixa dureza e se deformam com facilidade. No entanto, não são apropriadas para o produto, já que normalmente se deseja elevada resistência mecânica. Por isso, ligas na condição O são tratadas termicamente antes da conformação, de modo que o estado da liga passa de O para W que será uma das condições em que foi executada a estampagem incremental.

Após a conformação, ligas da série 7XXX que foram solubilizadas, necessitam de envelhecimento artificial para atingir as melhores propriedades no produto, passando da condição W para T62 que apresenta propriedades similares à condição T761.

Do ponto de vista econômico, fabricar um produto na sua condição final, por exemplo, em T761, indica uma economia de tempo de processo, pois não é necessário executar o tratamento de solubilização e posteriormente, o envelhecimento artificial. Além do tempo de processo, existe o custo evitado em instalar fornos e estufas para a realização dos tratamentos térmicos, além de evitar a necessidade de mão-de-obra qualificada.

Porém, geometrias complexas, pequenos raios de curvatura e ângulos fechados normalmente necessitam de matérias-primas com elevada conformabilidade e baixa dureza e, por este motivo, a condição W também foi avaliada neste estudo.

A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas da liga AA7475 nas condições O e T761.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga AA 7475 em diferentes condições de tratamento térmico.

Composição química			Propriedades mecânicas					
Elemento	7475-O e 7475-T761		LRT (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (%)	LRT (MPa)	LE (MPa)	Alongamento (%)
	%Mín	%Máx	7475-O longitudinal			7475-T761 longitudinal		
Si		0,10	183	74	24,7	503	441	10,1
Fe		0,12	178	74	17,4	502	439	10,1
Cu	1,2	1,9	182	75	21,4	501	439	10,2
Mn		0,06	179	73	20,7	500	438	10,2
Mg	1,9	2,6	179	71	22,7	502	439	9,9
Cr	0,18	0,25				7475-T761 transversal		
Zn	5,2	6,2				486	419	10,2
Ti		0,06				485	418	10,0
Outros cada		0,05				483	418	9,6
Outros total		0,15				485	419	10,1
						485	419	9,9

Fonte: Relatório de lote de matéria-prima da Arconic.

A condição W não é apresentada pois trata-se de uma condição instável na qual a dureza e as propriedades mecânicas variam conforme o tempo e a temperatura. A condição O, por ser recozida, não apresenta variações das propriedades mecânicas nos sentidos longitudinal ou transversal em relação ao plano da chapa e por este motivo os dados são apresentados para apenas uma direção.

Incremento: neste trabalho foram definidos dois níveis de incremento com a finalidade de observar como este parâmetro pode influenciar a condição final do produto. Para incrementos maiores é esperada uma maior rugosidade superficial, o que se deseja confirmar neste trabalho a fim de obter os valores adequados para um produto de utilização na indústria aeronáutica. Desta forma, os valores de incremento Δz usados nos experimentos foram 0,5 mm e 1 mm.

Velocidade de avanço: foi definida levando em consideração as características da máquina utilizada na estampagem incremental, os valores normalmente utilizados em processos convencionais de usinagem, as referências bibliográficas e a experiência prévia no processo.

Os primeiros ensaios de estampagem incremental executados utilizaram velocidades de avanço iniciais de 1500 mm/min, porém velocidades de avanço maiores indicam menor tempo de processo e, conseqüentemente, menor custo de fabricação. A fim de buscar velocidades

maiores para tornar o processo de estampagem incremental mais competitivo com as tecnologias de conformação tradicionais, tais como a hidroconformação e o embutimento profundo, o valor de velocidade de avanço definido neste trabalho foi de 5000 mm/min.

A **geometria do produto** varia sensivelmente em função dos demais parâmetros, porém para este estudo, optou-se por uma geometria representativa de uma família de produtos da indústria aeronáutica. Apesar da variação de ângulo de parede ser notadamente conhecida em estudos com formas geométricas constantes, por exemplo, cones ou pirâmides invertidas (AERENS, *et al.*, 2009, ASGHAR e REDDY, 2013, FONTANARI *et al.*, 2012, JACKSON e ALLWOOD, 2009, SHRIVASTAVA e TANDON, 2015 e UHEIDA *et al.*, 2017) o propósito deste trabalho foi avaliar a aplicação da estampagem incremental em um produto representativo.

Para a definição e o projeto da geometria representativa, optou-se por escolher uma superfície com dupla curvatura numa peça que se assemelha a uma metade de uma tubulação bifurcada, na qual o raio maior é de 30,75mm e o raio menor é de 14,87mm (Figura 16 e Figura 17).

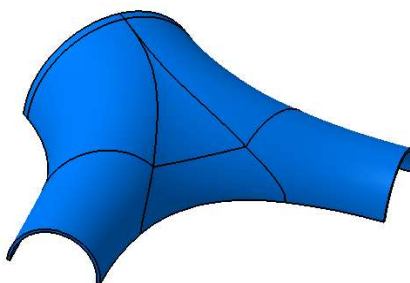


Figura 16 – Representação da forma geométrica escolhida para este estudo.

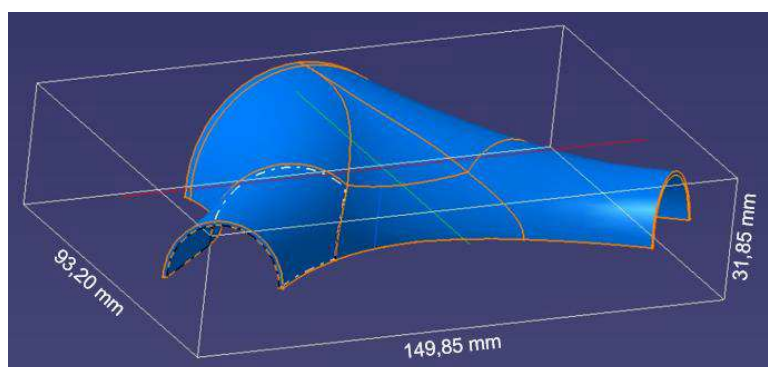


Figura 17 – Principais dimensões da peça escolhida para este estudo.

3.3 Seleção das variáveis de resposta

A variável de resposta é a característica da qualidade que se pretende melhorar ou alcançar, seja em termos de medida de posição (por exemplo, o valor médio) ou de dispersão (por exemplo, o desvio padrão). Em todos os casos em que acontece a medição de variáveis, se faz necessário o uso de equipamentos com faixa de medição adequada e confiáveis. Se a capacidade do medidor é baixa, então apenas efeitos grandes de fatores serão detectados pelo experimento (MONTGOMERY, 2012 e TOLEDO *et al.*, 2013).

Como o intuito deste trabalho é avaliar o uso da estampagem incremental em um produto representativo da indústria aeronáutica a fim de compreender os parâmetros do processo (fatores) e suas influências, as variáveis de resposta e suas finalidades são apresentadas em tópicos e discutidas unitariamente a seguir:

- a) Ensaio não destrutivo por líquido penetrante;
- b) Micrografia;
- c) Tolerâncias dimensionais do produto;
- d) Curva limite de conformação;
- e) Rugosidade superficial;
- f) Espessura final do produto;
- g) Dureza.

O **Ensaio não destrutivo por líquido penetrante** tem a finalidade de detectar discontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, entre outras.

Este método de análise é importante para detecção de defeitos na superfície do material que são normalmente difíceis de se observar a olho nu. Também é muito utilizado para analisar produtos, visto que não é permitido destruí-lo durante a análise pois perde sua função (ANDREUCCI, 2013). Para este trabalho, sua função é auxiliar na investigação de trincas oriundas do processo de conformação incremental.

A **micrografia** foi utilizada para avaliar o tamanho de grão após a estampagem incremental, assim como observar se a camada de *clad* da chapa não foi removida pelo processo de fabricação. O *clad* é uma fina camada de alumínio puro (99,99%) colocada sobre os dois lados da chapa durante o processo de laminação com a finalidade de aumentar a

resistência à corrosão. Este tipo de chapas de alumínio é comumente usado na indústria aeronáutica. Normalmente, a camada de *clad* representa 10% da seção transversal de uma chapa laminada e apesar de sua aplicação reduzir em 10% a resistência à tração, ainda assim é bastante usada em peças da indústria aeronáutica que não são pintadas (AMS 4100 F, 2007).

Em seu trabalho, HMIDA *et al.*, (2013) avaliam o tamanho de grão inicial e seu efeito após a conformação incremental simples de chapas finas. Eles concluem que a tensão de escoamento, a resistência à tração e a ductilidade diminuem quando a razão entre a espessura da chapa e o tamanho de grão diminui.

O tamanho de grão pode ser medido após preparação dos corpos de prova (embutimento, lixamento, polimento e ataque químico) por métodos definidos na norma ASTM E112 que descreve o procedimento para a quantificação do tamanho de grão.

Um dos procedimentos de quantificação do tamanho de grão descrito na ASTM E112 é o de Hilliard – Abrams (Figura 19). A estimativa de tamanho de grão é feita pelo método do intercepto, com o auxílio de uma linha de comprimento padrão sobreposta à microestrutura.

Ao sobrepor a linha, deve-se fazer uma contagem do número de contornos de grão que a interceptam. Ao se trabalhar com linhas circulares, a estimativa do tamanho de grão é melhor representada quando há casos de grãos irregulares, normalmente deformados por algum processo de conformação.

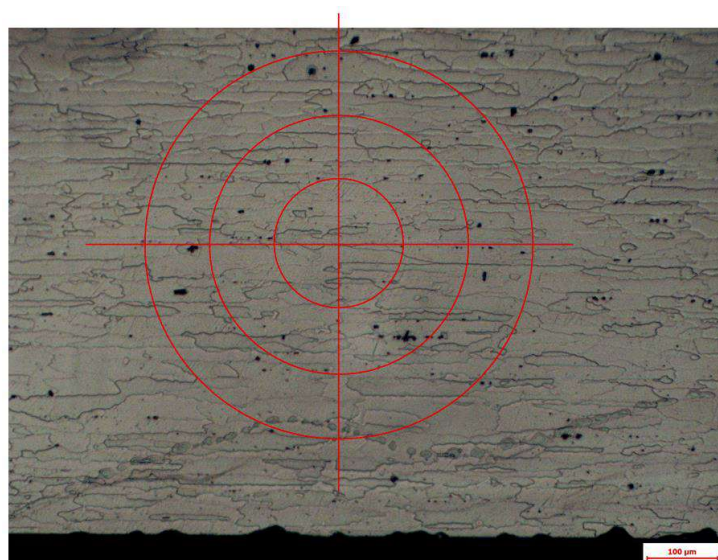


Figura 18 – Representação do método de coleta do tamanho de grão conforme ASTM E112.

A relação entre o número de intersecções por unidade de comprimento está diretamente relacionada com a área de contorno de grão por unidade de volume, O valor N dos interceptos

contados é usado na fórmula para calcular NL , de onde determina-se o tamanho de grão médio L_3 , conforme é demonstrado na equação a seguir:

$$NL = N.M/Lt = N.M/500 \text{ e } L_3 = 1/NL \quad (\text{Expressão 2})$$

Onde Lt é o comprimento da linha ensaio, N o número de intersecções sobre a linha ensaio e M a ampliação da micrografia. No padrão definido na norma, o comprimento total das três linhas circulares corresponde a 500mm.

As regiões da micrografia escolhidas para as medidas devem ser feitas de modo aleatório. Como a amostragem de contagem é feita de modo probabilístico, deve-se fazer um tratamento estatístico dos dados para calcular a média e o desvio padrão (ASTM E112, 2013).

Tolerâncias dimensionais do produto: Esta variável de resposta indica se o produto atingiu os requisitos dimensionais previamente propostos. Como este estudo investiga a estampagem incremental de chapas de alumínio AA7475 com diversos fatores e níveis, a tolerância dimensional foi avaliada apenas em termos da forma geométrica, ou seja, se a forma geométrica proposta no projeto foi atingida no produto real após a estampagem incremental.

Peças fabricadas por estampagem incremental costumam apresentar desvios dimensionais em relação ao seu modelo 3D, em função do material usado, da espessura e da rigidez que a geometria conformada promoveu na peça.

Além disso, a estratégia de conformação também afeta a precisão dimensional do produto. Uma forma de reduzir as variações dimensionais é pela fabricação em vários estágios combinados com tratamento térmico como recozimento ou alívio de tensão. Este método contribui com até 84% de redução do retorno elástico. A conformação em vários estágios pode contribuir para a redução do retorno elástico, porém a estratégia ideal deve ser encontrada a partir experiência prática (ARAGHI *et al.*, 2011).

Curva limite de conformação: As curvas limites de conformação (CLC) são normalmente usadas em estudos da estrição e da conformabilidade de chapas metálicas e permitem predições a respeito das variáveis de projeto, tais como a escolha do material e os esforços aos quais a chapa será submetida durante o processo de conformação.

KEELER e BACKOFEN, (1963) estudaram falhas no estiramento biaxial e construíram um mapa de tensão similar ao que se tem hoje conhecido como CLC.

KEELER (1968) descobriu ainda que as propriedades do material têm grande influência na distribuição das tensões no estiramento biaxial. Ele construiu um mapa de tensão principal, que é separado por estados de deformação.

Posteriormente, MARCINIAK *et al.* (1973) determinaram um método numérico para levantamento da CLC, baseado nas falhas durante a estrição do material.

RICHTER (2003) destaca que os experimentos mais utilizados para a determinação da CLC são os métodos definidos por Nakazima e Marciniak que utilizam punção esférico e punção cilíndrico, respectivamente. Em ambos os casos, eles utilizaram chapas de diferentes larguras para a avaliação de diferentes estados de deformação e a obtenção da curva.

Atualmente, ainda não existe uma norma específica para determinação da CLC. As normas existentes dão algumas sugestões, mas não descrevem um procedimento para levantamento das curvas (SANTOS *et al.*, 2007).

Poucos são os estudos de curvas limites de conformação aplicadas em estampagem incremental, devido principalmente às diferentes interações de parâmetros (SURESH *et al.*, 2018). Normalmente, os parâmetros de conformabilidade são avaliados em formas simétricas tais como cones e pirâmides (McANULTY *et al.*, 2017).

Em seu trabalho, SILVA *et al.*, (2008) argumenta que a aplicação de curvas limites de conformação na conformação incremental simples deve ser reconsiderada, já que os experimentos realizados em seu trabalho demonstram que não há a formação de estrição (*necking*) que é o comportamento que antecede a fratura de um corpo de prova submetido à conformação convencional. Esta estrição é o comportamento que antecede a falha, porém na conformação incremental ela é suprimida e a falha ocorre por fratura diretamente após uma redução uniforme do material.

Neste trabalho foram utilizadas CLCs provenientes do fornecedor da matéria-prima que utiliza o método de Nakazima. As curvas serão usadas com a finalidade de comparação com os valores máximos de deformação encontrados nos corpos de prova.

Rugosidade superficial: Por se tratar de um produto representativo para uso na indústria aeronáutica, a rugosidade é uma variável de resposta importante quando por este produto houver um escoamento de fluidos, por exemplo, o ar. Superfícies com baixa rugosidade indicam menores coeficientes de atrito, que por sua vez, garantem menor consumo de energia durante o deslocamento.

Redução da espessura: Jeswiet *et al.* (2005) comenta em seu artigo que vários pesquisadores se dedicaram a estudar as correlações entre redução de espessura e ângulo de conformação e puderam constatar que a relação entre eles é dada pela lei do seno, descrita anteriormente no capítulo 2.7. Porém esses valores se aplicam muito bem em formas geométricas conhecidas, com ângulos constantes, e quando é dado apenas um passe incremental, ou seja, quando o produto atinge sua forma final em apenas um estágio.

Porém, neste trabalho, deseja-se calcular a redução de espessura em um produto representativo, que não apresenta uma seção constante que seja fácil predizê-la com cálculos simples. Essa variável de resposta é importante para definir a espessura inicial necessária para um determinado componente de um conjunto mecânico e se a espessura real, obtida após conformação, é suficiente para suportar os esforços a que o conjunto mecânico se propõe atender.

Dureza: é uma propriedade relacionada à resistência à deformação plástica permanente de um material metálico. Neste trabalho foi utilizada a escala de dureza HR15T que é uma das escalas Rockwell para medição de superfícies, tais como chapas de espessuras finas, que podem se deformar enquanto se realiza o ensaio. Este ensaio é feito com os endentadores do ensaio Rockwell padrão, porém são aplicadas cargas reduzidas.

3.4 Definição do modelo de planejamento experimental

Como a estampagem incremental apresenta uma série de parâmetros que podem influenciar no resultado, seria necessária uma elevada quantidade de amostras e suas devidas réplicas para avaliar cada condição e suas interações. Como o processo de fabricação é lento e a matéria-prima possui um custo elevado, optou-se primeiramente por avaliar as propriedades do produto em relação à matéria-prima e ao incremento.

Tanto a condição de tratamento térmico da matéria prima, quanto o incremento são dois fatores importantes para a fabricação de produtos aeronáuticos: o primeiro fator é devido à necessidade ou não da utilização de tratamentos térmicos para garantir a conformabilidade e o segundo fator está fortemente relacionado com os níveis de rugosidade na superfície do produto.

A Figura 19 apresenta graficamente o planejamento experimental, os fatores e seus níveis, assim como a seleção das variáveis-respostas.

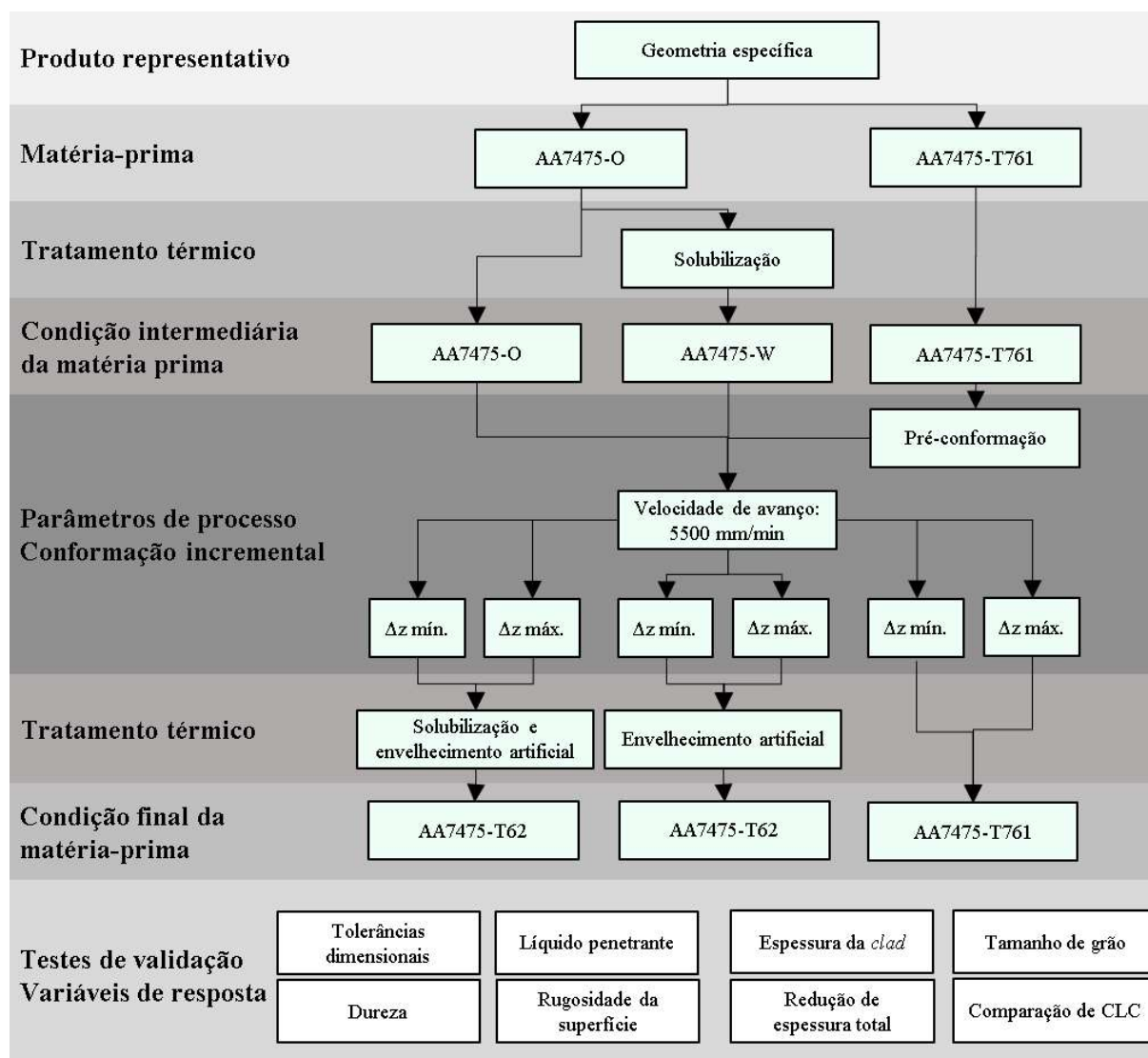


Figura 19 - Representação da primeira fase do planejamento experimental deste trabalho.

Para cada condição ensaiada durante a estampagem incremental, foram definidas 5 réplicas. Cada réplica foi analisada nos ensaios de validação com critérios específicos e estão apresentados no anexo A.

4 METODOLOGIA

Para investigar os efeitos dos parâmetros de estampagem incremental em uma geometria representativa e avaliar seu uso como uma peça integrante de uma aeronave, o desenvolvimento partiu da escolha da geometria, conforme já foi apresentado na Figura 17.

Essa forma geométrica foi definida a fim de considerar curvaturas acentuadas, com regiões côncavas e convexas. As principais dimensões estão apresentadas na Figura 17.

Neste trabalho, a estampagem incremental com molde foi escolhida, portanto foi utilizado como apoio um molde fabricado em alumínio da série 6XXX, resistente para suportar as deformações do processo. Na Figura 20 é apresentado o molde, que possui as mesmas dimensões da peça, com variações dimensionais máximas de $\pm 0,03\text{mm}$ na superfície de contato.

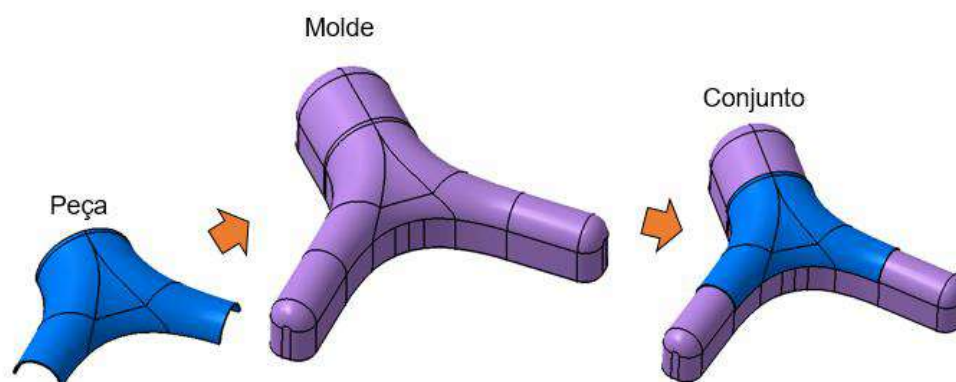


Figura 20 – Representação da montagem da peça sobre o molde.



Figura 21 – Molde utilizado para o estudo de estampagem incremental.

No molde também foi previsto o método de fixação por furos normais à superfície que junto com parafusos, mantêm o corpo de prova, inicialmente planificado, preso durante o processo de estampagem incremental (Figura 21).

As chapas de alumínio utilizadas neste trabalho apresentam 1,016 mm de espessura com variação máxima de 0,09 mm conforme especifica a norma AA ANSI H35.2. Foram utilizadas duas chapas fornecidas pela Arconic, uma delas na condição de tratamento térmico O e a outra na condição T761. A chapa na condição O gerou corpos de prova para avaliação da estampagem incremental na condição O e W. A espessura mínima de *clad* garantida pelo fornecedor da matéria-prima é de 3,2% em cada lado da chapa, ou seja, 32,5 μm é a espessura mínima esperada de *clad*.

O tamanho de grão informado pelo fornecedor é de 20,2 μm para a chapa na condição O. Na condição T761, o tamanho de grão não é informado, porém o fornecedor garante não ser superior a 38 μm .

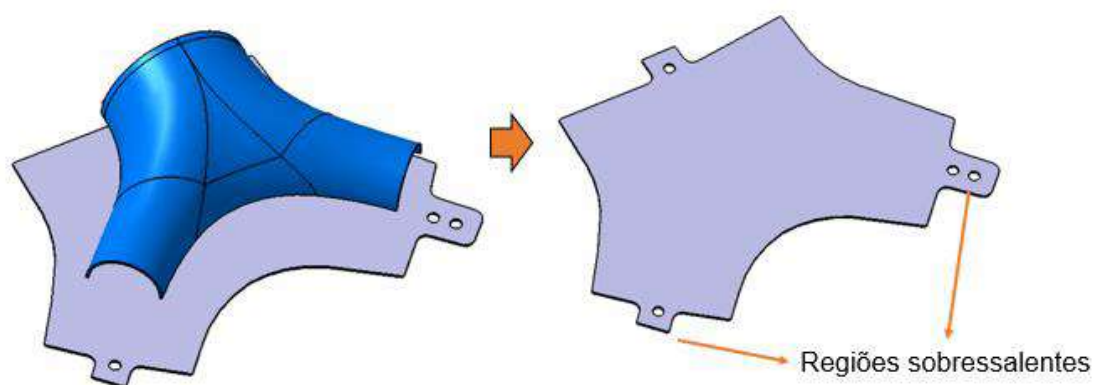


Figura 22 – Representação da peça planificada com regiões sobressalentes para fixação no molde.

As chapas foram cortadas no formato do produto planificado (Figura 22). A planificação foi feita em software CATIA V5 R24 utilizando a licença “*sheetmetal*”. Durante a planificação, foram adicionadas regiões sobressalentes para atender ao método de fixação do corpo de prova sobre o molde.

Com a geometria planificada, um programa CNC foi desenvolvido para recorte do contorno da peça em uma fresadora CNC com 3 eixos de liberdade. Na fresadora, as chapas foram fixadas mecanicamente.

Em seguida, os corpos de prova passaram por rebarbação manual com lixadeira orbital para eliminação das rebarbas da máquina e dos cantos vivos das peças. A lixa utilizada para o processo foi de grana 320.

Após a rebarbação, os corpos de prova foram marcados pelo processo de gravação eletroquímica com a finalidade de identificar as zonas de maior deformação após a estampagem incremental e, com isto, possibilitar a comparação das regiões de maior deformação com a curva limite de conformação. Nesse processo de gravação (Figura 23), foi utilizada uma malha com circunferências de 2,5 milímetros de diâmetro. O equipamento de gravação modelo RB200 e os agentes de gravação e neutralização são da marca Tecnigrav.



Figura 23 – Processo de gravação eletroquímica utilizado neste estudo.

Após a gravação eletroquímica os corpos de prova que seriam conformados incrementalmente na condição térmica W passaram pelo processo de solubilização em meio líquido (banho de sal) à base de sais de nitrato.

Os corpos de prova foram limpos com pano umedecido em álcool etílico e inseridos no banho de sal na temperatura de $495\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 40 minutos. Passados os 40 minutos, os corpos de prova foram removidos e imediatamente inseridos em um tanque com água na temperatura ambiente. Os corpos de prova conformados incrementalmente nas condições O e T761 não foram solubilizados.

Em seguida os corpos de prova da condição T761 foram pré-conformados em prensa de hidroconformação. O molde de conformação foi posicionado no interior da “gaveta” da máquina e sobre o molde, os corpos de prova foram posicionados, unitariamente em cada

ciclo de conformação. Para manter o corpo de prova fixo sobre o molde, pinos de fixação foram utilizados (Figura 24).

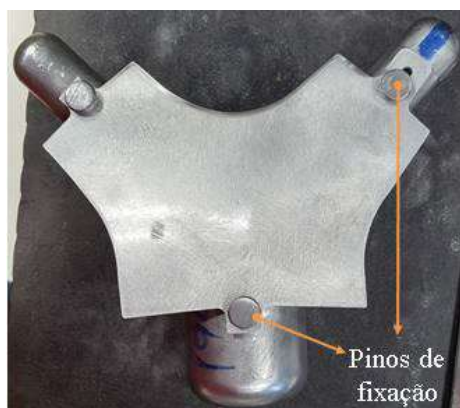


Figura 24 – Peça fixada sobre o molde com pinos.

A prensa executou uma pré-conformação com pressão de 250 psi (3,58 MPa). A utilização de pressões maiores poderia trincar o corpo de prova na região mais crítica do molde, como pode ser visto na Figura 25 em um ensaio executado com pressão de 6000 psi (41,37 MPa).



Figura 25 – Peça conformada com 6000 psi (41,37 MPa) que apresentou trinca.

Apenas os corpos de prova na condição T761 foram pré-conformados pois sua resistência mecânica somada à concepção do ferramental e à geometria do produto poderiam causar deformações excessivas e trincas durante o processo de estampagem incremental, conforme pode ser visto na Figura 26 em um ensaio previamente executado sem a pré-conformação.



Figura 26 - Corpo de prova em AA7475-T761 que sofreu ruptura durante a estampagem incremental direta.

Os corpos de prova na condição W foram armazenados em *freezer* industrial horizontal a fim de manter a condição instável do material e evitar o endurecimento por precipitação antes do processo de estampagem incremental. O *freezer* foi mantido na temperatura de $-20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Os corpos de prova na condição W permaneceram no equipamento enquanto o processo de estampagem incremental foi preparado. Os demais corpos de prova foram armazenados em temperatura ambiente.

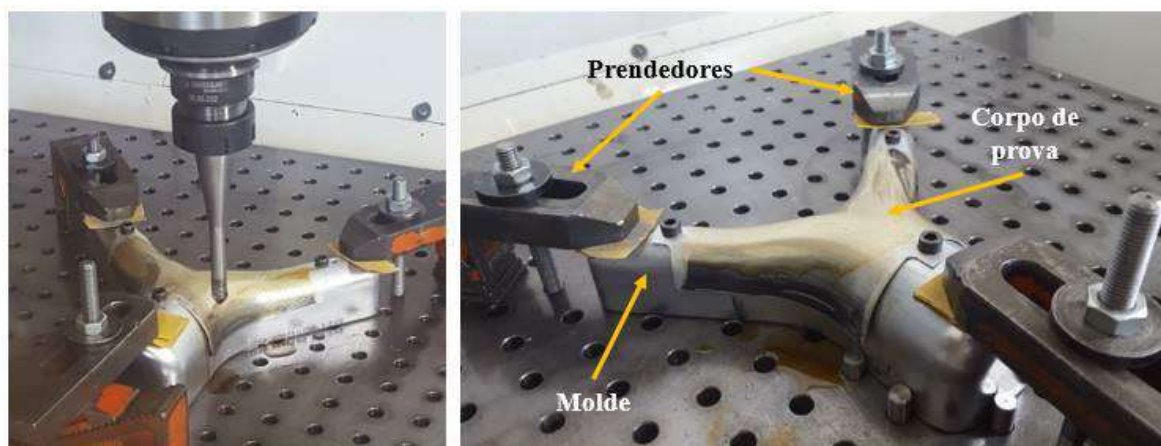


Figura 27 – Conjunto corpo de prova e ferramental montados sobre a mesa da máquina fresadora.

Para execução do processo de estampagem incremental, a máquina, o molde e a ferramenta foram preparados. Uma fresadora CNC da marca Mori Seiki, modelo DMG 220,

com três eixos foi utilizada. Na área de trabalho da fresadora, o molde foi fixado com pinos e prendedores e sobre ele, o corpo de prova foi parafusado, como mostra a Figura 27.

A ferramenta foi previamente fabricada em aço SAE 4340. Apesar de não ser usualmente um aço ferramenta, suas propriedades mecânicas são suficientes para estampagem incremental de peças de alumínio AA 7475. A ferramenta foi usinada com as dimensões descritas na Figura 28, em milímetros. Ela foi fixada no cabeçote da fresadora e em seguida a máquina começou a operar conforme a programação CNC previamente elaborada.

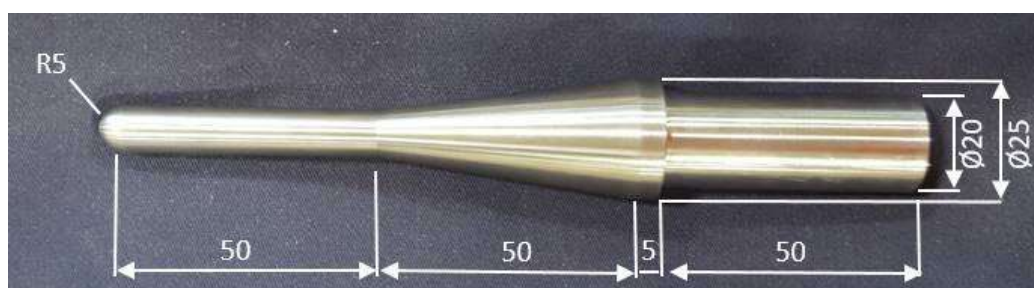


Figura 28 – Ferramenta utilizada e suas principais dimensões em milímetros.

Para redução de atrito, foi utilizado um lubrificante próprio para operações de conformação metálica, da marca Finelli, código MGV-45. O lubrificante foi aplicado com um pincel sobre a superfície do corpo de prova. A ferramenta manteve velocidade de rotação de 20 rpm durante todo o processo de conformação incremental.

O processo de estampagem incremental foi executado de acordo com a programação CNC seguindo os parâmetros de processo estabelecidos neste trabalho, no capítulo 3.2. A trajetória da ferramenta teve início no topo do produto e percorreu gradativamente o contorno conforme os incrementos propostos neste trabalho até as regiões próximas à mesa da máquina.

Para cada condição de ensaio, cinco corpos de prova foram conformados incrementalmente.

Após a finalização da estampagem incremental os corpos de prova foram limpos com pano umedecido em álcool e identificados com caneta pneumática.

Em seguida, as etapas de caracterização dos corpos de prova foram efetuadas conforme a sequência a seguir:

- a) Ensaio não destrutivo por líquido penetrante;

- b) Tolerâncias dimensionais do produto;
- c) Rugosidade superficial;
- d) Espessura final do produto;
- e) Dureza;
- f) Micrografia (tamanho de grão e espessura da camada de *clad*).

O ensaio por líquido penetrante foi feito em tanques contendo o agente revelador e penetrante e logo após os corpos de prova foram inspecionados com luz ultravioleta.

Em seguida, as tolerâncias dimensionais dos corpos de prova foram avaliadas pela coleta de pontos ao longo da superfície dos corpos de prova com uma máquina de medição por coordenadas da marca Hexagon Global Advantage modelo 09.20.08 com auxílio do *software* PCDMIS_2014.1 para melhor assentamento (*best fit*) da nuvem de pontos com o desenho 3D.

A rugosidade superficial dos corpos de prova foi medida com um rugosímetro portátil da marca Taylor Robson Ametek, modelo Surtronic duo, no sentido perpendicular à trajetória, a fim de coletar as variações existentes entre cada passo incremental (semelhante à região transversal A, descrita na Figura 30). Os valores de espessura dos corpos de prova antes e após o ensaio de estampagem incremental foram medidos com micrômetro da marca Mitutoyo, modelo CoolantProof.

A dureza foi medida com o durômetro de bancada da marca Mitutoyo modelo HR 400. Por fim, os corpos de prova foram preparados para o ensaio metalográfico para avaliação de tamanho de grão e espessura da camada de *clad*.



Figura 29 - Demonstração das regiões de coleta dos dados.

Para os ensaios de líquido penetrante e tolerâncias dimensionais, as coletas de dados foram efetuadas ao longo de toda a superfície da peça. Para a rugosidade, redução de espessura e dureza, foram demarcadas regiões de análise nos corpos de prova, conforme é apresentado na Figura 29. Para a análise comparativa da curva limite de conformação, optou-se por medir as circunferências na região de maior deformação (região F).

Para os ensaios metalográficos, os corpos de prova foram seccionados nas regiões longitudinal (B) e transversal (A), onde se entende ser a região de maior esforço mecânico da chapa durante a estampagem incremental (região F). A Figura 30 ilustra as regiões A e B analisadas.



Figura 30 – Regiões transversal (A) e longitudinal (B) ao movimento do punção de estampagem incremental.

A direção de grão das chapas é paralela à direção B. A quantidade e o método utilizado para a coleta de cada variável de resposta estão detalhados no Anexo A.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados na sequência cronológica em que foram obtidos e conforme a proposta do planejamento experimental apresentada no capítulo 3.

A análise dos resultados é feita em relação à aplicação da estampagem incremental na liga de alumínio AA 7475 nas condições O, W e T761 e com dois níveis de incremento. A Tabela 4 consolida todos os resultados, que serão explicados em seguida. No Anexo B, esses resultados são apresentados com a inclusão dos valores obtidos durante a coleta e o desvio padrão de cada medição.

Tabela 4 – Dados consolidados da análise da estampagem incremental na liga AA7475 em diferentes condições de tratamento térmico e incrementos.

	<u>AA7475-O</u>		<u>AA7475-W</u>		<u>AA7475-T761</u>	
Velocidade de avanço (mm/min)	5500					
Incremento (mm)	1	0,5	1	0,5	1	0,5
Tempo de ciclo (min)	8	16	8	16	8	16
Inspeção líquido penetrante - presença de descontinuidades	Ausente					
Máxima variação dimensional (mm)	3,4	3,6	6,6	7,1	13,0	13,0
Máxima redução de espessura (%)	30,6	32,7	32,1	32,4	33,6	34,9
Dureza média (HR15T)	81,7	84,1	83,9	82,1	82,5	82,6
Rugosidade média (Ra)	2,5	3,6	2,4	3,7	2,4	3,2
Granulometria média (µm)	95,0	86,3	63,9	70,4	51,0	50,6
Espessura média da camada de <i>clad</i> (µm)	35,9	36,3	29,8	33,0	14,9	15,3

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4, o tempo de ciclo da estampagem incremental varia sensivelmente com a escolha dos parâmetros de velocidade de avanço e incremento. Essa variação é de 8 minutos quando apenas o incremento é alterado (0,5 e 1,0 mm). É esperado que ao reduzir o incremento pela metade, o tempo de ciclo também seja reduzido pela metade. A velocidade de avanço para este trabalho foi mantida em 5500

mm/min, quanto maior a velocidade de avanço, menor é o tempo de processo. O incremento de 1 mm e a velocidade de avanço de 5500 mm/min representaram um tempo de processo considerado bastante aceitável para a indústria, especialmente para produção em pequenos lotes, ou seja, se for considerada apenas a condição do tempo de fabricação, este processo de estampagem incremental seria capaz de produzir 7,5 peças/h sem considerar o tempo de preparo da ferramenta, molde de apoio e carga e descarga da máquina.

Além dos dois fatores acima (incremento e a velocidade de avanço), a forma geométrica do produto e suas dimensões causam grande influência no tempo de ciclo.

A inspeção não destrutiva por líquido penetrante foi executada logo após a finalização da estampagem incremental e não foi observada nenhuma descontinuidade na superfície das peças, em nenhuma das condições de ensaios apresentadas na Tabela 4 e na Figura 31.



Figura 31 – Análise de descontinuidades com luz ultravioleta em um corpo de prova após o líquido penetrante.

Complementarmente à análise de descontinuidades na superfície, uma análise comparativa da curva limite de conformação (CLC) de cada matéria-prima também foi efetuada. Para essa análise, a CLC de cada material foi fornecida pelo fabricante da matéria-prima utilizando o método de Nakazima, para uso em *softwares* de simulação. Com estas curvas, a medição do tamanho das circunferências foi efetuada na região de maior deformação (região F) e o valor encontrado após a estampagem incremental foi identificado no mesmo gráfico, conforme pode ser visto nas Figura 32 e 33. A CLC indica que valores acima da curva estarão na zona de falha e valores abaixo da curva estarão na zona de conformação segura.

Os valores de deformação verdadeira encontrados para a liga AA 7475-O e AA 7475-W foram plotados no mesmo gráfico porque a condição W é instável e temporária, logo a curva CLC para esta condição é inexistente, pois ela varia com o tempo e a temperatura.

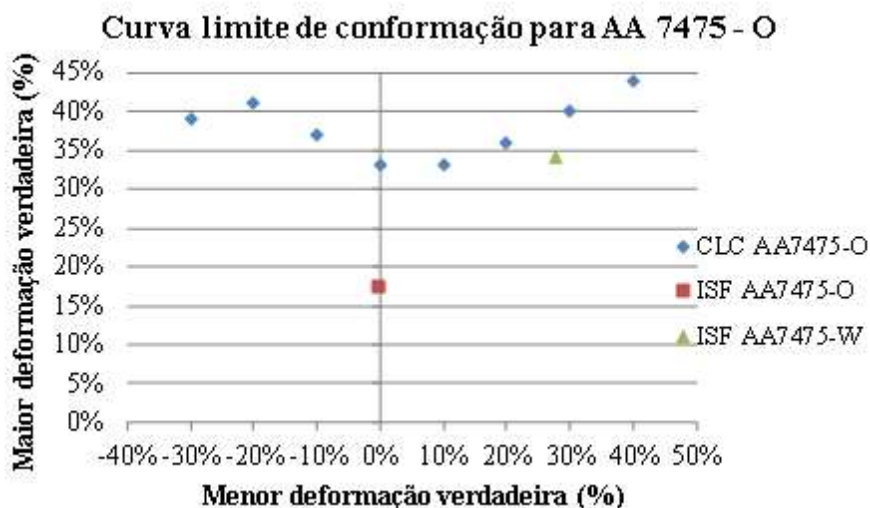


Figura 32 – Dados comparativos entre deformação verdadeira da estampagem incremental e CLC do AA 7475-O.

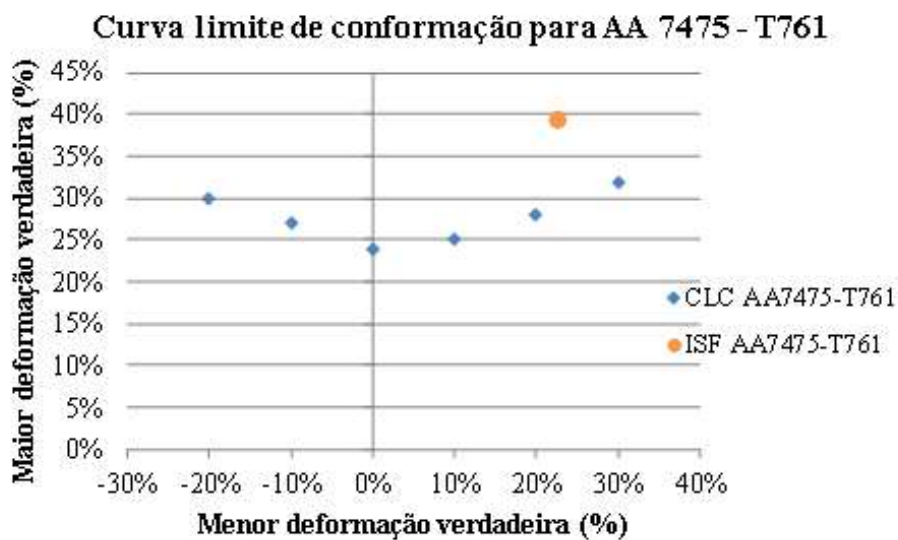


Figura 33 - Dados comparativos entre deformação verdadeira da estampagem incremental e CLC do AA 7475-T761.

Observa-se na Figura 32 que o valor de deformação verdadeira para a condição W ficou mais próximo da CLC do que na condição O, o que indica que os corpos de prova estavam iniciando envelhecimento da liga durante o processo de estampagem incremental, pois no

envelhecimento ocorre o endurecimento por precipitação dos componentes da liga, aumentando sua dureza e resistência mecânica e, conseqüentemente, reduzindo sua conformabilidade.

Na Figura 32 observa-se que os valores da deformação verdadeira indicam um estiramento biaxial para a liga na condição W, ou seja, as deformações aconteceram tanto no sentido longitudinal como transversal da chapa. Para a liga na condição O, a deformação plana, que ocorre apenas em uma direção, foi predominante. Uma razão para esta diferença pode ser a anisotropia do material.

A liga AA 7475-T761 (Figura 33) também apresentou um estiramento biaxial, porém as deformações verdadeiras foram superiores à CLC, ou seja, o estiramento da chapa ultrapassou a zona de segurança sem o aparecimento de trincas ou ruptura do material. Este comportamento pode indicar de que a estampagem incremental atinge limites de deformação e estiramento superiores à conformação convencional, como observado por Shim e Park (2001) e por Tisza et al. (2012).

Isto acontece porque a cada incremento, o material sofre encruamento localizado e uma zona de resistência é formada dificultando a ruptura do material a cada avanço da trajetória. Além disso, a conformação acontece de maneira controlada e gradual, diferentemente da conformação convencional, no qual a dificuldade de promover deformações sem ruptura em regiões críticas depende mais da concepção do ferramental e do uso ou não de lubrificantes.

Normalmente, as CLCs são usadas como referência para a concepção de novos produtos em *softwares* de simulação de modo a avaliar virtualmente se um produto apresentará rupturas, qual a maior redução de espessura e onde se localizam as regiões de maior e menor estiramento.

No entanto, neste trabalho foi possível perceber que o uso de CLCs oriundas do ensaio tradicional de Nakazima não é o método adequado de comparação, já que as CLCs deveriam ser desenvolvidas pelo processo de estampagem incremental a fim de definir onde realmente se encontram as zonas de falha e de segurança.

Por fim, ao se comparar os gráficos das Figura 32 e 33, observa-se que as ligas na condição O e W poderiam ter potencial para suportar maiores deformações sem ruptura do material.

Na próxima avaliação das variáveis de resposta, as peças foram medidas em uma máquina de medição por coordenadas e a nuvem de pontos coletada foi comparada com o projeto 3D da peça, Figura 34.

Na Tabela 4 são apresentados apenas os valores mais distantes do ponto medido em relação ao desenho 3D. Este ponto indica a quantidade de retorno elástico (*springback*) que o corpo de prova apresentou nas regiões D e E. Nota-se que houve variações significativas em relação à condição de tratamento térmico do material. Na condição O, que apresenta a menor dureza e a menor resistência mecânica, o retorno elástico também foi menor.

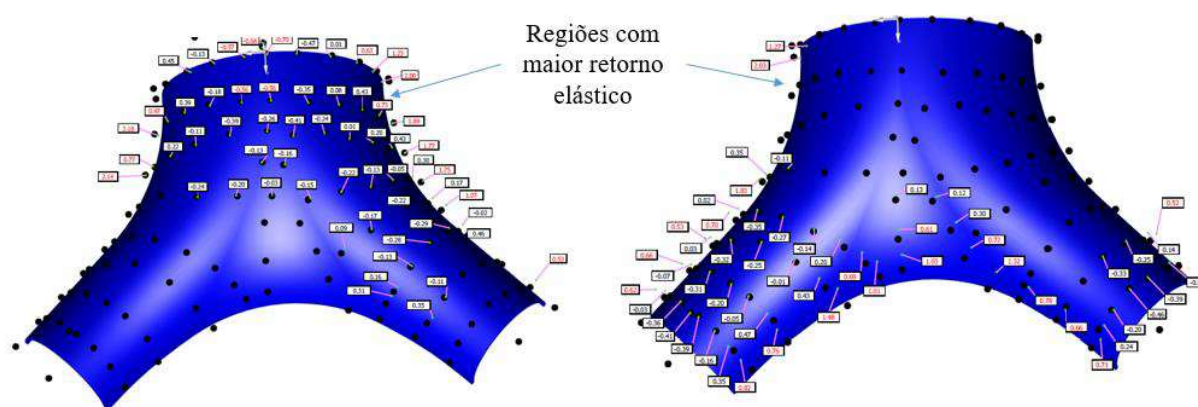


Figura 34 – Exemplo da coleta da nuvem de pontos e comparação com o desenho 3D (forma geométrica em azul).

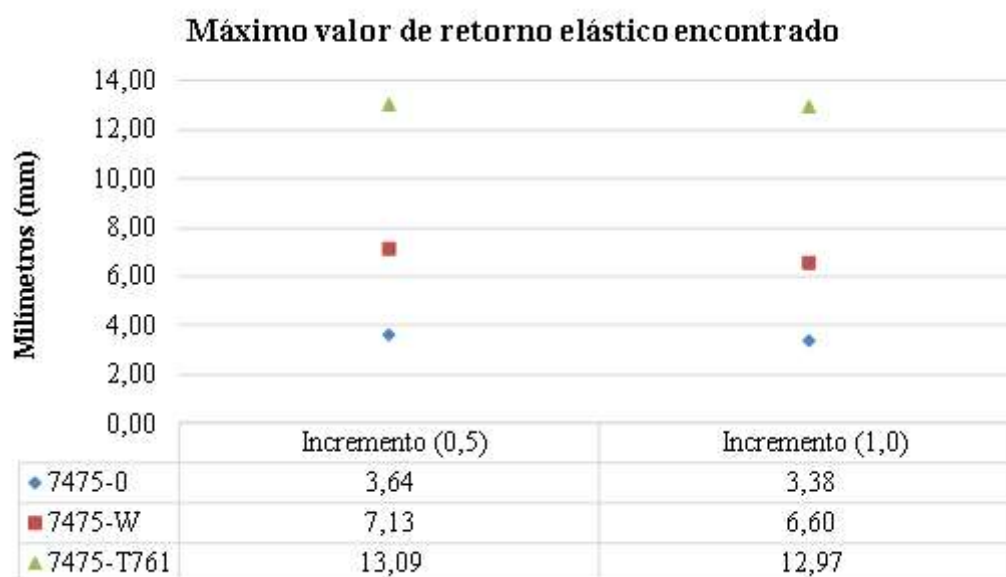


Figura 35 – Valores máximos de retorno elástico encontrados em cada condição do ensaio.

Na Figura 35, os valores mais distantes em comparação ao projeto 3D foram inseridos no gráfico e na Figura 36 uma imagem dos corpos de prova sobre o molde indica o comportamento do retorno elástico para cada condição de matéria-prima (O, W e T761) ao realizar o processo de estampagem incremental com incremento de 1,0 mm.

As amostras da condição O apresentaram sua forma geométrica mais próxima do desenho 3D, no entanto, o uso de *softwares* para simulação do retorno elástico e compensação geométrica do molde poderiam ser usados a fim de aproximar os valores medidos com as tolerâncias dimensionais deste produto.



Figura 36 – Imagens de cada corpo de prova sobre o molde após a estampagem incremental:
a) Condição O, b) W e c) T761.

O método de prendedor utilizado não corresponde com os métodos tradicionais, apresentados na revisão bibliográfica. Devido à complexidade da forma geométrica e pela falta de um prendedor móvel para a chapa planificada, que se movimentasse juntamente com o avanço do incremento, optou-se por prender com parafusos nas regiões mais altas do ferramental. Este tipo de prendedor permite a movimentação da chapa durante a conformação incremental e pode contribuir para um aumento do retorno elástico.

Outros parâmetros que podem influenciar na precisão geométrica são o diâmetro da ferramenta, o atrito, o estiramento e o cisalhamento causados durante a conformação. Quanto menor o tamanho da ferramenta, maior a flexão imputada no corpo de prova. Neste trabalho, o diâmetro da ferramenta foi mantido constante, em 10 mm, porém estudos específicos podem ser considerados no futuro a fim de reduzir o retorno elástico.

A mudança do incremento não provocou variações significativas no retorno elástico e não se observaram mudanças na redução de espessura (Figuras 37 e 38), cujos valores ficaram

entre 30,61% e 34,92% para a região frontal (F) dos corpos de prova, onde ocorreu a maior redução de espessura.



Figura 37 – Gráfico da porcentagem de redução de espessura para os corpos de prova com incremento de 0,5 mm.



Figura 38 - Gráfico da porcentagem de redução de espessura para os corpos de prova com incremento de 1,0 mm.

Para as regiões D e E, os valores variaram entre 10,87% e 24,37%, como pode ser observado nas Figuras 37 e 38. A disparidade dos valores nas regiões D e E aconteceu principalmente para os corpos de prova na condição T761, que apresentaram reduções de

espessura inferiores aos corpos de prova nas condições O e W. Algumas características que influenciaram nesta redução de espessura são a forma geométrica escolhida, o método de fixação do corpo de prova sobre o molde e o retorno elástico apresentado pela condição T761.

A dureza foi medida na escala HR15T após todos os corpos de prova atingirem sua condição final de tratamento térmico, ou seja, após a estampagem incremental, os corpos de prova da condição W foram envelhecidos artificialmente e os corpos de prova na condição O foram solubilizados e envelhecidos artificialmente. A condição T761 já é a condição final, logo ela não passou por nenhum tratamento térmico.

Os valores ilustrados na Figura 39 mostram que diferentes níveis de encruamento, causados pelo incremento não geraram modificação na dureza final dos corpos de prova. Esta afirmação pode ser feita pois os valores de desvio padrão ficaram entre 0,26 e 2,65 HR15T.

Logo após a estampagem incremental, os corpos de prova na condição O foram medidos e os valores encontrados foram 58,3 e 58,4 HR15T para os incrementos de 0,5 mm e 1,0 mm, respectivamente. Ao se comparar estes valores com os dados apresentados no gráfico da dureza, os tratamentos térmicos realizados nas condições O e W são necessários para atingir a maior resistência mecânica da liga, podendo aumentar em mais de 40% a dureza final de um produto.

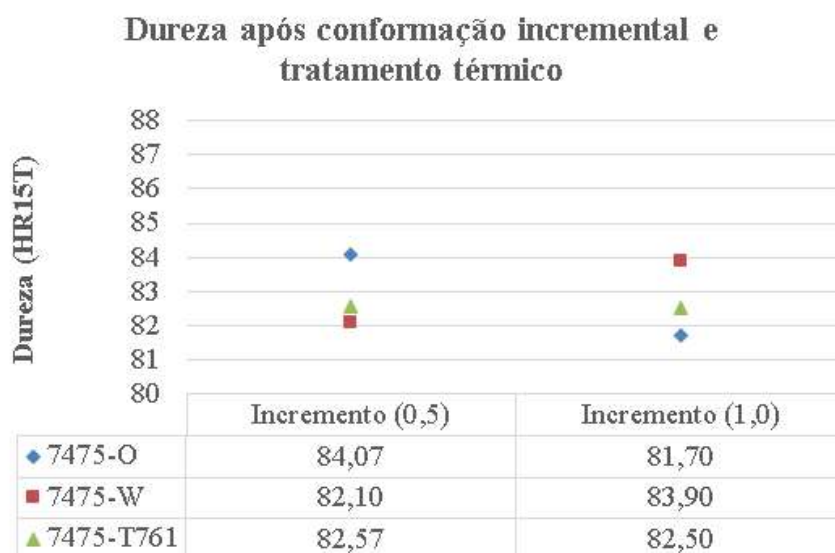


Figura 39 – Gráfico da dureza após estampagem incremental e tratamento térmico.

Em relação à rugosidade das amostras, os valores obtidos ficaram entre 2,39 μ m e 3,67 μ m, como é indicado na Figura 40.

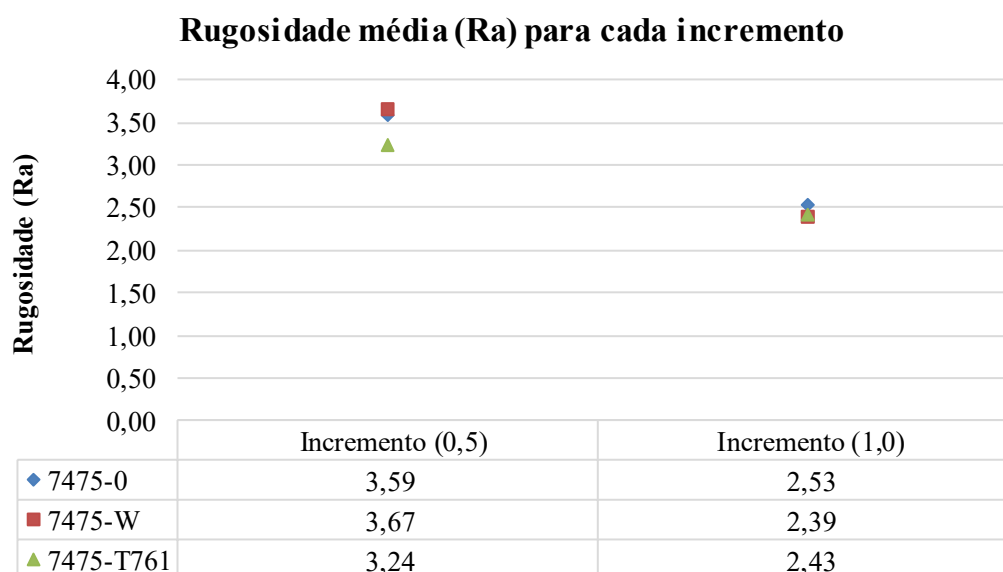


Figura 40 – Gráfico da rugosidade média (Ra) dos corpos de prova em cada condição de ensaio.

Conforme pode ser observado no gráfico de rugosidade média (Ra), os valores para incremento de 1,0 mm foram menores do que para o incremento de 0,5 mm. Os dados foram extraídos na região D de cada corpo de prova, a fim de comparar igualmente os valores.

A rugosidade é um parâmetro influenciado não apenas pelo incremento, mas também pelo raio da ferramenta, que neste caso é 5 mm e pelo ângulo do produto a ser conformado. Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a relação dos parâmetros propiciou um melhor resultado quando se usou o incremento de 1 mm.

Como o ângulo de conformação não é constante ao longo do produto, não foi possível prever quais os melhores incrementos para garantir a menor rugosidade na estampagem incremental, no entanto, poderiam ser previstos com a ajuda de um *software* de simulação.

Os ensaios metalográficos foram executados para compreender duas variáveis: a primeira é para avaliar se o tamanho de grão pode ser afetado pela estampagem incremental, e a segunda para avaliar se a camada de *clad* permanece no produto após a conformação incremental, visto que este processo depende do contato e movimento da ferramenta sobre o produto.

Mesmo com ataque químico, os corpos de prova na condição O não apresentam contornos de grão visíveis pois encontram-se recozidos. Para visualizar o grão e permitir a medição, os corpos de prova foram solubilizados e envelhecidos artificialmente.

Ao ser comparado com os valores recebidos pelo fornecedor da matéria-prima recebida concluiu-se que o tamanho de grão sofreu variações causadas pelos processos de conformação e tratamentos térmicos utilizados (Figuras 45 e 46).

Os corpos de prova nas condições de tratamento térmico O e W apresentaram maior crescimento do grão, especialmente porque os processos de solubilização e envelhecimento contribuíram para esse aumento. Além disso, processos de conformação produzem deformações no material e ao se realizar um tratamento térmico, essas deformações favorecem a recristalização dos grãos, podendo aumentar seu tamanho.

Apesar dos corpos de prova na condição T761 não terem passado por um tratamento térmico após a estampagem incremental, houve um pequeno aumento do tamanho de grão, cerca de 30%, que pode ter sido causado pelo estiramento do material. Esse aumento foi comparado com os valores de tamanho de grão inicial da chapa.

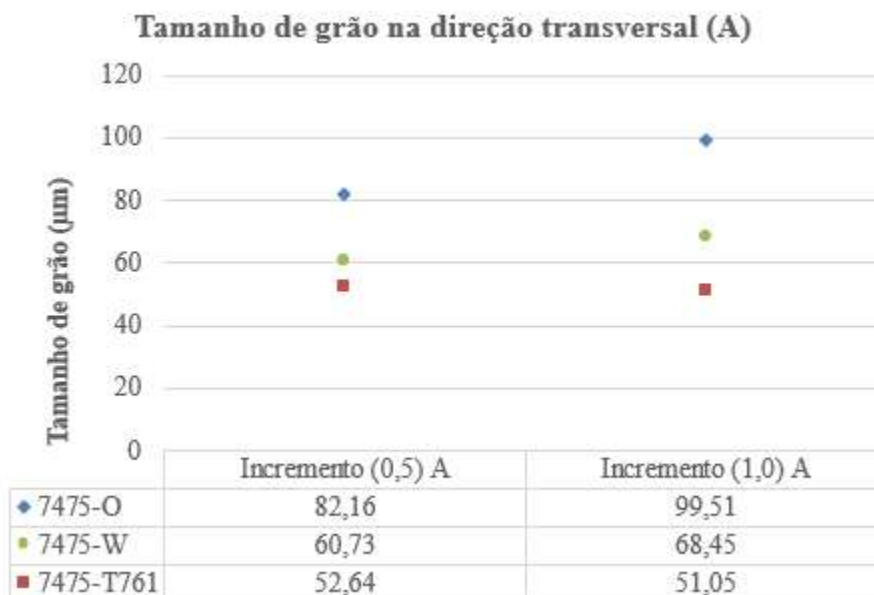


Figura 41 – Gráfico do tamanho de grão na direção transversal (A) à trajetória de estampagem incremental.

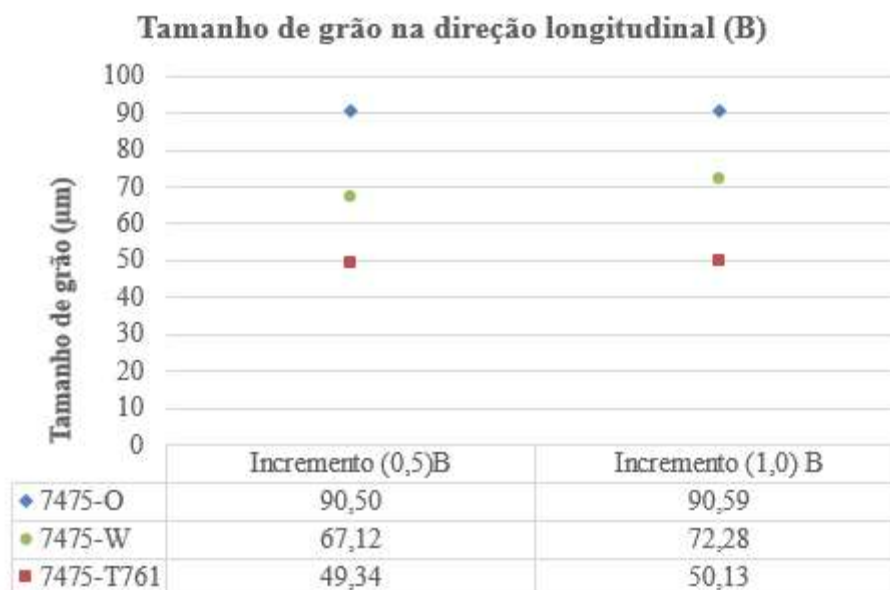


Figura 42 - Gráfico do tamanho de grão na direção longitudinal (B) à trajetória de estampagem incremental.

Não é possível observar variações significativas no tamanho de grão das amostras da liga T761 quando se altera o incremento. Porém na direção transversal, para as ligas na condição O e W, observa-se um aumento do tamanho de grão quando o incremento é aumentado de 0,5 para 1,0 mm. Este comportamento pode ser causado devido às taxas de deformação para o incremento de 1,0 mm serem mais severas que o incremento de 0,5 mm causando um maior deslocamento de material na região transversal.

Nota-se também que o tamanho de grão é levemente superior na direção longitudinal, indicando que o histórico da direção de laminação da chapa permaneceu após os processos de tratamento térmico e estampagem incremental.

A espessura da camada de *clad* foi medida na análise das micrografias da região transversal (região A da Figura 30) à trajetória da ferramenta, com o intuito de avaliar se poderia ocorrer a remoção da camada durante o processo de estampagem incremental.

O gráfico apresentado na Figura 43 mostra os valores da espessura da camada de *clad* da região externa da chapa para cada incremento e condição de tratamento térmico. Para as condições O e W, os valores ficaram entre 29,7 μm e 36,3 μm , sendo que a condição W apresentou valores de espessura da camada levemente inferiores à liga na condição O.

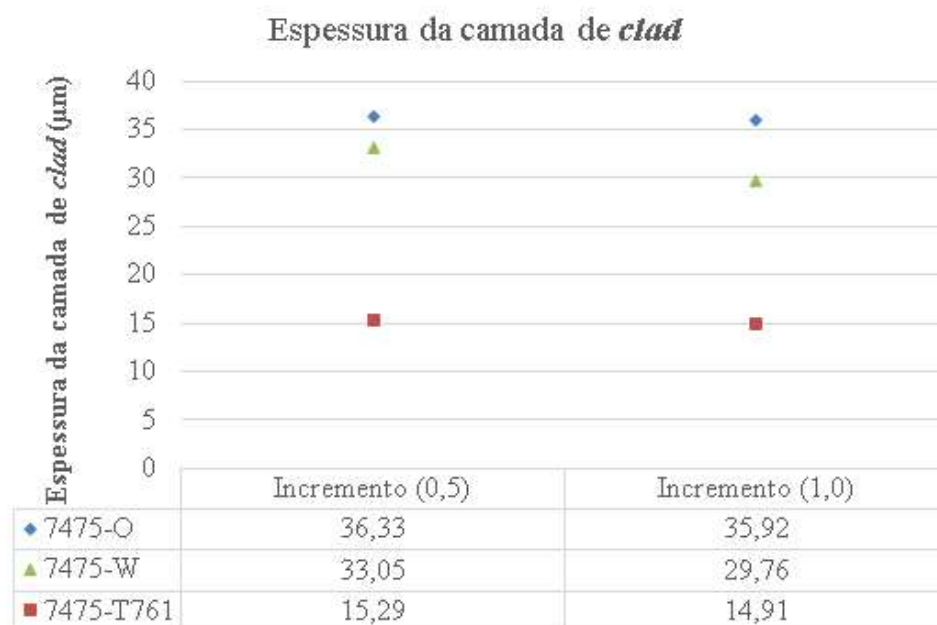


Figura 43 – Gráfico da espessura da camada de *clad* na região transversal (A) ao sentido de conformação.

As amostras metalográficas foram cortadas, preparadas e medidas na região transversal à trajetória da ferramenta de estampagem incremental (região A da Figura 30). As Figuras 48 a 53 apresentam as micrografias das ligas em cada condição de tratamento térmico. A região externa indica o lado da chapa que esteve em contato com a ferramenta durante a estampagem incremental. Com uma ampliação menor é possível observar que a camada de *clad* permaneceu contínua, mesmo na região externa, onde houve maior estiramento do material.

A espessura da camada de *clad* para a condição T761 apresentou valores consideravelmente inferiores (próximos a 15 µm) quando comparada com os valores obtidos nas condições O e W. Na Figura 46 é possível notar que a camada de *clad* da região externa da chapa é menor do que a região interna, o que pode indicar que houve uma redução de espessura durante a estampagem incremental, causada pelo atrito da ferramenta com o corpo de prova. Por apresentar maior resistência mecânica, os corpos de prova na condição T761 apresentaram maior rigidez e consequentemente dificultaram o processo de conformação, o que pode ter provocado a remoção da camada de *clad*.

O tamanho de grão e a espessura da camada de *clad* não apresentaram diferenças significativas quando o incremento foi alterado.

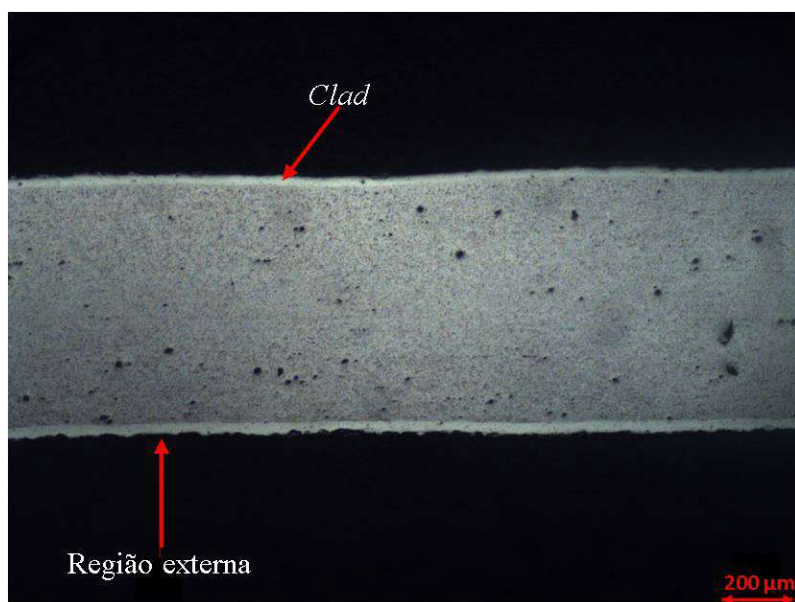


Figura 44 – Corte transversal da amostra com matéria prima AA 7475-O. Ataque químico: Nital 5%.

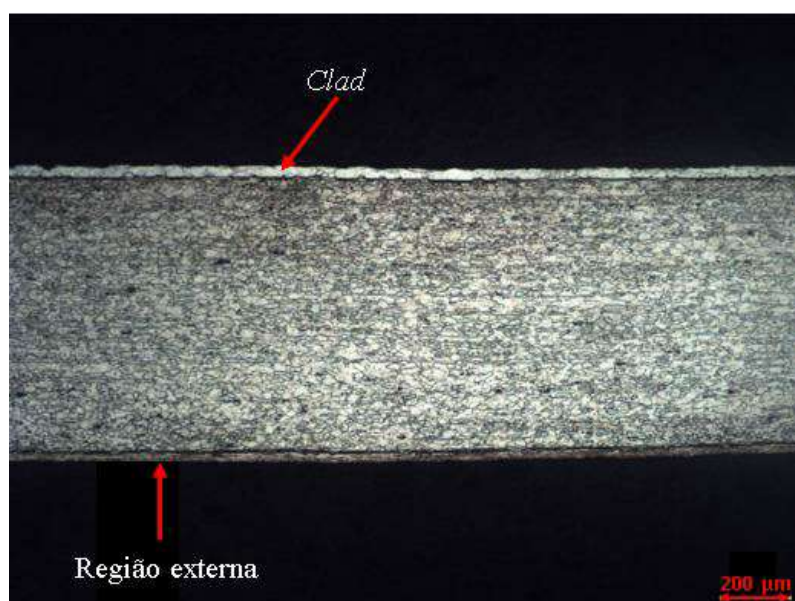


Figura 45 – Corte transversal da amostra com matéria prima AA 7475-W. Ataque químico: Nital 5%.

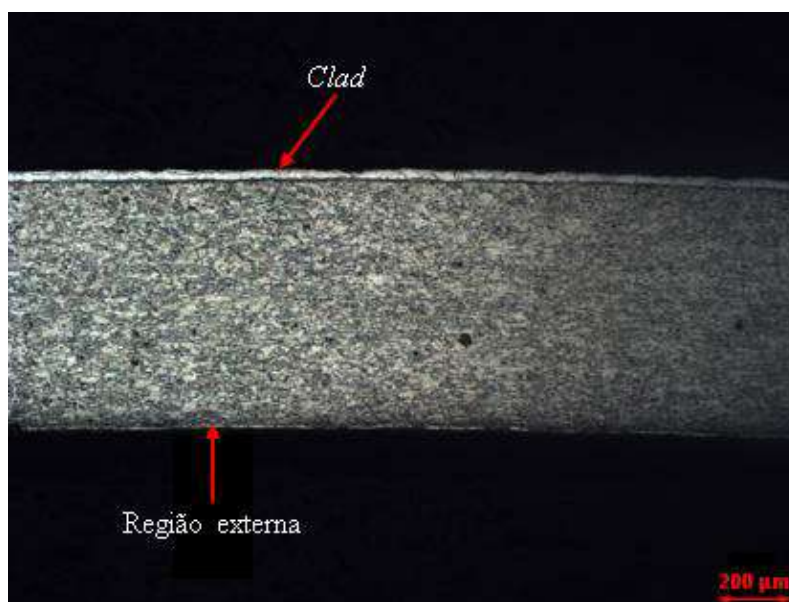


Figura 46 - Corte transversal da amostra com matéria prima AA 7475-T761. Ataque químico: Nital 5%.

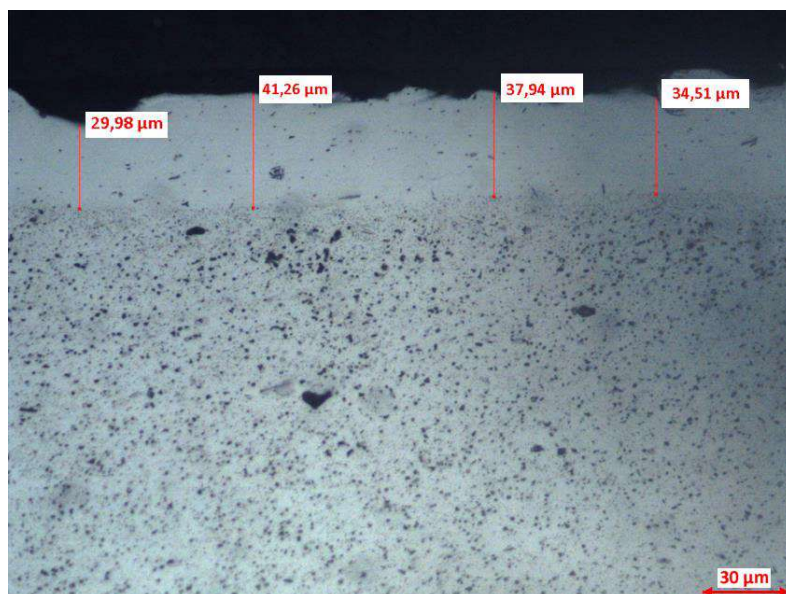


Figura 47 – Dimensões da camada de *clad* para a liga AA 7475-O após estampagem incremental. Ataque químico: Nital 5%.

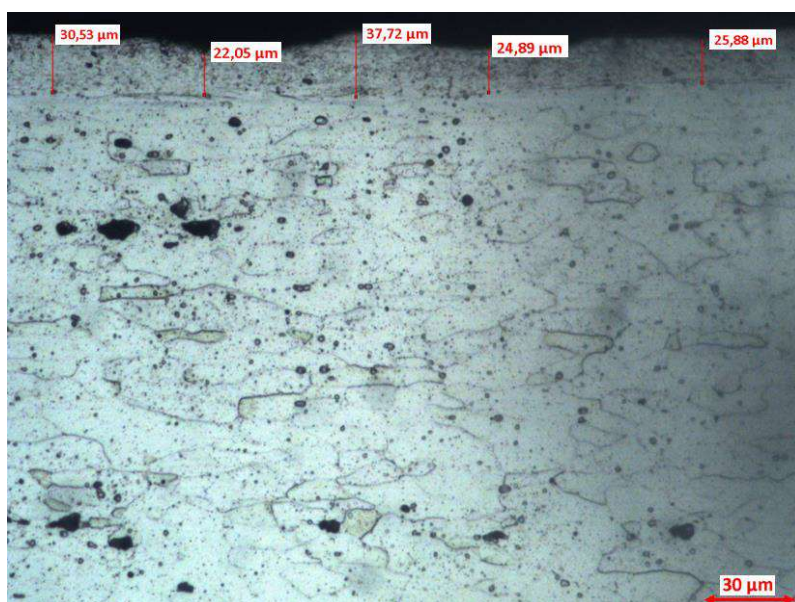


Figura 48 - Dimensões da camada de *clad* para a liga AA 7475-W após estampagem incremental. Ataque químico: Nital 5%.

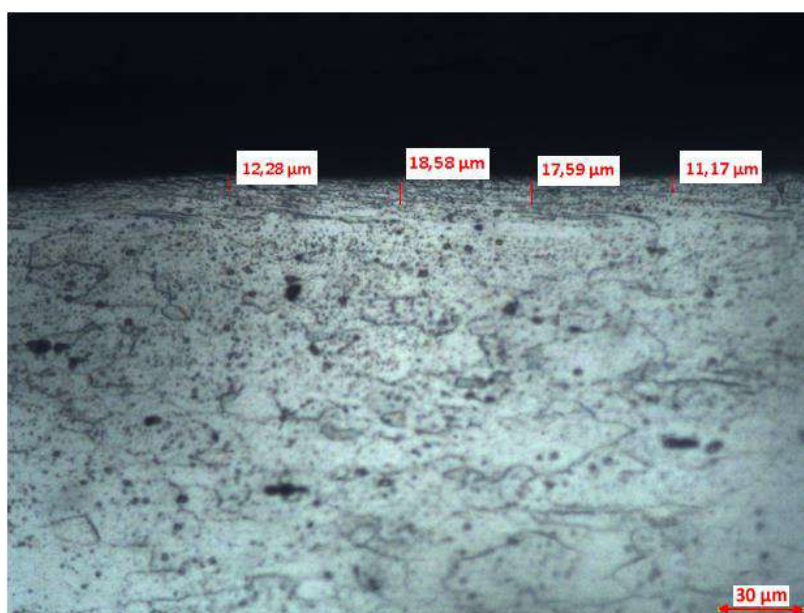


Figura 49 - Dimensões da camada de *clad* para a liga AA 7475-T761 após estampagem incremental. Ataque químico: Nital 5%.

6 CONCLUSÃO

Para estudar a possibilidade de aplicação da estampagem incremental de uma peça representativa da indústria aeronáutica, avaliou-se o comportamento das propriedades mecânicas e físicas de corpos de prova quando são alterados parâmetros de processo e da matéria prima.

Com os resultados obtidos, pode-se afirmar que este processo é capaz de garantir a fabricação de peças protótipos ou peças especiais sob demanda, atendendo-se os requisitos esperados com algumas restrições detalhadas a seguir.

A estampagem incremental de chapas de alumínio AA7475 em diferentes condições de tratamento térmico e em diferentes níveis de incremento mostrou-se viável para a fabricação de peças similares à geometria e espessura apresentadas neste trabalho. Os corpos de prova não apresentaram descontinuidades na superfície, conforme foi observado após a inspeção por líquido penetrante.

O tempo de fabricação variou consideravelmente com o incremento: quanto maior o incremento utilizado, menor o tempo de fabricação, o que torna o custo unitário de cada peça mais baixo de modo que a estampagem incremental passa a ser uma tecnologia competitiva quando comparada com as tecnologias de conformação convencionais, especialmente para a fabricação de pequenos lotes. Outro fator que pode contribuir na redução do tempo de fabricação é o diâmetro da ferramenta; ferramentas maiores combinadas com o incremento adequado resultam em um encurtamento da trajetória e consequentemente em menos tempo de fabricação.

A velocidade de avanço foi um fator de influência constante neste trabalho, porém, maiores velocidades também implicam em menor tempo de fabricação.

A conformação dos corpos de prova em diferentes condições de tratamento térmico foi fundamental para avaliar em qual situação se obtém o melhor resultado após a estampagem incremental. Conforme exposto no capítulo 3.2, ligas de alumínio na condição T761 seriam ideais para a conformação de peças, a fim de eliminar a necessidade de tratamentos térmicos durante o processo. No entanto, os corpos de prova obtidos com a liga AA 7475-T761 apresentaram elevado retorno elástico e uma remoção considerável da camada de *clad* causados principalmente pela elevada resistência mecânica da liga. Estes fatores inviabilizam

a aplicação industrial sem que haja a intervenção do processo com estudos aprofundados para este tipo de liga.

Apesar de ser necessária a aplicação de tratamentos térmicos, os corpos de prova na condição O e W apresentaram variação dimensional inferior à liga na condição T761, já que na condição O a liga metálica está recozida o que resulta num menor retorno elástico. Porém, dependendo da aplicação do produto, os valores obtidos podem não ser aceitáveis, e neste caso, estudos de simulação da conformação e compensações do molde podem suprir a variação encontrada.

A redução máxima de espessura dos corpos de prova foi próxima a 30% na região da bifurcação do corpo de prova (região F). Devido à resistência mecânica e ao retorno elástico da liga AA7475-T761, os valores de redução de espessura foram levemente inferiores do que os corpos de prova nas condições O e W.

Reduções de espessura próximas à 30% são atípicas em processos de conformação convencional de ligas de alumínio para uso em indústrias aeronáuticas, resultando, normalmente, no aparecimento de trincas e na fratura dos corpos de prova. Nos processos convencionais, as reduções máximas estão em torno de 20%. Porém o resultado obtido neste trabalho está de acordo com os valores encontrados por diversos autores que estudaram a aplicação de ligas de alumínio na conformação incremental, alcançando inclusive reduções de espessura superiores a 30% sem provocar fraturas.

A rugosidade foi a variável de resposta mais afetada pela variação do incremento. Diversos autores relatam a importância da combinação do ângulo de conformação, do diâmetro da ferramenta e do incremento utilizado para minimizar os efeitos da rugosidade superficial. Neste trabalho, ao considerar esta geometria de corpo de prova específica e combiná-la com o diâmetro da ferramenta e o incremento, foi observado que o incremento de 1mm apresentou uma rugosidade inferior quando comparada com o incremento de 0,5 mm.

Devido à necessidade de tratamentos térmicos para atingir as propriedades mecânicas similares à condição T761 ao final dos ensaios, as ligas nas condições O e W apresentaram aumento no tamanho de grão quando comparado com o tamanho de grão inicial das chapas.

Apesar de ser um trabalho com fatores de influência bem específicos, e na literatura não haver estudos relacionados com a liga AA 7475 em diferentes condições de tratamento térmico, observou-se que as variáveis de resposta apresentaram comportamentos similares aos estudos da revisão bibliográfica com outras ligas e outras condições testadas.

A camada de *clad* se manteve constante nas três condições de tratamento térmico, sendo que a condição T761 sofreu a maior redução da camada quando comparada com as condições O e W. Isto aconteceu devido ao atrito da ferramenta juntamente com o retorno elástico elevado dos corpos de prova durante a conformação incremental.

A maioria dos estudos da revisão bibliográfica trazem análises em uma forma geométrica cônica ou piramidal, com aplicação da conformação incremental simples. Neste trabalho foi explorada uma forma geométrica de maior complexidade e que representasse um produto similar aos produtos da indústria aeronáutica. Ao escolher investigar este tipo de forma geométrica complexa, alguns fatores se tornaram mais complexos de se predizer, por exemplo, a redução de espessura, que deixou de ser uniforme e passou a ser mais proeminente em regiões de maior deformação plástica.

Outro fator também influenciado pela forma geométrica foi a rugosidade: apesar de ser mantido o incremento em uma trajetória helicoidal iniciando do ponto mais alto do molde, a geometria provocou diferentes padrões de rugosidade dependendo da região investigada nos corpos de prova.

O sistema de fixação utilizado para prender a chapa sobre o molde eliminou a necessidade de uma operação de recorte do contorno do produto após a conformação incremental, porém pode ter provocado um aumento do retorno elástico causado principalmente pela flexão da chapa ao longo da trajetória.

Apesar destas variações, foi possível concluir que a conformação incremental de chapas de alumínio apresentou níveis de deformação superiores aos processos convencionais. Esta afirmação pode ser validada pelos resultados obtidos nas curvas limite de conformação, nas quais a liga na condição O ultrapassou o limite de falha sem apresentar trincas no corpo de prova.

Como sugestão de continuidade deste trabalho, propõe-se a aplicação de *softwares* de simulação da estampagem incremental que podem acelerar o desenvolvimento desse processo, além de reduzir o custo e o tempo de ensaios físicos. Devido à elevada quantidade de parâmetros existentes, *softwares* de simulação podem auxiliar na análise de diferentes combinações e garantir melhores resultados finais no produto a um baixo custo de desenvolvimento. No entanto, para aferir se os parâmetros obtidos em simulações são representativos, ensaios físicos também são necessários. Eles servem para validação da simulação e como dados de entrada para aprimorar a precisão da simulação.

Além disso, *softwares* de simulação contribuem no desenvolvimento dos moldes, que podem ser fabricados de maneira a compensar o retorno elástico.

Outra sugestão para trabalhos futuros é a aplicação de ensaios de tração e fadiga, que foram suprimidos deste trabalho devido à geometria e dimensão dos corpos de prova. Ensaios de tração e fadiga são importantes dados de entrada em *softwares* de simulação de conjuntos estruturais. Por ser um processo de conformação ainda pouco conhecido na indústria, o uso da estampagem incremental em produtos críticos para a segurança necessita da maior quantidade de informações possíveis.

Referências

AA ANSI H35.2 - **American National Standard Dimensional Tolerances for Aluminum Mill Products**. The Aluminum Association, 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. NBR ISO 4287, 2002.

AERENS, R., EYCKENS, P., VAN BAELE, A., DUFLOU, J. R., **Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46 (9–12), pp 969–982, 2009.

AMS 4100 F - **Aluminum Alloy, Alclad, Sheet 5.7Zn - 2.2Mg - 1.6Cu - 0.22Cr (Alclad 7475-T761) Solution and Precipitation Heat Treated**. SAE International, 2007.

ARAGHI, B. T., MANCO, G. L., BAMBACH M., HIRT, G., **Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming**, CIRP Annals MT, 58, pp. 225-228, 2009.

ARAGHI, T. B., GÖTTMANN, A., BAMBACH, M., HIRT, G., BERGWEILER, G., DIETRICH, J., STEINERS, M., SAEED-AKBARI, A. **Review on the development of a hybrid incremental sheet forming system for small batch sizes and individualized production**. Production Engineering, 5 (4), pp. 395-404, 2011.

ASGHAR, J. REDDY, N. V. **Importance of Tool Configuration in Incremental Sheet Metal Forming of Difficult to Form Materials using Electro-Plasticity**. Proceedings of the World Congress on Engineering, WCE 2013, Vol. 3, 2013.

ASTM E112-13, **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

AZEVEDO, N.G., FARIAS, J.S., BASTOS, R.P. *et al.* **Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials**. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 16, 589–595, 2015.

BHATTACHARYA, A., MANEESH, K., REDDY, N.V., CAO, J., **Formability and surface finish studies in single point incremental forming**, Transactions of the ASME-B, Journal of Manufacturing Science Engineering, 133(6), 1020–1028, 2011.

BRAMLEY, A.N., **Incremental Sheet Forming Process for Small Batch and Prototype Parts**, in Idee-Vision-Innovation, Verlag Meisenbach, pp. 95-102, 2001.

COLEMAN, D. E., MONTGOMERY, D. C. **Systematic approach to planning for a designed industrial experiment**. Technometrics, 35(1), pp.1-12, 1993.

CONRAD, L., BAILLY, D., HIRT, G., LAUGWITZ, M. **Flexible sheet metal forming for small batches**. 31. Aachener Stahlkolloquium – Umformtechnik. Ideen Form geben. RWTH Aachen, 2016.

DALEFFE, A., SCHAEFFER, L., FRITZEN, D., CASTELAN, J. **Analysis of the Incremental Forming of Titanium F67 Grade 2 Sheet**, Key Engineering Materials, Vols. 554-557, pp.195-203, 2013.

DUFLOU, J., SZEKERES, A., VANHERCK. **Force Measurements for Single Point Incremental Forming: and experimental study**. Journal Advanced Materials Research, Vols. 6-8, pp. 441 – 448, 2005.

FILIP, A. C., NEAGOE. **An overview on incremental sheet forming, a method for rapid manufacturing of hollow metal parts**, Academic Journal of Manufacturing Engineering, 8 (3), pp. 24-29, 2010.

FONTANARI, V., BENEDETTI, M., BRUSCHI, S., FUGANTI, A. **Numerical and experimental analysis of the single point sheets incremental forming process**. 15th International Conference on Experimental Mechanics. Porto/Portugal, 2012.

GAO, H., SHEIKHOLESAMI, G., DEARDEN, G., EDWARDSON, S.P., **Development of Scan Strategies for Controlled 3D Laser Forming of Sheet Metal Components**, Physics Procedia, Vol. 83, pp. 286-295, 2016.

HAGAN, E., JESWIET, J., **Analysis of surface roughness for parts formed by CNC incremental forming**, IMECHE part B, J. of Engineering Manufacture. Vol. 218, B10, pp. 1307-1312, 2004.

HAM M., **Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003**. Annals of the CIRP, 55 (1), pp. 241-244, 2006.

HIRT, G., BAMBACH, M. BLECK, W., PRAHL, U., STOLLENWERK, J. **The Development of Incremental Sheet Forming from Flexible Forming to Fully Integrated Production of Sheet Metal Parts**, Advances in Production Technology, Lecture Notes in Production Engineering, 2015.

HIRT, G., AMES J., BAMBACH, M. **A New forming strategy to realise parts designed for deep drawing by incremental CNC sheet forming**. Steel Research, 71 (2), pp. 160-166, 2005.

HOMOLA, P., NOVAKOVA, L., KAFKA, V., OSCOZ, M. P. **Effect of Incremental Forming Parameters on Titanium Alloys Properties**, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 8 (1), pp. 38-42, 2014.

HMIDA, R., THIBAUD, S., GILBIN, A. RICHARD, F. **Influence of the initial grain size in single point incremental forming process for thin sheets metal and microparts: Experimental investigations.** MATERIALS & DESIGN. 45. pp. 155-165. 2013.

JACKSON, K., ALWOOD J. **The mechanics of incremental sheet forming.** Journal of materials processing technology, 209, pp. 58-74, 2009.

JESWIET, J., MICARI, F., HIRT, G., BRAMLEY, A., DUFLOU, J., ALLWOOD, J. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal,** CIRP Annals – Manufacturing technology. 54 (2), pp. 88-114, 2005.

JURISEVIC, B., HEINIGER, K. C., KUZMAN, K. JUNKAR, M., **Incremental Sheet Metal Forming with a High-Speed Water Jet,** Proceedings of the International Deep Drawing Research Group conference, pp. 139 – 148, 2003.

KEELER, S. P. **Understanding Sheet Metal Formability: Part 5 – Die Design and Lubrication,** New York, 1968.

KEELER S. P. BACKOFEN W.A. **Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches:** ASM, Vol. 56, pp. 25-48, 1963.

KHARE, U., PANDAGALE, M. **A Review of Fundamentals and advancement in Incremental Sheet Metal forming.** IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering International Conference on Advances in Engineering & Technology, pp. 42-46, 2014.

KIRIDENA, V., VERMA, R., GUTOWSKI, T., ROTH, J. **Rapid Freeform Sheet Metal Forming: Technology Development and System Verification.** DOI: 10.2172/1433826, 2018.

KOPAC, J., KAMPUS, Z., **Incremental sheet metal forming on CNC milling machine tool,** Journal of Material Processing Technology, Vol. 162-163, pp. 622-628, 2005.

MARCINIAK, Z., DUNCAN, J.L., HU, S.J., **Cap. 1 - Material properties, Mechanics of Sheet Metal Forming** (Second Edition), Butterworth-Heinemann, pp. 1-13, 2002.

MARCINIAK, Z., KUCZYNSKI, K. AND POKRA, T. **Influence of The Plastic Properties of a Material on The Forming Limit Diagram For Sheet Metal In Tension:** Int. J. Mech. Science., Vol. 15, pp. 789-805, 1973.

MATSUBARA, S., **Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool,** J. of the JSTP, Vol. 35, pp. 1311-1316, 1994.

McANULTY, T., JESWIET, J., DOOLAN, M. **Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art.** CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 16, pp. 43-54, 2017.

MEIER, H., MAGNUS, C., SMUKALA, V., **Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal sheet metal forming with two moving tools**, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 60, pp. 327-330, 2011.

MMPDS – 12 Metallic Materials Properties Development and Standardization. **Chapter 3 – Aluminum Alloys**. Batelle Memorial Institute, 2017

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7^a ed. John Wiley & Sons. New York, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4^a ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.

PARK, J.J., KIM, Y.H., **Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique**, Journal of Material Processing Technology, Vol. 140, pp. 447-453, 2003.

PENG, W., OU, H., AND BECKER, A. **Double-Sided Incremental Forming: A Review**. ASME. J. Manuf. Sci. Eng; 141(5): 050802. <https://doi.org/10.1115/1.4043173>, 2019.

POHLAK, M., MAJAK, J., KÜTTNER, R. **Incremental sheet forming process modeling – limitation analysis**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 22 (2), pp. 67-70, 2007.

RIBEIRO, R. G. A., SOUZA, A.T.M.D., KAMIZONO, K.A., DUARTE, T.M., CARVALHO, D.L.B., NOGUEIRA, P.S. **Análise das propriedades elétricas do alumínio eletro conductor submetido a diferentes tempos de envelhecimento artificial para a produção de cabos elétricos**, Anais do VI Congresso nacional de engenharia mecânica, 2010.

RICHTER, A. **Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação**, Anais da VI Conferência Nacional de Deformação de Chapas, Porto Alegre, 2003.

SANTOS, R. A., TIGRINHO, L.M.V., FILHO, R.A.C., MARCONDES, P.V.P. **Avaliação da curva limite de conformação usando o teste de Marciniak comparando com teste de Nakazima para avaliação de chapa de aço de alta estampabilidade**, Anais do COBEF, 2007.

SHIM, M.S., PARK, J.J., **The formability of aluminum sheet in incremental forming**, Journal of Materials Processing Technology, 113 (1-3), pp. 654-658, 2001.

SHRIVASTAVA, P. TANDON, P. **Investigation of the effect of grain size on forming forces in Single Point Incremental Sheet Forming**. Procedia Manufacturing, Vol. 2, pp. 41–45, 2015.

SILVA, M. B., MARTINS, P.A.F., **Comprehensive Materials Processing**, Cap. 3.02: Incremental Sheet Forming, Vol. 3, pp. 7-26, 2014.

SILVA, M. B., SKJOEDT, M., ATKINS, A. G., BAY, N., MARTINS, P.A.F. **Single-point incremental forming and formability–failure diagrams**. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2008.

SOUSA, R.J.A., FERREIRA, J.A.F., FARIAS, J.B.S., MARTINS, A.B.E., **SPIF-A: On the development of a new concept of incremental forming machine**, Structural Engineering & Mechanics, Vol. 49, pp. 645-660, 2014.

SURESH, K., KUMAR, P., PRIYADARSHINI, A., KOTKUNDE, N. **Analysis of formability in incremental forming process**. Materials Today: Proceedings, Vol. 5, pp. 18905–18910, 2018.

Tisza M., Kovács, P.Z., Lukacs, Z., **Preliminary Studies on the Determination of FLD for Single Point Incremental Sheet Metal Forming**, Key Engineering Materials, 504-506, pp. 863-868, 2012.

TOLEDO, J., C., BORRÁS, M., A., MERGULHÃO, R., C., MENDES, G., H., S. **Qualidade gestão e métodos**. LTC, Rio de Janeiro, 2013.

TOTTEN, G.E, MACKENZIE, D, S. **Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes**. Taylor & Francis, New York, 2003.

TRZEPICIEŃSKI, T, BOGDAN & KUBIT, A. WYDRZYŃSKI, D. **Possibilities of application of incremental sheet-forming technique in aircraft industry**. Scientific Letters of Rzeszow University of Technology - Mechanics. 10.7862/rm.2018.08, 2018.

UHEIDA, E. H., OOSTHUIZEN, G. A., DIMITROV, D. *et al.* **Effects of the relative tool rotation direction on formability during the incremental forming of titanium sheets**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96, 3311–331, 2018.

UHEIDA, E. H., OOSTHUIZEN, G. A., DIMITROV, D. **Investigating the impact of tool velocity on the process conditions in incremental forming of titanium sheets**. Procedia Manufacturing, Vol. 7, pp. 345-350. 2017.

UHEIDA, E. H., OOSTHUIZEN, G. A., DIMITROV, D. **Toward Understanding the Process Limits of Incremental Sheet Forming of Titanium Alloys**, International Conference on Competitive Manufacturing. 2016.

XIAO, X., TONG, X., GAO, G., ZHAO, R., LIU, Y., LI, Y., **Estimation of peening effects of random and regular peening patterns**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 254, pp. 13-24, 2018.

Referências Eletrônicas

ANDREUCCI, R. **Ensaio por líquidos penetrantes.** Disponível em <http://www.abendi.org.br/abendi/default.aspx?mn=631&c=481&s=>. Acessado em 24/09/2017.

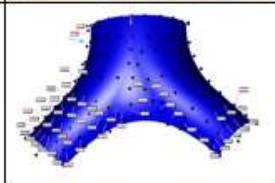
BUTTON, S., T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.** Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/im317.html>. Acessado em 23/09/2017.

IBF-RWTH Aachen. **Instituts für Bildsame Formgebung.** Disponível em <http://www.ibf.rwth-aachen.de/en/research-development/>. Acessado em 10/09/2017.

ROZENFELD, H., TAHARA, S. **Planejamento de Experimentos (DOE).** Instituto de gestão e desenvolvimento de produtos – IGDP. Disponível em <http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/Planejamento-de-Experimentos-DOE>. Acessado em 23/09/2017.

QUIA. **Chapter 20 Metal Forming part 3.** Disponível em <https://www.quia.com/jg/1961543list.html>. Acessado em 24/03/2017.

ANEXO A – Detalhamento da coleta das variáveis de resposta

Variáveis de resposta	Método de coleta	Ilustração
Ensaio não destrutivo por líquido penetrante;	Análise da superfície em todos os corpos de prova	
Micrografia - Tamanho de grão	Corte longitudinal (B) e transversal (A) na região F de 2 corpos de prova em cada condição testada. Análise microscópica e coleta do tamanho de grão em 5 regiões distintas de cada corte.	
Micrografia - Espessura da camada de <i>clad</i>	Corte longitudinal (B) e transversal (A) na região F de 2 corpos de prova em cada condição testada. Análise microscópica e coleta da espessura de <i>clad</i> em 4 regiões distintas de cada corte.	
Tolerâncias dimensionais do produto	Medição de pelo menos 2 corpos de prova em cada condição de teste.	
Curva limite de conformação	Coleta de 4 pontos em cada região (D, E e F) de um corpo de prova de cada condição de teste.	
Rugosidade da superfície	Coleta de 3 pontos na região D de 2 corpos de prova de cada condição de teste.	
Espessura final do produto	Coleta de 4 pontos em cada região (D, E e F) de um corpo de prova de cada condição de teste.	
Dureza	Coleta de 1 medição em cada região (D, E e F) em 2 corpos de prova de cada condição de teste.	

ANEXO B – Tabela de dados com desvio padrão

Espessura <i>clad</i> região A	7475-O		7475-W		7475-T761	
Incremento	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Média	36,33	35,92	33,05	29,76	15,29	14,91
Desvio padrão	5,04	4,83	4,79	5,85	3,73	3,72

Tamanho de grão (mm)	7475-O				7475-W				7475-T761			
Incremento	0,5 A	0,5B	1,0 A	1,0 B	0,5 A	0,5B	1,0 A	1,0 B	0,5 A	0,5B	1,0 A	1,0 B
Média	82,16	90,50	99,51	90,59	60,73	67,12	68,45	72,28	52,64	49,34	51,05	50,13
Desvio padrão	5,60	4,16	3,14	4,08	4,85	4,71	3,44	4,50	3,95	2,81	5,82	2,86

Dureza (HR15T)	7475-O sem solub e env		7475-O		7475-W		7475-T761	
Incremento	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Média	58,33	58,37	84,07	81,70	82,10	83,90	82,57	82,50
Desvpad	0,59	1,20	1,02	2,65	1,54	0,26	1,07	1,30

Rugosidade (Ra)	7475-O		7475-W		7475-T761	
Incremento	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Média	3,59	2,53	3,67	2,39	3,24	2,43
Desvpad	0,15	0,22	0,26	0,20	0,23	0,25

Medição - máximo afastamento (mm)	7475-O		7475-W		7475-T761	
Incremento	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Média	3,64	3,38	7,13	6,60	13,09	12,97
Desvpad	0,18	0,11	0,21	0,12	0,02	0,27

Redução de espessura (%)	7475-O (Média)		7475-O (Desvpad)		7475-W (Média)		7475-W (Desvpad)		7475-T761 (Média)		7475-T761 (Desvpad)	
Incremento	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
D	24,37	19,49	2,72	3,69	23,11	23,11	5,57	5,15	13,60	10,87	3,89	4,10
E	19,70	19,19	3,54	3,81	23,11	23,11	4,43	4,21	14,30	11,75	3,87	3,64
F	32,70	30,61	1,20	2,65	32,45	32,45	1,98	1,33	34,92	33,61	3,04	1,96

Os valores de comparação com a CLC e o resultado da inspeção por líquido penetrante não estão nesta tabela pois não foi realizada a média e o desvio padrão dos dados.