

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

BRUNO MAGNANI LANDELL

Deformação Plástica Incremental – Análise por Elementos Finitos

São Carlos
2016

BRUNO MAGNANI LANDELL

Deformação Plástica Incremental – Análise por Elementos Finitos

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

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Profa. Dra. Luciana Montanari

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2016

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

L243d Landell, Bruno Magnani
Deformação Plástica Incremental - Análise por
Elementos Finitos / Bruno Magnani Landell; orientadora
Luciana Montanari. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2016.

1. Estampagem incremental. 2. SPIF. 3. Deformação
Plástica. 4. Elementos Finitos. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO**Candidato:** BRUNO MAGNANI LANDELL**Título:** Deformação Plástica Incremental – Análise por Elementos Finitos

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

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Luciana Montanari (orientadora)

Nota atribuída: 10,0 (dez)

Luciana Montanari
(assinatura)

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues

Nota atribuída: 10,0 (DEZ)

[Assinatura]
(assinatura)

Enga. Msc. Adriana Bruno Norcino

Nota atribuída: 10,0 (Dez)

Adriana Bruno Norcino
(assinatura)

Média: 10,0 (dez)Resultado: aprovado**Data:** 08/12/2016

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

SIM ☒ NÃO ☐ Visto do orientador Luciana Montanari

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente às pessoas que estiveram mais próximas de mim durante a confecção deste trabalho: agradeço à Débora, aos meus pais, Pedro e Glaucia e às minhas irmãs, Érica e Lígia, pelo apoio, incentivo e por confiarem cegamente em mim. Sem eles, não teria conseguido alcançar tudo o que alcancei, não teria almejado nada do que tenho hoje, e teria permanecido na multidão, sendo apenas mais uma voz.

Agradeço também aos meus colegas e amigos de faculdade, que tanto me ajudaram, me ensinaram e me serviram de espelho. Eu seria uma pessoa totalmente diferente se não tivesse conhecido cada um deles. Em especial, agradeço ao Alexandre, Danilo, Guilherme, Francisco, João Pedro, Lucas, Luiz, Mauricio, Thales, Vágner e Vinícius.

Devo também um agradecimento aos amigos que fui conquistando durante a minha vida. Alguns deles foram de extrema importância no apoio e incentivo durante este trabalho. Obrigado em especial ao Renato, Cíntia, Juliana, Kênia e Laura.

Finalmente, agradeço à minha orientadora, Prof. Dra. Luciana Montanari pela proposta do tema, pelo acompanhamento e aconselhamento durante o trabalho e pelos conselhos dados.

“So long, and Thanks for All the Fish”

Douglas Adams (1984)

RESUMO

LANDELL, B. M. **Deformação Plástica Incremental – Análise por Elementos Finitos**. 2016. 78 f. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Vários processos de fabricação têm surgido devido à tendência e necessidade do mercado e da tecnologia disponível. Dentre esses processos destaca-se o processo de estampagem incremental de chapas sem matriz, devido à sua capacidade de substituir as operações de estampagem convencional na fabricação de pequenas séries ou séries unitárias. A estampagem incremental é especialmente atrativa para empresas que produzem protótipos, lotes pequenos e peças de alto valor agregado. Por ser um processo novo, com cerca de 50 anos desde sua concepção, ainda não consta na grade curricular do curso de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos. Logo, este trabalho teve como objetivos: realizar revisão da literatura a respeito do processo, parâmetros envolvidos, capacidade de aplicação na indústria, viabilidade econômica e limitações, além de simular, via elementos finitos, utilizando o ANSYS, o comportamento da espessura da chapa ao longo do processo. Ademais, este estudo através de *software* é comparado com a formulação teórica do processo e dados experimentais obtidos em literatura técnica. Os resultados obtidos comprovam que a utilização de análise por elementos finitos é adequada para simulação do processo, especialmente na variação da espessura da peça ao longo da manufatura, ponto de atenção para determinar falha ou não do material.

Palavras-chave: Estampagem incremental. Deformação incremental com ponto único. Deformação Plástica. Elementos Finitos.

ABSTRACT

LANDELL, B. M. **Incremental Plastic Deformation: A Finite Element Analysis.** 2016. 78 f. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The topic of this document is incremental sheet forming, focusing the Single Point Incremental Forming (SPIF) process. The objective is to provide necessary knowledge, thus a mechanical engineer can make use of it in an incremental sheet forming manufacturing process of a simple part. In order to make it possible, a vast literature review is presented, supported by many diverse scientific articles: there are good references for eventual deepening into the subject. Also, at the review, it is discoursed about applications in engineering, economic and practical viability. An analysis by means of finite elements, using ANSYS software, is carried, which one of the objectives is to provide to the mechanical engineering student, tools, a guide to perform a simple simulation. Analysis of thinning of the sheet can be studied using this guide. Furthermore, this study using the *software* is compared to the theoretical formulation of the process, just as well with the experimental results collected in a scientific paper. Results here showed that finite element analysis is adequate to simulate the process, especially regarding the thinning of the thickness.

Keywords: Incremental Sheet Forming. SPIF. Plastic deformation. Finite element analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) SPIF, (b) TPIF com contra-ferramenta do tipo punção, (c) TPIF com matriz parcial, (d) TPIF com matriz completa. Fonte – Jeswiet et al (2005).	16
Figura 2 - Aparato idealizado e patenteado por Leszak. Fonte - Leszak (1964).	17
Figura 3 – (a) TPIF proposto por Matsubara (1994), (b) TPIF por robôs, pesquisa de Meier et al (2009).	19
Figura 4 - Enunciação da lei do seno. Fonte – Kobayashi, Hall, Thomsen (1961).	23
Figura 5 - Diagrama de esforços do processo de SPIF: (a) representação esquemática de uma peça que já sofreu o processo, com destaque para o elemento CDEF do tipo shell, em perspectiva; (b) representação esquemática de um elemento do tipo shell ao se cortar o desenho (a) por um plano meridional – observe as letras representativas de vértice ‘EF’ nas duas Figuras; (c) detalhe de (b) mostrando os esforços atuantes. Fonte – Silva, Skjoedt e Martins (2008).	25
Figura 6 - Representação esquemática das superfícies e das fraturas recorrentes. Fonte - Silva, Skjoedt e Bay (2009).	27
Figura 7 - Propagação de trinca no processo de SPIF. (a) ilustração das propagações recorrentes da fratura devido a tensões meridionais. (b) Fratura circunferencial em zig-zag. (c) Fratura circunferencial reta. (d) Fratura circunferencial reta proveniente de um processo de estampagem profunda Fonte – Silva, Skjoedt e Martins (2008).	28
Figura 8 - Representação esquemática do elemento BC que é analisado nesta seção. Fonte – Silva, Skjoedt e Martins (2008).	29
Figura 9 – Diagrama Limite de Deformação (DLD) para o alumínio AA 1050-H111. Fonte – Isik, Silva, Tekkaya (2014).	32
Figura 10 - DLD do alumínio AA1050-H111 com destaque para fotos das fraturas ocorridas nos experimentos realizados. Fonte – Isik, Silva e Tekkaya (2014).	34
Figura 11 - Limite de conformabilidade para o aço DC04 utilizando diferentes valores para o diâmetro do punção. Fonte – Hirt, Junk e Witulski (2002).	35
Figura 12 - Diferenciação do passo vertical (Δz) e da altura de degrau (Δh). Fonte – Aereens, Eyckens, e Van Bael (2010).	37
Figura 13 - Parâmetro de conformabilidade para o alumínio AA 1050-0 variando com o passo vertical, para um punção de 12 mm de diâmetro. Fonte - Micari (2004).	37
Figura 14 - Chart de materiais poliméricos quanto às suas características. Fonte – Martins, Kwiatkowski e Franzen (2009).	46

Figura 15 - Distribuição de temperatura para ponta da ferramenta e peça para as seguintes condições: (a), (b): durante e ao final do processo, com rotação da ferramenta em 2000 rpm. (c) e (d): durante e ao final do processo sem rotação. Fonte – Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015).	48
Figura 16 - Força medida ao longo do processo. Valores médios de vários experimentos. Fonte - Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015).	49
Figura 17 - Fluxograma sugerido como guia para simulação.	54
Figura 18 – Representação de todas as condições de contorno necessárias e deslocamento da ferramenta.	55
Figura 19 (a) - Representação simplista de uma trajetória do tipo '2.5D', com passo constante - Fonte Matsubara (1994). (b) - Representação esquemática de uma trajetória helicoidal com passo constante. Fonte – Manco, Filice e Ambrogio (2011).	57
Figura 20 - Resultado do teste de contato para malha de 16 elementos	59
Figura 21 - Resultado do teste de contato para malha de 36 elementos	59
Figura 22 - Teste de contato para malha de 64 elementos	60
Figura 23 - Teste de contato para malha de 225 elementos	60
Figura 24 - Deformação para velocidade de 50 m/s, profundidade realizada de 5 mm. Escala verdadeira.	63
Figura 25 - Deformação para velocidade de 100 m/s, profundidade realizada de 5 mm. Escala verdadeira.	63
Figura 26 - Deformação para velocidade de 200 m/s, profundidade realizada de 5 mm. Escala verdadeira.	64
Figura 27 - Deformação para velocidade de 400 m/s, profundidade realizada de 5 mm. Escala verdadeira.	64
Figura 28 - Deformação para velocidade de 400 m/s, profundidade realizada de 2 mm. Escala verdadeira.	65
Figura 29 - Deformação para velocidade de 200 m/s, com densidade de 10000 kg/m ³ .	66
Figura 30 - Malha adotada para simulações - 5 elementos na espessura	67
Figura 31 - Resultados experimentais e através de simulação por elementos finitos (FEM). Fonte - Manco, Filice e Ambrogio (2011).	70
Figura 32 - Resultados obtidos da simulação feita no ANSYS.	71
Figura 33 - Resultados obtidos do ANSYS para espessura da chapa ao longo da profundidade da peça.	72
Figura 34 - Curso escolhido para obtenção dos dados.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do alumínio AA1050-O	53
Tabela 2 - Resultados do teste de contato para duas velocidades de ferramenta.	60
Tabela 3 - Resultados do teste de linha	62

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1. Contextualização.....	15
2.2. Desenvolvimento Histórico	17
2.3. Equipamentos e Análise de Custos	20
2.4. Discernimento de Processos	22
2.5. Aspectos do Processo.....	23
2.5.1 Espessura final de parede: Lei do Seno.....	23
2.5.2 Equilíbrio de Membrana.....	25
2.5.3 Modo de Fratura	26
2.5.4 Estado de Tensão e Deformação	29
2.6. Limite Plástico do Material.....	30
2.7. Parâmetros que Influenciam na Capacidade de deformação do Processo	35
2.7.1 Diâmetro do Punção	35
2.7.2 Passo Vertical.....	36
2.7.3 Espessura da Chapa.....	38
2.7.4 Velocidade do Processo e Rugosidade.....	38
2.8. Indicador de Conformabilidade dependente do Material.....	40
2.9. Força no Processo	41
2.10. Precisão e Limitações do Processo	43
2.11. Aplicações da Estampagem Incremental.....	44
2.12. Utilização de Outros Materiais.....	45
2.12.1 Introdução sobre Polímeros	45
2.12.2 Parâmetros que se diferem: Força e Temperatura	47
3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	51
3.1. Proposta	51
3.2. Considerações e Passos iniciais	52
3.3. Passos para Simulação	53
3.4. Confecção da Trajetória.....	56
4. RESULTADOS	69
4.1. Limitações.....	74
5. CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS.....	75
BIBLIOGRAFIA	76

1. INTRODUÇÃO

A manufatura é uma área da indústria. Neste contexto, chama-se a atenção para os métodos utilizados para fabricação serem antigos, bem tradicionais: o torneamento, por exemplo, provavelmente o primeiro processo de usinagem moderna, é praticado desde o antigo Egito e outras civilizações ancestrais. Por outro lado, fundição e forjamento, são processos realizados desde, seguramente, a idade média (SMITH, 2014).

Recentemente, novos processos de fabricação têm chamado bastante a atenção. Por exemplo, a manufatura aditiva, que através da sinterização contínua de massa (geralmente um polímero) gera uma peça complexa e precisa através de um ambiente CAD-CAM. Apesar de não indicada para grandes lotes, também é e será cada vez mais utilizada por grandes montadoras de veículos, por exemplo, por conta do benefício da confecção de peças únicas ou em pequenos lotes e não possuir um grande custo fixo associado – a de fabricação de matriz e punção, ou compra de inserto para troca de ferramenta, por exemplo. Sendo assim, processos como a manufatura aditiva são versáteis quanto ao tipo de indústria e de peças fabricadas. É comum sua utilização para fabricação de protótipos, substituição de peças e até projeto de peças personalizadas (JESWIET *et al.*, 2005).

Neste contexto, com características semelhantes ao processo de manufatura aditiva em vários pontos – como a de ser um processo novo, ainda pouco conhecido e cada vez mais estudado, ser indicado para pequenas quantidades com ampla versatilidade quanto ao tipo de indústria atendido e a peça a ser fabricada, entre outros –, o processo de estampagem incremental vem ganhando espaço da indústria mecânica.

O processo de estampagem incremental apresenta semelhanças com o processo de estampagem convencional: não há perda de material, ou seja, não há formação de cavaco, apenas de deformação elástica e plástica do material – ambos sendo, majoritariamente, de chapas metálicas (JESWIET *et al.*, 2005). Fora essa “definição” comum, muito se diferem os métodos de estampagem, sendo que um dos objetivos deste estudo será o de revisão da literatura do processo de estampagem incremental e detalhamento do estado da arte em que as mais recentes pesquisas se encontram.

Adiante, outro objetivo deste estudo, será o de estudo de trajetória da ferramenta. Duas das principais limitações da estampagem incremental, que prejudicam seu uso para engenharia convencional, são a baixa qualidade superficial e dimensional das peças. Há várias

soluções propostas para amenizar esses problemas, sendo que o primeiro problema é geralmente contornado com uso adequados de parâmetros, como diâmetro da ferramenta, altura de passo na direção da ferramenta e ângulo da parede. No entanto, o segundo problema é mais complexo, sendo que as soluções propostas envolvem a customização da trajetória da ferramenta ao longo da peça por meio de algoritmos iterativos que envolvem cálculos de verificações. Nesse contexto, um estudo envolvendo o *software* de elementos finitos ANSYS será feito e comparado com resultados publicados (MANCO, FILICE, AMBROGIO, 2011). Este trabalho é escolhido por apresentar uma peça de geometria pequena, isto é, adequada aos recursos computacionais usados nesse trabalho, com praticamente todos parâmetros de manufatura bem definidos e compilação de resultados de forma simples.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Contextualização

A estampagem incremental, referida frequentemente como ISF – Incremental Sheet Forming – é a classificação dada a vários processos que tem em comum o fato de, a cada instante de tempo, uma pequena porção do material estar em contato com a ferramenta se deformando e, portanto, tomando forma sem remoção do material. A fabricação desta peça envolve essa zona de deformação passando por toda a área a ser deformada. Algumas características de processos ISF são condensadas por Jeswiet et al. (2005): são processos de fabricação a partir de chapas metálicas; as ferramentas variam de cerca de 6 mm de diâmetro até, em alguns casos, a 20 mm e estão em contato constante com a peça, sendo controladas tridimensionalmente; se existirem matrizes, estas são simples, pequenas e genéricas; e por fim, podem produzir peças assimétricas.

Um desses processos chamados de ISF é o SPIF – *Single Point Incremental Forming* (Figura 1(a)), ou seja, estampagem incremental sem matriz: a ferramenta punção – sem ponto de apoio adicional. Este é o processo que realmente será estudado e investigado sobre sua trajetória. Destaca-se também, outro processo, chamado de TPIF – *Two Point Incremental Forming* (Figuras 1(b), (c) e (d)), bem semelhante ao SPIF com a adição de uma outra ferramenta, geralmente denominada de matriz, que estará posicionada do lado oposto da peça em relação ao punção. Conclui-se facilmente, então, que TPIF não é um processo verdadeiramente sem matriz, embora, geralmente, seja considerado como tal. Por ora, basta a apresentação da definição dos processos. Em outras seções, serão apresentados mais detalhes e modos de diferenciações de cada um dos processos.

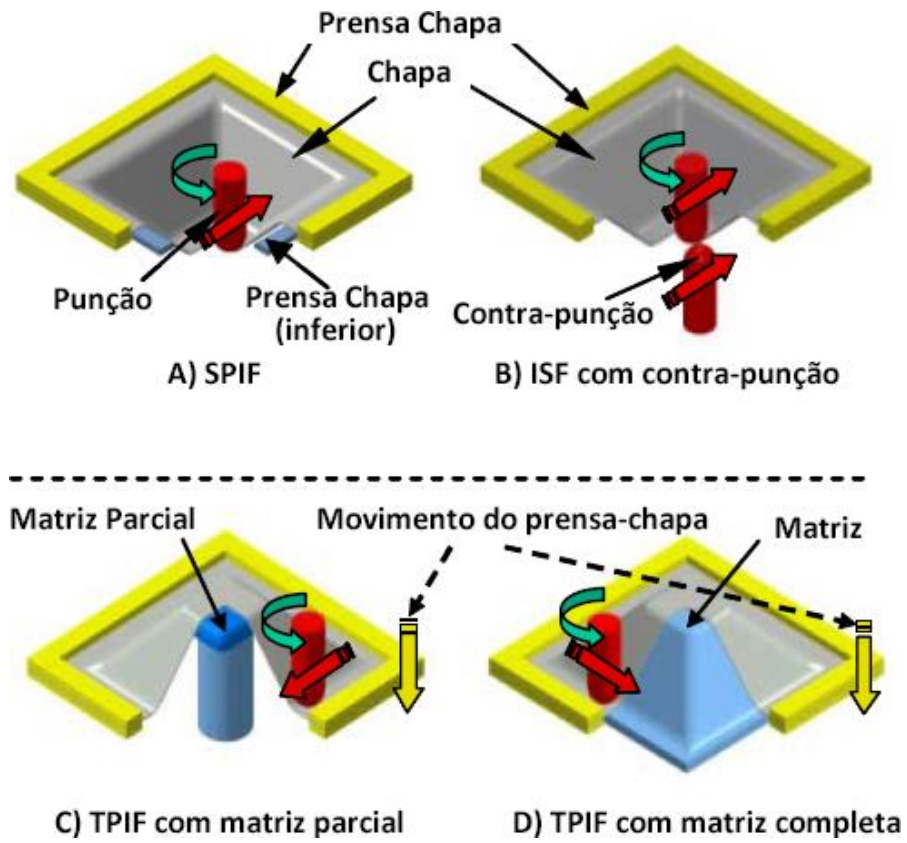


Figura 1 - (a) SPIF, (b) TPIF com contra-ferramenta do tipo punção, (c) TPIF com matriz parcial, (d) TPIF com matriz completa. Fonte – Jeswiet et al (2005).

2.2. Desenvolvimento Histórico

Um dos primeiros registros quanto à tecnologia de estampagem incremental é uma patente americana (LESZAK, 1964). Nessa patente (Figura 2), o autor apresenta desenhos de um aparato para um processo incremental sem matriz. O autor destaca a dificuldade de se fabricar peças cônicas por métodos tradicionais como estampagem profunda, repuxo e hidroformação e que, nesse novo processo, um conjunto enorme de peças podem ser fabricadas com uma ferramenta barata, tornando o processo muito atraente para rápidos protótipos e modelos de projetos. Destaca-se que Leszak propôs sua invenção muito antes de ser possível um processo de ISF, sendo que o primeiro caso documentado de sucesso foi feito por Mason (1978) em sua tese de doutorado. Mason proporcionou avanços significativos em sua tese, de uma tecnologia estagnada desde 1964. O trabalho foi apresentado por seu orientador, Mason e Appleton (1984), em conferência no Japão, o que fez o assunto ser muito investigado e desenvolvido no oriente durante os anos 90.

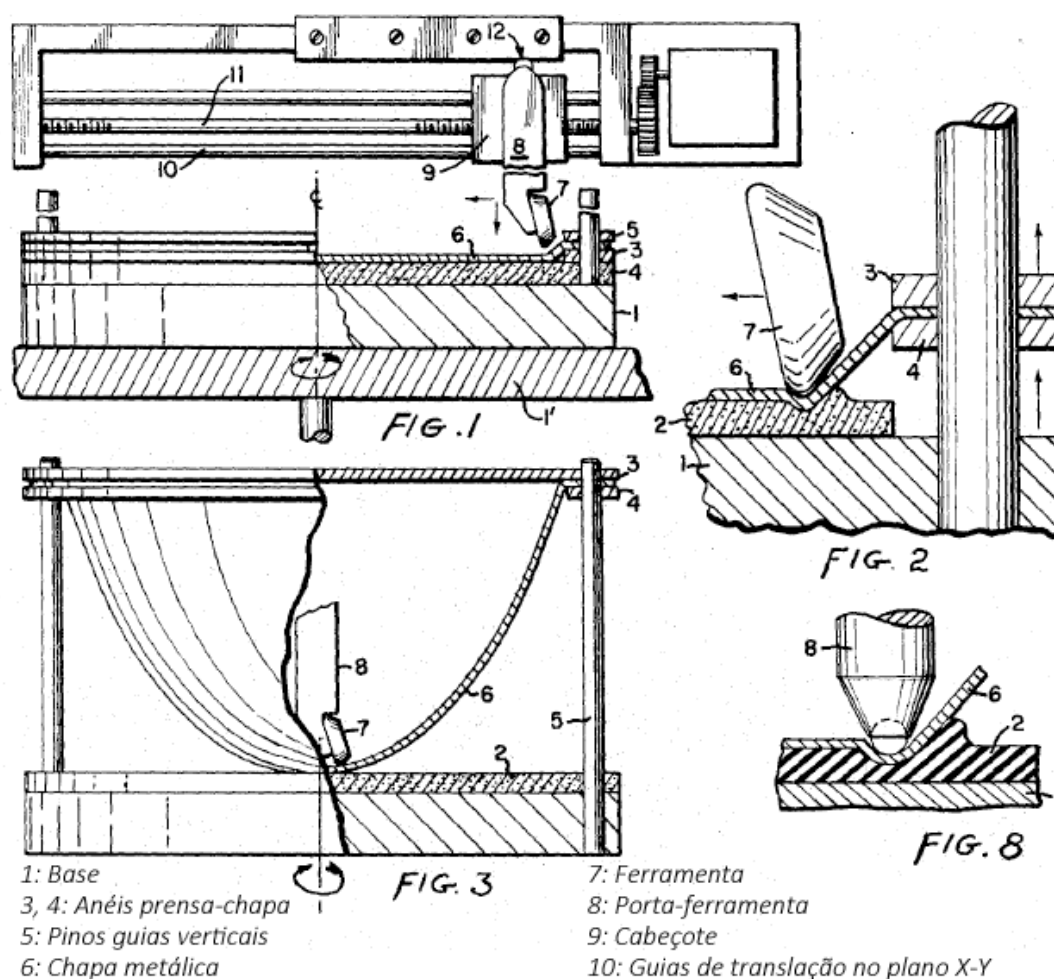


Figura 2 - Aparato idealizado e patenteado por Leszak. Fonte - Leszak (1964).

Durante desenvolvimento do processo no Oriente, vários autores elaboraram muito material – artigos e patentes – sobre ISF. Por exemplo, Iseki e Matsubara idealizaram o processo TPIF (MATSUBARA, 1994). O autor primeiramente desenvolveu uma patente em 1993, concedida em 1995. Interessantemente, Matsubara não patenteou o método TPIF, mas sim o aparato utilizado por ele. Já Iseki, Kato e Sakamoto (1989), foram os primeiros pesquisadores que introduziu o uso de centros de usinagem com Controle Numérico Computacional (CNC), sendo um grande avanço para a época, já que os centros de usinagem CNC eram caros e raros, também apresentando problemas de baixa rigidez. Após esse estudo, vários outros seguiram a linha de pesquisa e o uso de máquinas CNC foi cada vez mais aceito e adotado pela comunidade científica e industrial.

Além dos trabalhos acadêmicos, a indústria japonesa, automotiva por meio da Toyota e a Honda, e a empresa Hitachi desenvolveram várias patentes ao final dos anos 90. Emmens, Sebastiani e Van Den Boogaard (2010) realizaram extensa pesquisa sobre a evolução história dos processos ISF e seu estado da arte. A busca foi feita em bases de patentes orientais e ocidentais e os resultados foram mostrados com detalhes de reivindicações e objetivos de cada patente. Eles destacam ainda que apenas depois dos anos 2000, a estampagem incremental despertou o interesse do mundo ocidental: Do lado industrial, as empresas alemãs BMW e Daimler-Chrysler publicaram uma patente cada. Por outro lado, o mundo acadêmico ocidental realmente se tornou ativo e hoje possui vários autores, muitos dos quais serão citados neste trabalho, principalmente na Europa.

Emmens, Sebastiani e Van Den Boogaard (2010) também destacam um grupo de patentes japonesas relacionando o capô do S800, de 1965, em que a Honda teve interesse em fabricar peças de reposição para este carro clássico. Essa constatação prova um dos benefícios do processo que é o de versatilidade de manufatura de peças em pequenos lotes, como protótipos e peças de reposição. A BMW, já mencionada, por ser uma marca de tendência mais exclusiva, teve e tem interesse em processos ISF devido a customização dos carros para seus clientes: a marca encontra, em processos como SPIF e TPIF, uma forma barata de alterar o projeto de produção de peças individualmente.

A idealização do processo TPIF em Matsubara (1994), presente na Figura 3 (a), é muito semelhante ao estado da arte. O autor empregou uma contra ferramenta fixa hemisférica em contato com a parte inferior da chapa metálica, simplificando o processo, deixando-o mais acessível economicamente, desta forma, para várias geometrias de peças

com duas ferramentas genéricas poderiam ser utilizadas, extinguindo a fabricação de uma matriz parcial.

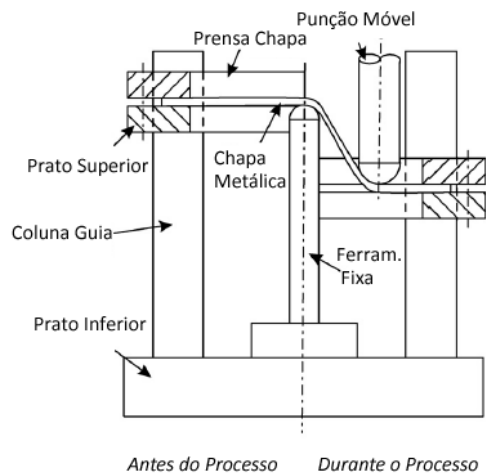


Figura 3 – (a) TPIF proposto por Matsubara (1994), (b) TPIF por robôs, pesquisa de Meier et al (2009).

Há trabalhos acadêmicos, principalmente os mais recentes, que utilizam uma ferramenta móvel como matriz. Neste contexto, é crescente a tendência de se usar dois braços robóticos como ferramentas do processo (figura 3 (b)), de modo que a chapa seja disposta na vertical e os braços robóticos apliquem a deformação nas laterais, como feito em (MEIER, *et al.*, 2009). O objetivo dos autores é o melhoramento da tolerância dimensional da peça a ser feita. Um dos principais desafios enfrentados é o de não existência de um módulo CAD/CAM específico para dois robôs operando conjuntamente.

2.3. Equipamentos e Análise de Custos

A ideia-conceito dos processos SPIF e TPIF é a flexibilização de um modo de fabricação de chapas metálicas para pequenos lotes com custo baixo, próximo ao custo da matéria prima e homem/máquina horas. Logo, a fim de atingir este objetivo, um conjunto capaz de realizar essa tarefa tem como premissa ser o mais simples possível. Alguns requisitos, no entanto, são necessários: deve-se ter o mínimo de controle sobre parâmetros como velocidade de rotação e translação da máquina, precisão no ajuste do passo e precisão de trajetória da ferramenta. O controle desses parâmetros será importante na hora de inspeção dimensional da peça: tolerâncias podem ser apertadas na indústria em geral. Levando em conta o objetivo de se obter uma peça de geometria e dimensão precisas, o uso de uma máquina-ferramenta convencional é descartada: uma fresadora ou um centro de usinagem com controle por comando numérico são preferíveis nessas aplicações. Apesar de ser um maquinário caro, geralmente não é contabilizado no custo do processo: admite-se que esse centro de usinagem já é de propriedade da empresa ou do centro de pesquisa em que ele é empregado regularmente.

Possuído o maquinário, os demais equipamentos necessários são: ferramenta e matriz (se houver), prensa-chapa, suporte com base e guias. Destes, praticamente todos podem ser feitos utilizando o próprio centro de usinagem, com atenção especial para ferramenta, que é aconselhada a ser de um material bem rígido, como aço ferramenta temperado a 60 HRC, como geralmente recomendado (JESWIET, *et al.*, 2005). Neste mesmo artigo, os autores sugerem o uso de revestimento de carbeto cementado, ou até ser feita totalmente deste material, a fim de evitar atrito excessivo, cujo efeito pode influenciar negativamente no desgaste da ferramenta. Matsubara (2001) resalta que, ao deformar uma peça de aço inoxidável usando um punção de aço ferramenta, ocorre o fenômeno chamado de *stick-slip*, algo como um instantâneo agarramento repentino de duas peças, quando desliza uma sobre a outra, e o deslizamento no momento seguinte, gerando uma região de baixa qualidade superficial. Em outras aplicações é necessário um punção fabricado de material plástico a fim de evitar reações químicas com a chapa. A matriz, por sua vez, pode ser feita de um material menos nobre, polímero ou até madeira: Matsubara (2001) justifica que, por conta da matriz não sofrer com tensão devido ao atrito e as pressões de contato serem baixas, ela pode ser fabricada de aço doce, resina epóxi ou borracha feita de uretano. O prensa-chapas também

pode ser feito de resina de epóxi, garantindo assim um baixo custo. As guias devem ser fabricadas com precisão e boa tolerância geométrica.

Em geral, como as peças são simples e de fácil fabricação, o custo fixo de um processo SPIF ou TPIF é baixo comparado ao ‘setup’ de um processo de estampagem convencional, onde o punção e a matriz são bem definidos e de geometria mais complexa. Maidagan, Zettler e Bambach (2007) estimam que o custo de ‘setup’ de um processo ISF é de cerca de 5-10% do que um processo de estampagem convencional, um número muito expressivo que mostra umas de suas maiores qualidades. Micari (2004) realizou análise de custos envolvendo diversos parâmetros, como custo fixo com programação CNC, *setup* de máquina e de linha de produção, além de custos variáveis como gasto com energia, mão de obra e matéria prima, e chegou à conclusão de que os processos AISF (*Asymmetric Incremental Sheet Forming*) são indicados quando lotes de tamanho menor do que 600 peças requerem ferramentas novas dedicadas. Assim, não só para protótipos, AISF é recomendado. Empresas com pequeno volume de vendas, mas com médio-alto valor agregado, têm no processo uma nova alternativa para redução de custos.

Sumariamente, pode-se dizer que, por conta da simplicidade dos elementos mecânicos utilizados, os processos de estampagem incremental de um ou dois pontos de deformação são econômicos, uma vez adquirido o centro de usinagem ou fresadora CNC. Chama-se atenção para a simplificação do aparato proposto por Leszak em sua patente (Figura 2) ao que se tem atualmente: equipamento como descrito acima e podendo ser observado na Figura 3.

2.4. Discernimento de Processos

Esta seção tem como objetivo apontar algumas diferenças de natureza estrutural, teórica e qualitativa entre os processos SPIF e TPIF. A Figura 1 ilustra a diferença estrutural entre os dois processos. É devido a essa particularidade que ocorrem os outros dois tipos de diferenças: de modo de movimento da ferramenta e da relação entre conformabilidade e tolerância.

No processo de deformação em único ponto, a ferramenta se move das extremidades para o centro da peça, enquanto para o processo de dois pontos, segue trajetória inversa, da área central para as bordas. Além disso, para o SPIF, o movimento vertical se dá pela própria ferramenta, através do cabeçote, enquanto para o TPIF, o movimento vertical é geralmente feito através do prensa-chapas, que se deslocará por guias. As trajetórias da ferramenta podem ser geradas por *softwares* CAM, utilizando o mesmo procedimento de trajetória para fresamento. Neste trabalho, a trajetória será elaborada de forma simples através de planilhas de cálculo (Excel) a fim de demonstrar que não é necessário o uso de um *software* de custo elevado (SolidCAM, por exemplo) para confecção de trajetórias de geometrias simples, como a de cone ou pirâmides de base reta. A trajetória (por ser longa) e o algoritmo não serão descritos neste trabalho. No entanto, a linha de raciocínio será mostrada junto com os parâmetros de construção, ficando de fácil acesso ao leitor a confecção de sua própria trajetória.

Não há muitos estudos sobre a comparação direta entre os métodos SPIF e TPIF. Entretanto, Attanasio, Ceretti e Giardini (2008) trazem informações interessantes. Segundo os autores, o método TPIF resultará em peças com menores deformações às peças feitas pelo SPIF, ou seja, a peça deverá ser planejada com mais cuidado quanto aos seus parâmetros que podem causar falhas, geralmente expressas pelo ângulo de parede. Por outro lado, TPIF favorece as tolerâncias geométricas e dimensionais da peça em um único passo, especialmente para peças complexas.

De uma maneira geral, por ser mais simples, o SPIF é preferido ao TPIF em meio acadêmico. Acredita-se que o TPIF deva ser mais utilizado e tenha mais potencial industrial principalmente por causa de suas melhores tolerâncias dimensionais e geométricas. Essencialmente, o processo incremental é proposto como alternativa à conformação convencional em séries pequenas ou unitária. Uma vez que a conformabilidade de um

material é menor em processos convencionais, espera-se que o TPIF possa substituir plenamente e ainda provenha vantagens de tolerância sobre o SPIF.

2.5. Aspectos do Processo

2.5.1. Espessura final de parede: Lei do Seno

Um dos parâmetros que devem ser considerados ao se fazer uma peça em estampagem incremental é a espessura final de parede. Admite-se que o processo é realizado sob estado plano de deformações, uma hipótese plausível, pode-se usar a lei do seno, originalmente enunciada para o processo de repuxo, para cálculo de espessura final em função da espessura inicial e do ângulo da parede – equação. (1a). Chega-se à igualdade mencionada fazendo um simples balanço de volume de antes e depois da deformação do processo. Essa formulação é direta e possibilita uma estimativa aceitável da espessura quando comparado com resultados de simulações em *softwares* de elementos finitos como o ANSYS, com um custo computacional extremamente baixo. Um dos parâmetros a ser analisado neste trabalho é a validação da lei para uma simulação. A ilustração e formulação da lei do seno é apresentada na Figura 4:

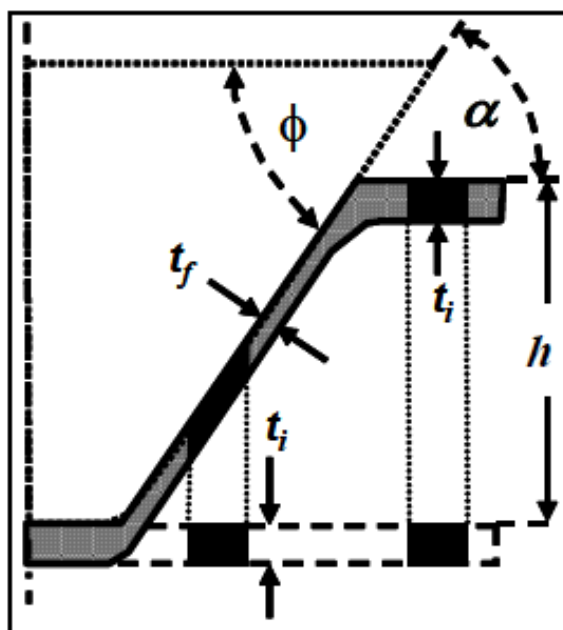


Figura 4 - Enunciação da lei do seno. Fonte – Kobayashi, Hall, Thomsen (1961).

A equação (1a) é a lei do seno para processo de repuxamento (KOBAYASHI, HALL e THOMSEN, 1961). Já a equação (1b) é a lei do seno válida para estampagem incremental:

$$t_f = t_i \cdot \text{sen}(\alpha) \quad \text{eq. (1a)}$$

$$t_f = t_i \cdot \text{sen}(90^\circ - \alpha) \quad \text{eq. (1b)}$$

Onde α é o ângulo de parede da peça, enquanto t_i e t_f são a espessura inicial e final do processo, respectivamente.

A correção em questão é de fácil entendimento ao se pensar, hipoteticamente, em um ângulo de parede de 90° . Da equação apresentada na Figura 4, a espessura final da parede deve ser igual à espessura inicial, uma informação contraditória do que se sabe sobre o SPIF, em que a espessura tende a diminuir com o incremento do ângulo.

Dessa forma é importante definir o ângulo de parede, α , de cada material, pois é fator determinante para a obtenção de certas geometrias como, por exemplo, cônica. Para cada material existe um ângulo máximo possível de ser atingido, definido como α_{max} . Isso é importante quando se adota algum dos métodos de adequação de trajetórias propostos, isto é, muitas vezes, ao se corrigir uma trajetória de acordo com um parâmetro, as características do próximo passo podem ser alteradas: tamanho do passo e ângulo, principalmente. Em alguns casos, o *software* que realiza o cálculo de correção pode pedir por um ângulo maior do que ϕ_{max} , o que resultará em falha, fratura da peça. O ângulo de parede, α_{max} , é muitas vezes utilizado como um parâmetro de definição de manufatura do material, sendo que para metais varia, geralmente, de 60° a 75° .

Da lei do seno, nota-se que não há uma dependência direta da espessura final com o tamanho do passo vertical. O passo como parâmetro de processo tem um papel mais complexo do que predito pela lei dos senos. Será mostrado adiante que o passo é um parâmetro importante e com vários desdobramentos no tempo de fabricação, na capacidade de deformação e no acabamento da peça.

2.5.2. Equilíbrio de Membrana

Uma completa análise de membrana foi feita por Silva, Skjoedt e Martins (2008). A Figura 5 mostra os diagramas de forças elaborados pelos autores.

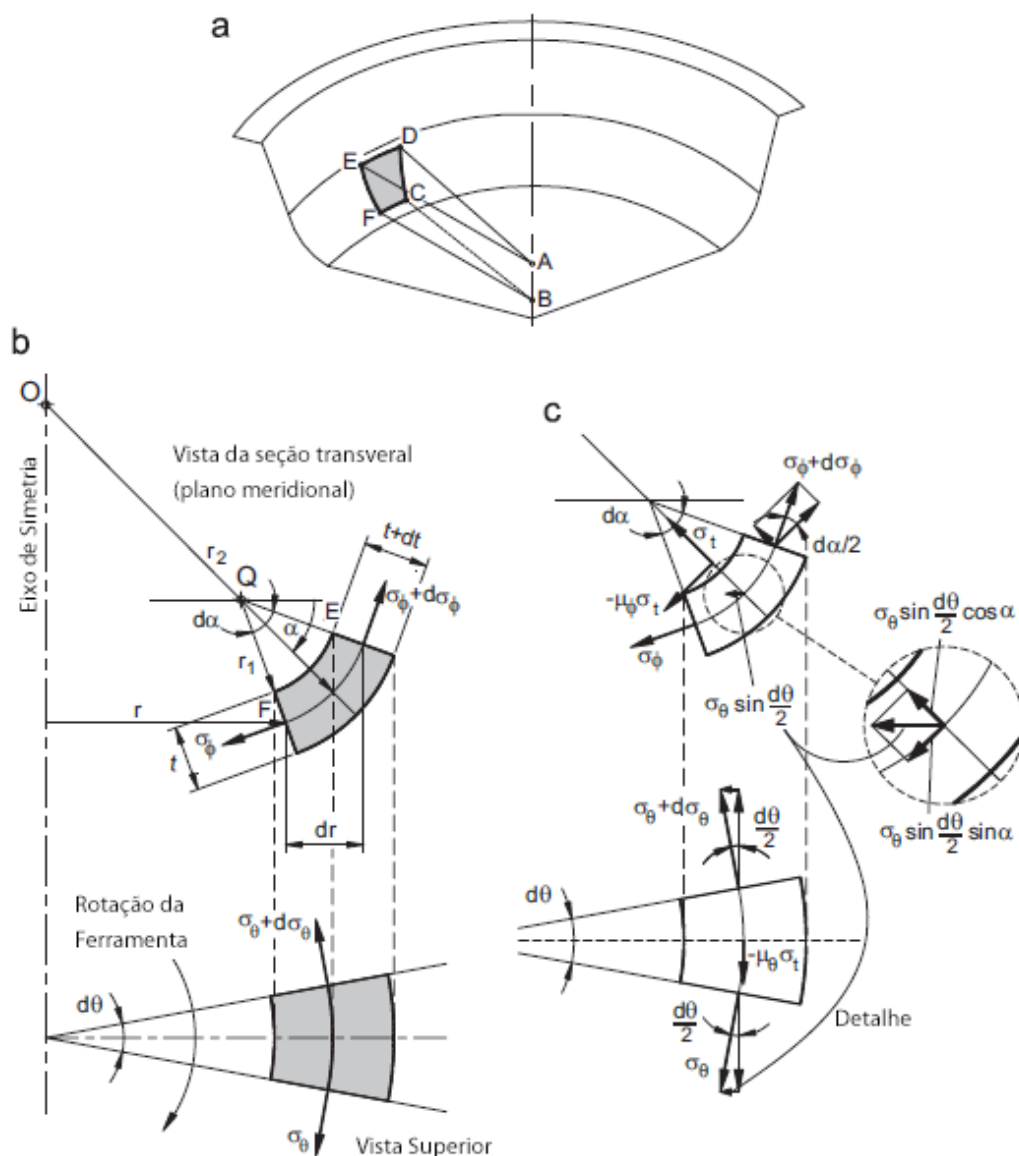


Figura 5 - Diagrama de esforços do processo de SPIF: (a) representação esquemática de uma peça que já sofreu o processo, com destaque para o elemento CDEF do tipo *shell*, em perspectiva; (b) representação esquemática de um elemento do tipo *shell* ao se cortar o desenho (a) por um plano meridional – observe as letras representativas de vértice ‘EF’ nas duas Figuras; (c) detalhe de (b) mostrando os esforços atuantes. Fonte – Silva, Skjoedt e Martins (2008).

Considerações feitas para a análise de plasticidade dos elementos deformados são: desconsiderar os momentos de flexão e, devido ao eixo de simetria, as tensões circunferencial

(σ_θ), meridional (σ_ϕ) e ao longo da espessura (σ_t) serão consideradas como as principais. Além disso, o material é considerado como perfeitamente plástico, isotrópico e a força de atrito resultante é composta por duas componentes no plano: $\mu_\phi \sigma_t$ – componente meridional, devido ao passo vertical da ferramenta – e $\mu_\theta \sigma_t$ – componente circunferencial, devido ao movimento circular da ferramenta, combinado com a velocidade de rotação. A maneira ideal de modelar o atrito, já que ambos coeficientes dependem da mesma tensão, é pelo uso de um coeficiente resultante, μ , que é a raiz quadrada da soma dos quadrados de μ_θ e μ_ϕ , eq. (2):

$$\mu = \sqrt{\mu_\theta^2 + \mu_\phi^2}. \quad \text{eq. (2)}$$

Onde μ_θ , μ_ϕ e μ são os coeficientes de atrito nas direções circunferencial e meridional e resultante, respectivamente.

2.5.3. Modo de Fratura

Silva, Skjoedt e Bay (2009) estudam o comportamento de falhas em diferentes formatos de superfícies. Os autores verificam que há três padrões superficiais distintos que apresentam determinado tipo de modo de falha. Os três tipos de superfícies podem ser verificados na Figura 6: a superfície A, caracterizada por sua forma plana em que se atua um estado plano de deformações – isto é, deformação na direção da espessura da chapa é nula; superfície B, caracterizada pela simetria ao longo do eixo de rotação da ferramenta e que também sofre um estado plano de deformações; e superfície C, um canto que sofre deformação bi-axial, isto é, os esforços em duas das principais direções é de mesma magnitude, podendo, também, sofrer deformação ao longo da direção normal aos esforços. A Figura 6 apresenta imagens de falhas típicas das áreas destacadas.

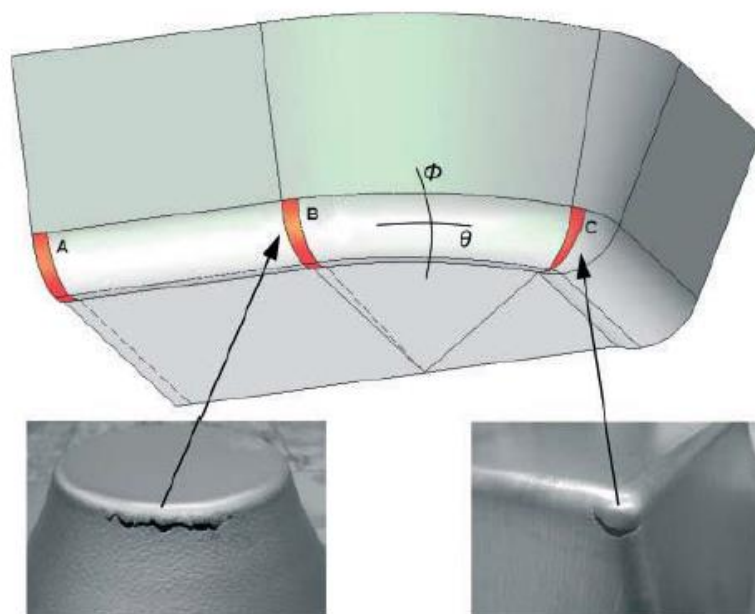


Figura 6 - Representação esquemática das superfícies e das fraturas recorrentes. Fonte - Silva, Skjoedt e Bay (2009).

Da área de resistência dos materiais, sabe-se que a anulação das forças cisalhantes – ou cortantes – é uma consequência do estado principal de tensões. Logo, ao se deixar de lado os momentos de flexão, os autores desconsideraram os esforços cisalhantes e, com isso, puderam utilizar a consideração descrita.

O passo seguinte é o de análise do tipo de falha. Silva, Skjoedt e Martins (2008) realizaram estudo sobre o tipo de fratura recorrente no processo de SPIF, geralmente na zona de transição entre a parede inclinada e a região ainda não deformada da chapa. Os autores verificaram que o tipo de fratura é causado pela tensão meridional (σ_ϕ) (Figura 7), isto é, pelo modo I de fraturas mecânicas (abertura), ao invés de tensão de cisalhamento plana (modo II). Essas observações permitiram a conclusão de que a fratura no processo de SPIF para cones simétricos – como o mostrado na Figura 7 – é similar àquela encontrada nas estampagens profunda e convencional.

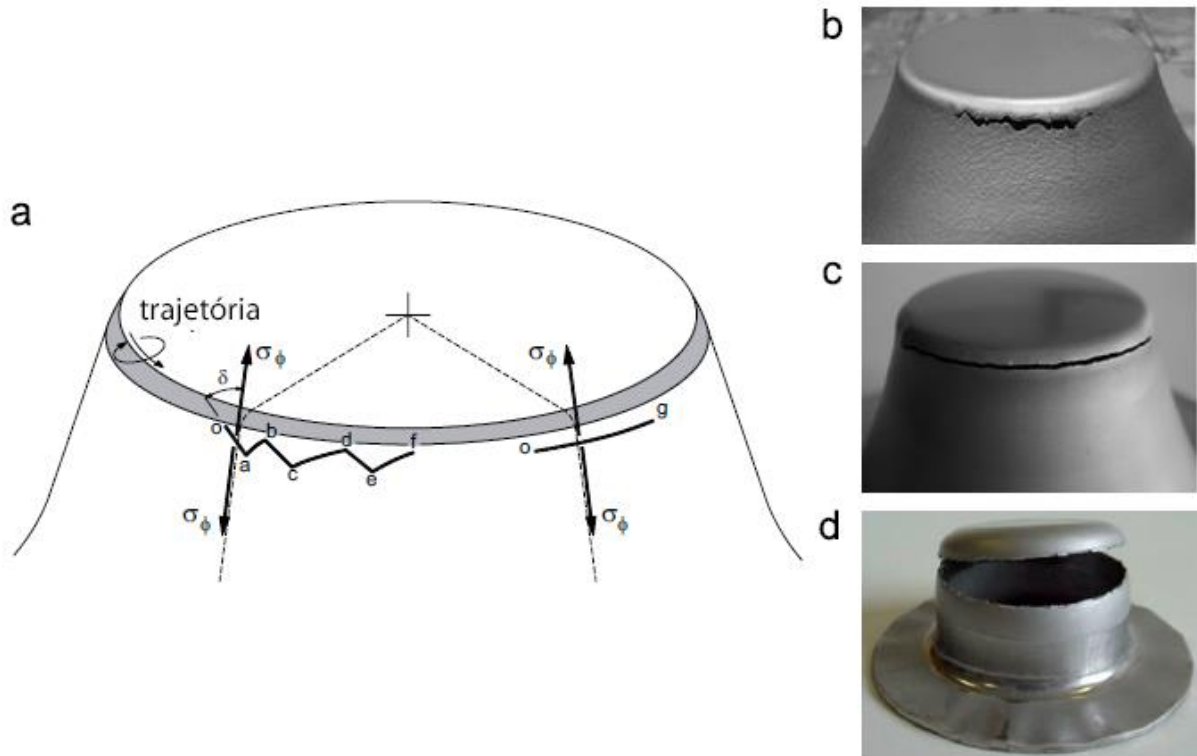


Figura 7 - Propagação de trinca no processo de SPIF. (a) ilustração das propagações recorrentes da fratura devido a tensões meridionais. (b) Fratura circunferencial em zig-zag. (c) Fratura circunferencial reta. (d) Fratura circunferencial reta proveniente de um processo de estampagem profunda Fonte – Silva, Skjoedt e Martins (2008).

A Figura 7 mostra dois tipos de trajetória da trinca. Na Figura 7 (c), a fratura encontrada é a mais próxima possível àquela presente em estampagem profunda, como é o caso da Figura 7 (d). Já na Figura 7 (b), a fratura é propagada em formato ‘zig-zag’. Silva, Skjoedt e Martins (2008) propuseram duas explicações para esse fenômeno pouco esperado. A explicação mais plausível é que o movimento de vai-e-vem é provavelmente por causa de fricção com a ferramenta rotativa: o ponto de velocidade neutra, no centro da ferramenta e que descreve uma linha ao decorrer do processo, pode causar a propagação da trinca após o início da trinca em ‘o’ a um ângulo ‘ δ ’ com a direção da tensão meridional. Essa propagação de trinca se estende até o ponto ‘a’, fora da zona de deformação plástica observada na Figura 7 (a), uma região em que apenas deformação elástica atua, resultando assim na parada de propagação da trinca. Com o movimento circular da ferramenta, essa falha é trazida até o ponto ‘b’, onde a quantidade de tensões aplicadas é de semelhante magnitude ao ponto ‘o’, o que faz a propagação da trinca voltar a acontecer. Esse mecanismo se estende até que o dano atinja limites críticos, culminando na falha da peça, no ponto ‘f’.

2.5.4. Estado de Tensão e Deformação

Após o estudo sobre equilíbrio de membrana no processo e de modo de fratura, Silva, Skjoedt e Martins (2008) dá continuidade ao estudo de tensões no elemento que sofre deformação instantaneamente, elemento representado pela aresta BC da Figura 8.

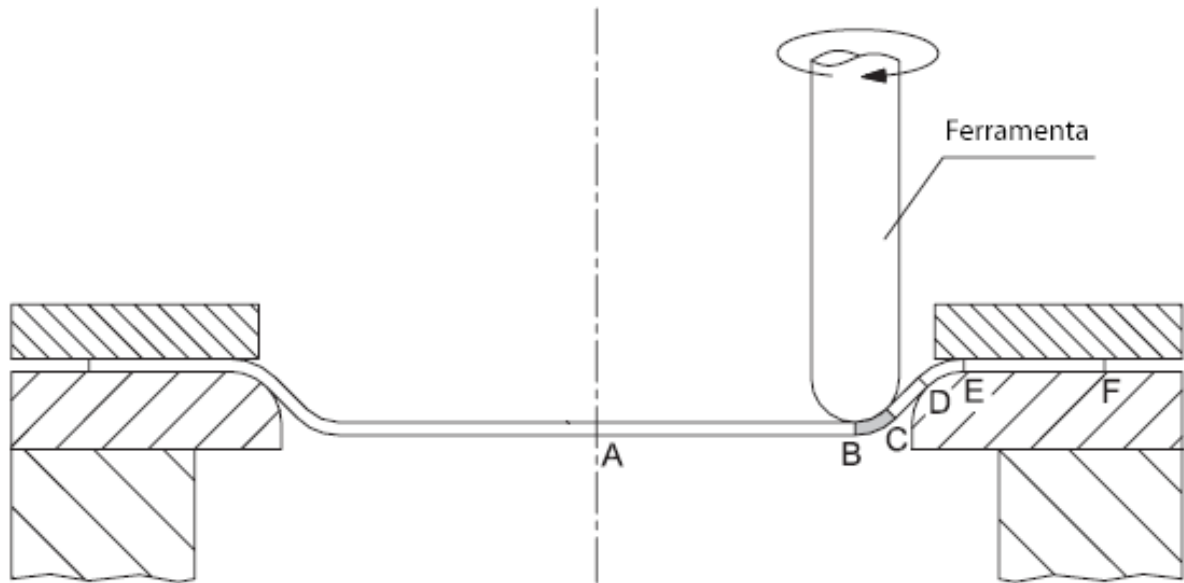


Figura 8 - Representação esquemática do elemento BC que é analisado nesta seção.
Fonte – Silva, Skjoedt e Martins (2008).

Do equilíbrio de membrana resulta uma relação simples entre as três tensões (meridional, circunferencial e ao longo da espessura) com a dimensão característica respectiva. Desta relação, aplicando as condições da chapa do processo ilustrado pela Figura 8, chega-se numa relação apenas entre a tensão ao longo da espessura e da meridional, sendo que o raio da ferramenta é a única variável (eq. (3)). Considerando que a tensão ao longo da espessura é igual – em magnitude, mas de sentido contrário – à pressão exercida pela ferramenta, então, ambas tensões podem ser escritas como função de duas variáveis em comum: raio da ferramenta e pressão de contato.

$$\sigma_t = -\sigma_\phi \frac{t}{r_{ferramenta}}; \sigma_t = -p \quad \text{eq. (3)}$$

Onde σ_t é a tensão ao longo da espessura, σ_ϕ é a tensão meridional, t é a espessura da ferramenta, $r_{ferramenta}$ é o raio da ferramenta e p é pressão atuante na ferramenta – provindo do cabeçote.

Além dessas duas considerações, é retomada a premissa de estado plano de deformações, resultando na eq. (4), para a tensão circunferencial:

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_t + \sigma_{\phi}) \quad \text{eq. (4)}$$

Onde σ_{θ} é a tensão circunferencial.

Com o desenvolvimento das três tensões e adotando a consideração feita na seção anterior, as tensões principais $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ são, na verdade, as tensões meridional, circunferencial e ao longo da espessura de peça $(\sigma_{\phi}, \sigma_{\theta}, \sigma_t)$, sendo que a primeira é positiva, a última é negativa e a segunda é, também, positiva, por conta da tensão ao longo da espessura ser muito menor do que a tensão meridional (em valor absoluto), como pode ser concluído da eq. (3) e resultando na eq. (5).:

$$\sigma_{\phi} = \frac{\sigma_Y}{\left(1 + \left(\frac{t}{r_{ferramenta}}\right)\right)} > 0; \quad \sigma_t = -\frac{t}{\left(1 + \left(\frac{t}{r_{ferramenta}}\right)\right)} \sigma_Y < 0 \quad \text{eq. (5)}$$

A diferença entre σ_1 e σ_3 deve ser constante, de acordo com o parâmetro de Tresca, e igual à tensão σ_Y , para materiais perfeitamente plásticos. Considerando um material que obedeça ao encruamento em forma potencial, então σ_Y deve ser respondido por $\sigma = K\varepsilon^n$, onde K é o coeficiente de resistência e n é o coeficiente de encruamento.

Com a obtenção das equações, Silva, Skjoedt e Martins (2008) concluíram que, ao se comparar com as tensões principais em estampagem convencional – essencialmente as mesmas, mudando apenas que as tensões circunferencial e meridional são aproximadamente iguais devido às características geométricas do processo –, um processo dominado por tensões hidrostáticas, como o SPIF – onde basicamente se tem o domínio de um estado plano de tensões –, a estampagem convencional tem um nível de tensão atuante maior que o SPIF, assim causando um crescimento mais rápido de dano acumulado, o que leva à falha da peça. Essa conclusão do autor explica, em linhas gerais, por que o processo de estampagem incremental possui um limite plástico maior do que estampagens profundas.

2.6. Limite Plástico do Material

Um material sofre maiores deformações antes de falhar por fratura quando submetido a processos de estampagem incremental quando comparado com estampagem convencional. Isso significa que um mesmo material originará peças mais versáteis quando submetido a ISF.

Uma explicação bem simples e direta pode ser obtida quando analisado o modo como o esforço é aplicado na deformação do material: em um processo convencional, o esforço aplicado pelo punção e suportado pela matriz é altíssimo e ocorre em questão de instantes. Já no processo incremental, como o próprio nome sugere, o esforço é aplicado lenta e constantemente em pequenas áreas por vez até atingir a peça por inteiro. Desse modo, o material tem tempo de recuperação e aceitação do esforço aplicado a ele, ocorrendo, inclusive, o retorno elástico do material, um efeito indesejado e que afeta no erro dimensional da peça.

A Figura 9 mostra um Diagrama de Limite de Deformação (DLD) para o alumínio AA 1050 -H111. Este diagrama é uma ferramenta crucial no entendimento do motivo pelo qual os processos ISF se deformam mais do que os convencionais. Neste diagrama são representadas duas curvas intrínsecas de cada material: a Curva Limite de Estricção ou Estampagem (CLE) e a Curva Limite de Fratura (CLF), sendo que a primeira curva é considerada como dependente da trajetória de deformação (isto é, o tipo de deformação e esforços) e a segunda, uma propriedade do material (ISIK, SILVA, TEKKAYA, 2014). A primeira curva representa uma aproximação para curva limite de deformação suportada por um material quando submetido à estampagem convencional, enquanto a segunda curva à estampagem incremental. Logo se observa a discrepância entre elas, sendo a estampagem incremental claramente mais vantajosa. Destaca-se, para o diagrama, o uso de deformação verdadeira, isto é, os valores exibidos no gráfico são obtidos ao se fazer o logaritmo natural da razão entre o comprimento final (ao falhar) pelo comprimento inicial na respectiva direção.

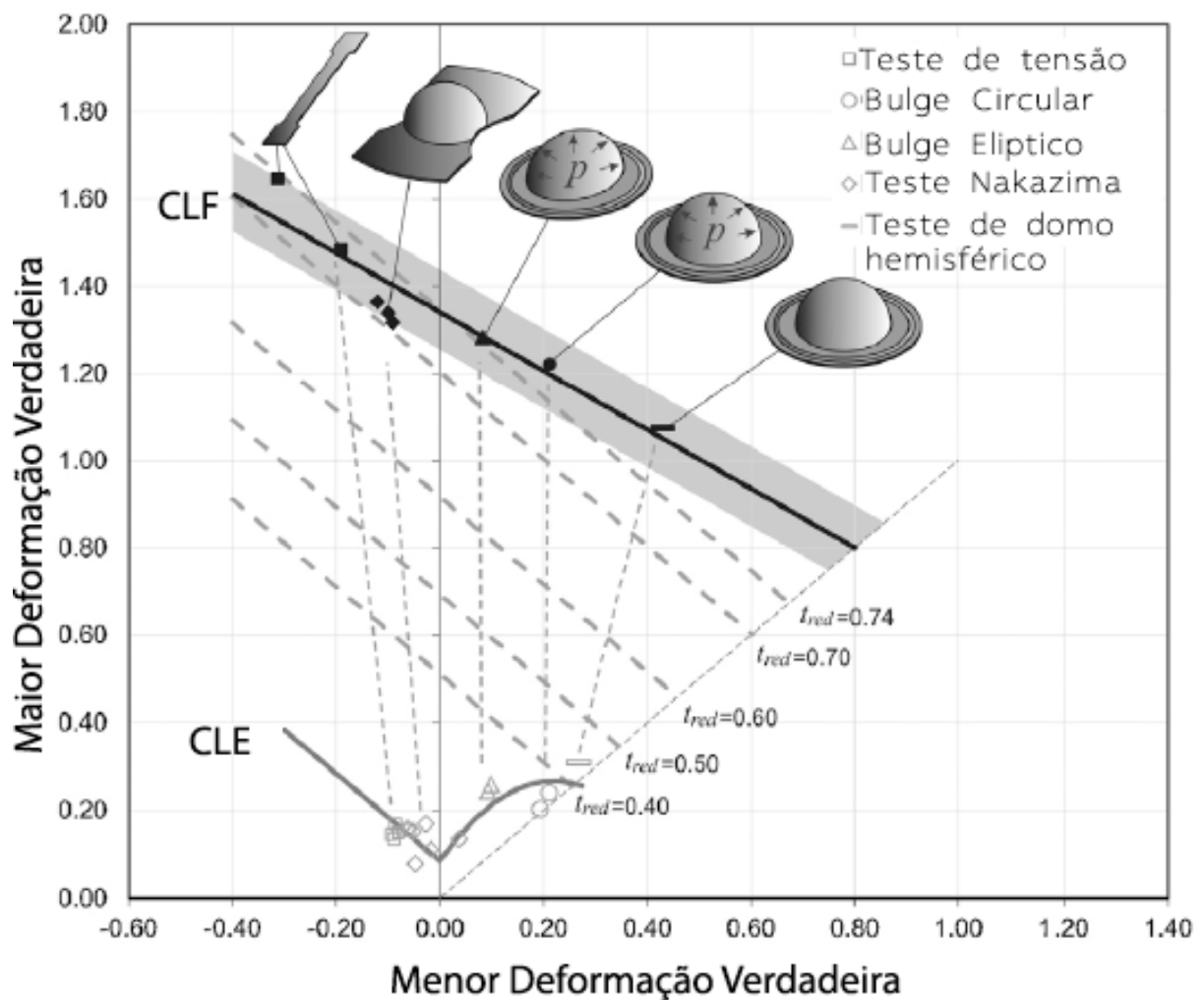


Figura 9 – Diagrama Limite de Deformação (DLD) para o alumínio AA 1050-H111.
Fonte – Isik, Silva, Tekkaya (2014)

Na verdade, o diagrama da Figura 9 deve ser analisado e estudado com cautela: é um pouco traiçoeiro para engenheiros sem prévio conhecimento. Qualquer material não deformado começará um processo de fabricação na origem, no '0' do diagrama. Ao ser aplicado um esforço gradativo sobre ele, sofrerá uma deformação contínua que não passará grandes alterações, ou seja, suportará deformações em taxas proporcionais entre as direções, resultando numa reta, com inclinação constante até a curva de CLE. A partir desta curva, o material sofre uma diminuição na espessura, o empescoamento, semelhante ao que ocorre em um teste de tensão uniaxial para um material dúctil quando atingido o escoamento. O que se observa é que, para processos convencionais de estampagem, a falha por fratura estará muito próxima deste valor, sendo que muitos pesquisadores consideram a curva de fratura como paralela à CLE, de mesmo formato, apenas um pouco acima da curva original. Para processos incrementais, no entanto, as deformações continuam até a CLF, mudando

ligeiramente a inclinação da reta. Essas retas e o modo de como variam podem ser verificados na Figura 9. Nota-se que pode haver caso de falha da peça sem o estiramento, como por exemplo, para o limite do diagrama à direita, quando as duas deformações são iguais, ou seja, para o caso de tensão bi-axial, comprovado experimentalmente (EMBURY; DUNCAN, 1981).

A obtenção dessas duas curvas é trabalhosa, requerendo vários experimentos para se determinar um conjunto de pontos de onde se possa traçar por regressões, por exemplo, uma curva ideal. Como pode ser discernido da Figura 9 e da explicação anterior, cada tipo de esforço causará uma característica, uma trajetória de deformação. Assim, para causar diferentes tipos de esforços, são necessários diferentes tipos de testes, metodologias e equipamentos, tornando ainda mais complicado e trabalhoso a obtenção dos dados. Os testes feitos para o experimento da Figura 9 são: teste de tensão uniaxial, teste de Bulge Circular e Elíptico, teste de Nakazima e de domo hemisférico.

Isik, Silva e Tekkaya (2014) propõem, em um trabalho extenso e completo, o estudo e experimento de um novo parâmetro de conformabilidade do material, complementar à CLF, e por consequência ao DLD, em um campo ainda não abrangido por tal: a de falha por cisalhamento.

Isik, Silva e Tekkaya (2014) definem o conceito básico desse novo parâmetro, o qual eles chamaram de Curva Limite de Fratura por Cisalhamento (CLFC). Segundo os autores, a base da curva CLFC é composta por dois fatores: o limite de distorção γ e o máximo trabalho de cisalhamento plástico por unidade de volume, $\int \gamma d\gamma$, na região da fratura.

A forma final do DLD proposto pelos autores é um Local – ou Localização – da Fratura. Na Figura 10 pode ser visto o DLD completo do mesmo alumínio da Figura 9, AA1050-H111. Nela, vê-se que os autores optaram por confeccionarem a curva CLF com o processo de SPIF, enquanto para CLFC, utilizaram um teste desenvolvido em que a metodologia pode ser encontrada no artigo em questão. Sobre a curva CLF, foi utilizado duas geometrias de peça, uma cônica e outra piramidal, sendo que apenas dois testes são necessários, devido ao fato da CLF se tratar de uma reta. De forma semelhante, sabendo que a CLFC é uma reta – premissa feita a partir do embasamento teórico do artigo –, apenas dois testes são necessários na sua determinação. A linha tracejada no diagrama abaixo é a CLD do mesmo material obtida por testes convencionais de conformabilidade, como os testes apresentados pela Figura 9. Nota-se uma discreta variação no coeficiente angular da reta.

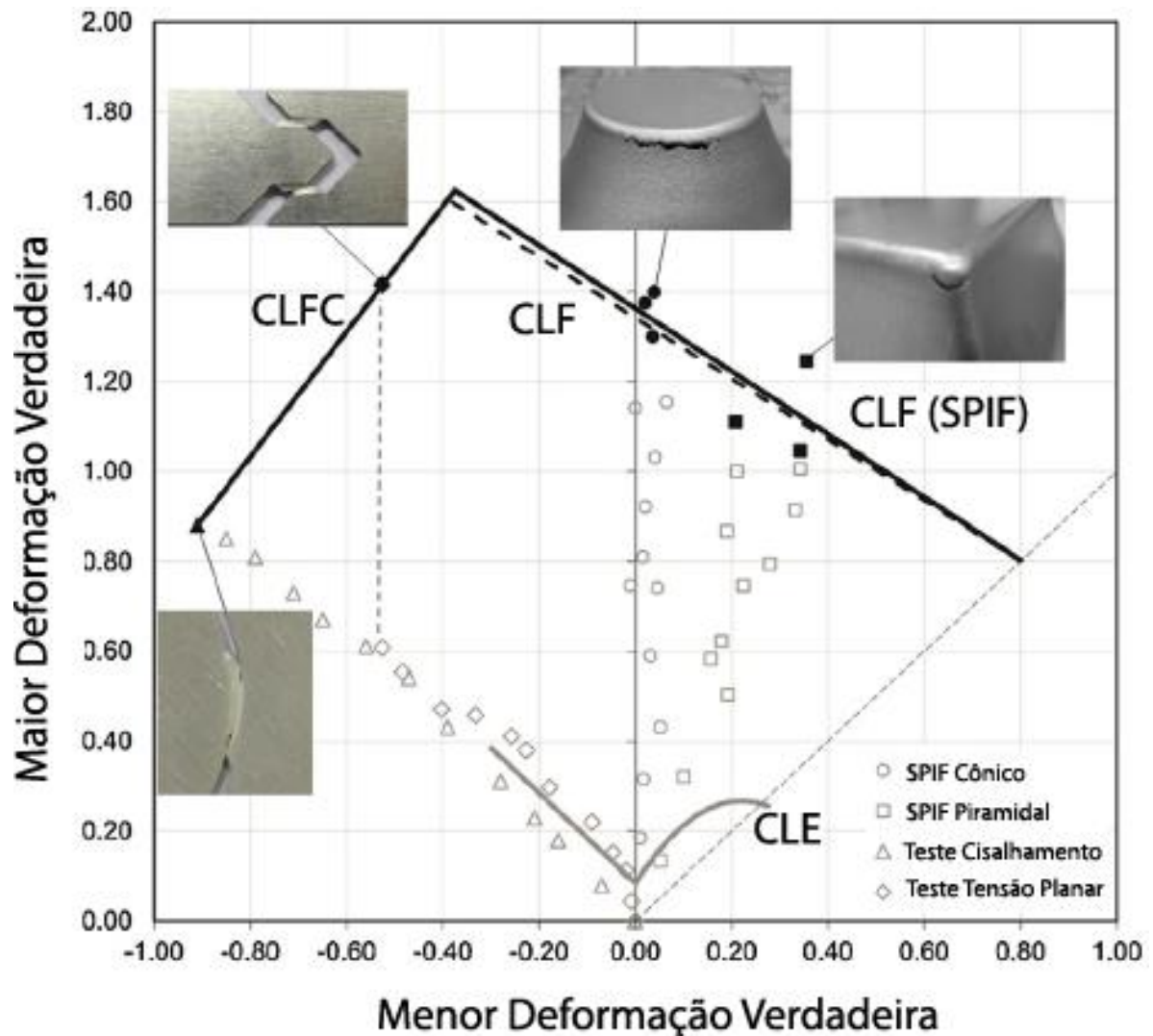


Figura 10 - DLD do alumínio AA1050-H111 com destaque para fotos das fraturas ocorridas nos experimentos realizados. Fonte – Isik, Silva e Tekkaya (2014).

A partir do embasamento teórico feito pelos autores, é possível inferir que as curvas CLF e CLFC possuem coeficientes angulares de -1 e 1, respectivamente. Logo, são ortogonais entre si. Os resultados obtidos experimentalmente, no entanto, diferem ligeiramente do previsto. Por esse coeficiente angular variar, os autores indicam o uso de pelo menos dois testes: se sabido que as curvas obedecem a regra '-1/1', apenas um experimento seria necessário para determinação das curvas. Os valores obtidos experimentalmente são -0,7 e 1,39 para CLF e CLFC, respectivamente. Isik, Silva e Tekkaya (2014) sugerem que essa variação para o valor previsto se deve principalmente às hipóteses adotadas para análise de membrana. Apesar desta variação, o resultado da multiplicação de coeficientes angulares é cerca de -1, o que significa que as retas são praticamente ortogonais entre si, mostrando a boa concordância com o predito teoricamente.

2.7. Parâmetros que Influenciam na Capacidade de deformação do Processo

Existem alguns parâmetros do processo que podem ser diretamente controlados a fim de obtenção de uma peça sem falhas, com rugosidade superficial e tolerâncias geométricas adequadas, isto é, com o objetivo de melhorar a capacidade de deformação, e no menor tempo possível. Serão destacadas as influências de: diâmetro de punção, passo vertical, espessura da chapa e velocidade do processo. Para tal análise, será comum se dizer que ao aumentar uma característica do processo, a capacidade de deformação aumentará ou diminuirá, espera-se do leitor entender o deslocamento das curvas de CLFC e CLF para cima e para baixo, respectivamente, e o entendimento inerente desse movimento das curvas.

2.7.1. Diâmetro do Punção

Como destacado por Jeswiet et al. (2005), um pequeno diâmetro do punção causa a concentração de forças em uma área ínfima, onde ocorrerá a zona de deformação plástica. Com o aumento do diâmetro do punção, no entanto, essa zona se expande e o processo se torna mais similar à estampagem convencional, reduzindo a capacidade de deformação do processo. O diâmetro da ferramenta também é importante na quantificação da força atuante no processo: com o aumento do diâmetro, a força atuante também cresce. Uma seção para a força atuante no processo será elaborada.

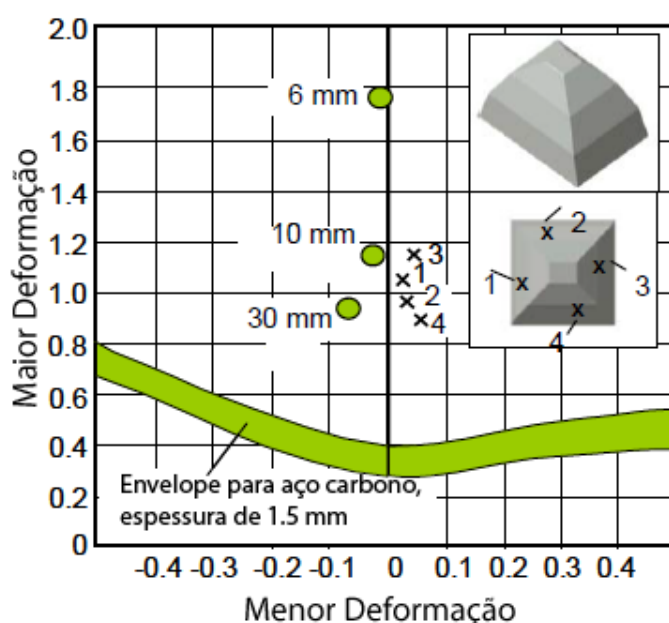


Figura 11 - Limite de conformabilidade para o aço DC04 utilizando diferentes valores para o diâmetro do punção. Fonte – Hirt, Junk e Witulski (2002).

Quantificação experimental do efeito do diâmetro do punção foi feito por (HIRT, JUNK e WITULSKI, 2002). Na Figura 11 é possível ver o experimento reportado na pesquisa, realizado com o aço DC04. Variando o diâmetro de 30 mm até 6 mm, isto é, de valores não praticados (grandes) para valores menores e praticáveis, a Figura 11 mostra um aumento muito considerável na capacidade de deformação do material, como predito.

2.7.2. Passo Vertical

Um dos parâmetros de maior campo para exploração a fim de se buscar melhor qualidade de acabamento é o passo vertical. Este parâmetro pode ou não ser fixo durante o processo, de acordo com a determinação do usuário. Ressalta-se que a implementação de passo variável não é de extrema simplicidade, geralmente utilizando algoritmos com programas matemáticos para sua certa implementação. No entanto, essa implementação traz benefícios na

Frequentemente associado ao passo vertical e por vezes utilizado como parâmetro de limitador no algoritmo de determinação de trajetória, o degrau originário do incremento em z, (Figura 12) é uma boa indicação sobre a qualidade superficial da peça. Attanasio, Ceretti e Giardini (2008) realizaram extensa pesquisa sobre os parâmetros de passo vertical e altura desses degraus. A conclusão obtida do trabalho é que a altura dos degraus se torna deveras importante quando há mudanças de geometria da peça (por exemplo, de uma face inclinada para uma face horizontal). A característica física de ondulações na superfície da peça cai com a diminuição da altura do passo. Também, baixos valores de altura desses degraus produzem uma superfície mais homogênea. Deve-se, no entanto, tomar cuidado com os benefícios de diminuição desses dois parâmetros pois causam um desequilíbrio com os tempos de simulação e fabricação da peça: ao serem diminuídos, a trajetória terá mais passes para a mesma altura final, tomando mais tempo de formação da peça. A efeito comparativo, para uma determinada geometria, reportam que o tempo de fabricação de uma peça foi de 4 minutos para passo vertical constante de 1 mm, contra 30 minutos para passo vertical de 0,2 mm e máximo degrau de 0,02 mm.

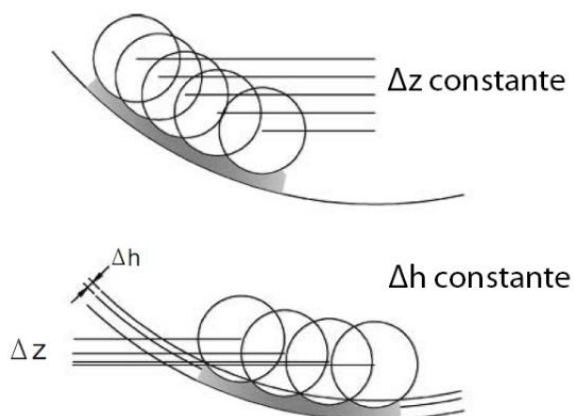


Figura 12 - Diferenciação do passo vertical (Δz) e da altura de degrau (Δh). Fonte – Aerens, Eyckens, e Van Bael (2010).

Jeswiet et al. (2005) e Attanasio, Ceretti e Giardini (2008) apontam que o valor para o passo vertical influencia na capacidade de deformação, além da rugosidade. Segundo Jeswiet et al. (2005), com o aumento do passo, a chapa sofre condições de deformações mais severas enquanto a capacidade de deformação decresce como consequência direta. Micari (2004) constatou que ao se decrescer o passo vertical, os incrementos da deformação sobrepostos em cada ‘loop’ também decrescem e qualquer ponto terá sobreposição de ‘loops’ vizinhos. Dessa forma, o punção prolonga a vida da fratura dúctil do material, melhorando capacidade de deformação do material. A Figura 13 apresenta, com dados obtidos experimentalmente, o efeito do passo vertical no Diagrama de Limite de Deformação. Note a diminuição desta com o aumento do passo, como predito teoricamente.

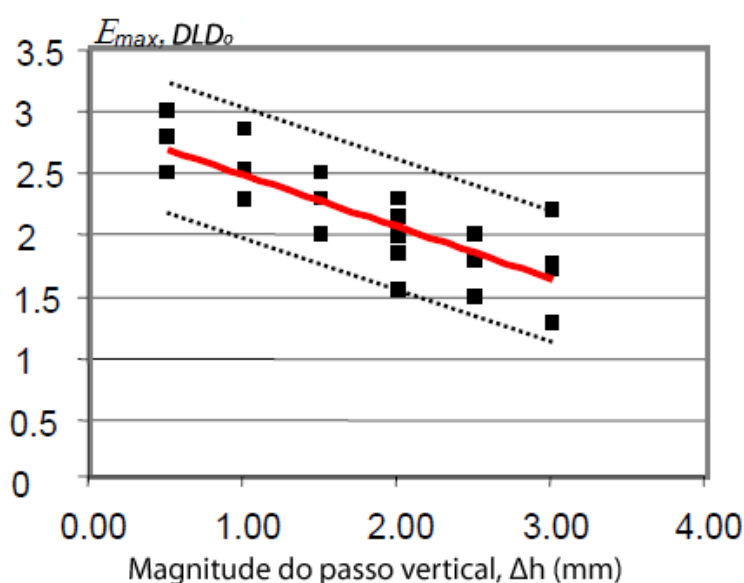


Figura 13 - Parâmetro de conformabilidade para o alumínio AA 1050-0 variando com o passo vertical, para um punção de 12 mm de diâmetro. Fonte - Micari (2004).

2.7.3. Espessura da Chapa

De um modo geral, observa-se o aumento da capacidade de deformação do material com o aumento da espessura da chapa. Uma explicação lógica, originada das Lei do Seno e de conceitos básicos de resistência dos materiais é que, para uma determinada espessura inicial, quanto maior o ângulo de parede necessário, menor será o valor da espessura final. Em algum momento, considerando apenas como a chapa resiste mecanicamente, a espessura da parede é tão fina que ocorre o rompimento da chapa por compressão ao longo da espessura.

2.7.4. Velocidade do Processo e Rugosidade

Existem duas velocidades atuantes em um processo de estampagem incremental como SPIF e TPIF, são elas: velocidade de avanço – expressa em mm/min – e de rotação da ferramenta – expressa em rpm.

A maioria dos pesquisadores emprega em seus experimentos velocidades de avanço em torno de 2000 mm/min, provavelmente pela própria capacidade da máquina. Hoje, a maioria das máquinas CNC apresenta excelente rigidez para altas velocidades, sendo que, por exemplo, o avanço rápido de um centro de usinagem da Romi é na casa dos 30 m/min, enquanto a rotação do cabeçote pode chegar até 10000 rpm.

Hamilton e Jeswiet (2010) publicaram sobre o efeito da alta velocidade de avanço e rotação na superfície e estrutura das peças fabricadas. O objetivo deste estudo foi de avaliar a viabilidade de velocidades de avanço entre 5080-8890 mm/min, de 2,5 a 3,5 vezes o tradicional, analisando a rugosidade por meio de medições e análise visual do efeito ‘Orange Peel’ (OP). Este defeito é superficial e ocorre quando, na formação de uma peça por estampagem incremental, a ferramenta só está em contato com um lado da chapa. O lado contrário ao de contato pode ficar com uma aparência rugosa, como o de uma casca de laranja.

Hamilton e Jeswiet (2010) desenvolveram um parâmetro qualitativo de medição do efeito OP. Determinou patamares relacionados a qualidade superficial, passando de ‘Nenhum’ (sem OP) até ‘Excessivo’. Utilizando essa escala, conseguiram relacionar com o parâmetro quantitativo, rugosidade equivalente, observando valores crescentes com o aparecimento do efeito OP, e com isso quantificar o efeito. Concluíram que uma relação S/F (rotação em rpm

por velocidade de avanço em mm/min) alta beneficia a superfície da peça, deixando-o a menos rugosa. Observaram também que, para S/F acima de 5, não há um contínuo benefício; que ao aumentar S/F acima de 5, haverá maior aquecimento localizado devido ao atrito, porém, não há substancial efeito sobre OP a partir desse ponto. De forma geral e final, destacam que, para efeitos na distribuição de espessuras, não há efeito negativo aparente devido à altas velocidades de deformação. Assim, o tempo de fabricação pode ser reduzido ao se utilizar altos valores para velocidade de avanço e rotação, desde que adotado alguns parâmetros propostos para evitar o aparecimento do efeito de OP e da alta rugosidade. Esses parâmetros podem ser verificados no artigo em questão. Ademais, os autores propõem uma equação, obtida por regressão dos dados de seus experimentos, que formula valores para rugosidade equivalente em função do passo vertical, velocidade de rotação (S) e ângulo de parede α .

De uma maneira geral, quanto à capacidade de deformação do processo, Micari (2004) destacam a possibilidade de aumentá-la relacionando diretamente com a velocidade de rotação. O aumento da capacidade de deformação é devido a dois fatores: um aquecimento localizado na chapa e minimização de efeitos friccionais na interface ferramenta-chapa. Deve-se, no entanto, ficar atento com o desgaste que se acentua devido ao aumento de temperatura, além da queima de lubrificantes.

2.8. Indicador de Conformabilidade dependente do Material

Hussain, Gao e Hayat (2009) trabalharam no desenvolvimento de um novo parâmetro para conformabilidade no processo de SPIF, o que eles chamam de '*spifability*'. O objetivo inicial da pesquisa foi o de revisar os efeitos do coeficiente de encruamento (fator '*n*'), elongação na fratura e coeficiente de resistência ('*K*') – fatores provenientes da equação $\sigma = K\varepsilon^n$ –, relatado por outros autores como os parâmetros de maior influência na '*spifability*', nesta ordem.

Para tanto, o autor realizou vários ensaios com diferentes tipos de materiais (alumínios, aços, titânio, bronze e cobre), onde se levantou vários dados e propriedades dos materiais. Correlacionados com esses dados foram algumas propriedades dos materiais: as três propriedades já relatadas e outras duas novas, sendo elas: deformação verdadeira e redução de área na fratura

Os resultados obtidos não foram animadores quanto às propriedades re-investigadas. Na verdade, os experimentos não apresentaram dados possíveis de se correlacionar: os pontos ficam dispersos e sem sentido, refutando trabalho anterior desenvolvido por Fratini et al (2004) que previu correlação entre conformabilidade do material com o coeficiente de encruamento do material (FRATINI, AMBROGIO, *et al.*, 2004). No entanto, quanto às duas novas propriedades investigadas, Hussain, Gao e Hayat (2009) obtiveram resultados com alto grau de significância: estabeleceram relação entre DLD_0 com deformação verdadeira e redução de área com coeficientes de determinação (R^2) de 0,8 e 0,92, respectivamente. Foi encontrado um polinômio de segundo grau que relaciona a redução de área com a conformabilidade do processo: logo, com as propriedades de um material, característica facilmente obtida através de banco de dados, Internet ou um simples ensaio uniaxial de tensão, é possível estimar, categorizar e ranquear um material na escala de '*spifability*'. A relação desenvolvida é apresentada na forma da eq. (6).

$$DLD_0 = -0.017A_r^2 + 3.022A_r + 63 \quad \text{eq. (6)}$$

Onde A_r é a redução na área quando ocorre a fratura, em porcentagem.

Como o estudo foi feito com vários tipos de materiais metálicos, praticamente todo metal obedecerá a eq. (6). No entanto, os autores sugerem novos estudos para testar a veracidade da fórmula sob outras condições de trabalho.

2.9. Força no Processo

Com um estudo já bem detalhado feito por Silva, Skjoedt e Martins (2008) sobre as tensões atuantes no processo de estampagem incremental, é possível a quantificação da força de deformação durante a trajetória. Esse parâmetro não é, no entanto, utilizado de maneira prática ao se realizar uma estampagem por dois motivos principais: falta-se praticidade na realização de medições de força – isto é, é necessário um aparato para medição da força –, e outros parâmetros são mais fáceis de se relacionar com a conformabilidade do material, como, destacado várias vezes neste trabalho, o ângulo máximo de deformação, que é facilmente medido.

Contudo, Aerens, Eyckens e Van Bael (2010) desenvolveram um trabalho pioneiro na predição de forças, através de medições experimentais. O objetivo da pesquisa foi de estabelecer uma fórmula prática capaz de estimar as três forças principais que ocorrem durante um processo de estampagem incremental com apenas uma ferramenta (SPIF). Para tanto, foram utilizados dados de vários experimentos que levavam em conta as condições de trabalho (espessura, ângulo de parede, diâmetro de ferramenta e passo vertical) para cinco diferentes materiais. Com isso, foi encontrado um modelo geral para qualquer material para as três forças o processo: radial e tangencial (planares) e axial, ao longo da ferramenta.

Cada parâmetro foi investigado individualmente. Por exemplo, utilizando um mesmo material, escolhe-se deixar todos os parâmetros constantes, exceto aquele que será estudado. Se, por exemplo, começado o estudo com a influência do ângulo de parede, apenas o ângulo sofrerá variação nesse estudo, sendo que a força será medida ao se realizar uma peça com ângulos de 20°, 40° e assim por diante, até se for necessário ou possível. Então, esses dados (que são apresentados em formato gráfico) são plotados em log-log (força pela variável investigada), sendo possível a observação de relações lineares entre os logaritmos.

Dessa forma, estabeleceram uma relação entre a força radial e a força axial de regime permanente. Para tanto, foram realizadas várias simulações em *software* de elementos finitos. A relação inicialmente proposta, dependente apenas dos ângulos de parede, degrau e *groove* (ângulo entre a ponta da ferramenta e o final do contato desta com o material). Quando testada, esta relação foi satisfatória para a maioria dos valores coletados, porém, não para todos. Assim, Aerens, Eyckens e Van Bael (2010) propuseram um polinômio de correção que leva em conta o efeito do material na relação de forças. Esse polinômio é de natureza bem

complexa – muito mais do que a relação proposta inicialmente – e varia sua forma para cada material.

Todos experimentos e modelos culminam no desenvolvimento de uma fórmula para força axial em regime permanente eq. (7). Esta fórmula foi testada e comprovada para materiais utilizados no estudo, isto é, os alumínios AA3003 e AA5754 (AlMg₃), o aço não ligado para estampagem DC01, aço inoxidável AISI 304 e o aço para mola 65Cr2. Para outros materiais, a relação é apenas sugerida: o único fator na fórmula que depende do material é a resistência à tração do material (tensão de ruptura), R_m , em N/mm².

$$F_{Z_s} = 0.0716 R_m \cdot t^{1.57} \cdot d_t^{0.41} \cdot \Delta h^{0.09} \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha) \quad \text{eq. (7)}$$

Os outros parâmetros utilizados são: a espessura t em (mm), o ângulo de parede α em graus, o diâmetro da ferramenta d_t em (mm) e a altura de degrau Δh em (mm), resultando na força axial em regime permanente F_{Z_s} , expressa em (N).

Sobre a eq. (7), nota-se a quantificação de características já observadas (ou tidas como premissas) do processo: a força aumenta à medida que a espessura, diâmetro da ferramenta e altura do degrau – relacionado com o passo vertical – aumentam, de maneira que o primeiro é o que tem mais peso, enquanto o último, o de menor. Característica essa é notada ao se comparar os expoentes dos respectivos termos. Também verifica que o material influencia de maneira diretamente proporcional.

A precisão da eq. (7) não é ideal, há certo erro cometido para uma quantidade significativa dos casos. O valor estimado do erro é de aproximadamente 15% para 77% do campo de aplicação da fórmula. Aerens, Eyckens e Van Bael (2010) afirmam que a eq. (7) pode e deve ser usada, mas, deve-se ter cuidado com o uso desenfreado desta equação. O fator força não é um parâmetro crucial nem limitante do processo, sendo que, geralmente, não há contraindicações de uso de máquinas CNC comuns para a estampagem incremental. Para estabelecimento de um processo de estampagem incremental, sugere-se estimar a força através da eq. (7) e verificar possíveis limitações mecânicas oriundas da máquina de usinagem.

2.10. Precisão e Limitações do Processo

As tolerâncias atingidas pelos processos de estampagem incremental ainda não são as desejáveis. Jeswiet et al (2005) constatam que os processos AISF, à época do estudo, não as apresentavam em uma faixa aceitável: enquanto a maior parte das peças em engenharia necessitam de uma tolerância menor do que 1 mm, sendo que peças feitas em grande escala frequentemente necessitam de medidas mais apertadas, algo como ± 0.5 mm, diversos autores reportam erros de, pelo menos ± 1.5 mm para peças simétricas e ± 2 mm para peças assimétricas, sendo que outros falam de ± 3 mm de desvios medidos. A expansão e melhoria dos processos de AISF para tolerâncias de 0.3 mm, com superfícies de 1 mm de raio possíveis de se fabricar em chapas de até 3 mm, seria interessante e viável para metade das aplicações de empresas de manufatura.

As dimensões máximas de uma chapa que sofrerá estampagem incremental são limitadas pelo envelope de trabalho da máquina CNC. Logo, essa chapa dificilmente passará de uma seção quadrada de 300 mm de lado, sendo que, muitas vezes, é ainda menor. Desta forma, um erro de poucas unidades de milímetro já é uma fração considerável, podendo até causar complicações em seu funcionamento. Considerando, por exemplo, uma peça de 200 x 200 mm com um erro característico de $\pm 1,0$ mm, o grau de tolerância padrão mais aconselhável é de IT15, segundo a norma NBR 6158. Porém, esse erro geralmente não será cometido nas dimensões máxima da peça, mas sim estará relacionada a espessura desta. Em uma chapa com espessura de 1,5 mm – um valor relativamente alto para o processo –, o grau de tolerância se torna IT17. Ambos graus são acima dos alcançados pelos processos tradicionais de fabricação mecânica, muitas vezes dificultando o uso de processos ISF em engenharia em escala industrial. À nível de comparação, uma furação atinge pelo menos o grau IT13. Uma das formas de controlar e contornar essa limitação é justamente a elaboração de trajetórias através de *softwares* e ferramentas matemáticas, assunto que será tratado futuramente neste trabalho.

Além da limitação devido ao envelope de trabalho, um parâmetro do processo tem peso especial na determinação da viabilidade ou não de um processo: tempo de projeto e de execução. Por enquanto, pelo ISF estar mais inserido no meio acadêmico, o tempo total de fabricação de uma peça ainda não foi vista como um limitador do processo, porém, diversos autores relataram suas experiências na simulação da peça – isto é, utilizando *software* de elemento finitos e prevendo a geometria final da peça com o desenho CAD original,

comparando também a geometria com os dois resultados anteriores através de escâner 3D do protótipo. Jeswiet et al. (2005) reportam alguns valores de tempo para simulações simples. Esses tempos ocorrem por volta de várias horas, geralmente se aproximando de 10h para problemas de tamanho médio.

Uma última limitação destacada é o ângulo máximo de parede, que é uma medida da capacidade de deformação do material. Quanto a este fator, não há um recurso que permita um amplo controle e aumento de sua versatilidade para estampagem incremental: deve-se sempre respeitar os limites de capacidade de deformação determinados pelo CLF e expressos pelo ângulo de parede.

2.11. Aplicações da Estampagem Incremental

Uma vez conhecido sobre uma boa quantidade de informações do processo, necessita-se de exemplos-estímulos de uso da tecnologia.

Já dito em seção anterior, SPIF e TPIF são frequentemente utilizados na realização de protótipos: No ramo acadêmico-universitário, times de Mini-Baja e Formula SAE são alguns desses usuários na manufatura de peças de formato chapa. Essas equipes são atraídas pela versatilidade do processo: por ser barato e simples: basta-se o desenho em *software* 3D e um *software* CAM para criação da trajetória: ferramentas que estão sob domínio dos estudantes de engenharia.

No âmbito profissional, destaca-se os usos feitos pela Honda para manufatura de apenas um capô do S800 e da fabricante alemã BMW que tem se utilizado da tecnologia para oferecer opções de customização dos seus carros para seus clientes.

Por fim, em um ambiente mesclado de engenharia, pesquisa tecnológica e área da saúde, os processos de estampagem incrementais estão sendo usados para fabricação de próteses internas. Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015) reportam o uso de próteses metálicas – geralmente feitas de materiais biocompatíveis como titânio – de tornozelo, céu da boca e parte de crânios humanos. Usualmente, essas peças são feitas utilizando o escâner 3D da pessoa.

2.12. Utilização de Outros Materiais

2.12.1. Introdução sobre Polímeros

Até agora tratou-se do processo de estampagem em chapas metálicas como aço, alumínio e, menos frequentemente, ligas de titânio, cobre e demais. Não se tratou, porém, do uso de materiais poliméricos termoplásticos. O uso de tais materiais expande as áreas de aplicação de estampagem incremental, possibilitando ainda mais o barateamento do processo.

Há poucos estudos sobre o modo como vários tipos de polímeros se comportam sob SPIF. A maior parte dos autores e trabalhos sobre polímeros são destacados a seguir. Destaca-se apenas recentemente o uso de materiais poliméricos começou a chamar a atenção. A estampagem incremental, herdando essa característica da estampagem convencional, ainda está fortemente ligada com materiais metálicos.

Um dos trabalhos mais completos sobre polímeros foi feito por Martins, Kwiatkowski e Franzen (2009). Neste estudo o autor analisou cinco polímeros termoplásticos com o objetivo de determinar a viabilidade do uso de cada material. Os cinco polímeros foram escolhidos para se representar todo o range entre cristalino (com alto nível de cristalinidade) até amorfo, sendo eles, na ordem: Polioximetileno (POM), Polietileno (PE), Poliamida (PA), Policloreto de Vinila (PVC) e Policarbonato (PC).

Os dados levantados das cinco amostras foram: tipo de estrutura (altamente cristalino até amorfa), densidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e tenacidade à fratura. A partir disso, o experimento consiste em analisar o máximo ângulo de parede como medida de conformabilidade do processo em função do raio da ferramenta, do ângulo de parede inicial e da espessura inicial da chapa. Foi quantificado o valor do retorno elástico do material para dois valores de ângulos iniciais. Além disso, foi analisado a variação da cor do corpo de prova de cada polímero quando submetido a um teste de tração. Mesmo não representando a estampagem incremental, é possível notar e quantificar a variação de cor, que está relacionada com a deformação e empescoçamento sofrido pelo corpo de prova. Os resultados experimentais não serão dissertados neste espaço: escolhe-se, porém, destacar o resultado compilado pelos autores, mostrado na Figura 14.

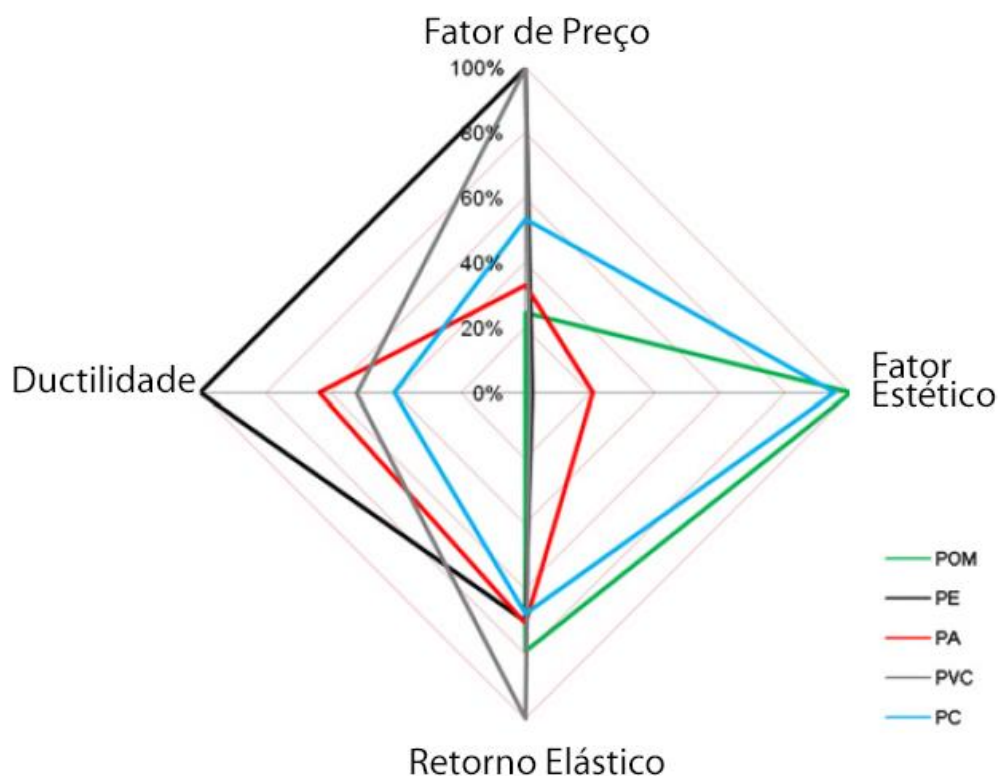


Figura 14 - Chart de materiais poliméricos quanto às suas características. Fonte – Martins, Kwiatkowski e Franzen (2009).

As indicações da Figura 14 foram organizadas de tal forma que as pontas representam os materiais de máxima qualidade em determinada característica. Por exemplo, os materiais mais baratos são PE e PVC; os materiais que menos sofrem alteração na cor são POM, seguido de PC; o PVC é o material que menos sofre retorno elástico; por fim, o PE apresenta o maior fator de ductilidade, significando que possui menor facilidade na propagação de trincas. Consequentemente, a conformabilidade do material aumenta à medida que o fator de ductilidade aumenta.

Os materiais mais indicados para o processo são PE e PA, adequados a paredes bem inclinadas. PVC, por possuir o menor retorno elástico, é indicado para peças com tolerância apertada, enquanto o PA deve ser evitado quando se deseja uma boa precisão: este material possui altíssimo valor de retorno elástico. PC, por apresentar pouca variação de cor, deve ser empregado quando a parte estética da peça tiver um grau de importância maior. Por fim, o POM, apesar de possuir valores bons em dois quesitos – retorno elástico e fator estético –, possui baixíssima conformabilidade, facilitando enormemente a formação de trincas. Por isso, deve ser evitado para o processo de SPIF (MARTINS, KWIATKOWSKI, FRANZEN, 2009)

2.12.2. Parâmetros que se diferem: Força e Temperatura

Um fator que não é estudado no processo de estampagem incremental é a temperatura. De fato, para chapas metálicas, o aumento da temperatura causado pela fricção é de baixa importância no processo: não há uma grande mudança nas propriedades mecânicas dos materiais para pequenas variações de temperatura: para garantir a fluência da estampagem, basta o uso adequado de lubrificante.

No entanto, polímeros são bem mais sensíveis a mudanças de temperatura. Como por um exemplo, o polímero PET tem temperatura de transição vítrea por volta dos 70°C. A partir dessa temperatura, o material, antes com aspecto vítreo, se torna borrachoso, mole, impróprio para seus usos gerais e, conseqüentemente, para estampagem incremental. Nesse âmbito, Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015) pesquisaram a influência da temperatura (e da força) na formação de uma peça feita de PVC.

Inicialmente, sobre a força, Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015) utilizaram a fórmula desenvolvida por Aerens, Eyckens e Van Bael (2010) para força – apresentada na seção correspondente –, para validá-la para o PVC. Porém, não obteve bons resultados, quando comparados aos valores medidos experimentalmente, de até 41%. Esse alto erro foi relacionado a três causas. Primeira, de que a equação fora desenvolvida para materiais metálicos, os quais possuem característica bastante diferentes dos materiais poliméricos. Segundo, a equação foi obtida através de experimentos em partes, geometrias, com ângulos constante de parede, enquanto Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015) fizeram experimentos de peças com ângulo variável. Finalmente, em terceiro, que o desenvolvimento da equação não levou em conta um parâmetro de processo, a rotação da ferramenta: esse fator foi deixado de lado no desenvolvimento feito por Aerens, Eyckens e Van Bael (2010) por não produzir influência significativa na força axial do processo. No entanto, para o PVC, como demonstrado pelas medições realizadas no trabalho, há influência da rotação da ferramenta. Segundo os autores, esse efeito, apesar de já ter sido observado por um deles, não foi reportado na literatura, não há estudos direcionados para o entendimento deste efeito. A explicação proposta no artigo é de que a força se relaciona com a variação da temperatura durante o processo de fabricação, já que é sabido que a carga necessária para deformação de um material polimérico cai com o aumento da temperatura.

Partindo da ideia inicial de se estudar a força atuante no processo de um polímero, chega-se à necessidade de estudo do efeito da temperatura. Para ilustrar a influência,

experimentos foram feitos e recordados com uma câmera especial termográfica. A Figura 15 apresenta o resultado que é possível tirar desta análise: a distribuição de temperaturas na peça de acordo com a condições especificadas.

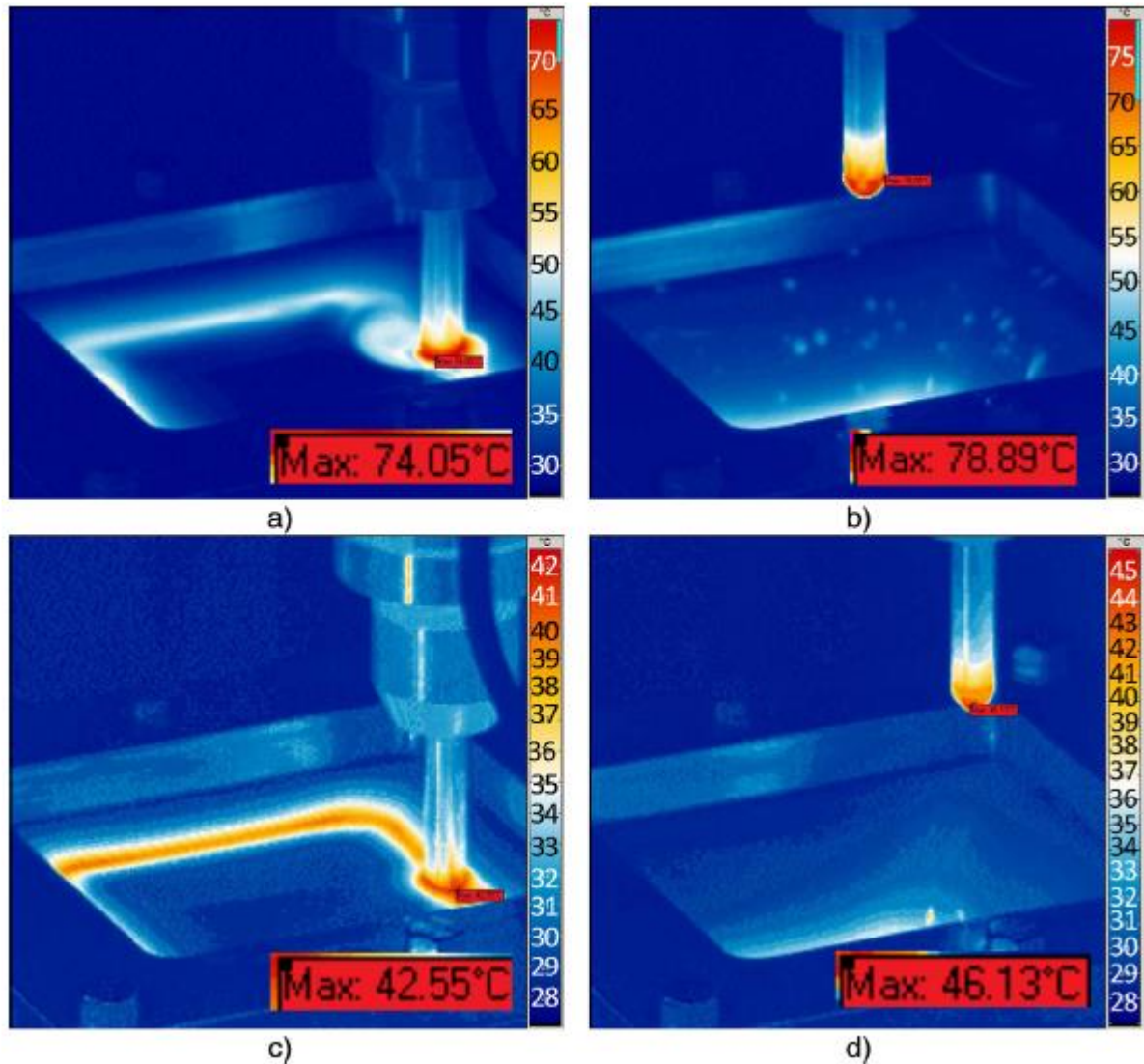


Figura 15 - Distribuição de temperatura para ponta da ferramenta e peça para as seguintes condições: (a), (b): durante e ao final do processo, com rotação da ferramenta em 2000 rpm. (c) e (d): durante e ao final do processo sem rotação. Fonte – Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015).

Nota-se que a temperatura nas Figuras 15 superiores (a) e (b) é maior, tanto na peça, quanto na ferramenta, do que no processo com rotação livre – o que significa que o cabeçote não transmite rotação para a ferramenta, não impedindo, porém, o punção de sofrer rotações devido a influências externas (atrito).

As medições de força feitas pelos autores estão em concordância com a consequência de uma maior temperatura no processo ao se utilizar rotação. Isto é, as medições de força para o caso que há rotação da ferramenta dão menores que no caso de rotação livre. A conclusão por parte dos autores é de que a rotação da ferramenta também influencia na força de formação necessária para manufatura de uma peça polimérica através de SPIF. A equação proposta por Aerens, Eyckens e Van Bael (2010) deve ser revista para atender polímeros. Para quantificar e ilustrar melhor o efeito da rotação na força exercida, é mostrado, na Figura 16, a evolução do esforço ao longo do processo para diferentes velocidades.

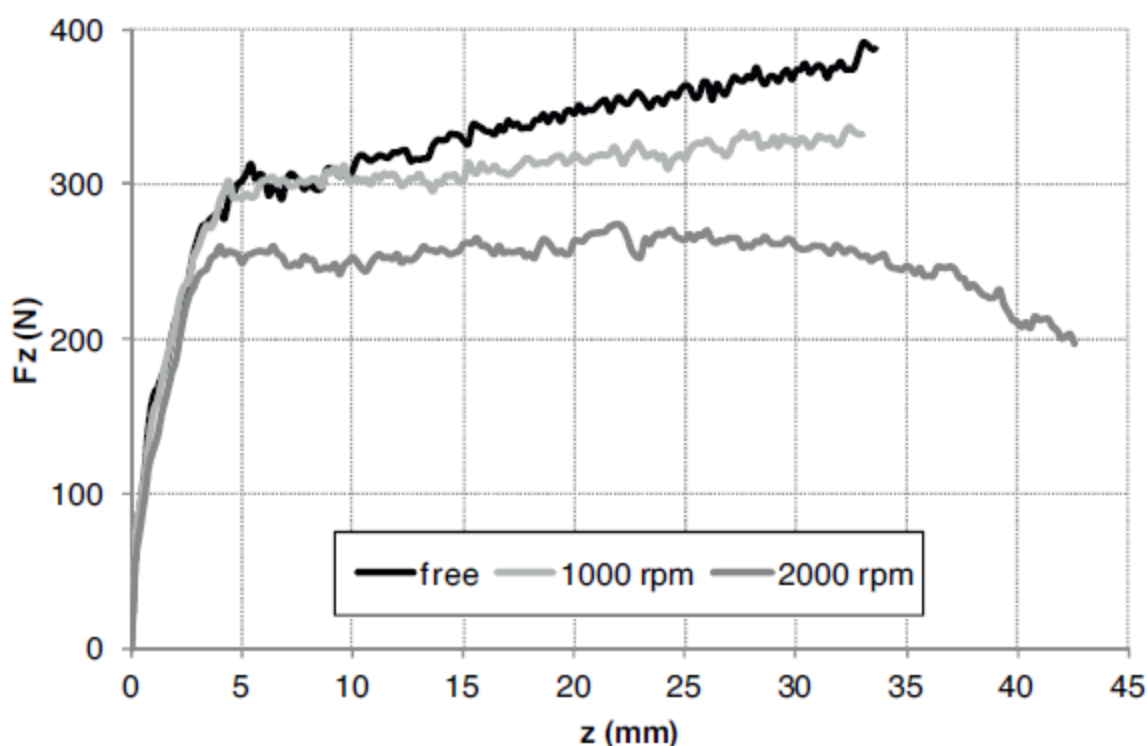


Figura 16 - Força medida ao longo do processo. Valores médios de vários experimentos.
Fonte - Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015).

Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015) reportaram algumas das limitações no uso de polímeros para estampagem incremental. Destacaram que, ao contrário do comportamento regular de metais e de demais polímeros, a conformabilidade do PVC aumenta com valores de passos vertical e velocidade de avanço maiores. Esse comportamento do PVC é exatamente o contrário do relato por outro autor para o polímero PP. Essa diferença para comportamentos pode estar relacionada com as propriedades de tribologia dos materiais

termoplásticos. Também, destacaram o fator de polímeros não apresentarem uma massa molecular constante, fazendo suas propriedades mecânicas diferirem enormemente.

Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015) destacam que, para um certo experimento a 2000 rpm, com 0.5 mm de passo vertical, diâmetro de ferramenta de 10 mm, espessura de 1.5 mm e velocidade de avanço de 1500 mm/min, a rugosidade verificada na peça foi a pior possível, sendo que foram identificadas bolhas nas superfícies. Esse fato é atribuído à alta temperatura atingida durante o processo, como pode ser visto nas Figuras 15 (a) e (b). A temperatura máxima detectada na peça foi de cerca de 79°C, bem próxima da temperatura de transição vítrea de 82°C, sendo esse dado uma média e suscetível a amplas variâncias. Como já dito, em temperaturas próxima à vítrea, o material perde a aparência de vidro e passa a ter aspectos borrachoso. No outro oposto, o experimento que apresentou melhor rugosidade foi feito com rotação livre, 0.2 de passo vertical, diâmetro de ferramenta de 6 mm, espessura de 2 mm e velocidade de avanço de 1500 mm/min. Além de algumas características que favorecem a menor rugosidade – diâmetro da ferramenta, maior espessura e menor passo vertical –, a grande influência se dá por conta da ausência de rotação do cabeçote. Como visto nas Figuras 15 (c) e (d), a temperatura máxima atingida durante processo é muito menor do que com rotação a 2000 rpm. Inclusive, é muito menor do que a temperatura de transição vítrea. Logo, o material, enquanto deformado, não sofre alterações significativas de comportamento mecânico, permitindo assim uma constância da aparência da superfície após feito o processo.

Em suma, o artigo de Bagudanch, Garcia-Romeu e Centeno (2015) traz algumas informações muito importantes e reveladoras sobre SPIF em polímeros quando analisados sobre a perspectiva de rotação da ferramenta. Para o caso específico do PVC, com o aumento da rotação, não só a força de formação diminuirá, como também a conformabilidade do material melhorará, mas piorará a rugosidade da superfície: todas essas variações estão ligadas com o aumento da temperatura ao se aumentar a velocidade de rotação, devido a um maior atrito na interface peça-ferramenta. Essa variação de temperatura faz com que o material sofra alterações nas propriedades mecânicas, que é a causadora das características relatadas. Atenta-se para o fato que, ao se escolher um polímero com maior temperatura de transição vítrea, como o PC, com T_g de cerca de 145°C, poder-se-ia trabalhar com rotações mais elevadas, aproveitando o aumento da temperatura para maior conformabilidade com uma rugosidade controlada.

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Até agora, foi realizada uma introdução, contextualização e teorização de processos de estampagem incremental, em especial o SPIF. A partir deste ponto, propõe-se um trabalho mais prático, envolvendo o uso de *software* de elementos finitos para simulação e análise comparativa de casos reais desenvolvidos em artigos científicos.

3.1. Proposta

Pouco se é informado pelos autores sobre suas simulações com elementos finitos. Informações são escassas, deixando o trabalho árduo para novos usuários da tecnologia. Pesquisas na Internet trazem muitas informações, mas dispersas por diversos de tutoriais e fóruns de CAE. O proposto por esse texto é trazer informação necessária para uma simulação, semelhante à que será feita, por um engenheiro ‘*end-user*’, em que este possa realizar simulações simples em seu computador pessoal, sem o uso de um cluster.

Frisa-se, primeiramente, que, apesar do objetivo ser a utilização em computadores pessoais, o autor de qualquer simulação deve ter em mente a natureza e ordem de grandeza de seu problema. O tempo necessário para uma simulação de um problema simples de estampagem incremental pode estranhar até os experientes usuários de CAE: como a análise é dependente da variável tempo, o método de resolução de um problema desses é explícito, ao contrário de simulações não variáveis no tempo, em que se pode usar métodos implícitos. Análises envolvendo métodos implícitos tendem a serem mais rápidos pois não são necessárias de serem calculadas para vários instantes, sendo que a carga é geralmente aplicada estaticamente ou quase-estaticamente, encurtando o tempo de solução do problema. Além disso, um problema de estampagem incremental envolve grandes deformações, análises que tomam longo tempo em *softwares* CAE.

O *software* mais utilizado para estampagem incremental pela comunidade científica é o LS-DYNA, baseado em dinâmica explícita e especialmente usado para problemas como colisões, impactos, penetrações, entre outros. Além disso, o valor de sua licença é menor do que os outros dois principais *softwares* CAE no mercado, que são o ANSYS e o Abaqus. No entanto, qualquer um dos três *softwares* é extremamente capaz de realizar tais as simulações necessárias, ficando ao leitor a escolha do programa que tenha mais domínio e facilidade ou

disponibilidade. Por vezes, os maiores problemas na convergência e tratamento de resultados se darão por conta do grau de conhecimento do usuário com o *software*.

Ao critério de disponibilidade, para a comunidade acadêmica, tanto ANSYS quanto Abaqus oferecem versões estudantis com limitado número de nós e elementos. São 32 mil nós/elementos para o ANSYS e mil nós para o Abaqus. Destaca-se que, apesar do número reduzido do problema para o Abaqus, este oferece todos os pacotes ao estudante, ou seja, sua versão completa, enquanto o ANSYS, oferece apenas alguns dos principais pacotes. O método de resolução pelo LS-DYNA, inclusive, é oferecido na versão completa do ANSYS, porém não consta na versão estudantil. Por conta da maior liberdade no tamanho do modelo, o *software* ANSYS foi escolhido para fazer tal análise deste trabalho.

3.2. Considerações e Passos iniciais

Escolhido o *software*, o primeiro passo deve ser o de estabelecer as características da simulação que a ser realizada. Para isso, procurou-se na literatura, um artigo com levantamento de distribuições de espessura da profundidade da peça. Estas informações foram encontradas em (MANCO, FILICE e AMBROGIO, 2011). Os autores fizeram análise de várias formas de trajetória em seu estudo. No entanto, o interesse será apenas voltado para os experimentos realizados em um único passe, isto é, com ângulo de parede constante. Vale notar que, também neste mesmo artigo, os autores apresentam dados de simulações numéricas obtidos com auxílio do *software* LS-DYNA.

A chapa usada para teste tem 1 mm de espessura, feita do alumínio AA1050-0, cujas suas propriedades mecânicas podem ser verificadas na tabela 1. O modelo de encruamento adotado para entrada de dados no ANSYS foi o de encruamento isotrópico, embora não sendo necessariamente o melhor modelo para o material. A versão utilizada do *software* não permitia o uso de um modelo anisotrópico. No entanto, é comum a utilização de isotropia no meio científico.

A geometria final da peça é um cone de 90 mm de diâmetro na base, com uma profundidade de 50 mm, com um ângulo de parede de 60°. A ferramenta tem diâmetro de 12 mm, enquanto o passo vertical foi escolhido como 1 mm.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do alumínio AA1050-O

Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Elongação na Falha	Coefficiente de Encruamento	Coefficiente de Tensão (MPa)
28	76	39%	0,14	111

O modelo físico do problema idealizado foi considerado como $\frac{1}{4}$ do problema real, isto é, aproveitando-se das características de simetria do problema real, e tendo em mente o alto custo computacional na simulação, adotou-se a frequente estratégia de diminuição do problema real pelos eixos de simetria do problema, que neste caso são dois. Assim, é possível a utilização de uma malha mais refinada e, conseqüentemente, de um resultado mais preciso. Aqui, deve-se comentar o fato observado por vários autores em literatura de que se é indicado a simulação do problema completo para estampagem incremental. No entanto, costuma-se fazer de tal modo quando há possibilidade de o material falhar, ao se utilizar um ângulo próximo ao limite máximo do material. Não se terá esta preocupação neste trabalho, visto que Manco, Filice e Ambrogio (2011) não enfrentaram problemas com falhas utilizando o ângulo de 60°. Assim, adota-se uma chapa ‘ $\frac{1}{4}$ ’ de 60 x 60 x 1 mm³ de dimensões.

3.3. Passos para Simulação

Os passos dados a seguir seguem a lógica da figura 17, um simples fluxograma elaborado com o objetivo de facilitar ao usuário iniciante o contato com uma simulação.

Antes da efetiva utilização do ANSYS, o usuário, uma vez selecionado o projeto, o produto final – seção anterior – tem a necessidade de elaborar os desenhos das duas peças mais importantes do processo: o punção e a chapa inicial.

Para tanto, foi-se utilizado o *software* SOLIDWORKS, embora, essencialmente, possa ser utilizado qualquer *software* de desenho de engenharia 3D. Ao fim dos desenhos das peças, o usuário deve fazer uma montagem, onde se é muito importante notar o posicionamento da ferramenta com a chapa. A partir desse ponto inicial é que se deve escrever toda a trajetória. A importação de arquivos no ANSYS não pode ser realizada com o formato de arquivo padrão para montagens do SOLIDWORKS: prefira salvar em .STEP.

Uma vez no ambiente do ANSYS, seleciona-se o módulo Explícito. A caixa de geometria deve ser importada e a montagem gerada no ambiente ANSYS. Define-se a seguir as propriedades dos materiais. Indica-se a criação da liga de trabalho (alumínio, titânio, etc) com dados reais ou do artigo a ser verificado. Muita atenção deve ser dada aos dados do material e, se necessário, estabelecido um critério de falha. Neste trabalho não se utilizou verificações de falha. O segundo material, da ferramenta, pode ser selecionado como aço estrutural, visto que será definido como rígido.

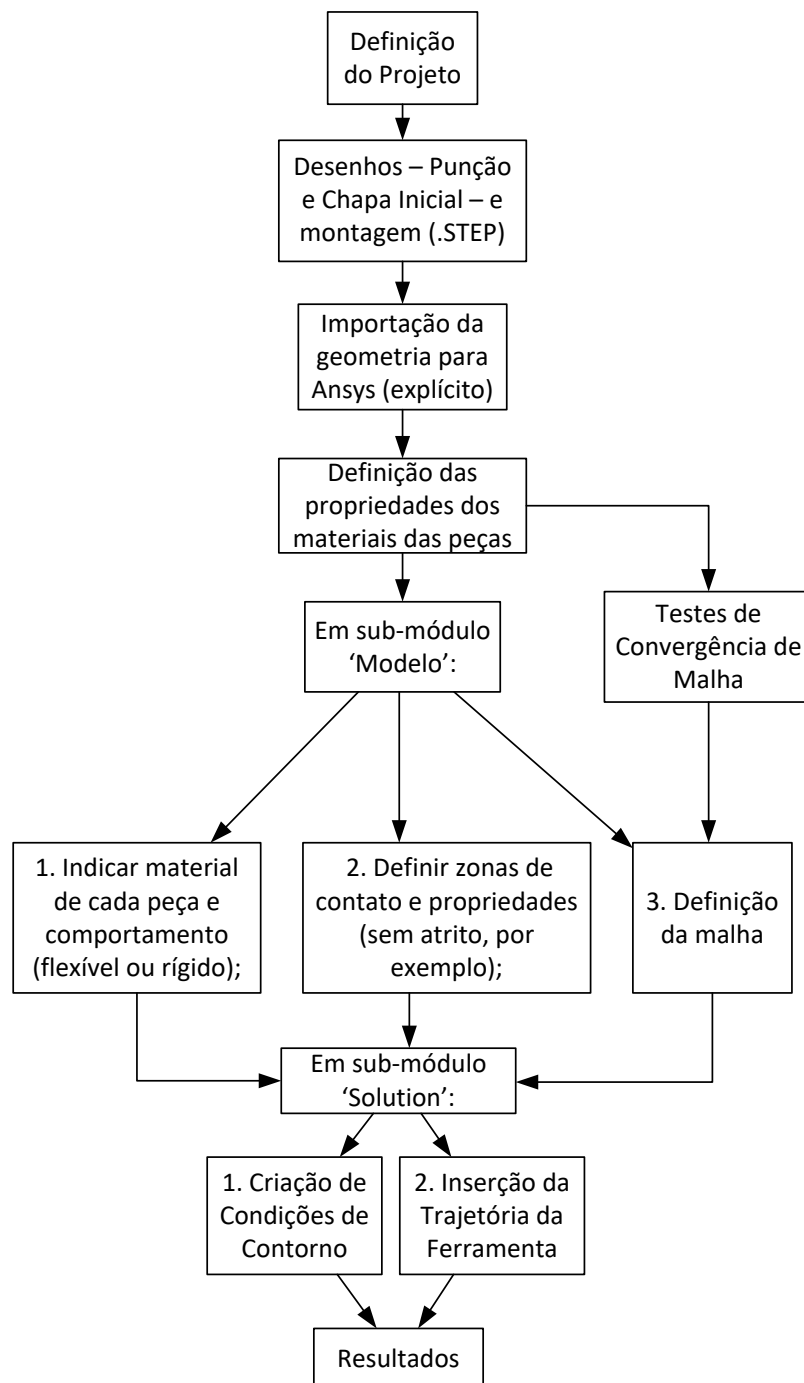


Figura 17 - Fluxograma sugerido como guia para simulação.

Com geometria e materiais definidos, pode-se entrar no sub-módulo de Modelo. Este sub-módulo é o mais importante e deve ser definido com cuidado. Primeiro, dentro de geometria, indica-se qual peça é feita de qual material e seu comportamento (flexível para chapa e rígido para punção). O segundo passo é de definição das zonas de contato entre chapa e ferramenta e sua natureza – sem ou com atrito. O terceiro passo é o de criação da malha. Nesta etapa, entra-se com valores que serão definidos com ajuda de testes de convergência (próxima seção). Ajusta-se o número de elementos necessário ao longo da espessura e o tamanho característico do elemento das outras duas direções. Deve também se escolher um tamanho de elemento para a ferramenta, podendo esta ter uma malha pouco refinada. Sugere-se também o uso de malha reduzida para elementos rígidos, a fim de ganhar eficiência computacional. Por fim, como o problema simulado é de contato e não linear, é indicado o uso de elementos finitos de primeira ordem, isto é facilmente passado ao ANSYS com a opção *dropped* para *Element Midside Nodes*.

Os próximos passos estão no menu de solução do ANSYS. Deve-se criar as condições de contorno e o deslocamento da ferramenta. Ambas são criadas de maneira semelhante, dentro do mesmo menu. A Figura 18 mostra as regiões onde devem ser aplicadas as condições de contorno. Para este caso, as regiões ‘B’ e ‘E’ são de suporte fixo e as regiões ‘C’ e ‘D’ são de simetria da peça, portanto, a única direção de restrição para elas são em ‘x’ e em ‘y’, respectivamente. Por fim, a condição A representa o deslocamento da ferramenta.

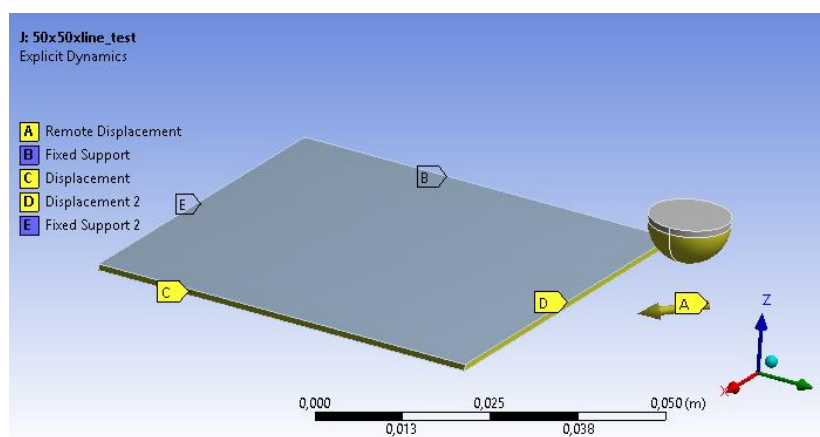


Figura 18 – Representação de todas as condições de contorno necessárias e deslocamento da ferramenta.

Uma vez com todos esses parâmetros definidos, o usuário será capaz de rodar simulações através do ANSYS. Nas próximas seções será discorrido sobre como definir uma malha adequada e uma trajetória satisfatória.

3.4. Confeção da Trajetória

Facilmente, um usuário pode utilizar *softwares* CAM para criação da trajetória da ferramenta. O *software* dá o código G da peça para fabricação em arquivo de texto. Esses dados são facilmente manipulados a fim de serem formatados numa planilha Excel, onde cada coluna é uma coordenada (t, x, y, z) e cada linha um ponto no espaço que deve ser atingido no determinado tempo. Dessa forma, com quase nenhum outro tratamento deste conjunto de dado, pode-se utilizar no ANSYS ou em outro *software* para definir a trajetória. Destaca-se que o ANSYS não toma mais tempo com o maior número de pontos, que a dependência de tempo de resolução do problema tem a ver com o tempo total de entrada do processo, isto é, o processo está descrito em 0.4 segundos e demorará 1h para simulação, não importando se há 100 ou 1000 pontos coordenados dentro deste tempo.

O proposto por este trabalho, no entanto, é a criação de uma trajetória através do Excel. Assim, o usuário terá mais domínio, mais expertise sobre detalhes do projeto. A criação da trajetória é simples: deve-se usar quatro colunas para coordenadas (t, x, y, z) e várias linhas para os vários pontos. Deve-se calcular a distância entre cada um desses pontos (dessas linhas) e dividi-la pela velocidade de simulação, a fim de dar o tempo necessário do incremento. A coordenada 't' é apenas um acumulativo deste tempo necessário em cada passe.

As demais coordenadas são mais complicadas: deve-se fazer uma trajetória completa ($\frac{1}{4}$ ou inteira circunferência) para cada valor de 'z', se a estratégia de manufatura é a permanência de 'z' constante a cada passo, isto é, a técnica de fresamento '2.5D', representada na Figura 19 (a). As coordenadas 'x' e 'y' devem ser escritas em função do raio (do centro da peça até o ponto de deformação) para a altura em questão. Aconselha-se determinar o valor deste raio para cada altura de cone e então utilizar 'x' e 'y' variando com o ângulo, com o percorrer da trajetória e dependendo do raio, que varia com a altura. A discretização da trajetória também é aconselhável: escolher um número grande de pontos para descrever a curva pode reduzir o erro (ao se aproximar uma curva com uma reta) sem causar um aumento no tempo necessário de simulação.

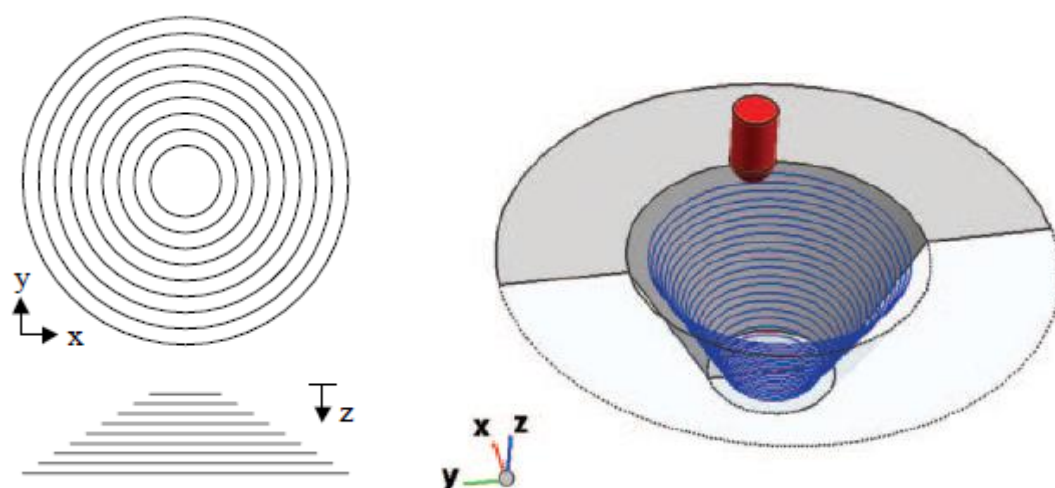


Figura 19 (a) - Representação simplista de uma trajetória do tipo '2.5D', com passo constante - Fonte Matsubara (1994). (b) - Representação esquemática de uma trajetória helicoidal com passo constante. Fonte – Manco, Filice e Ambrogio (2011).

Outro procedimento possível de ser realizado é a criação de uma trajetória helicoidal, em espiral, onde o passo da ferramenta é, geralmente, constante, como no caso anterior, porém o modo como é feito é gradual: a cada pequeno incremento espacial no plano, também se há um afundamento proporcional da ferramenta. Essa trajetória pode ser entendida com o auxílio da Figura 19 (b). Quanto ao modo de implementação, as duas trajetórias são simples e de fácil execução pela máquina CNC. Há, geralmente, melhores resultados (qualidade da peça final) para a trajetória helicoidal, por causa de uma maior suavização ao longo da trajetória. Por isso, esta é geralmente preferida como técnica de deformação.

Uma vez confeccionada a trajetória, é necessário a correção da trajetória da ferramenta. A Figura 19 (b) mostra como deve ser esta trajetória corrigida. O modo indicado aqui para se fazer a correção é contabilizar a correção apenas na direção radial. Isto é, corrigir o valor apenas no raio da trajetória e começar e terminar a trajetória axial normalmente. Dessa forma, a trajetória se tornará correta nas duas direções com apenas uma alteração. Note também que, ao se confeccionar a trajetória em função do raio e fazendo a correção nele, não se deve ter problemas com (x, y) descreverem uma trajetória circular. Isto é, se a correção for feita em 'x' quando o ângulo é 0° , ela terá papel inverso quando o punção estiver no meio da volta, no ângulo de 180° : corrigindo-se o raio, não se tem tal problema.

Testes de Convergência

O primeiro fator que deve ser entendido é o motivo da solução demorar várias horas. Uma das condições para convergência de resultados de um método explícito que deve ser satisfeita é a condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), apresentada na equação 8 para o caso unidimensional. Essa condição diz que, para obtenção de resultados que converjam, o incremento de tempo usado deve ser menor do que um valor crítico dado pela eq. (8):

$$\Delta t_c \propto L_{min} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad \text{eq. 8}$$

Onde Δt_c é o incremento crítico de tempo (s), L_{min} é o comprimento mínimo de elemento (m), podendo ser diagonal ou lado de um elemento, ρ é a densidade do material, em kg/m³ e E é o módulo de elasticidade do material (Pa). Observe que a raiz quadrada da densidade pelo módulo de elasticidade é o inverso da velocidade de propagação da onda no meio. A origem da equação 8 e mais informações podem ser acessadas pelo website (DYNASUPPORT, 2016).

É possível perceber que o resultado da equação 8 é, na verdade, consequência da escolha do material e da malha utilizada, dois parâmetros já adotados. Tomando os dados já definidos nesse trabalho e calculando o valor do tempo crítico, chega-se que o valor para o incremento de tempo é cerca de $3.95 \times 10^{-7} \text{ s}$. Com esse incremento crítico, um problema de 1 segundo necessita de cerca de 2.5 milhões de ciclos. A fim de evitar um problema demasiado grande, lento e custoso computacionalmente, há algumas alternativas que podem ser tomadas. Para adoção correta dessas alternativas, dois testes são empregados: teste em contato e teste em linha.

O teste de contato envolve apenas um aprofundamento da ferramenta em uma chapa pequena. Neste caso, foi empregado uma ferramenta de 12 mm com uma chapa de 12 mm de lado e 1 mm de espessura. As extremidades da chapa foram todas fixadas e o objetivo é analisar o comportamento das tensões, deformações e comportamento da chapa ao se variar o tamanho da malha. O teste começa com a ferramenta encostada no centro da chapa e termina com o aprofundamento da ferramenta em, neste caso, 3 mm, sem movimentos nas outras dimensões. Para criar a trajetória no ANSYS, basta o digitar as coordenadas destes dois pontos (0,0,0) e (0,0,-0,003) e calcular o tempo levado para este movimento na velocidade desejada.

Para realização do teste, várias simulações com malhas diferentes foram utilizadas e analisadas, tomando como referência a de malha mais fina e comparando os resultados encontrados em malhas menos refinadas. Os parâmetros de análise ficam a critério do usuário do programa. Neste trabalho foi analisado a tensão de Von Mises, a deformação equivalente plástica, o tempo de simulação tomado e uma análise visual meramente qualitativa. Destaca-se também que os testes foram realizados para duas velocidades verticais: 0,25 e 1 m/s. Ambas são tipicamente acima da velocidade do processo. No entanto, verifica-se (com o teste de contato e com o próximo teste) que a velocidade utilizada na simulação não tem grande influência sobre o resultado desta. Assim, pode-se utilizar conceitos semelhantes ao de escala de tempo.

As malhas analisadas foram confeccionadas com base nas configurações mais utilizadas por autores. Com dimensões características de elemento de 3, 2, 1.5 e 0.8 mm, resultando em malhas de 16, 36, 64 e 225 elementos. As Figuras de 20 a 23 a seguir mostram os resultados gráficos do ANSYS para velocidade de 1 m/s. Todas Figuras estão em escala verdadeira. A Tabela 2 apresenta a síntese dos resultados do teste de contato.

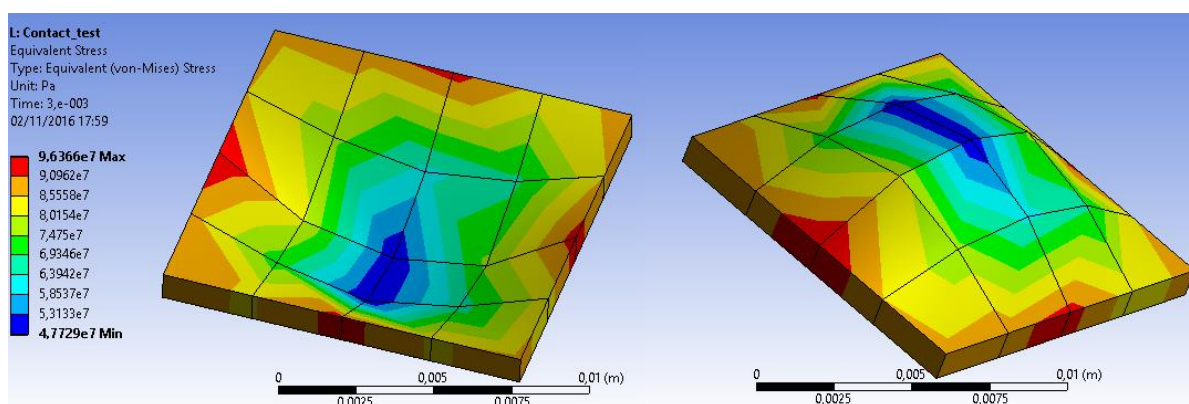


Figura 20 - Resultado do teste de contato para malha de 16 elementos

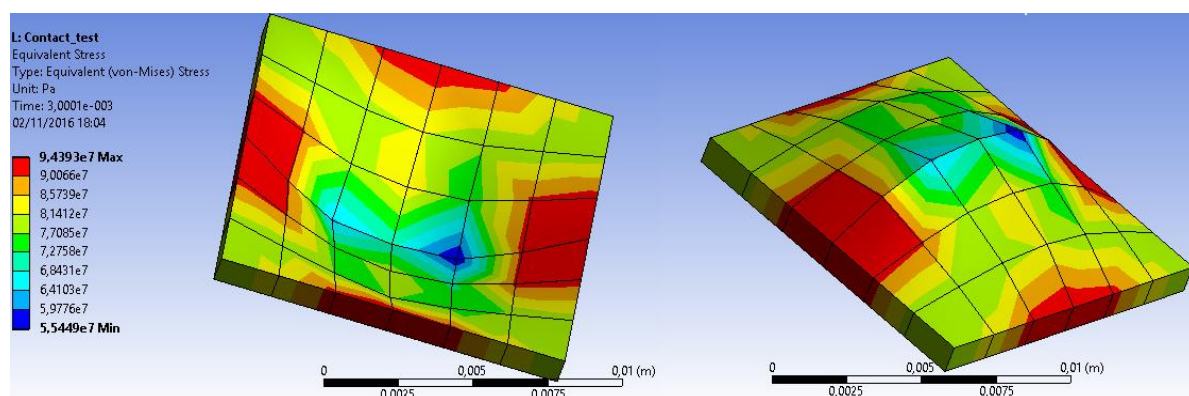


Figura 21 - Resultado do teste de contato para malha de 36 elementos

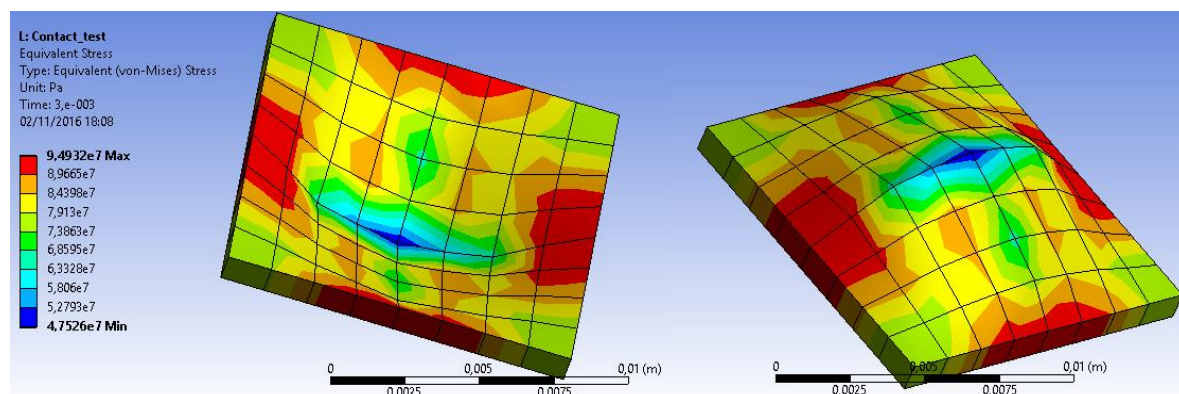


Figura 22 - Teste de contato para malha de 64 elementos

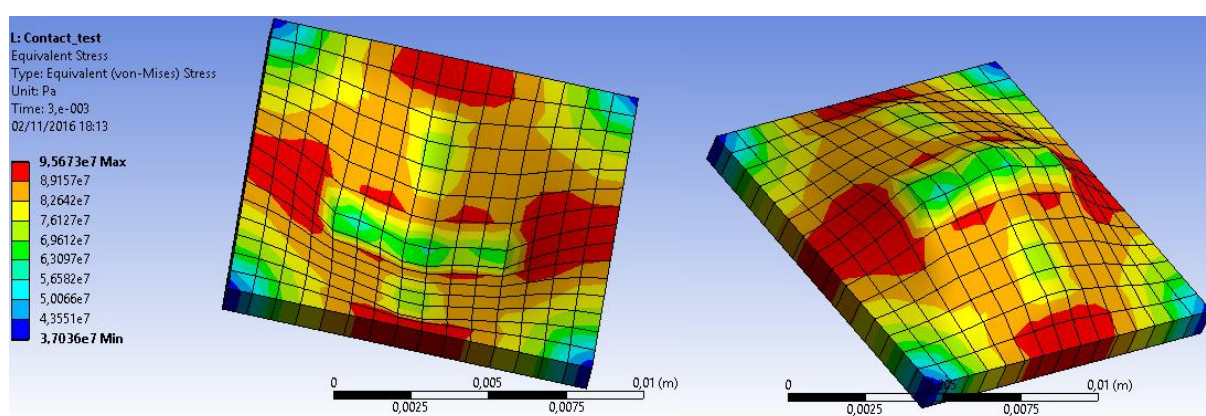


Figura 23 - Teste de contato para malha de 225 elementos

Tabela 2 - Resultados do teste de contato para duas velocidades de ferramenta

Velocidade (m/s)	Número de Elementos	Área por Elemento (mm ²)	Tensão de Von Mises (MPa)	Deformação Equivalente Plástica	Tempo Relativo
0,25	16	9	100,58	0,3354	-
1	16	9	96,335	0,3335	0,29
0,25	36	4	94,45	0,3392	-
1	36	4	94,39	0,3387	0,62
0,25	64	2,25	94,75	0,3541	-
1	64	2,25	94,93	0,3539	0,71
0,25	225	0,64	95,70	0,3971	-
1	225	0,64	95,67	0,3980	1

O tempo foi coletado apenas para as simulações de maior velocidade. Usou-se uma escala de tempo relativo, onde a malha mais fina (225 elementos) é usada como valor base, enquanto as demais simulações foram expressas em frações relativas. Da tabela acima, pode-se observar que a mudança para um elemento com dimensões característica bem pequena,

como por exemplo 0,8 mm, – o que resulta numa malha extensa, sendo que a área característica por elemento é de 0,64 mm², resultando em 3900 elementos (por elemento de espessura) numa chapa 50 x 50 mm², por exemplo – tem resultado bem semelhante a uma malha bem menos refinada, com dimensão característica de 3 mm, resultando em cerca de 300 elementos por elemento de espessura. Ademais, analisando visualmente a Figura 23, nota-se a perda das características de uniformidade e continuidade da superfície inferior, características esperadas do processo real e do simulado. Logo, deve-se tomar cuidado ao utilizar malhas extremamente refinadas em um plano, porém grossa na direção normal.

Em virtude da premissa deste trabalho, isto é, o de uso de um computador pessoal para análise do processo e, tendo em mente da natureza qualitativa e acadêmica desta monografia, opta-se por utilização de uma malha com elemento de 2,5 mm. Este valor escolhido deverá condizer com resultados mais certos do que a malha de 3 mm, com um custo computacional ligeiramente superior. A malha, então, é composta de 2880 elementos de primeira ordem.

O segundo teste de convergência é chamado de teste em linha e consiste na análise mais apropriada de acordo com o processo de estampagem. O teste em linha tem função diferente do teste de contato: seu objetivo é o de determinação da possibilidade de utilizar escalonamento de massa e tempo não automáticos – isto é, definidos pelo usuário. Todos os *softwares* oferecem escalonamento de massa automáticos, em que o ANSYS, por exemplo, guiado por alguns parâmetros de entrada, adiciona massa aos elementos da malha a fim de obter uma diminuição no tempo. Esse processo, porém, pode ficar desajustado e feito de má qualidade. Não é raro se encontrar maus resultados em simulações de elementos finitos: o engenheiro responsável, por vezes, pensa que está seguro, respaldado, quando se utiliza um *software*. Este, tem apenas papel calculista e não detém o conhecimento técnico.

O teste em linha foi preferido de ser feito com o próprio modelo que será investigado. A trajetória, inclusive, é a mesma do trabalho adiante, porém é limitada: o foco é só o de investigação até o 5 passo da ferramenta – termina-se com profundidade de processo de 5 mm. Várias velocidades são pesquisadas: 1, 50, 100, 200 e 400 m/s. Adianta-se que para velocidades baixas, como 1 m/s, o ANSYS não consegue terminar a análise, abortando o problema com erro de energia acima do permitido. Logo, a primeira velocidade em que se obtém resultados é a de 50 m/s.

Tabela 3 - Resultados do teste de linha

Velocidade (m/s)	Tensão de Von Mises (MPa)	Deformação Equivalente Plástica	Tempo Relativo
50	107,75	0,55265	1
100	96,94	0,55265	0,52
200	92,03	0,55265	0,26
400	81,05	0,55265	0,15

Não há uma convergência nos valores da tensão de Von Mises. No entanto, isso não deve ser fator decisivo para escolha da velocidade. Visto que o valor de deformação equivalente plástica é o mesmo para todos – que será o principal parâmetro analisado como resultado –, escolhe-se utilizar de uma análise visual para determinação da qualidade da peça. Por exemplo, para as velocidades de 50, 100 e 200 m/s, a chapa se apresenta adequadamente ao final das simulações, como pode ser visto nas Figuras 24, 25 e 26. Já na Figura 27, mostra-se a chapa ao final do processo para a velocidade de 400 m/s. Vê-se que, apesar de resultados numéricos adequados (vide tabela 3), a apresentação visual da chapa está totalmente inadequada, nada se lembrando ao processo real. Para uma velocidade tão alta como esta, crê-se que o processo deixa de se assemelhar a um processo incremental e passa a se assemelhar a uma colisão, por isso gera a superfície pouco uniforme da Figura 27. A Figura 28 mostra o processo simulado com esta mesma velocidade, mas profundidade de apenas 2 mm: desde o começo já é possível certificar da não-adequabilidade de tal velocidade. Portanto, a última velocidade testada, a de 200 m/s, é tomada como satisfatória e será utilizada futuramente neste trabalho.

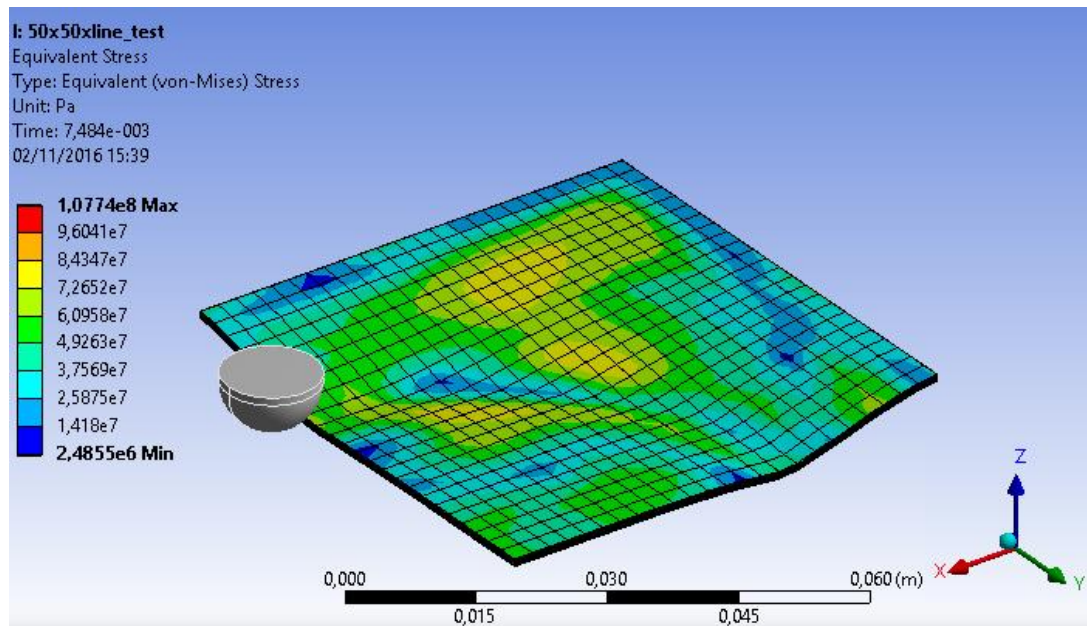


Figura 24 - Deformação para velocidade de 50 m/s, profundidade realizada de 5 mm.
 Escala verdadeira.

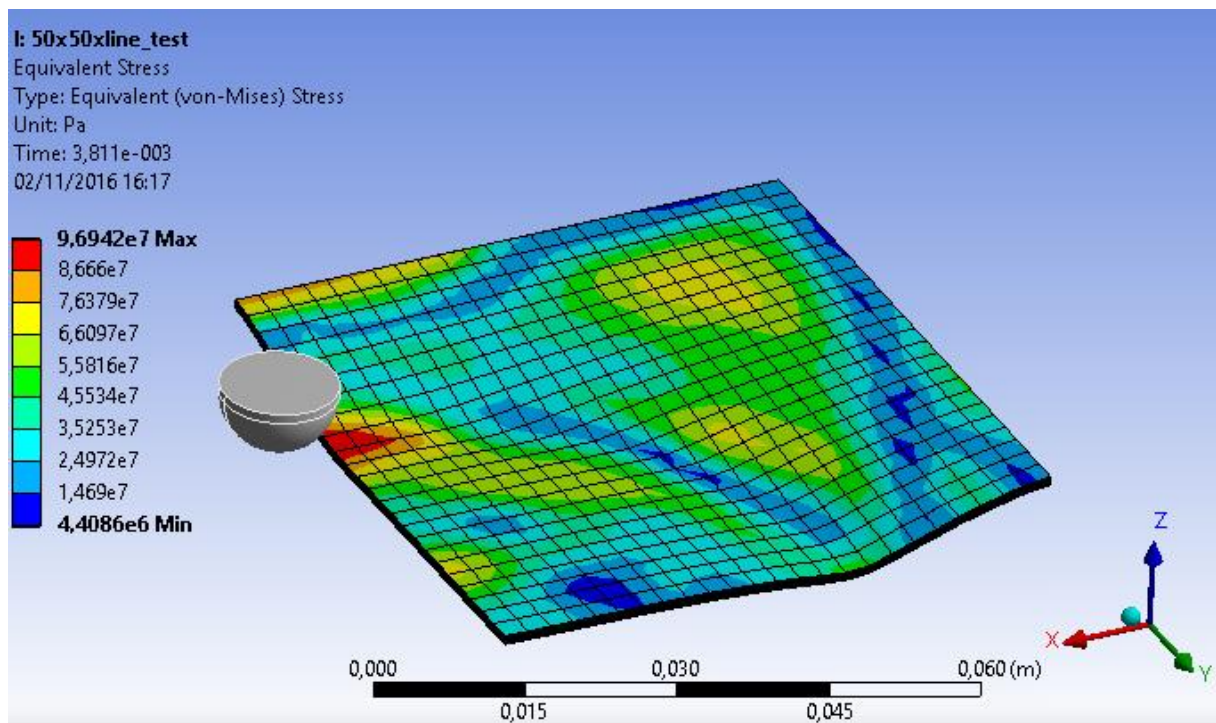


Figura 25 - Deformação para velocidade de 100 m/s, profundidade realizada de 5 mm.
 Escala verdadeira.

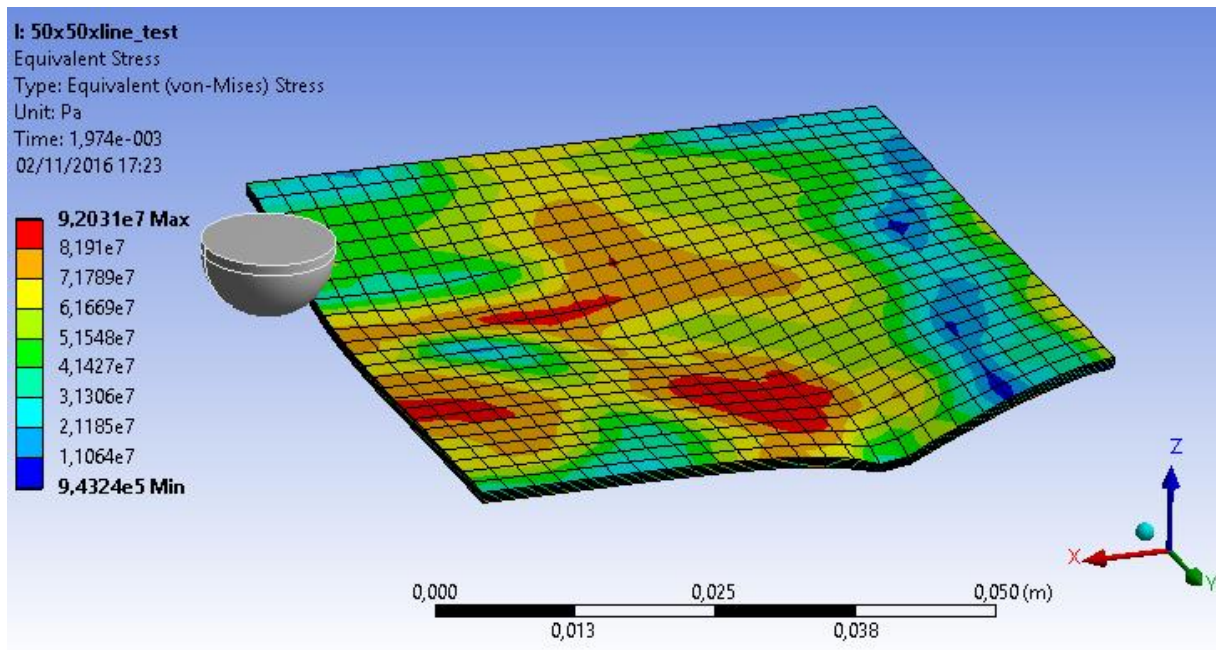


Figura 26 - Deformação para velocidade de 200 m/s, profundidade realizada de 5 mm.
 Escala verdadeira.

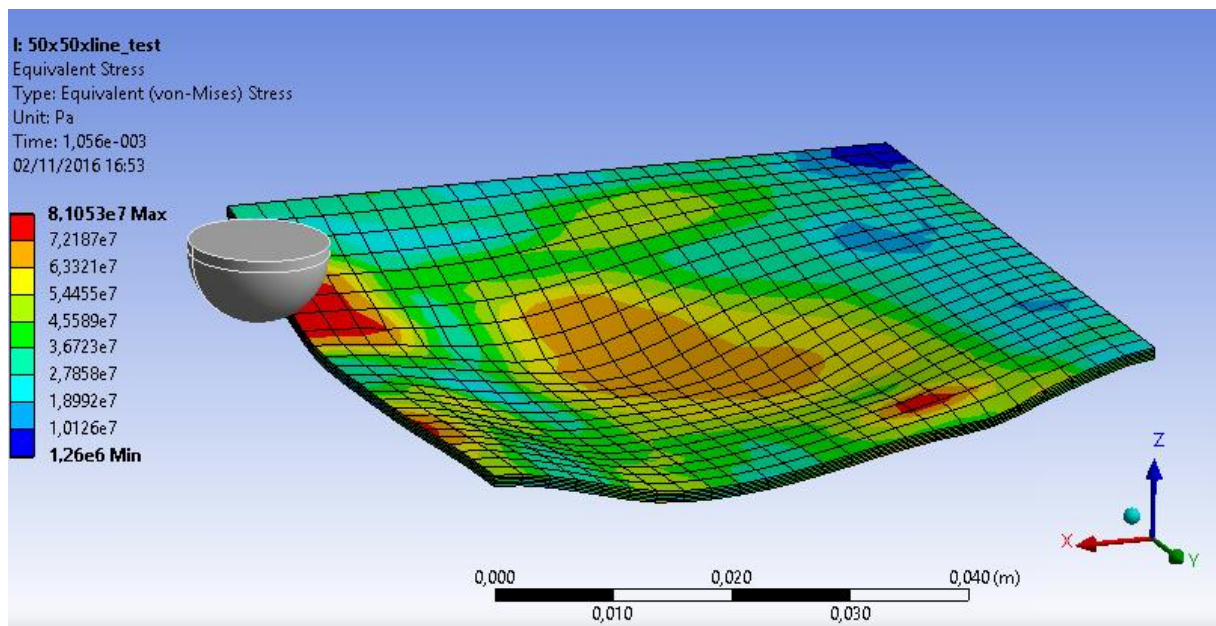


Figura 27 - Deformação para velocidade de 400 m/s, profundidade realizada de 5 mm.
 Escala verdadeira.

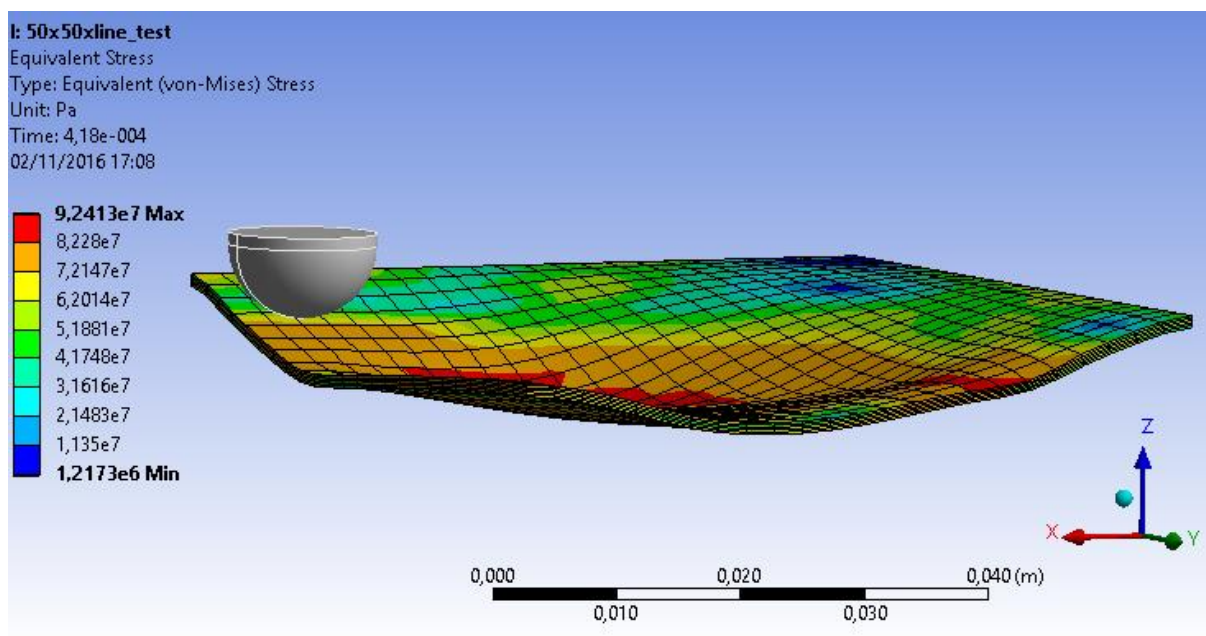


Figura 28 - Deformação para velocidade de 400 m/s, profundidade realizada de 2 mm.
Escala verdadeira.

Outro parâmetro que pode ser analisado junto à velocidade do processo foi o escalonamento da massa, feita através da mudança da densidade do material. O material pode ser modelado com uma densidade maior do que realmente é, o que resulta num valor maior para o incremento crítico de tempo, deixando a simulação mais rápida. Essa tentativa de escalonamento de massa deve ser estudada caso a caso, assim como foi feito com a velocidade de entrada no ANSYS. Neste trabalho, porém, não se teve sucesso ao se aumentar a densidade do material. Na Figura 29, a seguir, mostra-se uma simulação semelhante às anteriores (de 5 mm de profundidade) com a densidade de 10000 kg/m³. Nota-se a baixa qualidade da superfície, semelhante à da Figura 27. Outra simulação, com densidade de 27000 kg/m³, apresentou resultados muito piores, não dignos de serem reportados. Uma alternativa que pode ser tentada é o da diminuição de velocidade da ferramenta até atingir a qualidade superficial desejada. Deve-se, no entanto, ficar atento a qual será a estratégia que tomará menos tempo. Fica aqui a sugestão para verificação dessa possibilidade em futuros trabalhos.

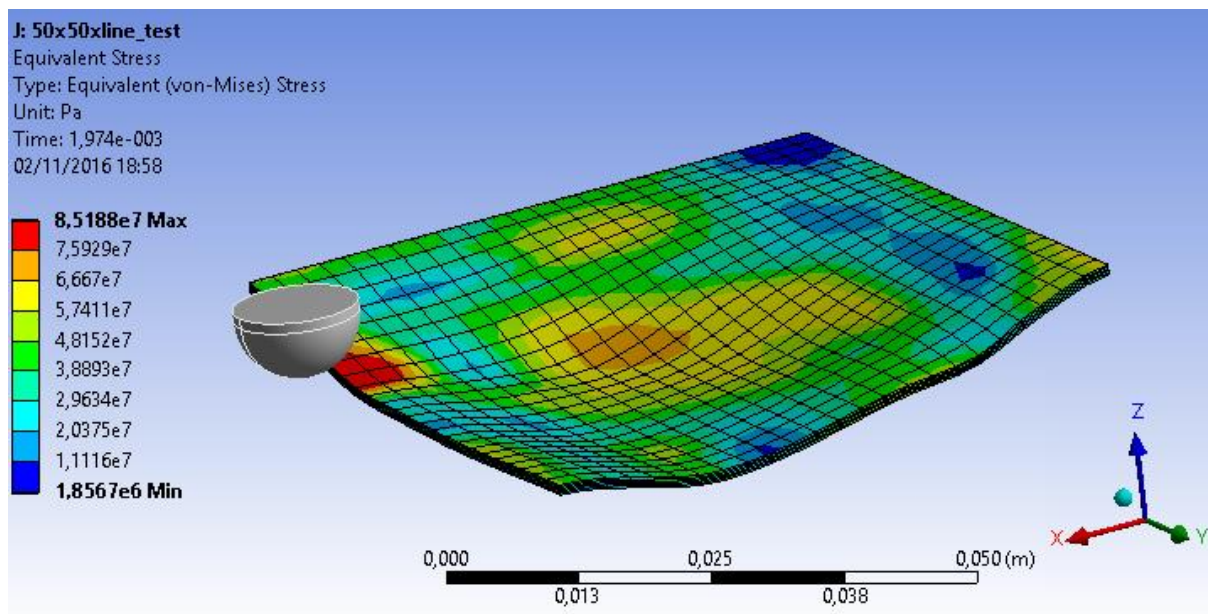


Figura 29 - Deformação para velocidade de 200 m/s, com densidade de 10000 kg/m³.

Um grande empecilho na realização da simulação explícita é o alto tempo de processo, que pode chegar a alguns segundos, mesmo com velocidades altas de deformação (50 a 200 m/s). Observa-se que muito do tempo da simulação é empregada do momento que a ferramenta sai da chapa até o momento que ela volta ao ponto inicial, antes de realizar o ‘step down’ e realizar o próximo ciclo. Essa distância percorrida pela ferramenta é a maior distância única que existe na trajetória e demandaria a maior parcela única de tempo de cada ciclo. Como esse trecho é realizado sem deformação, é razoável assumir uma velocidade maior da ferramenta a fim de acelerar o processo e encurtar o tempo computacional exigido. Testes foram feitos com a ferramenta a 2000 m/s. Nestas condições, não se foi verificado mudança das variáveis, validando assim a hipótese.

Os testes de contato e de linha são de grande importância na escolha dos parâmetros de tamanho característico de elemento, velocidade de processo e escalonamento de massa através da densidade do material. Os escolhidos, ao final, foram: dimensão característica do elemento de 2.5 mm, o que resulta numa malha que contém cerca de 6.25 mm² por elemento, velocidade de processo de 200 m/s e de deslocamento de ferramenta (em vazio) de 2000 m/s e, finalmente, densidade original do alumínio, de 2700 kg/m³. Esses valores foram escolhidos visando os melhores resultados de ambos testes, com maior diminuição do tempo de simulação.

A malha escolhida em questão é regular e de fácil confecção. Em outros *softwares*, a customização da malha é bem mais direta e simples, possibilitando o usuário o refino desta em locais mais críticos e reduzindo em locais pouco importantes. Esse procedimento gerará uma maior confiabilidade dos resultados a um preço computacional que pode ser até decrescido. A malha utilizada na simulação é mostrada na Figura 30.

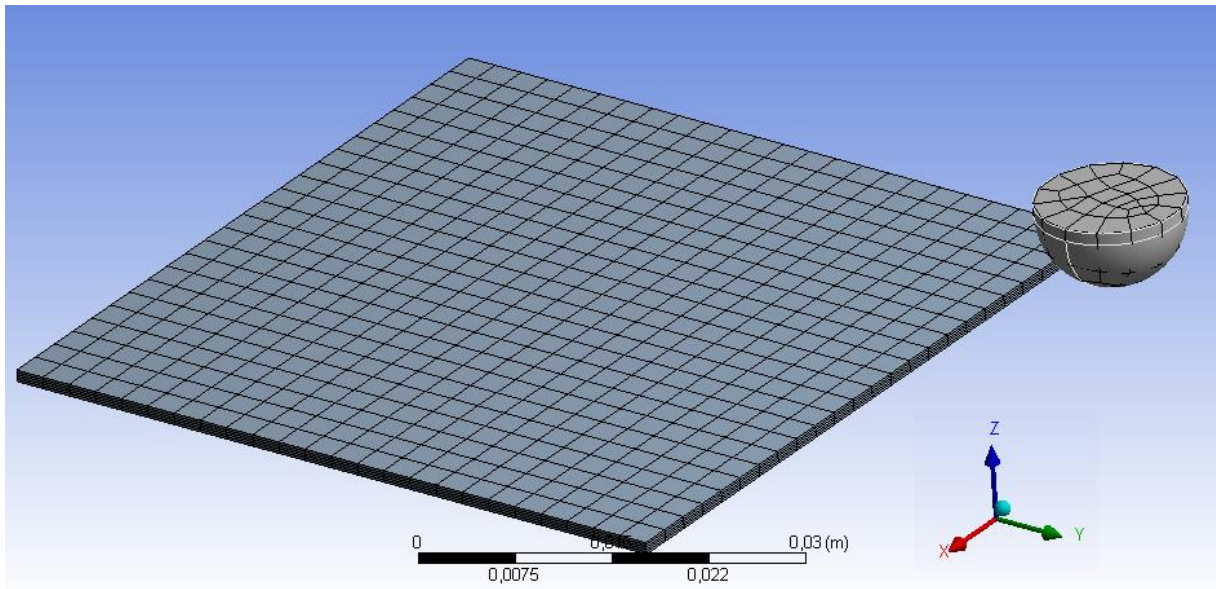


Figura 30 - Malha adotada para simulações - 5 elementos na espessura

Um ponto interessante que deve ser comentado nesta seção relaciona a questão do tempo de simulação de um processo de estampagem incremental com o tamanho da malha. Bambach (2014) fez levantamento de uma equação que descreve o tempo necessário na solução explícita. Segundo ele, o tempo de CPU é proporcional ao tamanho da trajetória (total) e ao número de elementos, e inversamente proporcional à velocidade e ao incremento de tempo. O tempo total demorado é essa razão multiplicada pelo tempo de CPU para um elemento e um incremento. Para um cone simples, como a peça estudada neste trabalho, com raio ' R ' e passo vertical ' d_z ' constante, o tempo total será dado pela eq. (9), segundo Bambach (2014):

$$T_{CPU} = \frac{\pi R^2}{V \cdot \frac{h}{C_d}} \cdot \frac{R^2}{h^2} \cdot T_{el,inc} \quad \text{eq. 9}$$

Onde ' h ' é o lado característico do elemento, ' V ' é a velocidade do processo, ' C_d ' é a velocidade do som e, finalmente, $T_{el,inc}$ é o tempo de CPU para um elemento e um incremento.

Da eq. (9), pode-se inferir algumas maneiras de diminuir o tempo necessário de simulação. Bambach (2014) destaca algumas delas: aumento da velocidade ou uso de escala na massa, redução do tamanho do elemento através de malhas adaptativas. Este método de modelagem da malha é, na verdade, o assunto principal do artigo em questão. Bambach mostra as vantagens – ganho em qualidade no resultado e de tempo – no uso de malhas ‘móveis’, isto é, malhas que se adaptam e readaptam a cada incremento de tempo, sendo sempre bem refinada nas regiões próximas à ferramenta e, conseqüentemente, ‘viajando’, realizando a trajetória junto com o punção. Esse recurso de malha adaptativa não está disponível na versão acadêmica do ANSYS, e por isso não foi testada.

4. RESULTADOS

Esta seção destina-se a apresentação de alguns resultados de simulações numéricas comparando com dados obtidos experimentalmente por Manco, Filice e Ambrogio (2011) e da teoria, a lei do Seno. Aqui, só serão comparados a espessura final da chapa ao final da manufatura da peça.

Inicialmente, foi proposto a verificação para diferentes fatores de atritos (começando por atrito nulo, 0,1 e 0,3). Porém, por limitações do modelo físico adotado, isto é, a simulação de apenas $\frac{1}{4}$ da chapa, não se foi possível a verificação de nenhum dos coeficientes de atrito. Ocorre-se dois erros, majoritariamente: primeiro, o de alto erro na energia e, quando tomadas atitudes para contorno do erro, ocorre esmagamento da chapa na região de entrada da ferramenta. Diversas estratégias foram adotadas para adequação deste erro, principalmente estratégias que envolvem a realização do passo vertical antes da entrada na chapa, ou dentro da chapa, ou ao longo dela, incrementalmente. Deve-se dizer que não se foram obtidos resultados satisfatórios. Ademais, Manco, Filice e Ambrogio (2011) adotaram trajetórias de forma espiral e não em '2.5D', o que deixa o resultado das simulações apresentadas com menor credibilidade. Simulações com trajetórias em espirais foram tentadas, porém sem sucesso. Novamente, o erro de energia é atingido e o ANSYS para o cálculo. Uma forma de resolução do problema é aumentar o número de elementos na malha através da diminuição do tamanho característico de um elemento. No entanto, neste trabalho, não foi possível a diminuição necessária da malha para inibição deste erro.

Na Figura 31, é possível ver os resultados obtidos e tratados por Manco, Filice e Ambrogio (2011). A Figura em questão já traz uma comparação entre resultados experimentais e de simulações computacionais através do LS-DYNA. Também é de fácil comparação com o valor obtido pela Lei do Seno – espessura de 0,5 mm que deveria ser constante para toda a área deformada. No eixo horizontal da Figura 31, está a grandeza 'Profundidade', isto é, a distância, ao longo do eixo 'Z', entre a face superior da chapa na área não-deformada nas extremidades, com a face superior da área não-deformada que fica ao centro da peça: exatamente a altura do cone.

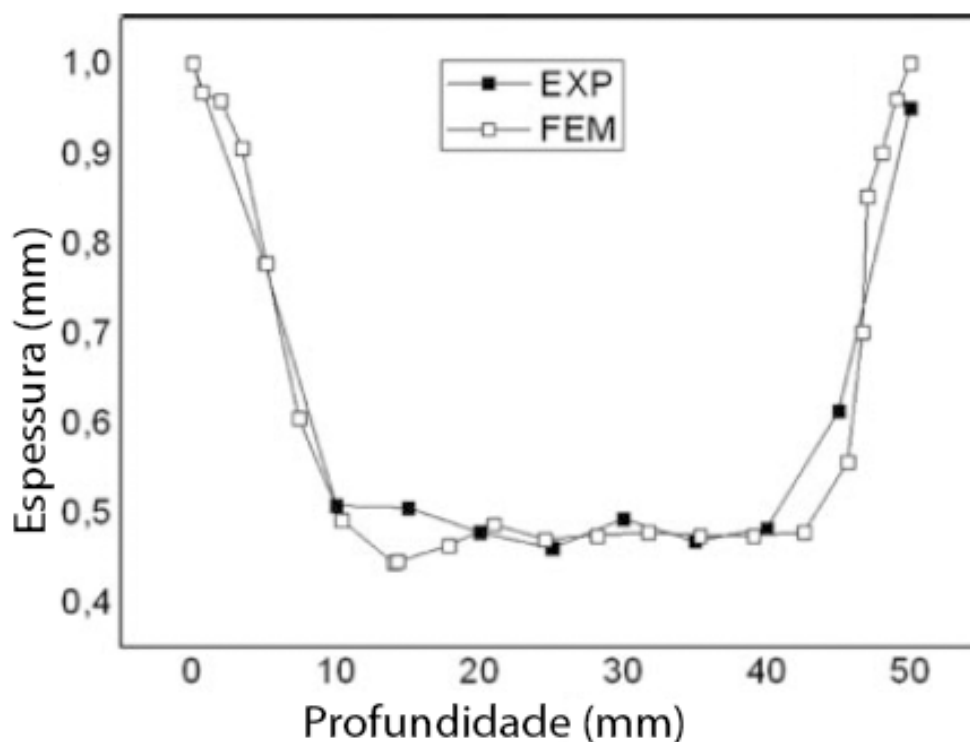


Figura 31 - Resultados experimentais e através de simulação por elementos finitos (FEM). Fonte - Manco, Filice e Ambrogio (2011).

Observa-se a boa concordância da Lei do Seno descrita pela equação 1 com os resultados obtidos pelos autores. A espessura experimental e simulada está de acordo com a esperada, que é de 0,5 mm. Manco, Filice e Ambrogio (2011) reportam que a mínima espessura medida do experimento foi de 0,46mm – um erro de cerca de 5% do valor da Lei do Seno. De fato, para todos os experimentos realizados pelos autores, a Lei se prova adequada, com valores bem próximos aos obtidos. Essa validação é importante pois permite o amplo uso da lei para estimativa da espessura final de uma chapa que será deformada: tendo-se uma necessidade, por exemplo, uma peça com espessura de 1.5 mm e com ângulos máximos de 50°, pode-se estimar a espessura da chapa antes da manufatura, a ser comprada.

A Figura 32 contém a distribuição de deformação plástica equivalente obtida da simulação descrita neste trabalho. Pode-se observar tendências ao se percorrer a profundidade da peça, começando (de cima para baixo) rapidamente uma diminuição na espessura (azul claro, verde e amarelo) até uma estabilização nas cores laranja e vermelho. Após essas duas zonas, há novamente uma transição da espessura (cores amarelo, verde e azul claro). Essa tendência se assemelha ao verificado na Figura 31 obtida por Manco, Filice e Ambrogio (2011).

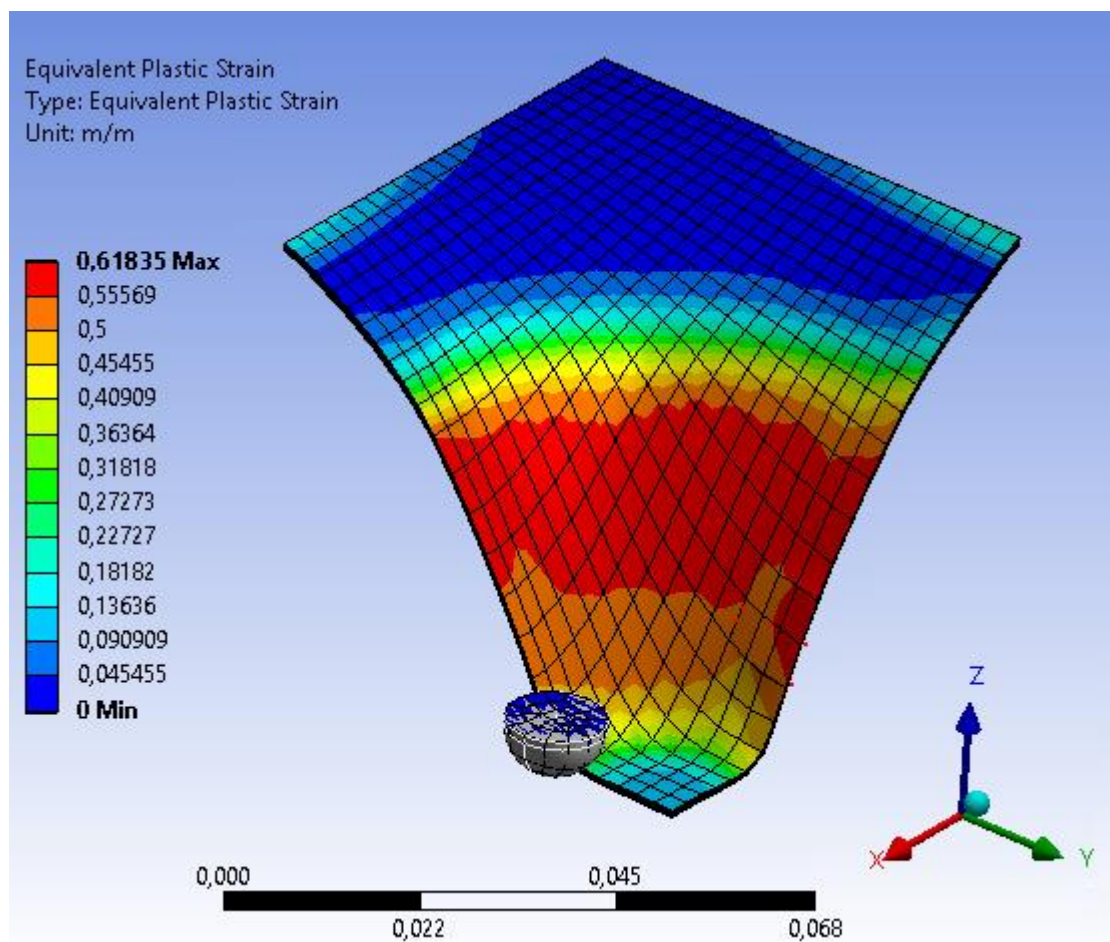


Figura 32 - Resultados obtidos da simulação feita no ANSYS.

Para entendimento da Figura 32, uma consideração é feita: Considera-se que toda deformação plástica ocorre na direção da espessura. Essa hipótese é de extrema importância na simplificação e na viabilização da obtenção de resultados. O ANSYS não provém – ao menos a versão testada – valores para deformações plásticas principais, dando apenas a equivalente plástica. Então, os valores dados na Figura 32 são, na verdade, a deformação ao longo da espessura. Assim, o valor da espessura em qualquer ponto será dado por um menos o valor da deformação, multiplicado pela espessura final. Logo, uma tendência vermelha escura tem valor de espessura de, no mínimo, 0,38 mm e, no máximo, 0,44 mm. A efeito de comparação, a coloração alaranjada escura foi estipulada como valor mínimo de espessura de 0,44 mm e valor máximo de 0,5 mm, valores que estariam de acordo com os resultados obtidos da Figura 31 e próximos da Lei do Seno.

A seguir, apresenta-se na Figura 33, gráfico semelhante ao obtido por Manco, Filice e Ambrogio (2011), apresentado na Figura 31. Como já constatado por esta figura, o modo

como a espessura varia ao longo da profundidade da peça é semelhante ao obtido pelos autores: com a Figura 33, essa visualização fica ainda mais clara. Novamente, a Lei do Seno se mostra condizente com o que realmente ocorre no processo: a espessura diminui rapidamente nos primeiros 10 a 20 milímetros de profundidade da peça e se estabelece praticamente constante em valores próximos do previsto pela teoria, neste caso 0,5 mm. O valor mínimo de espessura observado é de 0,42 mm, ante 0,46 mm obtidos experimentalmente pelos autores. Ou seja, erro de cerca de 9% do valor obtido para o valor experimental e cerca de 16% para o valor esperado pela Lei do Seno. A Figura 34, a seguir, mostra o curso de onde foi obtido esses valores de espessura da chapa. Escolheu-se uma linha exatamente ao meio da peça por se entender que haverá menor influências de efeitos de borda, tendo, assim, menores erros.

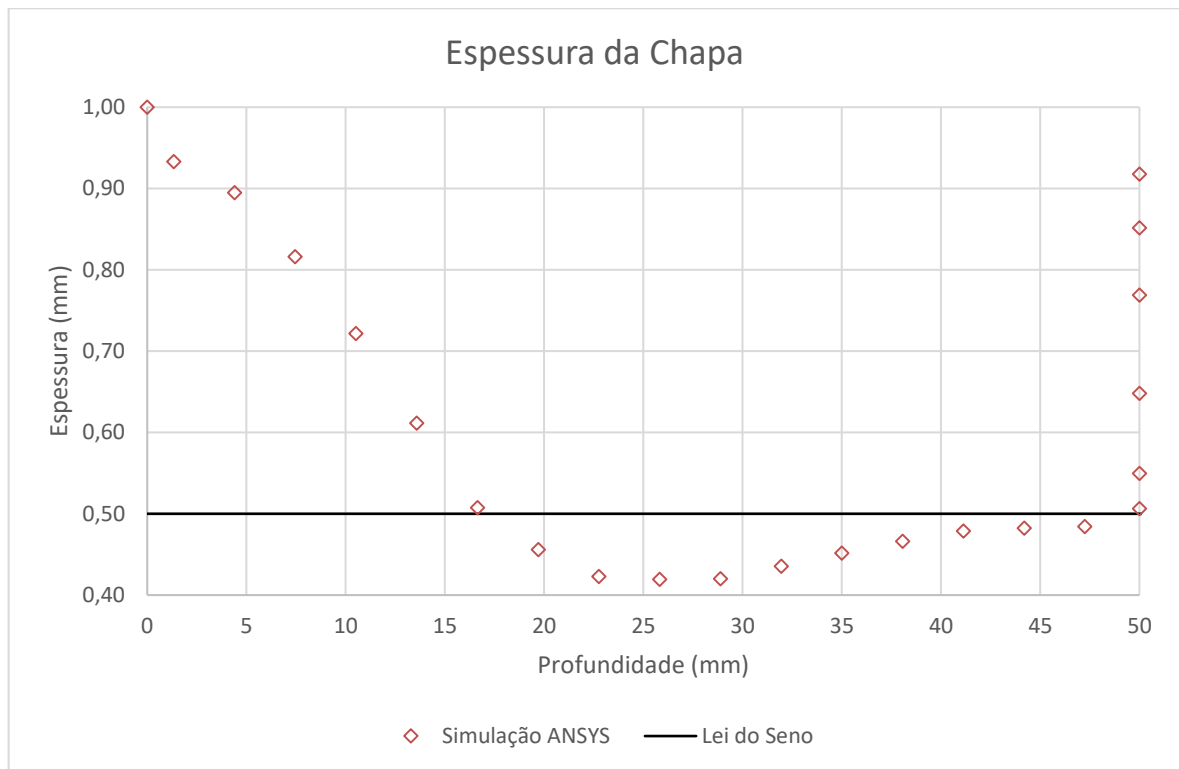


Figura 33 - Resultados obtidos do ANSYS para espessura da chapa ao longo da profundidade da peça.

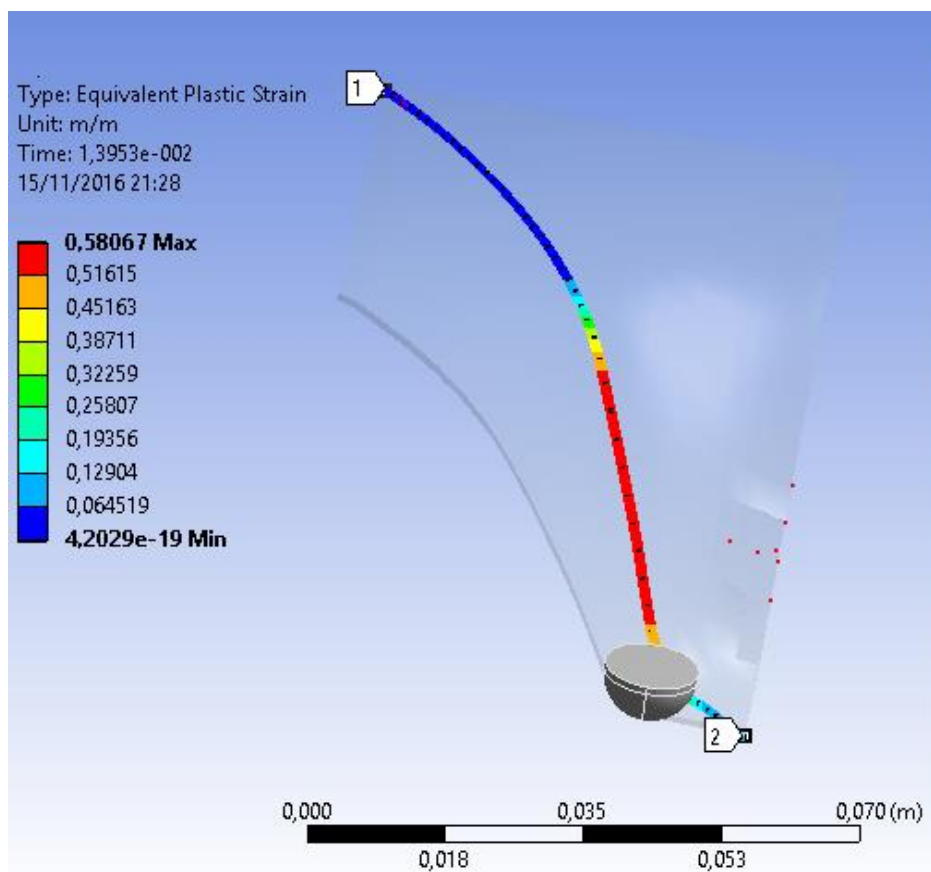


Figura 34 - Curso escolhido para obtenção dos dados.

Apesar de resultados ligeiramente diferentes, o método empregado neste trabalho apresentou surpreendentes resultados: com a constatação de que a variação da espessura fica semelhante ao observado por Manco, Filice e Ambrogio (2011) experimentalmente e por meio de elementos finitos. Assim, a fim de obter maior acurácia no resultado, ou seja, melhores valores para espessura da chapa, deve-se apenas alterar pequenos parâmetros do método utilizado: as considerações feitas e adotadas podem ser tidas como corretas, ficando como sugestão de futuro trabalho, adotar novas hipóteses e testá-las. Ademais, alguns desses problemas são comentados e sugestões de futuros trabalhos são apresentados na próxima seção.

4.1. Limitações

A grande limitação do modelo físico é exatamente o de sua simplificação para $\frac{1}{4}$ do problema real. A partir disso, deve-se escolher o ponto onde a ferramenta sofrerá o incremento axial. Várias simulações foram feitas, com a ferramenta entrando na chapa já no passo seguinte e também realizando a descida em cima da chapa. As duas alternativas apresentam problemas após alguns ciclos, geralmente mostrando falha da peça neste local. A limitação do modelo físico é justamente não entender a continuidade do processo: o primeiro contato da ferramenta com a chapa é visto como um choque ao invés de um contato incremental. A isso, muito ajuda o fato do valor de passo vertical ser o mesmo tamanho da espessura da chapa, levando a crer que ocorra choque entre as duas peças. A aplicação de condições de contorno não é suficiente para solução do problema. Tal limitação do problema deve ser melhor estudada. Caso não se encontre vias de amenização do problema, aconselha-se o uso de problemas físicos completos para simulações confiáveis.

Outro ponto de atenção é a definição correta do modelo do material. Embora o modelo isotrópico seja aceito e adotado por alguns autores, não é o mais correto para estampagem incremental. A utilização de coeficientes médios de anisotropia é aconselhada. A versão utilizada do ANSYS, porém, requer o cálculo da matriz de rigidez do material, deixando o trabalho mais difícil. Atrelado ao modelo isotrópico, pode-se rever o modo de encruamento do material. Neste trabalho foi adotado como encruamento isotrópico, podendo não ser o mais correto para estampagem incremental.

Simulações também foram feitas para um modelo completo da chapa. Este modelo deve ter aplicações de condições de contorno (restrição total de movimentos) nas superfícies laterais. Foi-se variado o tamanho característico da malha a fim de obter um resultado confiável. Observou-se, no entanto, pior convergência dos resultados, com frequentes falhas da chapa para vários tamanhos de malhas, desde pouco refinada até bastante refinada. Como o problema de falha geralmente se apresentava na região que a ferramenta realiza o passo vertical, uma nova trajetória foi confeccionada, com o passo vertical variando de posição a cada alguns *loops*. De mesma forma, a peça apresentou falha, descartando totalmente os resultados do modelo completo.

Sugere-se mais estudo nos critérios de convergência utilizados pelo ANSYS e nas limitações destacadas aqui para futuros trabalhos.

5. CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS

Neste trabalho, duas frentes foram abordadas e o cumprimento destas é comentado a seguir:

Primeiro, foi desenvolvido revisão de literatura, de tal forma que o Engenheiro Mecânico sem prévia instrução sobre o assunto seja capaz de ler e adquirir conhecimento básico suficiente que o permita se aprofundar no assunto por meio de artigos científicos.

Segundo, foi relatado com detalhes, geralmente ocultos de artigos científicos que tratam do tema, um método e os resultados de uma simulação realizada em *software* de elementos finitos, neste caso o ANSYS. O procedimento é geral, válido para qualquer um dos outros *softwares*, ficando apenas ao leitor a dificuldade de se adaptar com a interface desejada.

A primeira abordagem foi completamente coberta. A segunda abordagem foi também concluída, no entanto, requer ajustes, tais como: melhor aproveitamento dos recursos disponíveis de uma simulação por elementos finitos.

Foram mostrados os diversos parâmetros a serem considerados a fim de obtenção de uma peça manufaturada nas melhores condições possíveis pelo processo de estampagem incremental. O único ponto que não foi coberto por este trabalho está relacionado com a efetiva confecção do plano de trabalho e trajetória da ferramenta para manufatura em máquina de usinagem.

Como proposta para outros trabalhos destacam-se maior aprofundamento de estudo, a começar pelo estudo de FEM aplicado a estampagem convencional: entende-se que muito do que é aplicado neste campo – mais difundido e pesquisado – pode ser aproveitado para um caso de estampagem incremental. Outra sugestão é de se analisar mais especificamente os parâmetros de convergência do ANSYS com os escalonamentos de massa e tempo automáticos disponíveis pelo *software*.

BIBLIOGRAFIA

- AERENS, R. et al. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. **Ins J Adv Manuf Technol**, 2010. 969-982.
- ATTANASIO, A. et al. Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 197, 2008. 59-67.
- BAGUDANCH, I. et al. Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. **Journal of Material Processing Technology**, 2015. 221-229.
- BAMBACH. Fast simulation of incremental sheet metal forming by adaptive remeshing and subcycling. **Int J Mater Form**, 2014.
- EMBURY, J. D.; DUNCAN, J. L. Formability Maps. **Annual Review of Materials Science**, v. 11, p. 505-521, 1981.
- EMMENS, W. C.; SEBASTIANI, G.; VAN DEN BOOGAARD, A. H. The technology of Incremental Sheet Forming - A brief review of the history. **Journals of Materials Processing Technology**, p. 981-997, 2010. ISSN Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.014.
- FRATINI, L. et al. Influence of mechanical properties of the sheet material on fomability in single point incremental forming. **CIRP 53**, 2004. 207-210.
- GOODWIN, G. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. **SAE Technical Paper**, 1968. ISSN pp. 680093.
- HAMILTON, K.; JESWIET, J. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, p. 311-314, 2010. ISSN DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.016.
- HIRT et al. Forming Strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming. **Material Technology/Precision Forming**, 2004.
- HIRT, G.; JUNK, S.; WITULSKI, N. Incremental Sheet Forming: Quality Evaluation and Process Simulation. **7th ICTP International Conference on Technology of Plasticity**, Yokohama, Japão, 2002. 343.
- HUSSAIN, G. et al. A new formability indicator in single point incremental forming. **Journal of Materials Processing Technology**, 2009. 4237-4242.

ISEKI, H.; KATO, K.; SAKAMOTO, S. Flexible and incremental sheet metal forming using a spherical roller (em japonês). **Proc. 40th JJCTP**, 1989. 41-44.

ISIK, K. et al. Formability limitis by fracture in sheet metal forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, p. 1557-1565, 2014. ISSN DOI:10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026.

JESWIET, J. et al. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. **Manufacturing Technology**, v. 54, n. 2, p. 88-114, 2005. ISSN doi:10.1016/S0007-8506(07)60021-3.

KEELER, S. P. Circular Grid System - a valuable aid for evaluating sheet metal formability. **SAE Technical Paper**, 1968. ISSN pp. 680092.

KOBAYASHI, S.; HALL, I. K.; THOMSEN, E. G. A Theory of Shear Spinning of Cones. **Trans. ASME, series B, Journal of Engineering for Industry**, v. 83, p. 485-495, 1961.

LESZAK, E. **APPARATUS AND PROCESS FOR INCREMENTAL DIELESS FORMING**. US 3,342,051, 10 Agosto 1964.

MAIDAGAN, E. et al. A new incremental sheet forming process based on a flexible supporting die system. **Key Engineering Materials**, 344, 2007. 607-614.

MANCO, L.; FILICE, L.; AMBROGIO, G. Analysis of the thickness distribution varying tool trajectory in single-point incremental forming. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 2011. 348-356.

MARTINS, P. A. F. et al. Single point incremental forming of polymers. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2009. 229-232.

MASON, B. **Sheet metal forming for small batches**. University of Nottingham. [S.l.]. 1978.

MASON, B.; APPLETON, E. Sheet metal forming for small batches using sacrificial tooling. **Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metalworking**, Kyoto, Japão, 1984. 495-511.

MATSUBARA. Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool: a study of numerical control forming system II (em japonês). **J. JSTP** 35, 1994. 1311-1316.

MATSUBARA, S. A computer numerically controlled dieless incremental forming of a sheet metal. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 2001. 959-966.

MEIER, H. et al. Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, p. 233,238, 2009. ISSN doi:10.1016/j.cirp.2009.03.056.

MICARI, F. **Single Point Incremental Sheet Forming: recent results**. Cambridge University. [S.l.]. 2004.

MUSCAT-FENECH, C. M.; ARNDT, S.; ATKINS, A. G. The determination of fracture forming limit diagrams from fracture toughness. **Sheet Metal 1996 - Proceeding of the 4th International Conference**, University of Twente, p. 249-260, 1996.

SILVA, M. B. et al. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2008. 73-83.

SILVA, M. B. et al. Revisiting single-point incremental forming and formability/failure diagrams by means of finite elements and experimentation. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, 2009. 221- 234.

SMITH, C. R. Metalworking throughout history. **The Fabricator**, 2014. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/metalworking-throughout-history>>. Acesso em: 08 jan. 2017.

YAO, C. et al.. A Novel lightning current monitoring system based on the differential-integral loop. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.20, n.4, p.1247-1255, Aug. 2013.