

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARCELO RIBEIRO DE SOUZA

**ESTUDO DO PROCESSO DE EXPANSÃO DE FUROS EM AÇO AVANÇADO DE
ALTA RESISTÊNCIA POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

Alegrete

2017

MARCELO RIBEIRO DE SOUZA

**ESTUDO DO PROCESSO DE EXPANSÃO DE FUROS EM AÇO AVANÇADO DE
ALTA RESISTÊNCIA POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Leandro Antônio
Thesing

Alegrete

2017

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S729e Souza, Marcelo Ribeiro de

Estudo do processo de expansão de furos em aços AHSS MS por
estampagem incremental / Marcelo Ribeiro de Souza.

60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2017.

"Orientação: Leandro Antônio Thesing".

1. Estampagem incremental. 2. Expansão de furo. 3. Aço. 4.
AHSS. 5. Martensítico. I. Título.

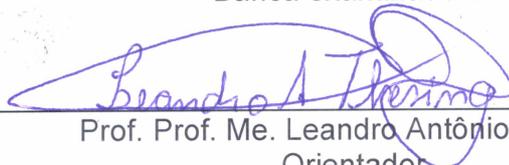
MARCELO RIBEIRO DE SOUZA

ESTUDO DO PROCESSO DE EXPANSÃO DE FUROS EM AÇO AVANÇADO DE
ALTA RESISTÊNCIA POR ESTAMPAGEM INCREMENTAL

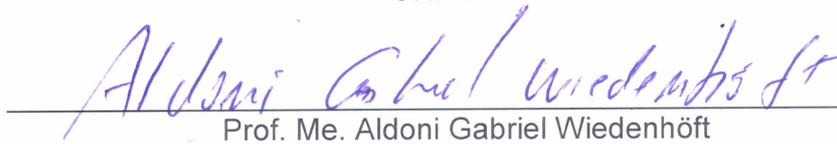
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28, novembro e 2017.

Banca examinadora:



Prof. Prof. Me. Leandro Antônio Thesing
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft
UNIPAMPA



Prof. Dr. Ana Claudia Costa de Oliveira
UNIPAMPA

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus, e a todos aqueles que de alguma forma auxiliam-me para o meu progresso pessoal, intelectual e moral.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Me. Leandro Antônio Thesing pela orientação, pelo material disponibilizado, pelas horas dedicadas para a criação desta obra e principalmente à confiança me atribuída.

Aos professores: Aldoni G. Wiedenhöft, pelo auxílio durante a realização dos testes no centro de usinagem, durante a confecção da matriz de fixação, e ao Alexandre U. Hoffmann pelo interesse na pesquisa e pelo conhecimento compartilhado durante as horas de conversa.

Aos colegas que me acompanham nesta lida, que em muitas vezes, apresenta tantas dificuldades, mas que, juntos conseguimos, devido à grande amizade, nos fortalecermos e seguirmos procurando o avanço, e o compartilhamento, do conhecimento.

Aos meus pais, pela orientação e base para minha sustentação.

Ao meu avô Gervasio (in memoriam), pela atenção me dada.

À minha companheira, pelo apoio e carinho.

Aos meus animais: Pitóca, Luna, Berenice, Filó, Pirão, Airumã, Caramelo, Belezinha, Ana Raio e o Paisano Curtinho, pela companhia e carinho.

“Nas lutas habituais, não exija a educação do companheiro. Demonstre a sua. Nas tarefas do bem não aguarde colaboração. Colabore, por sua vez, antes de tudo. As suas lágrimas não substituem o suor que você deve verter em benefício da sua própria felicidade.”

André Luiz

RESUMO

Os aços avançados de alta resistência (AHSS) encontram-se sendo cada vez mais empregados pela indústria automobilística, pois estes materiais possibilitam, a custos competitivos, reduzir o peso dos veículos e, ao mesmo tempo, aumentar a segurança dos passageiros em caso de colisão. No entanto, um dos grandes desafios para a fabricação de peças a partir destes novos materiais refere-se à baixa conformabilidade de bordas. A conformabilidade de bordas em chapas é avaliada, convencionalmente, pelo teste de Expansão de Furo, onde um furo central é expandido com um punção cônico. O objetivo do trabalho é a avaliação da performance comportamental da conformabilidade pela técnica inovadora de estampagem incremental na expansão de furo em chapas pré-furadas de aço AHSS martensítico. Pois, a estampagem incremental está sendo pesquisada e empregada aos mais diversos objetivos, devido, a mesma, possuir a característica de deformação localmente, e progressivamente, da chapa. A confecção de uma matriz de fixação, para comportar chapas de perfil quadrado e de disco, de ferramentas e de um percurso espiral cônica, para a estampagem incremental por ponto único de contato (SPIF), possibilitou-se efetuar os testes. Sendo que, na primeira estratégia foi empregado lubrificante sólido, do tipo grafite em pó, e uma ferramenta de geometria cilíndrica com diâmetros escalonados, na qual ocorreu a fratura da mesma, antes da expansão causar ruptura da borda. Desta maneira, foi possível estimar a força no instante da fratura, com as condições momentâneas. Na segunda estratégia, com o uso de lubrificante pastoso, do tipo graxa grafitada, e com uma ferramenta de perfil cilíndrico constante, obteve-se a expansão dos furos. Assim, pôde-se efetuar a comparação dos resultados com os dados obtidos por pesquisadores que empregaram o método convencional, regido pela ISO 16630. Obtendo uma razão da expansão de furos (REF) pela SPIF, com os parâmetros usados, de 47,2%. A REF obtida, para o mesmo material pela técnica convencional é de 54%. Logo, observa-se que, a SPIF, gerou antecipadamente trincas nas bordas em comparação à técnica convencional. Este resultado levemente inferior para a REF através da SPIF pode ser atribuído ao fato de que a borda do furo não está em contato com a ferramenta, o que contribui para o início da estrição localizada.

Palavras-Chave: expansão de furo, estampagem incremental, aço AHSS martensítico.

ABSTRACT

Advanced high-strength steels (AHSS) are increasingly being used by the automotive industry as these materials make it possible to reduce vehicle weight at competitive costs while increasing passenger safety in the event of a collision. However, one of the major challenges for fabricating parts from these new materials relates to the low conformability of edges. The conformability of sheet edges is conventionally evaluated by the Hole Expansion test, where a central hole is expanded with a tapered punch.

The objective of this work is the evaluation of the behavioral performance of the formability by an innovative technique of incremental stamping in the expansion of hole in pre-drilled plates of martensitic AHSS steel. For, the incremental stamping is being researched and used to the most diverse objectives, because, it, has the characteristic of deformation locally, and progressively, of the sheet. The fabrication of a fastening matrix, to include square and disk profile sheets, tools and a conical spiral path, for the incremental stamping by single point of contact (SPIF), made it possible to carry out the tests. In the first strategy, solid lubricant of the graphite powder type was used, and a cylindrical geometry tool with stepped diameters, in which the fracture occurred, before the expansion caused rupture of the edge. In this way, it was possible to estimate the force at the moment of fracture, with the momentary conditions. In the second strategy, with the use of pasty lubricant, graffiti-type grease, and with a tool of constant cylindrical profile, the holes in the plates were obtained. Thus, it is possible to compare the results with the data obtained by researchers who used the conventional method, governed by ISO 16630. Obtaining a ratio of the expansion of holes (REF) by the SPIF method, with the parameters used in the test, was of 47.2%. The obtained REF, for the same material by the conventional technique is 54%. Therefore, it is observed that the technique used, in martensitic AHSS steel plate, generated cracks at the edges before the conventional technique. This slightly lower result for REF through SPIF can be attributed to the fact that the edge of the bore is not in contact with the tool, which contributes to the onset of localized necking.

Keywords: hole expansion, incremental stamping, martensitic AHSS steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação.	17
Figura 2 - Processo de estampagem de chapa em geral.....	18
Figura 3 - Variantes do processo de estampagem incremental.	19
Figura 4 - Perfis usuais de ferramentas de estampagem incremental com ponto simples de contato. a) e d) Ferramentas de simples geometria. b) Conjunto de engate e ferramenta de simples geometria com ponta esférica. C) Ferramentas com grande variação de diâmetro e com sistema de alimentação de lubrificante.	21
Figura 5 - Perfis empregados em pesquisas de possíveis ferramentas substitutas para as ferramentas simples usuais em estampagem incremental com ponto simples de contato.	22
Figura 6 - Etapa e percurso a) realizado por duas ferramentas, uma para realizar o furo e a outra para expandir. b) realizado por apenas a ferramenta proposta, tanto o furo como a expansão.....	23
Figura 7 - Relação de espessura devido ao SPIF.	24
Figura 8 - Etapa sequencial para obtenção de curvatura em ângulo reto no processo de conformação incremental em CNC.	25
Figura 9 - Ilustração da microestrutura do aço AHSS martensítico.....	27
Figura 10 - Comparação da resistência e ductilidade de alguns dos aços para conformação empregados na indústria automobilística com destaque para os AHSS.	29
Figura 11 - Ilustração do conjunto dos equipamentos, base de suporte e punção, para realização da expansão de furo conforme a ISO 16630.	30
Figura 12 - Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de expansão de furo (medidas em milímetros).....	32
Figura 13 - Ferramenta escolhida para realização dos testes por estampagem incremental para expansão de furo.....	35
Figura 14 - Percursos usuais da ferramenta para expansão de furo por SPIF. a) Troca de contorno. b) Espiral.....	36
Figura 15 - Diferentes estratégias para obtenção de flanges por intermédio de estampagem incremental.....	36

Figura 16 - Estratégia com avanço angular de 15° por passo em conformação de chapas por estampagem incremental para a fabricação de flanges.	37
Figura 17 - Flange de colarinho cônico fabricada a partir de trajetória variável com SPIF.	37
Figura 18 - Vista explodida da matriz de fixação para expansão de furo em SPIF. ...	38
Figura 19 - Matriz de fixação: a) com parafusos organizados para comportar a geratriz em forma de disco e b) com parafusos organizados para comportar a geratriz em forma quadrada.	39
Figura 20 - Funcionograma metodológico dos desenvolvimentos teórico, dos testes, discussões e conclusões.	41
Figura 21- Percurso ilustrativo da sequência da primeira e da segunda espiral.	42
Figura 22 - Velocidade de deslocamento da ferramenta na direção vertical específica para cada espiral (mm/ minuto).	43
Figura 23- Chapa de aço AHSS martensítico conformada por SPIF com lubrificação de grafite em pó; a) zona conformada e danificada pela ferramenta e b) superfície inferior da chapa conformada.	44
Figura 24 - Ilustração da força de reação da chapa.	46
Figura 25 - Desenho da ferramenta escolhida para realização da segunda estratégia nos testes por estampagem incremental para expansão de furo.	46
Figura 26 - Espessuras em diversos locais da chapa após o SPIF.	48
Figura 27 - Resultado da expansão de furos pelo método convencional com punção cônico de 60°.	49
Figura 28 - Chapa de aço AHSS martensítico após a expansão do furo por SPIF. ...	50
Figura 29 - Superfície conformada pelo SPIF, com marcas provenientes do contato da ferramenta. É possível visualizar as fraturas da borda.	50
Figura 30 - Ferramentas com geometria antes do teste, à esquerda, e após a realização do teste, à direita.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designação dos tipos de aços.	27
Tabela 2 - Alguns tipos de aço AHSS martensítico comercial e suas respectivas aplicações no setor automotivo.....	28
Tabela 3 - Descrição dos números na Figura 11 - Ilustração do conjunto dos equipamentos, base de suporte e punção, para realização da expansão de furo conforme a ISO 16630..	30
Tabela 4 - Símbolos e descrições da ISO 16630.....	31
Tabela 5 - Símbolos e descrição das dimensões e intervalos determinados.	32
Tabela 6 - Resultado dos 3 ensaios de expansão, por SPIF, em chapa de aço AHSS martensítico com a estratégia 2.	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivos	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Conformação mecânica.....	16
2.1.1 Estampagem de chapas.....	17
2.1.1.1 Estampagem incremental.....	18
2.2 Teoria geral da estampagem incremental com ponto único de contato (SPIF, do inglês: Single Point Incremental Forming)	20
2.3 Equipamentos de comando numérico computadorizado (CNC).....	24
2.4 Aços avançados de alta resistência (AHSS).....	25
2.4.1 Classificações dos AHSS	26
2.4.1.1 Aços Martensíticos (MS).....	27
2.5 Expansão de furos	29
2.5.1 Expansão de furo com o uso de punção.....	29
2.5.1.1 ISO 16630:2009	30
3 METODOLOGIA	34
4 DESENVOLVIMENTO	42
4.1 RESULTADOS DOS TESTES	42
4.2 ANÁLISE COMPARATIVA.....	48
4.2.1 Análise das geometrias (obtida vs. referência)	49
5 DISCUSSÕES.....	51
6 CONCLUSÕES	53
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de projetos em setores industriais, que são conceituados como avançados, como o setor automotivo, estão gerando demanda de materiais que possuam características que possam vir a colaborar para o cumprimento de difíceis padrões, como a diminuição de peso e concomitantemente, o aumento da segurança dos passageiros em caso de colisão.

Deste modo, os aços avançados de alta resistência (AHSS, do inglês: *Advanced High-Strength Steels*) foram desenvolvidos pensando nesta lacuna, pois possuem perfil sofisticado e complexo, devido a composição química refinada e microestrutura multifásica, e propriedades de resistência, ductilidade fadiga e tenacidade altas, em comparação aos aços usuais, conforme manual AHSS Guidelines (2017).

Os aços AHSS, do tipo martensítico (AHSS MS), que possuem esta denominação por conterem a sua microestrutura composta de uma matriz martensítica com a presença de pequenas quantidades de ferrita e/ou bainita, como pode ser visto na ilustração da Figura 9, dentro do grupo AHSS, possuem o maior limite de resistência à tração.

Para se obter a caracterização do comportamento do material quando conformado, principalmente para casos a qual se estampa chapas pré-furadas, é realizado testes de expansão de furo.

A expansão de furo com punção é uma técnica usual por muitos pesquisadores que visa avaliar, dentre outros fatores, a razão de expansão. Pois, a partir destes testes, se faz possível delinear a capacidade de expansibilidade, ou seja, a conformabilidade plástica do furo quando submetido a um processo de estampagem (GIPIELA, 2012).

A conformação plástica em processos mecânicos, segundo Filho et al. (2011) é caracterizada por ser um processo que executa modificações no corpo, que podem ser em temperatura ambiente ou em até elevadas temperaturas, sem liquefazer o metal. Esta deformação é provocada pela aplicação de tensões externas. Tais tensões são, geralmente, de intensidade inferior à resistência de ruptura do material, ou seja, elas não alcançam o maior limite de resistência à tração.

O emprego da estampagem incremental com ponto único de contato (SPIF – do inglês: *Single Point Incremental Forming*) na expansão de furo em chapa se estrutura com o interesse de realizar a expansão em testes e posteriormente na discriminação de resultados para a comparação com o método convencional de expansão de furo por intermédio de puncionamento.

Em acordo com Ai et al. (2017), a conformação incremental de chapas é tratada como um processo que compreende em si grande flexibilidade, no que se refere a fabricação rápida de peças complexas, e conformação otimizada em relação aos processos de estampagem convencionais.

Em razão de que a conformabilidade do material tem sensibilidade direta à conformação aplicada. O comportamento do material está ligado à condição de tensões e de deformações, quando se trata de: fatores mecânicos, de influências consideráveis da microestrutura e fatores de natureza metalúrgica. Assim, para se obter a máxima eficácia de um processo, que manuseia características do material e de conformação, se faz indispensável a análise destas influências.

Logo, Filho et al. (2011) destaca a validade de se utilizar diferentes tipos de processos de conformação em determinado material. Pois, conforme for o processo, poderá ser obtido diferentes propriedades, como na área de: tolerância dimensional, arranjo microestrutural, acabamento da superfície e probabilidade de aparecimento de defeitos de fabricação.

1.1 Justificativa

Os testes realizados em chapas, para a caracterização de seu comportamento quando submetida em conformidade local, comumente são realizados por puncionamento na técnica de expansão de furo, no qual possibilita a avaliação da expansão em bordas, e que, em sua maioria segue normas para padronizar e evitar desvios consideráveis. E tendo a estampagem incremental com ponto único de contato como um método inovador e que traz consigo fatores, como a capacidade de conformação otimizada perante os processos usuais, pretende-se realizar a expansão do furo por SPIF e analisar se este processo terá resultados satisfatórios, para o material estudado, quando comparado ao processo de expansão com punção.

Deste modo, pretende-se caracterizar o comportamento do aço AHSS martensítico quando submetido a expansibilidade do furo por SPIF.

1.2 Objetivos

Objetivo geral deste trabalho é avaliar a performance comportamental da conformabilidade pelo processo inovador de estampagem incremental para expansão de furo em chapas pré-furadas de aço AHSS MS.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar o comportamento do furo expandido a partir da conformação causada pela ferramenta acionada pelo processo de estampagem incremental.
- Discriminar particularidades do processo de estampagem incremental em comparação ao método usual de puncionamento.
- Analisar a possibilidade de se obter melhor conformabilidade dos componentes comparado ao processo de puncionamento.
- Estimar as forças sobre a ferramenta de conformação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para uma estruturação adequada deste trabalho, se faz apropriado o desenvolvimento de embasamento em bibliografias conceituais nos temas abordados. Sendo que para Marconi e Lakatos (2011, p. 99 e 100), a teoria, tem incumbida um conjunto de concepções fundamentais, que formam um utensílio científico propício para a conceitualização, classificação e, especialmente, no esclarecimento dos fatos.

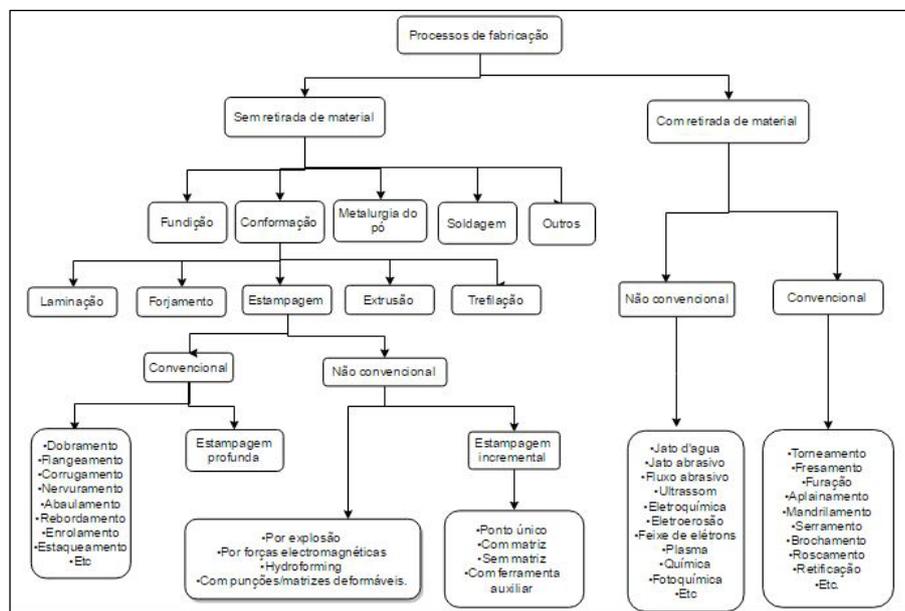
Assim, discriminando a todas técnicas, descritas segundo autores conceituados nas mesmas, aplicando-as nesta obra, ocorrerá o delineamento realizável da seção de testes práticos.

2.1 Conformação mecânica

A conformação enquadra-se como um processo de fabricação, como exemplifica Machado et al. (2011 apud FERRARESSI, 1977).

Com o refinamento dos processos de produção, em conjunto à materiais com comportamento diferencial aos convencionais. Deste contexto, A Figura 1 apresenta a classificação dos processos, no qual, está listado a conformação, que se enquadra na categoria de fabricação sem remoção de material e que engloba processos convencionais, como a estampagem profunda, e não convencionais, como a estampagem incremental por ponto único.

Figura 1 - Classificação dos processos de fabricação.



Fonte: Adaptado pelo autor, com dados de Machado et al. (2011) e complementado com dados de Filho et al. (2011), Maximiliano (2016) e Rocha (2012).

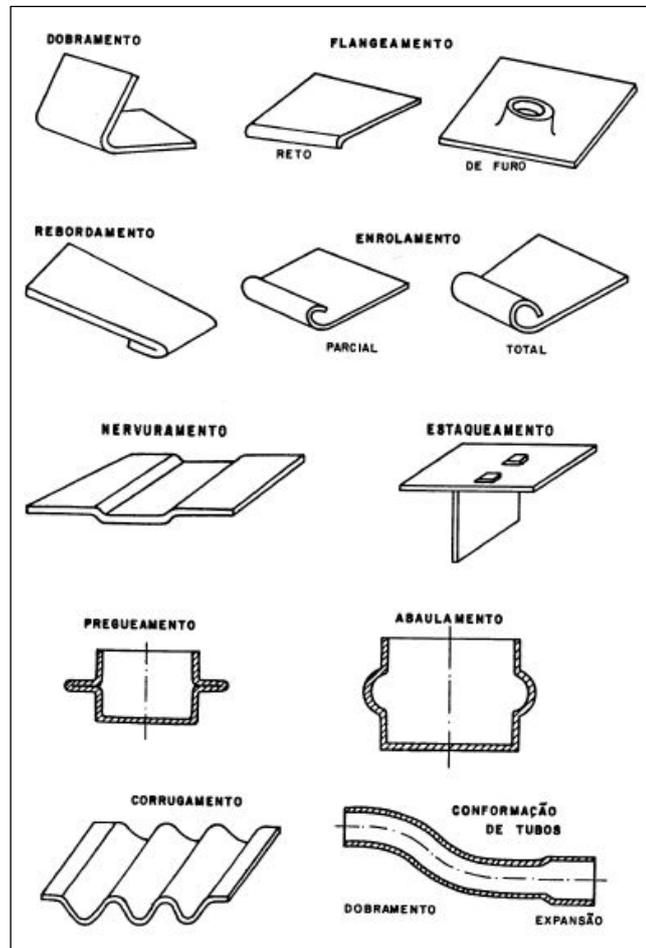
A conformação mecânica é a operação de mudança permanente das dimensões da peça através de deformação plástica, e, em muitos casos, em segundo objetivo tem-se a alteração das propriedades mecânicas do material. De modo que, esta mudança nas dimensões, deve-se à intervenção que se aplica na peça, sem ocorrência de variação do volume, a qual se denomina deformação plástica (HELMAN; CETLIN, 2005).

Estas peças iniciais, conforme Filho et al. (2011), a serem conformadas por algum processo, possuem as mais variadas geometrias, podendo ser simples tiras, discos, chapas e outros.

2.1.1 Estampagem de chapas

A estampagem de chapas, conforme Filho et al. (2011), é um grupo de processos que embarca o dobramento, rebordamento, estaqueamento, abaulamento, gravação, corrugamento, conformação de tubos, flangeamento, nervuramento, pregueamento, entre outros. A Figura 2, ilustra estes tipos de processos de estampagem.

Figura 2 - Processo de estampagem de chapa em geral.



Fonte: adaptado Filho et al. (2011).

2.1.1.1 Estampagem incremental

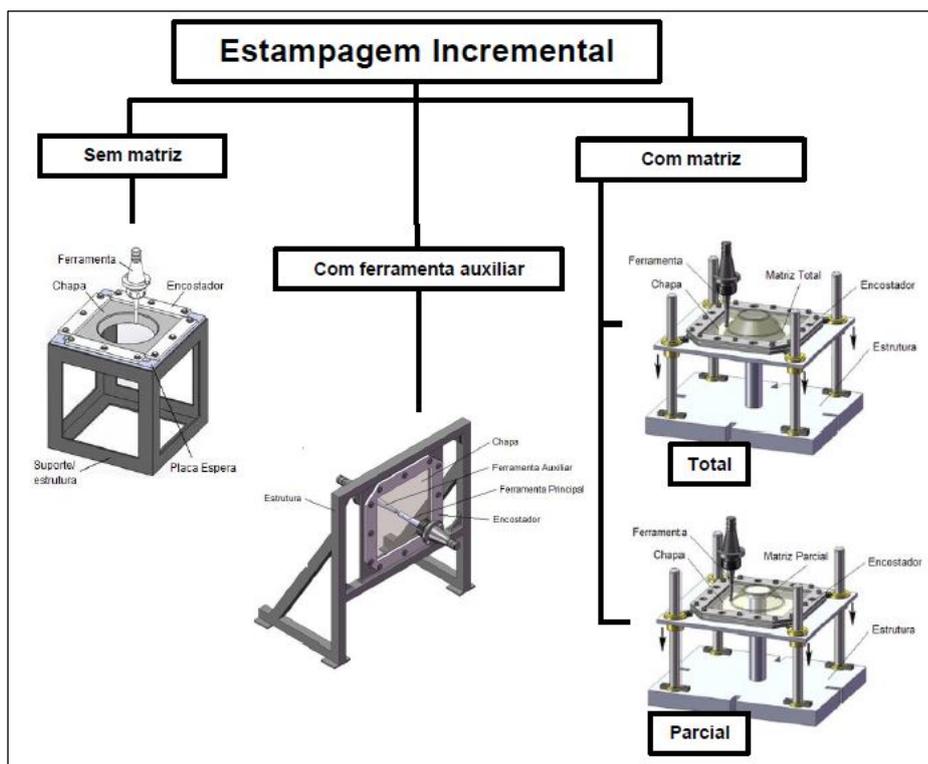
Este processo teve desquite na década de 1990, com o potencial capaz de produzir pequenos lotes de peças com custo pequeno, pois, além do equipamento CNC, se faz necessário uma ferramenta de conformação, com geometria relativamente simples e capaz de ser utilizada em diversas operações, e de um suporte de fixação para a chapa. Deste modo, a geometria final, ou seja, a conformação realizada no processo independe de uma matriz dedicada, segundo Hussain et al. (2016).

Por ser um processo novo, em comparação aos demais desta área de conformação de furos em chapas, as pesquisas estão sendo direcionadas em cima

das estratégias no aumento progressivo do diâmetro do furo, no aumento progressivo do ângulo da parede e a união destas duas estratégias, conforme descreve Hussain et al. (2016 apud GAO, 2008; CUI, 2010) para a confecção de flanges.

As variações deste processo, que estão ilustradas na Figura 3, vão desde o tipo mais simples, que faz emprego de uma base de fixação em conjunto a uma ferramenta atuante, que se denomina estampagem incremental sem matriz, passando pelo método que usa uma ferramenta suplementar, denominado estampagem incremental com ferramenta auxiliar, e até chegar nas variantes que empregam matriz, parcial ou total, em conjunto da ferramenta, denominado de estampagem incremental com matriz parcial ou total, conforme Soeiro (2014).

Figura 3 - Variantes do processo de estampagem incremental.



Fonte: Soeiro (2014).

2.2 Teoria geral da estampagem incremental com ponto único de contato (SPIF, do inglês: *Single Point Incremental Forming*)

Esta técnica de conformação está em ascendência nos últimos anos, tendo sua origem em 1967.

Com precisão relativamente alta, é indicada para aplicação na indústria na produção em pequena escala, pois, segundo Kuitert (2016), esta técnica não é indicada para produção em grande escala.

Para Bagudanch et al. (2013) e Jeswiet et al. (2015), esta técnica provem facilidades para fabricantes de protótipos e como substituta em processos que atualmente são onerosos e longos por serem realizados de forma manual.

Que, conforme Jeswiet et al. (2005), possui vantagens consideráveis, como: a flexibilidade de ser alterado o design da peça, a desnecessidade de matriz dedicada para cada design, emprego de centro de usinagem CNC, as chapas apresentam aumento da conformabilidade, operação que não emite grandes níveis de ruído. Soeiro (2014) destaca a possibilidade de se obter valores maiores de deformação, ligando os fatos da natureza do processo ser incremental e com as deformações serem localizadas.

O processo consiste na atuação de uma ferramenta por determinado caminho gerando pressão sobre a superfície da chapa, formando assim, localmente uma deformação. Estas características distinguem a SPIF dos demais processos, que aplicam uma deformação em toda área da chapa Kuitert (2016). Assim, Bagudanch et al. (2013) e Jeswiet (2015) explanam de forma complementar ao dito por Kuitert (2016), que a SPIF é capaz de realizar uma conformação de geometria complexa e totalmente funcional, o que não é possível em outros processos.

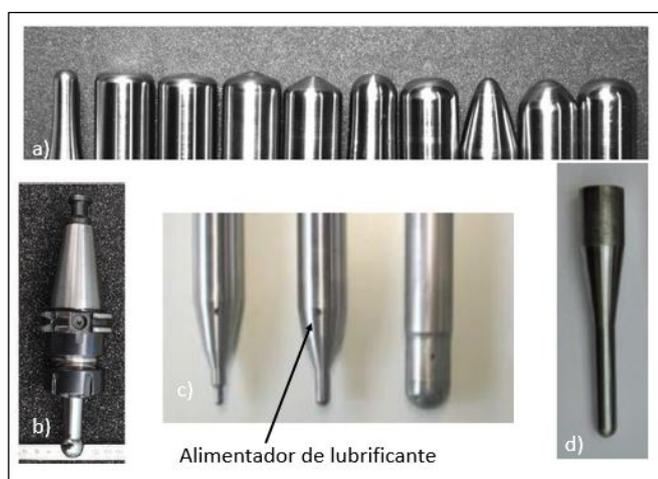
A precisão da SPIF está ligada aos parâmetros do processo, Kuitert (2016) decompõem estes como parâmetros de processo, de material e de projeto.

As variáveis de processo, como o tamanho do passo e a distância entre dois ciclos desenvolvidos, de material, como anisotropia e o endurecimento devido a deformação, e de projeto, como a geometria da peça, são influenciadores consideráveis para a precisão.

As ferramentas, exemplificadas na Figura 4, são consideradas pequenas, pois, possuem diâmetros em torno de 5 mm a 20 mm, conforme Jeswiet et al. (2015)

em acordo com Kuitert (2016), são facilmente confeccionadas, com investimento pequeno quando comparado a outras convencionais.

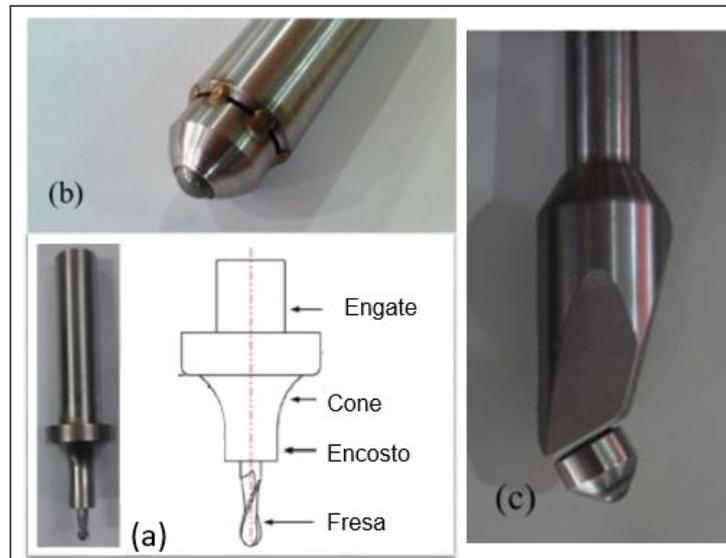
Figura 4 - Perfis usuais de ferramentas de estampagem incremental com ponto simples de contato. a) e d) Ferramentas de simples geometria. b) Conjunto de engate e ferramenta de simples geometria com ponta esférica. c) Ferramentas com grande variação de diâmetro e com sistema de alimentação de lubrificante.



Fonte: adaptado Jeswiet et al. (2015); Jeswiet et al. (2005); Soeiro (2014 apud PARDAL, 2013); Borrego et al. (2015).

A seleção da ferramenta acarreta na qualidade da peça, pois ferramentas com diâmetro menores tendem a facilitar a confecção de inclinações maiores, porém ocasionam aumento da rugosidade superficial do local de contato durante a conformação, com validade para materiais dúcteis, como alumínio, e com elevada dureza, como aço inoxidável (JESWIET ET AL., 2015). A confecção de ferramentas equipadas com partes moveis ou com geometria mais arrojada, como pode ser visto na Figura 5 que apresenta variedades de ferramentas com geometria empregada em pesquisas de conformação incremental por ponto simples de contato.

Figura 5 - Perfis empregados em pesquisas de possíveis ferramentas substitutas para as ferramentas simples usuais em estampagem incremental com ponto simples de contato.

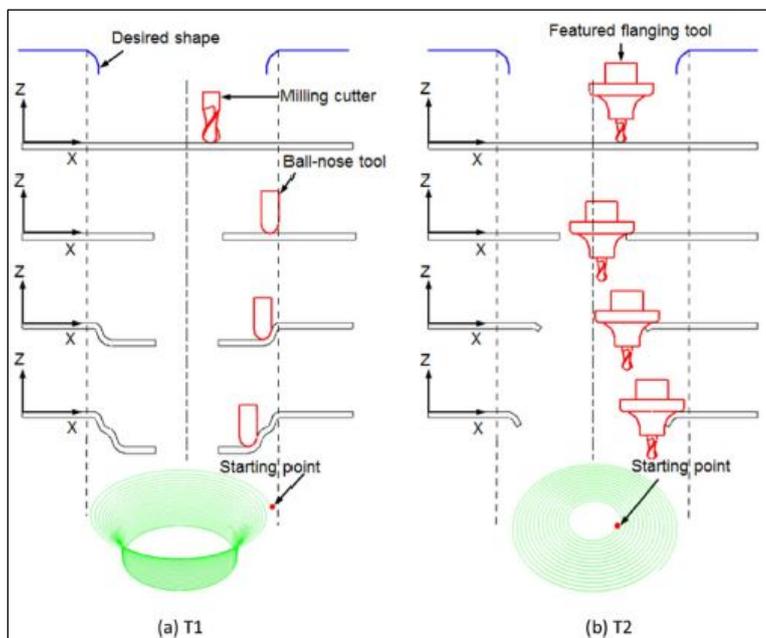


Fonte: adaptado Cao et al. (2016); Fritzen (2016 apud LU et al., 2014).

A Figura 6a, é uma ferramenta desenvolvida estrategicamente para realizar o processo de abertura de furo, por conter uma fresa em sua extremidade inferior, e posteriormente na sua extremidade superior existe um cone para efetuar a conformação, por um percurso no plano expandido em direção ao diâmetro final como ilustrado na Figura 6 Cao et al. (2016).

A Figura 6b e a Figura 6c, foram descritas por Fritzen (2016 apud LU et al., 2014) como ferramentas desenvolvidas com geometria composta por partes rolantes com o intuito de melhorar o acabamento da superfície.

Figura 6 - Etapa e percurso a) realizado por duas ferramentas, uma para realizar o furo e a outra para expandir. b) realizado por apenas a ferramenta proposta, tanto o furo como a expansão.



Fonte: adaptado Cao et al. (2016).

O investimento é novamente abordado no SPIF como vantajoso em termos de conformação profunda de chapas, pois, como ao processo de elaboração de copos por estampagem profunda, Filho et al. (2011) descreve a necessidade de uma matriz com determinada geometria, composta por diâmetros específicos, folgas e comprimento, destinada para este produto.

O tamanho da chapa a ser conformada é limitado apenas pela capacidade da máquina, pois as forças não possuem grandes elevações devido à área de contato e ao passo, que permanecem pequenos durante o SPIF (JESWIET ET AL., 2015).

Segundo Bagudanch e. al. (2013 apud DURANTE ET AL., 2009), as forças predominantes, na estampagem incremental de chapas, possuem maior intensidade na direção axial da ferramenta, diferindo-se do processo de fresagem.

Sabe-se que os esforços, da ferramenta, estão relacionados de modo direto com o diâmetro da ferramenta (d_t), pois a força na direção axial, na mesma, eleva-se conforme é aumentado o seu diâmetro. Esta relação se explica por haver maior área de contato da ferramenta com a chapa, e o passo, que empurra a superfície da

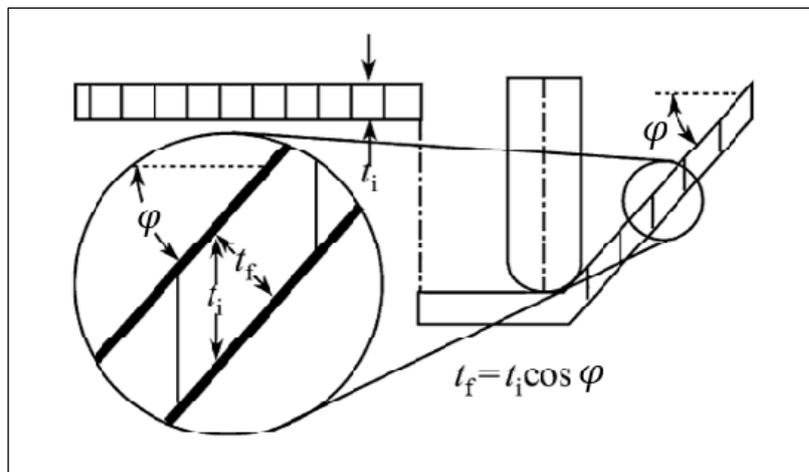
chapa, no qual, quanto maior for, maior terá de ser a força aplicada pela ferramenta para efetuar o deslocamento de material para realizar a deformação (BAGUDANCH ET AL. ,2013).

Deste modo, este tipo de estampagem em chapas causa redução da espessura da parede, que pode ser estimada pela Equação 1. O que não condiz com medições exatas, pois ocorre um leve afinilamento da espessura ao longo da estampagem, segundo Jeswiet et al. (2015). A Figura 7 ilustra tal relação de espessura.

$$t_f = t_i \times \cos \varphi \quad \dots(1)$$

Nos quais, t_f corresponde à espessura no local, t_i à espessura inicial e φ ao ângulo obtido na estampagem.

Figura 7 - Relação de espessura devido ao SPIF.



Fonte: adaptado de Jeswiet et al. (2015).

2.3 Equipamentos de comando numérico computadorizado (CNC)

Maquinário semelhante aos convencionais, porém contendo um melhoramento em termos de controle e precisão, derivado de uma unidade de

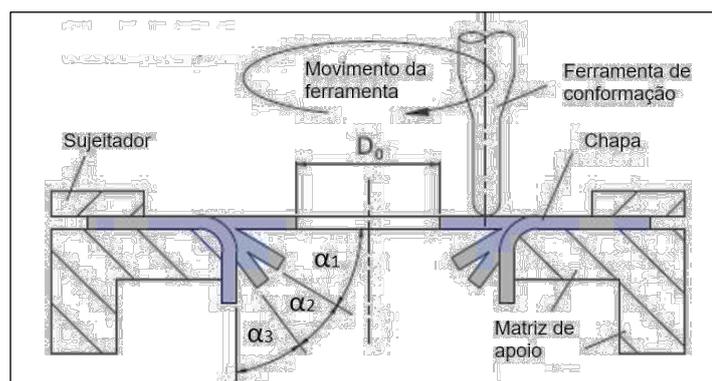
controle responsável pelo envio de sinais elétricos para dispositivos, como réguas óticas, de controle de funções na máquina Cunha (2006).

Para Cunha (2006), a operação de controle é basicamente a utilização contínua de comandos. Para Witte (1998), na sua generalidade, consiste em um código capaz de controlar uma máquina, no qual esta irá, primeiramente, ler o código e posteriormente transforma-lo em uma operação, quase que simultaneamente.

O emprego de maquinário CNC comuns de três eixos é destacado por Jeswiet et al. (2005 apud JESWIET, 2001; LEACH ,2001; FRATINI,2002), como sendo equipamentos capazes de executar a estampagem incremental. Com a necessidade de ser realizado uma sequência de passos para a confecção de um ângulo.

Esta consideração pode ser vista na Figura 8 a qual ilustra o processo de fabricação de flanges por conformação incremental em equipamento CNC planejado por Cristino et al. (2014) composto por uma determinada sequência de passes circulares da ferramenta em conjunto de passos de penetração.

Figura 8 - Etapa sequencial para obtenção de curvatura em ângulo reto no processo de conformação incremental em CNC.



Fonte: adaptado Cristino et al. (2014).

2.4 Aços avançados de alta resistência (AHSS)

Conforme Martins (2015 apud SUDA, 2005), devido a interesses, tanto sociais como corporativos, a indústria automotiva está direcionando sua produção para a

diminuição de peso, devido a aspectos de segurança e a redução da emissão de gases poluentes, como o CO₂. Em termos similares, cita Nigri (2008) que as organizações responsáveis pela regulamentação de veículos automotores do continente europeu e norte americano estão expedindo regulamentos requisitando a redução de gases, a segurança dos passageiros e a exigência de resistência ao impacto.

Deste modo, foi desenvolvido ligas de aço denominadas de aços avançados de alta resistência, para que sua alta resistência fosse responsável pela redução do peso de veículos, sem afetar de forma comprometedora a sua conformabilidade.

Os aços avançados de alta resistência, do inglês *Advanced High Strength Steel*, descritos também pela sigla *AHSS*, são aços que, em sua microestrutura, contém fases como ferrita, bainita, e austenita retida, ou austenita retida e martensita, que são formadas devido a fatores como o elemento de liga e ao tipo de processo de fabricação Gipiela (2012 apud ANDRADE *et al.*, 2000).

Em conformidade a Nigri (2008) os *AHSS* são classificados devido a sua resistência, pois além de fatores como a resistência, pode-se realizar uma classificação em termos da denominação metalúrgica e por outras propriedades do material. O mesmo cita também que dentro desta classificação estão contidos muitos aços de alta resistência, que possuem como valor limitante de resistência maior que 700 Mpa e de escoamento maior que 550 Mpa.

2.4.1 Classificações dos AHSS

Estes, se distinguem por características presentes no material, ou no comportamento mecânico de cada um, assim, a sua classificação, segundo Nigri (2008).

A classificação, conforme o manual *AHSS Guidelines* (2017), possui diferentes variações conforme o local, porém a classificação genérica é definida como “XX aaa/bbb”, no qual XX corresponde ao tipo de aço, na Tabela 1 descreve os tipos de aços e suas respectivas abreviaturas. A sequência aaa é descrita como o rendimento mínimo, em Mpa, e a sequência bbb é descrita como o limite de resistência a tração, em Mpa.

Tabela 1 - Designação dos tipos de aços.

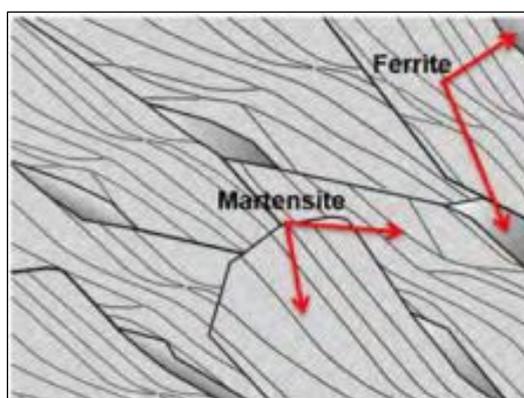
XX	Tipo de aço
HSLA ((High-Strength, Low Alloy)	Alta resistência, baixa liga
DP (Dual fase)	Fase dupla
CP (Complex Phase)	Fase complexa
FB (Ferrítico-Bainíticos)	Ferrítico- Bainíticos
Q & P (Quenching and partitioning)	Temperado & particionado
TRIP (Transformation-Induced Plasticity)	Plasticidade induzida por
MS (Martensitic)	Martensítico
TWIP (Twinning-Induced Plasticity)	Plasticidade induzida por geminação
HF (Hot Formed)	Conformado a quente e temperado
TPN (There-fase nano)	Trifásico nano precipitado

Fonte: Adaptado do manual AHSS Guidelines (2017).

2.4.1.1 Aços Martensíticos (MS)

Conforme o manual AHSS Guidelines (2017), este material é composto, microestruturalmente, por ferrita e/ou bainita, em pequenas quantidades e com martensita, que possui uma quantidade quase que próxima a 100%, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Ilustração da microestrutura do aço AHSS martensítico.



Fonte: adaptado do manual AHSS Guidelines (2017).

Segundo Tamareli (2011 apud ACELOR MITTAL), a martensita atua como uma matriz, na qual a ferrita e/ou bainita estão contidas. Assim, devido a este arranjo, tem-se um aço de baixo nível de alongamento quando comparado com os demais AHSS, porém com a capacidade de atingir níveis de resistência elevados, em torno de 900 a 1700 Mpa.

Este tipo de aço, AHSS martensítico, é subdividido conforme o intervalo de resistência a tração. A aplicação no setor automotivo, se dá em peças auxiliares da estrutura, como exemplificado na Tabela 2.

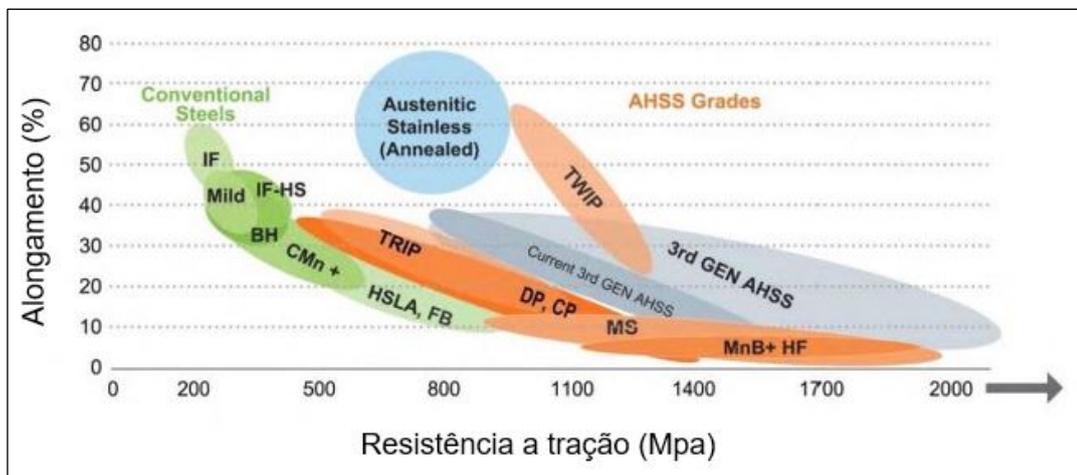
Tabela 2 - Alguns tipos de aço AHSS martensítico comercial e suas respectivas aplicações no setor automotivo.

Tipo de aço AHSS martensítico comercial	Aplicações automotivas (exemplos)
MS 950/1200	Travessas, vigas de intrusão laterais, vigas de para-choques e reforços de para-choques
MS 1150/1400	Rack externo, vigas laterais de intrusão, vigas de para-choques e reforços de para-choque
MS 1250/1500	Vigas de intrusão laterais, vigas de para-choques, reforços de para-choques

Fonte: adaptado de AHSS Guidelines (2017).

Na Figura 10, se faz possível visualizar o comportamento do aço AHSS MS, nas condições de alongamento versus tensão. Evidenciando seu comportamento perante os demais, descritos na Tabela 1.

Figura 10 - Comparação da resistência e ductilidade de alguns dos aços para conformação empregados na indústria automobilística com destaque para os AHSS.



Fonte: adaptado de AHSS Guidelines (2017).

2.5 Expansão de furos

Consiste em um meio de suma importância para estudos de caracterização de conformabilidade do processo de estampagem em chapas, conforme Narayanasamy et al. (2009, p.1).

Com grande aplicabilidade industrial, como o flangeamento de furos, que visa o reforço da borda, melhor aparência e estrutura com dimensões favoráveis para união de tubos em chapas.

Tal processo, consiste no alargamento do diâmetro de um pré-furo existente em uma chapa (BORREGO et al., 2016).

2.5.1 Expansão de furo com o uso de punção

O método convencional para o alargamento de furo que consiste na realização da passagem de um punção, perpendicular à superfície da chapa, causando assim uma deformação plástica composta pela combinação de tensão e alongamento na periferia circunferencial (BORREGO et al., 2016).

Esta técnica é normalizada pela ISO 16630, que regulamenta critérios relacionados ao procedimento de expansão de furos em chapas metálicas.

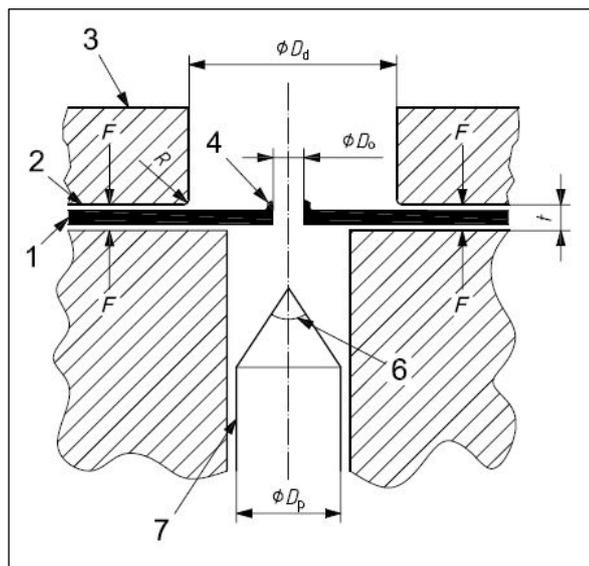
2.5.1.1 ISO 16630:2009

Esta norma destaca que o método de expansão de furo por punção estabelece a capacidade da chapa metálica, em estudo, ser ou não adequada a utilização de chapas metálicas, como por exemplo, na confecção de flanges, peças de suspensão e componentes estruturais, conforme ISO 16630 (2009, p. 5).

As etapas para realização deste processo são as descritas pela ISO 16630, pois esta enumera duas para serem realizadas. Sendo estas:

- 1- Realização do pré-furo, com diâmetro interno D_o , como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Ilustração do conjunto dos equipamentos, base de suporte e punção, para realização da expansão de furo conforme a ISO 16630.



Fonte: adaptado de (ISO 16630, p. 12).

Tabela 3 - Descrição dos números na Figura 11 - Ilustração do conjunto dos equipamentos, base de suporte e punção, para realização da expansão de furo conforme a ISO 16630..

Número	Descrição da referência numérica
1	Peça a ser testada
2	Cunho de encosto
3	Encosto

Número	Descrição da referência numérica
4	Rebarba criada pelo pré-furo
6	Ângulo da ponta do punção
7	Punção

Fonte: adaptado de (ISO 16630, p. 12).

- 2- O punção com ponta cônica de $60^{\circ} \pm 1^{\circ}$ e diâmetro (D_p), descrito na Tabela 3, suficiente para que possa expandir o diâmetro do pré-furo (D_o), exposto na Tabela 4, ilustrado na Figura 11, deve ser forçado, de forma concêntrica ao pré-furo, para que ocorra a expansão, e efetuar a parada no momento que surgir alguma fenda, que se estenda da borda em direção a chapa plana, com o parâmetro de velocidade na penetração constante.

Tabela 4 - Símbolos e descrições da ISO 16630.

Simbologia	Descrição	Unidade
D_d	Diâmetro interno da matriz	mm
D_h	Diâmetro do furo após a ruptura (médio)	mm
D_o	Diâmetro interno do pré-furo	mm
D_p	Diâmetro do punção	mm
F	Força aplicada pelo punção	N
R	Raio de canto da matriz	Mm
T	Espessura da chapa	mm
Λ	Relação de expansão do furo	%

Fonte: adaptado de (ISO 16630, p. 8).

Entre algumas das definições da ISO, está a dureza para a ferramenta de expansão cônica ter uma dureza mínima de 55 HRC e em termos dimensionais tem-se para algumas dimensões, valores fixos e intervalos validadores, apresentadas na Tabela 5.

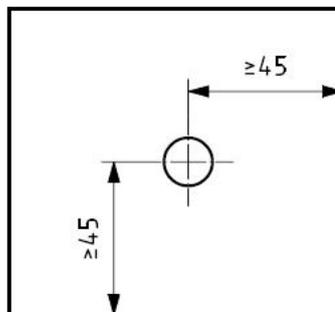
Tabela 5 - Símbolos e descrição das dimensões e intervalos determinados.

Símbolo	Intervalo ou valor definido
D_d	Não deve ser inferior a 40 mm
d_d	Deve ter 10,30 mm para espessura de: $1,2 \leq t < 1,5$ mm
D_o	Deve ter 10 mm
D_p	Deve ter tamanho suficiente para causar expansão do furo
F	Deve ser suficiente para evitar o deslizamento da peça
R	Deve estar entre 2 mm e 20 mm, recomenda-se 5 mm

Fonte: adaptado de ISO 16630.

A peça de teste deve ser plana, com dimensões na qual o furo esteja a uma distância mínima de 45 mm de qualquer extremidade e ao próximo furo adjacente, como ilustra a Figura 12, para não ocorrer influências da matriz que à fixa.

Figura 12 - Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de expansão de furo (medidas em milímetros).



Fonte: adaptado de ISO 16630.

O teste em si deve ser executado com os seguintes procedimentos:

- Temperatura ambiente de 23 ± 5 °C.
- São realizados 3 ensaios nas amostras de mesmo corpo.
- Alinhamento concêntrico da peça com a ferramenta.
- A superfície de saída do furo em expansão deve estar direcionada para a matriz, de modo que a direção de perfuração e a de expansão sejam iguais.

- A força aplicada na fixação da peça deve garantir que não ocorra deslizamento durante o teste.
- A velocidade de avanço do punção, na direção perpendicular a chapa, não deve ser superior a 1mm por segundo, para que seja possível ao operador parar, ou reduzir a velocidade do teste, no momento que seja possível, visualmente, avistar o início de fraturas.
- Após terminado o teste, realiza-se a mensuração interna do diâmetro expandido, por intermédio de instrumento adequado com precisão de 0,05 mm, em duas direções, no qual estas devem ser perpendiculares entre si. Deve-se evitar efetuar a mensuração no local da fenda.
- Caso não ocorra a fissura, deve-se descartá-la e fazer uso de um punção com diâmetro maior para outra peça.

O cálculo da razão de expansão do furo (REF) é obtido pela equação 2:

$$\lambda = \frac{D_h - D_o}{D_o} \times 100 \quad \dots(2)$$

3 METODOLOGIA

Ao examinar as informações obtidas em um teste, composto por parâmetros específicos da técnica, com as geradas em outro com parâmetros específicos de outra técnica, dispõem-se assim, finalmente a estes testes, dados para se formar um paralelo capaz de precisar as propriedades entre os mesmos. Em conjunto a teoria, que conforme, Marconi e Lakatos (2011, p. 99), tem serventia para orientar as restrições de amplitude dos fatos que serão postos em exploração, de modo a focalizar os aspectos que são considerados relevantes.

Têm-se que, para Marconi e Lakatos (2011, p. 92), este tipo de estudo é denominado Método Comparativo, o qual consiste na estrutura de se destacar informações para serem comparadas com o propósito de se reconhecer as semelhanças e explicar as suas divergências. Deste modo, o mesmo é descrito por Medeiros (2012, p. 32), que o método comparativo visa elucidar semelhanças e dessemelhanças por intermédio de observações de dois fatos.

Como focalizador dos testes a serem realizados neste estudo, tem-se como guia a ISO 16630, pois a mesma reforça que a adesão desta resulta em uma dispersão dos resultados minimizados nos procedimentos em teste ISO 16630.

As variações aplicadas nos testes, em relação às orientações da ISO 16630, será à substituição da ferramenta atuante, que convencionalmente para este teste é feito uso de punção cônico que desenvolve apenas movimento no sentido normal a chapa, como descreve ISO 16630, para o processo de estampagem, por uma ferramenta com geometria esférica, como ilustra a Figura 13, pois, a partir da afirmação de Kuitert (2016 apud KIM E PARK, 2002), de que a geometria esférica representa um fator que desempenha a melhoria da conformidade no processo SPIF. Tal ferramenta irá realizar movimento tridimensional, unindo deslocamento normal a um tangencial.

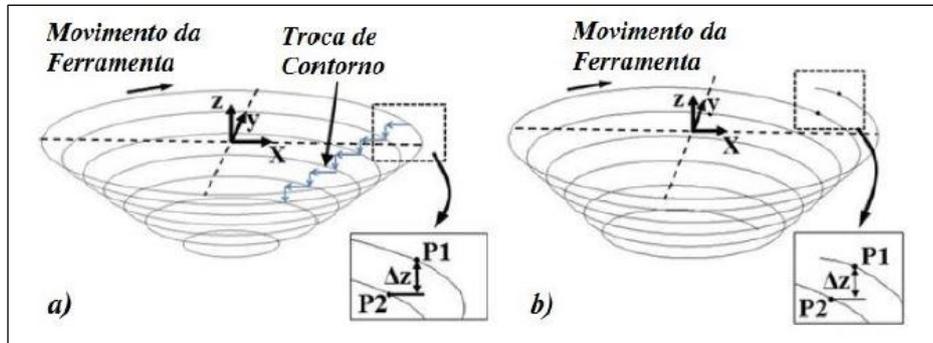
Figura 13 - Ferramenta escolhida para realização dos testes por estampagem incremental para expansão de furo.



Fonte: Autor.

O furo, presente no teste da ISO 16630, denominado anteriormente como pré-furo, que será expandido tridimensionalmente, em direção a borda e em sentido da penetração, como ilustrado a Figura 14 que representa o percurso da ferramenta, pode ser usado para esta expansão duas estratégias, como nos descreve Fritzen (2016 apud REDDY; LINGAM; CAO, 2015). A primeira nomeada de estratégia de contorno, na qual a ferramenta se desloca na direção vertical e com sentido de cima para baixo, como visto na Figura 14a, no local em que é definido o início de contorno. Este avanço realizado na direção vertical é descrito como passe vertical (Δz). Fora deste local de início de contorno, a ferramenta irá mover-se somente no Plano XY. O segundo percurso denominado como estratégia espiral, ilustrado na Figura 14b, o qual tem movimento tridimensional durante todo o percurso, pois o passe vertical (Δz) é distribuído gradualmente até realizar todo trajeto do contorno.

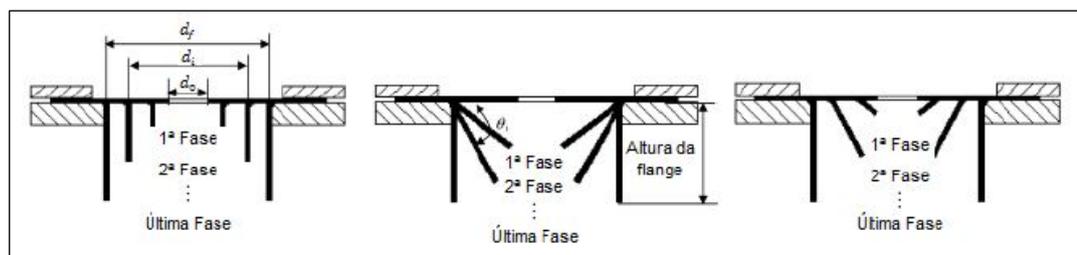
Figura 14 - Percursos usuais da ferramenta para expansão de furo por SPIF. a) Troca de contorno. b) Espiral.



Fonte: Fritzen (2016 apud REDDYL; LINGAM; CAO, 2015).

Realizando testes de trajetória de multipasses para a obtenção de flanges, Soeiro (2014 apud CAO e GUI, 2010) cita 3 testes realizados em alumínio 1060 com espessura de 1mm, ilustrados na Figura 15, como possíveis estratégias para a realização do processo. O primeiro consistia em expandir o furo com uma sequência de passes no plano até obter o furo final, neste caso o colarinho se mantém sempre perpendicularmente ao plano. O segundo realiza o aumento progressivo do ângulo da parede, realizando uma sequência de 30° , 45° , 60° , 75° e 90° , sempre efetuando o avanço angular para o diâmetro final. E por fim, o terceiro teste foi realizado a partir da combinação dos dois testes anteriores, que consiste no aumento progressivo do diâmetro juntamente com o ângulo do furo para cada passe.

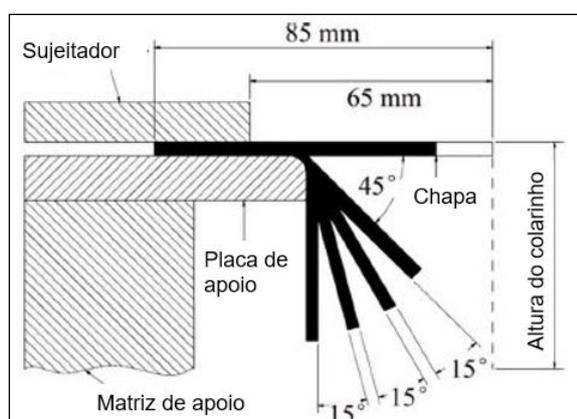
Figura 15 - Diferentes estratégias para obtenção de flanges por intermédio de estampagem incremental.



Fonte: Soeiro (2014 apud CAO e GUI, 2010).

Os avanços angulares enquadram-se como uma estratégia de suma importância, tanto que Hussain et al.(2016) descreve em seu teste o uso de avanços de 15° para cada passe, iniciando com um ângulo de 45° , como demonstrado na Figura 16, com a finalidade de obter flanges com colarinho alongado.

Figura 16 - Estratégia com avanço angular de 15° por passo em conformação de chapas por estampagem incremental para a fabricação de flanges.



Fonte: adaptado de Hussain et al. (2016).

Com a finalidade de obter flanges com colarinho cônico, ilustrado na Figura 17, Soeiro (2014 apud CENTENO et al., 2012) cita a realização de trajetória variável, com variação do ângulo conforme evolui a deformação.

Figura 17 - Flange de colarinho cônico fabricada a partir de trajetória variável com SPIF.



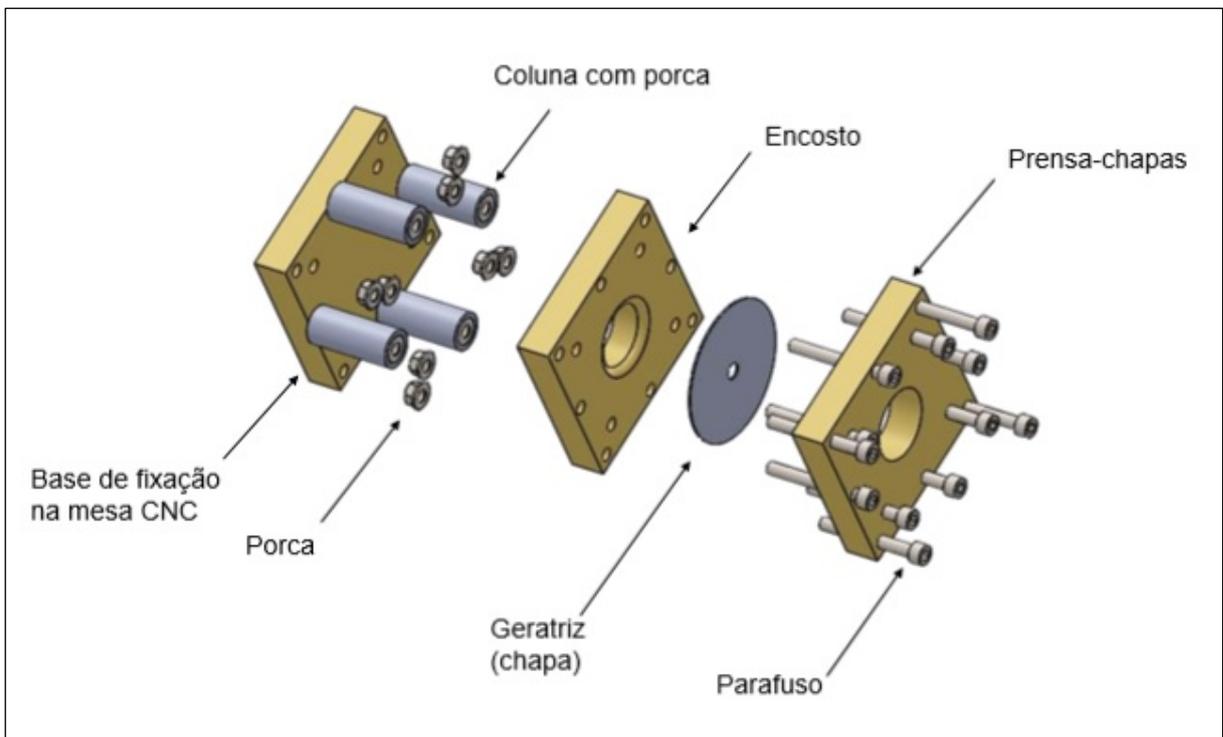
Fonte: Soeiro (2014 apud CENTENO et al., 2012).

Assim, deste levantamento de percursos utilizados e estudados, resume-se que a utilização de trajetória espiral, ou citada também como trajetória variável, possui fatores que a evidenciam como método consistente para a realização de expansão de furo, pois na criação de flanges cônicas o processo se assemelha com a mesma. E Fritzen (2016 apud JESWIET et al.,2005) ressalta que para a estratégia de contorno, o avanço causa marcação na região do início de contorno, causando aumento da rugosidade de elevação da força de conformação.

No teste será aplicada uma força pelo prensa-chapas capaz de manter a Geratriz fixa, de modo que a mesma não sofra deslocamento em direção à área central, onde está atuando a ferramenta.

A matriz destinada para fixação da geratriz é composta por um prensa-chapas, colunas de elevação com porca fixa na extremidade, base de fixação na mesa da CNC, encosto, parafusos e porcas, como ilustra a Figura 18.

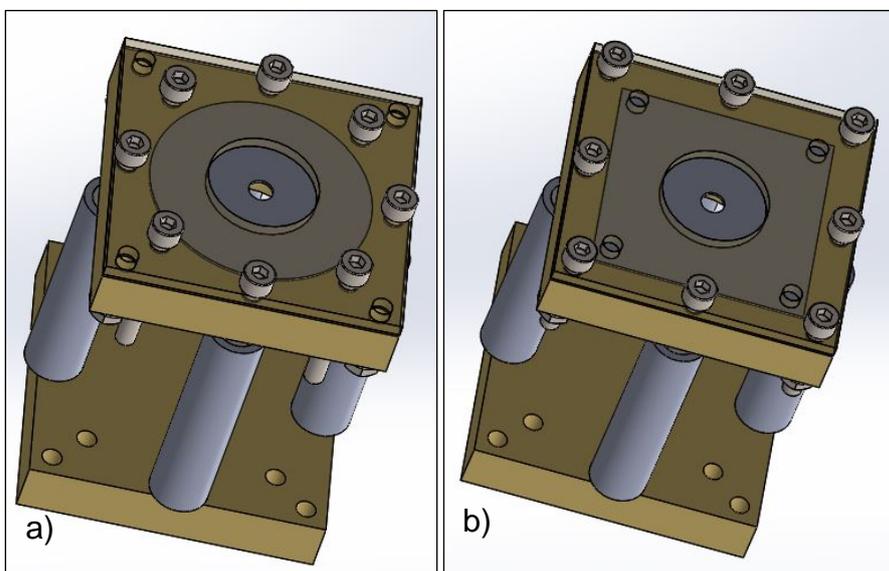
Figura 18 - Vista explodida da matriz de fixação para expansão de furo em SPIF.



Sabendo que a chapa deve possuir, conforme ISO 16630, medida de 90 x 90 mm, como ilustrado na Figura 12, esta pode ter geometria semelhante a um disco com um furo no centro ou a uma geratriz quadrada com furo no centro. Deste modo, a matriz de fixação é dimensionada para acomodar estes dois tipos de geometrias, com a alternância da organização dos parafusos. Pois, com a organização dos parafusos para a geratriz em forma de disco não seria possível fixar a geratriz de forma quadrada.

A Figura 19a demonstra o arranjo de parafusos para prensar a geratriz em forma de disco. E a Figura 19b demonstra o arranjo para prensar a geratriz com forma quadrada.

Figura 19 - Matriz de fixação: a) com parafusos organizados para comportar a geratriz em forma de disco e b) com parafusos organizados para comportar a geratriz em forma quadrada.

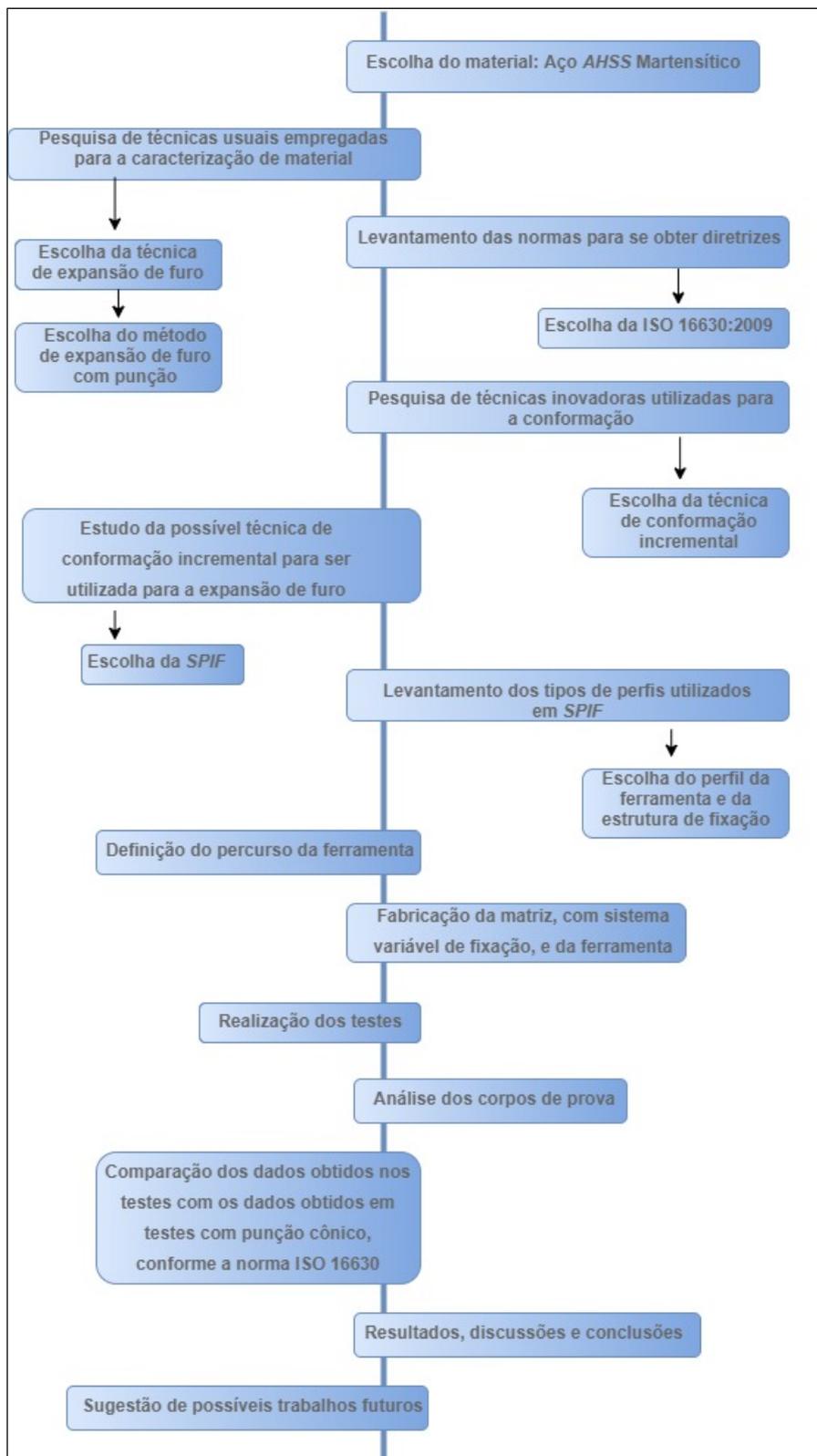


Fonte: Autor.

O avanço da ferramenta será interrompido no momento em que se notar visualmente qualquer fissura iniciada na borda do furo, prolongando-se através da espessura da chapa ISO 16630 (2009, p. 7).

O funcionograma das metodologias, relacionado à teoria, testes, discussões e conclusão, está exemplificado na Figura 20, definindo assim, uma sequência teórica para exemplificar de forma clara o passo a passo desenvolvido.

Figura 20 - Funcionograma metodológico dos desenvolvimentos teórico, dos testes, discussões e conclusões.



Fonte: Autor.

4 DESENVOLVIMENTO

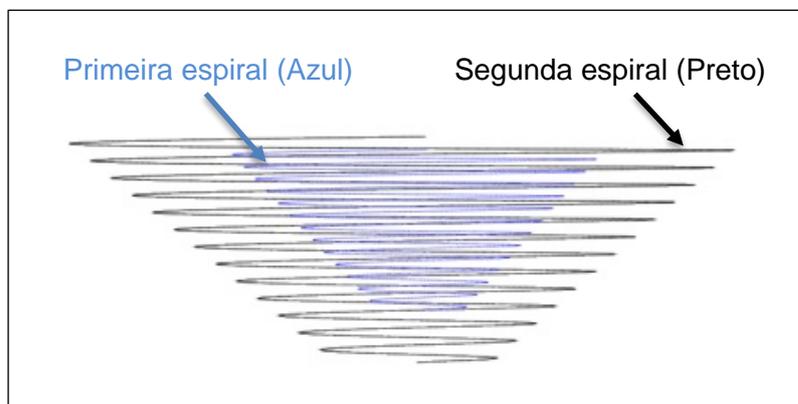
4.1 RESULTADOS DOS TESTES

Os testes realizados foram separados em duas estratégias, em chapa de aço AHSS Docol CR950Y1200T-MS com 1,2 mm de espessura.

Estratégia 1:

Nesta primeira estratégia, foi escolhido um percurso em espiral cônico, constituído por 7 espirais, no qual, cada uma é composta por 60 espiras, conforme ilustra a Figura 21 para a primeira e segunda espiral, com aumento gradativo do diâmetro inicial e do valor total de penetração. Pretendendo obter uma conformação semelhante ao que Soeiro (2014 apud CENTENO et al., 2012) fez para obter flanges cônicas. No equipamento CNC, fresadora Romi Cmg Fanuc 0i – NC D800, optou-se por um avanço de 400 mm/minutos, sem rotação, e em temperatura ambiente, a 25°C.

Figura 21- Percurso ilustrativo da sequência da primeira e da segunda espiral.



Fonte: Autor.

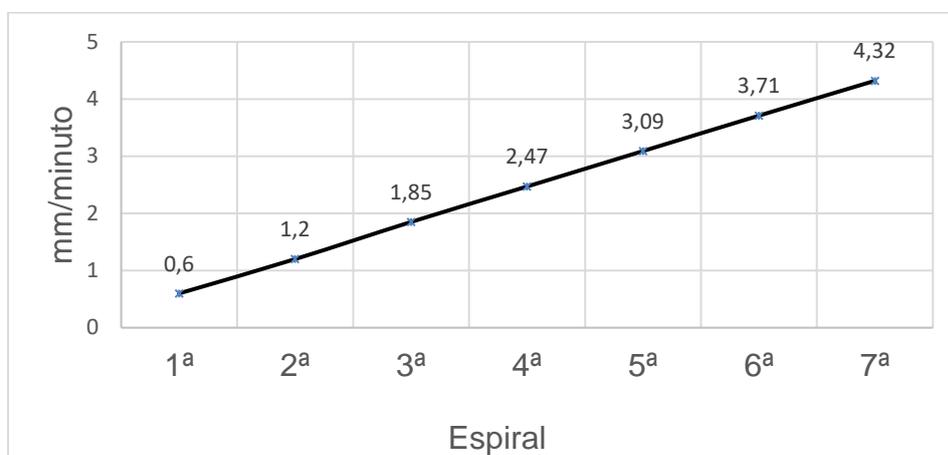
A ferramenta foi confeccionada com perfil cilíndrico, com variação do diâmetro ao longo do corpo, sendo 11,8 mm o maior diâmetro, com extremidade cônica e com ponta esférica de 5 mm. Confeccionada em aço AISI M2, o material com melhores características para conformação a frio, conforme GGD metals (2017), e que havia disponível no laboratório da universidade. Aplicou-se tratamento térmico, para elevação de dureza, de têmpera à 1200°C, com 2 pré-aquecimentos de 800 e

1000°C por 30 minutos/cada, e resfriamento em óleo. Para atenuar as tensões residuais, realizou-se o revenido de 550°C por 2 horas, como descrito por GGD metals (2017).

A fim de reduzir o atrito, ao longo do percurso, da ferramenta com a chapa, foi depositado na superfície da chapa uma fina camada, ± 1 mm, de lubrificante sólido, do tipo grafite em pó. Por haver captura de imagem em baixo da chapa, teve-se que limitar o tipo de lubrificação, não podendo ser aplicado lubrificante com baixa viscosidade ou líquido.

A velocidade vertical foi obtida de forma particular para cada espiral, como ilustra a Figura 22. Pois, conforme ocorre a sucessão das espirais, realiza-se diferentes deslocamentos verticais específicos para cada espiral. Porém, respeita-se o limite de 1mm por segundo, ou 60 mm/ minuto, estipulado pela ISO 16630.

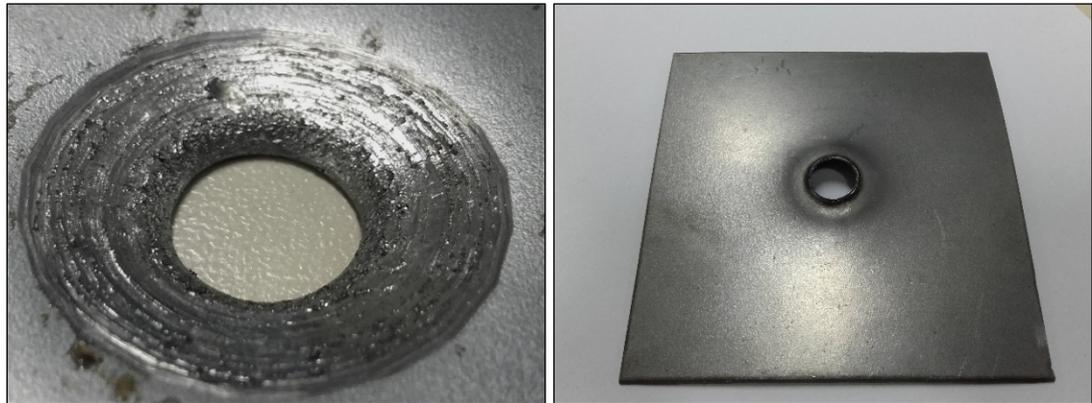
Figura 22 - Velocidade de deslocamento da ferramenta na direção vertical específica para cada espiral (mm/ minuto).



Fonte: Autor.

No ensaio, com a primeira estratégia, para efetuar a conformação com o uso da ferramenta de geometria ilustrada na Figura 13, obteve a quebra brusca da ferramenta, após 10 min de execução, e a formação excessiva de rugosidade superficial na chapa, no local que esteve em contato com a ferramenta. A Figura 23, explicita a chapa conformada pela primeira estratégia.

Figura 23- Chapa de aço AHSS martensítico conformada por SPIF com lubrificação de grafite em pó; a) zona conformada e danificada pela ferramenta e b) superfície inferior da chapa conformada.



Fonte: Autor.

Não houve a possibilidade de se obter expansão significativa do furo, até aparecer fraturas na borda, chegando à um diâmetro médio final de 10,65 mm, devido ao rompimento da ferramenta no primeiro ensaio. Porém, deste modo, se fez possível estimar a força a qual a ferramenta foi submetida até romper.

Callister (2002) descreve que, pela equação 3, se faz possível obter o limite de resistência a tração a partir do conhecimento da dureza, pois os dois parâmetros são indicadores da capacidade de um metal resistir a deformação plástica.

$$\text{LRT} = 3,45 \times \text{HB} \quad \dots(3)$$

Sendo LRT, em MPa, o limite de resistência a tração e HB o valor de dureza na escala Rockell B.

Realizando a mensuração da dureza da ferramenta, obtém-se uma média de 801,7 HV, no qual HV corresponde, conforme Galvão (2017), a dureza na escala Vickers, que corresponde a aproximadamente 722 HB. Sendo que este valor de dureza atende ao valor requisitado pela ISO 16630.

Portanto, o valor obtido para o LRT é 2490,9 MPa. Assim, sabe-se que a força exercida resultou em um valor maior, pois a peça rompeu, de modo que esta força ultrapassou o valor de LRT.

Como existe uma transição de diâmetro no local, ocorrerá concentrações de tensão, segundo Juvinall e Marshek (2008). Em vista disto, o mesmo, destaca a

equação 4, como relação entre a tensão teórica, σ_{nom} , e a tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$, que considera o concentrador.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = K_t \times \sigma_{nom} \quad \dots(4)$$

Assim, a concentração de tensão, para eixo com adoçamento, submetido a flexão, conforme Jovinall e Marshek (2008) explana em tabela, para a razão dos diâmetros, no local, tem-se 1,10. E para a razão do raio de adoçamento pelo diâmetro menor, obtém-se, aproximadamente, $K_t=1,85$.

E a tensão nominal é descrita pela equação 5, de acordo com Jovinall e Marshek (2008).

$$\sigma_{nom} = \frac{32 \times M}{\pi \times d^3} \quad \dots(5)$$

Em que, M é o momento fletor, composto pela parcela perpendicular da força, exercida pela chapa contra a ferramenta, multiplicada pela distância desta até o local em análise.

Substituindo a equação 4 na equação 5, tira-se a equação 6.

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{K_t} = \frac{32 \times M}{\pi \times d^3} \quad \dots(6)$$

Reorganizando, e expandindo os termos, tem-se a equação 7:

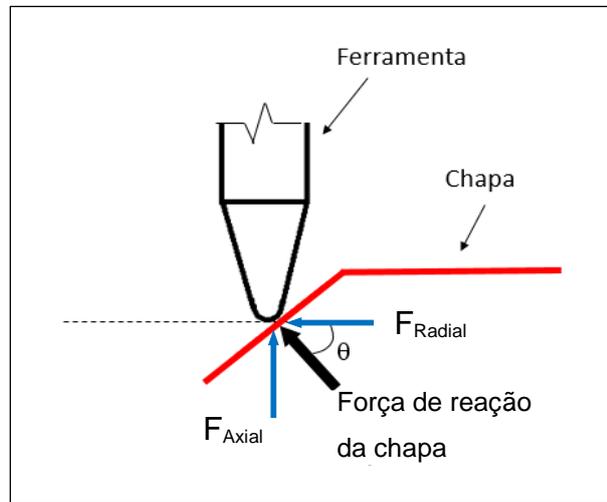
$$F = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} \times \pi \times d^3}{K_t \times 32 \times L} \quad \dots(7)$$

Deste modo, com L= 54 mm, consegue-se, estimar a parcela radial da força exercida na ferramenta pela chapa, aproximadamente 3 kN.

Após mensuração, chega-se a um valor aproximado para o ângulo de inclinação da chapa no momento que a ferramenta rompeu, desconsiderando o fator de retorno elástico, obtém-se 18°.

Assim, a força resultante, de reação da chapa, ilustrada na Figura 24, é próximo de 3,16 kN.

Figura 24 - Ilustração da força de reação da chapa.



Fonte: Autor.

Estratégia 2:

Para evitar a concentração de tensão, foi confeccionada uma geometria diferente na ferramenta, de perfil cilíndrico constante, com diâmetro de 12 mm, extremidade cônica e ponta esférica de 5 mm, como ilustra a Figura 25. Com tratamento térmico idêntico ao realizado na estratégia 1 e ensaio em temperatura ambiente.

Figura 25 - Desenho da ferramenta escolhida para realização da segunda estratégia nos testes por estampagem incremental para expansão de furo.



Fonte: Autor.

Deste modo, empregou-se outro método de lubrificação, por lubrificação pastosa de graxa grafitada, com o intuito de diminuir a resistência do atrito devido ao deslocamento da área de contato da ferramenta com a chapa.

No mesmo equipamento CNC, optou-se, para o deslocamento, usar avanço de 600 mm/min com rotação de 50 rpm, obtendo em torno de 17 minutos para a execução de cada teste.

À vista disto, com a estratégia 2, realizou-se 3 ensaios de expansão. Sendo que, nos mesmos, foi interrompida, imediatamente, a atuação da ferramenta, no momento em que foi visualizado alguma fissura na borda.

Devido à geometria da matriz, e do modo à qual foi fixada no torno de bancada da mesa da fresadora CNC, empregou-se uma câmera de vídeo digital, webcam, conectada a um computador, e fixada em uma das torres da matriz, para se acompanhar em tempo real o ensaio. A posição escolhida para a webcam facilitou a visualização das fraturas, pois esta, foi posta abaixo do encosto e direcionada para o furo.

Obtendo-se, para cada ensaio, determinado valor de expansão, ilustrados na Tabela 6, juntamente com os respectivos valores de razão de expansão, conforme a equação 2, para cada furo.

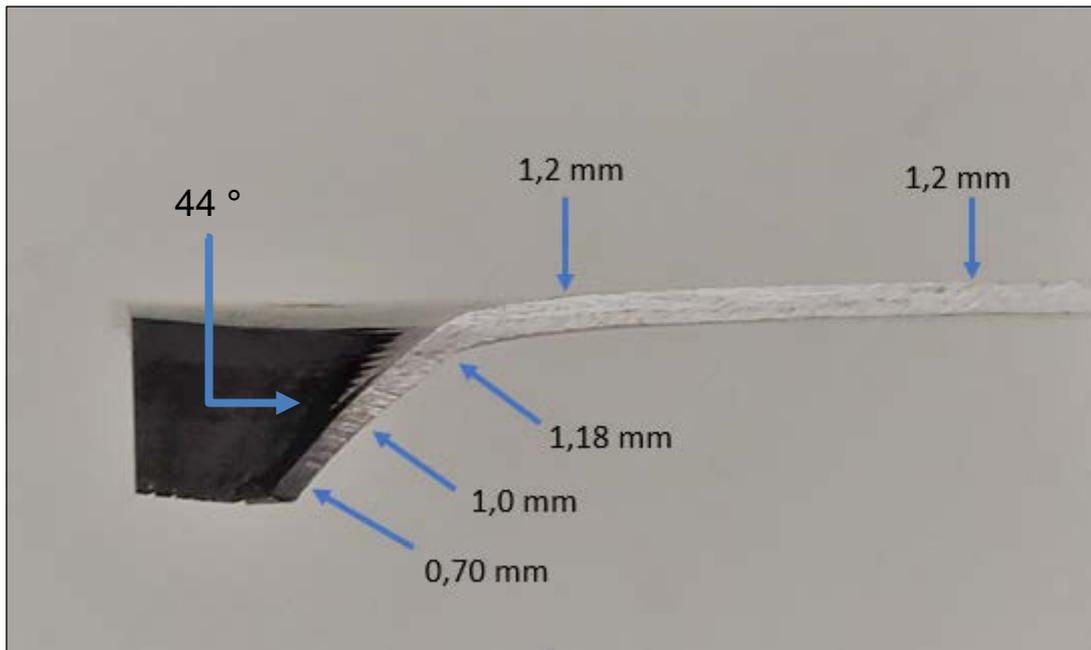
Tabela 6 - Resultado dos 3 ensaios de expansão, por SPIF, em chapa de aço AHSS martensítico com a estratégia 2.

	Diâmetro do pré-furo (D_0) [mm]	Diâmetro do furo após a ruptura (médio) (D_h) [mm]	Razão de expansão de furo λ [%]
1° Ensaio	10	15,01	50,1
2° Ensaio		14,63	46,3
3° Ensaio		14,52	45,2
Média		14,72	47,2

Fonte: Autor.

Houve redução da espessura da chapa ao longo do cone formado durante os testes, conforme ilustra em corte na Figura 26.

Figura 26 - Espessuras em diversos locais da chapa após o SPIF.



Fonte: Autor.

Deste modo, fica claro a ocorrência, em SPIF, da redução da espessura da parede, que, conforme descrito acima por Jeswiet et al. (2015). O mesmo, descreve a ocorrência de uma diferença dos valores calculados para o mensurado. Sendo que, o valor obtido por intermédio da equação 1 é de 0,8632 mm, e os valores, ilustrados na Figura 26, não condizem, como esperado, na realidade.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA

O levantamento comparativo, conforme já descrito acima por Marconi e Lakatos (2011, p. 92), é um método que visa reconhecer as semelhanças e divergências. E, também como já referido por Medeiros (2011, p.32), elucida semelhanças e dessemelhanças devido a observação dos dois fatos.

Assim, as dimensões dos furos, derivados da expansão nos ensaios, serão comparados com os valores obtidos por Thesing et al. (2016), que realizou estudo de expansão conforme a ISO 16630, com punção cônica.

4.2.1 Análise das geometrias (obtida vs. referência)

Para o teste realizado por Thesing et al. (2016), ilustrado na Figura 27 o resultado, obteve-se uma razão de expansão de furos na ordem de 54%, com os seguintes parâmetros: velocidade de deslocamento, constante, do punção na direção vertical igual a 5 mm/minuto, ferramenta com geometria cilíndrica e com extremidade cônica de 60°.

Figura 27 - Resultado da expansão de furos pelo método convencional com punção cônico de 60°.



Fonte: adaptada de Thesing et al. (2016).

A fim de confrontar informações, do ensaio efetuado por Thesing et al. (2016), realizou-se este trabalho, como ilustra a Figura 28, que possibilita destacar detalhes visuais.

Figura 28 - Chapa de aço AHSS martensítico após a expansão do furo por SPIF.



Fonte: Autor.

Foi observado marcas, em forma linear, na superfície da chapa que esteve em contato com a ferramenta, como ilustra a Figura 29. Nota-se a presença, mesmo fazendo uso de um método de lubrificação eficiente, de atrito entre a ferramenta e a chapa.

Figura 29 - Superfície conformada pelo SPIF, com marcas provenientes do contato da ferramenta. É possível visualizar as fraturas da borda.



Fonte: Autor.

5 DISCUSSÕES

Na primeira estratégia, foi possível identificar a existência de uma força radial excessiva perfil da ferramenta, devido ao atrito do contato com a superfície da chapa, que resultou na fratura da ferramenta no ponto de concentração de tensão, na área de transição do diâmetro. Tal força possui esta magnitude unicamente para o exato momento da conformação, com especifica rugosidade superficial, velocidade axial e radial da ferramenta, camada de material lubrificante, ângulo de inclinação da chapa, entre outros. Pois, à medida que, a inclinação aumenta, ou outro parâmetro muda, ir-se-á ter outra magnitude.

Em contraponto ao descrito acima por Bagudanch et al. (2013 apud DURANTE ET AL., 2009), o qual diz haver maior intensidade das forças na direção axial, foi encontrado um valor semelhante, na estratégia 1, no momento de ruptura da ferramenta, na direção radial em relação à direção axial.

Na segunda estratégia, verificou-se, que a retirada do concentrador de tensões, e do aumento de 11,4% do diâmetro da ferramenta, juntamente com o emprego de lubrificação pastosa, por graxa grafitada, garantiu a execução do ensaio sem falha do ferramental.

Nesta estratégia, obteve-se a expansão média de 47,2% em relação ao diâmetro inicial de 10 mm. Evidenciando uma menor expansão, quando comparado com os resultados de Thesing et al. (2016).

De modo que, a conformabilidade plástica do furo quando submetido ao SPIF, com os tais parâmetros definidos, fica em desacordo ao descrito por Jeswiet et al. (2005), para chapas sem furo, de que ocorre aumento da conformabilidade em chapas.

O que Soeiro (2014) disse acima, da técnica de estampagem incremental possibilitar conseguir valores maiores de deformação, devido aos fatos de ocorrer deformações localizadas e de natureza incremental, também está adverso ao obtido nos testes.

Visto também a ocorrência de um afinilamento na espessura da chapa, que em acordo com o descrito por Jeswiet et al. (2015), que testou SPIF em chapas sem furos, que não obedeceu ao regimento da equação 1.

O fato da presença do furo na chapa, pode ser listado como um fator que veio a causar um maior desvio comportamental, em relação ao dito por Jeswiet et al. (2015) quanto a técnica por SPIF. Pois, a espessura na região estampada não possui um valor específico, mas sim uma redução constante até a borda. E em relação aos parâmetros escolhidos para este tipo de material, pode ser que, estes são desajustados aos adequados para que houve-se resultado análogo ao que foi dito por Soeiro (2014) sobre as deformações.

Logo constata-se que os parâmetros que, como diâmetro da ferramenta possui influência inversa com a rugosidade superficial e direta com a facilidade da confecção de inclinações, conforme dito por Jeswiet et al. (2015), quando selecionados fora do intervalo próprio para o objetivo, irão ser causadores de desvio comportamental.

6 CONCLUSÕES

A partir da realização deste trabalho pode-se obter um maior conhecimento do processo de estampagem incremental com ponto único de contato empregada na conformação para expansão de furo em chapa de aço AHSS martensítico.

O mesmo, possibilitou a estimativa da força atuante, em determinado momento. Devido ao rompimento da ferramenta, relacionada à mesma ter uma geometria com presença de um concentrador de tensão.

Foi obtido êxito no projeto e na confecção do dispositivo de fixação, pela razão que, o equipamento, possui estrutura planejada para amparar chapas com geometria de disco, com até 91 mm de diâmetro, e chapas de perfil quadrado, com aresta de até 101 mm. Sendo necessário apenas mudar a organização dos parafusos para comportar as possíveis geometrias de chapa.

O dispositivo de fixação, durante os ensaios, foi submetido a esforços e não apresentou movimentação inesperada ou vibrações excessivas. Assim, a sua concepção garantiu a execução dos ensaios.

Devido a fatores, como geometria, avanço e rotação da ferramenta, aliados ao tipo de lubrificação, possibilitou-se a realização da conformação com reduzida formação de rugosidade superficial na chapa.

Já a ferramenta, teve danos superficiais de grande monta na área de contato, como ilustra a Figura 30. Demonstrando que o material deve ser melhor trabalhado, submetendo possivelmente a outra técnica de têmpera e revenido, ou fazendo a substituição de fornecedor. Pois, conforme GGD metals (2017), este material possui capacidade para responder a operações de conformação a frio.

Figura 30 - Ferramentas com geometria antes do teste, à esquerda, e após a realização do teste, à direita.



Fonte: Autor.

Evidenciou-se que a REF pelo método de SPIF, com os parâmetros usados no ensaio, é 6,8% menor que o obtido pela técnica convencional. Assim, observa-se que, a técnica empregada, em chapa de aço AHSS martensítico, gerou antecipadamente trincas nas bordas em comparação à técnica convencional. O resultado, levemente inferior, pode ser atribuído ao fato da borda, na maioria do tempo de teste, não estar em contato com a ferramenta. Desta maneira, contribuiu para o início da estrição localizada. Em contraponto ao esperado como objetivo à cima citado.

Porém os resultados apresentados demonstram que se faz possível o emprego de equipamentos da área de usinagem, como a máquina fresadora CNC, para a confecção de estampagem incremental para expansão de furos. De modo, que esta técnica surge como uma alternativa para avaliação da expansão de bordas em chapas.

Logo, como cita Soeiro (2014), os principais parâmetros influenciadores na conformação, como: diâmetro, velocidade de rotação e avanço da ferramenta, geometria da peça, incremento de deslocamento na direção vertical e lubrificação, quando realiza-se a escolha inadequada de algum, ou de alguns, parâmetros, como

o incremento de deslocamento vertical, aumenta a tensão no material na região de contato da ponta da ferramenta com a superfície da peça, de modo a levar a formação de fraturas mais rapidamente.

Enfim, este trabalho teve como contribuição mostrar a utilização de métodos não convencionais e de maquinários, usados convencionalmente para outros processos, combinados para realizar a expansão de furos em chapas. E, posteriormente, obter o comportamento do furo expandido.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como possíveis trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar novos testes de expansão de furos com diferentes percursos, como percurso incremental de círculos, objetivando a verificação da influência de diferentes parâmetros.
- Realizar a simulação em software da conformação dos testes pois proporcionaria uma investigação dinâmica do comportamento.
- Repetir a mesma investigação com outros aços AHSS, afim de caracterizar a expansão dos furos por SPIF nestes.
- Usar ferramenta com diferente geometria na extremidade, como de perfil cônico, parabólico ou plano.
- Empregar diferente lubrificante, como vaselina sólida, a fim de comparação da influência do atrito.

REFERÊNCIAS

AERENS, R., et al.. **Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 46.9, p. 969-982. 2010.

AHSS GUIDELINES. **Advanced High Strength Steels Applications.** V. 6. 314 p. Abr./2017. Disponível em:<
[http://www.worldautosteel.org/download_files/AHSS%20Guidelines%20V6/00_AHSS Guidelines_V6_20170430.pdf](http://www.worldautosteel.org/download_files/AHSS%20Guidelines%20V6/00_AHSS%20Guidelines_V6_20170430.pdf)>. Acesso em 30/05/2017.

Al, S., et al.. **Evaluation of deformation stability and fracture mechanism in incremental sheet forming.** 2016. International Journal Of Mechanical Sciences, P. 174 – 184, vol. 124-125. mai./2017. <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740316310657> >. Acesso em: 30/05/2017.

BAGUDANCH, I., et al.. **Forming Force in Single Point Incremental Forming under Different Bending Conditions.** 354-360 p. Procedia Engineering. Vol. 63, 2013.

BORREGO, M. et al..**No the study of the single-stage hole-flanging process by SPIF.** Journal of Materials Processing Technology, jun./ 2015. <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815044082>>. Acesso em: 15/05/2017.

BORREGO, M. et.al.. **Experimental study of hole-flanging by single-stage incrementalsheet forming.** Journal of Materials Processing Technology, jun./ 2016. <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013616302060> >. Acesso em: 16/03/2017.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 5ed. LTC, São Paulo, 2002.

CAO, Tingting et al.. **Investigation on a new hole-flanging approach by incremental sheet forming through a featured tool.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 110, p. 1-17, 2016.

CRISTINO, V.A.; MONTANARI L.; SILVA M.B.; ATKINS A.G.; MARTINS P.A.F. **Fracture in hole - flanging produced by single point incremental forming.** Journal of Materials Processing Technology, Abr./2014. <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740314001246> >. Acesso em: 20/05/2017.

CUNHA, Lauro Salles, **Manual prático do mecânico.** 2. ed. São Paulo, SP : Hemus, 2006. 584 p.

FILHO, E. B. et al.. **Conformação plásticas dos metais**. 1. Ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

FRITZEN, D.. **Estudo dos parâmetros de conformabilidade para o processo de estampagem incremental**. 2016. 134p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre. 2016.

GALVAÇO. **Conversão de dureza e resistência à tração**. Disponível em:< <http://www.galvaco.com.br/conversao-de-dureza-e-resistencia-a-tracao.html>>. Acesso em: 10/11/2017.

GGD METALS. **AISI M2 aço ferramenta**. Disponível em:< <http://www.ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2015/07/M2.pdf> >. Acesso em: 10/11/2017.

GIPIELA, M. L.. **Estudo da expansão de furos e estampabilidade de furos de chapas de aço multifásico CPW800**. 2012, 184 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

HELMAN, H.; CETLIN, P.R.. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. Ed. São Paulo: Artliber, 2005. 260 p.

HUSSAIN, G. et al.. **Finite element and experimental analyses of cylindrical hole flanging in incremental forming**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 26, n. 9, p. 2419-2425, 2016.

ISO 16630. **Metallic materials — Sheet and strip —Hole expanding test**. 14 p. Suíça, 2009.

JESWIET, J. et al.. **Single point and asymmetric incremental forming**. Advances in Manufacturing, v. 3, n. 4, p. 253-262, 2015.

JESWIET, J.; et al.. **Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal**. CIRP Annals - Manufacturing Technology. vol. 54, no. 2, 88 - 114 p, 2005.

JUVINALL, R.C.; MARSHEK, K.M.. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 550 p.

LAKATOS, Eva M.; MARCONI, Marina de A.. **Metodologia científica**. 6. Ed. São Paulo: Atlas, 2011. 320 p.

KUITERT, Ing. R.. **Feasibility study on single point incremental forming: A study of die-less preforming of double curved aluminum sheets for GLARE laminates**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Materiais aeroespaciais) – Delft University of Technology, Holanda do sul. 2016.

MACHADO, À. R. et al.. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2016. 397 p.

MARTINS, Uillian M.. **Estudo do Comportamento Mecânico de Aços TRIP Após Tratamento de Têmpera e Partição**. 2015. 52 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Automotiva) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, Joinville. 2015.

MAXIMILIANO, Gerson.. **Estampagem incremental de múltiplos passes em chapa de latão c268**. 2016. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre. 2016.

MEDEIROS, J. B.. **Redação Científica: A prática de fichamento, resumos, resenhas**. 11. Ed. São Paulo: Atlas, 2012.

NARAYANASAMY, R. et al.. **Effect of mechanical and fractographic properties on hole expandability of various automobile steels during hole expansion test**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 47, Ed. 1, p. 365-380, 2009.

NIGRI, Evelyn.. **Estudo exploratório da soldagem por fricção e mistura mecânica de um aço TRIP**. 2008. 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

POLACK, Antonio V.. **Manual prático de estampagem: breve tratado teórico-prático para os mecânicos e profissionais desta especialidade**. 1. Ed. Tradução: Edson B. N. de P. Lima. São Paulo: Hemus, 2004. 220 p.

ROCHA, Otávio F. L.da.. **Conformação mecânica**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. 68p.

SANTOS, Ricardo A.. **Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento de aços de alta resistência**. 2013. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

SOEIRO, João M. de C.. **Enformabilidade em estampagem incremental**. 2014. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2014.

TAMARELLI, Carrie M.. **AHSS 101: The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications**. 2011. Steel Market Development Institute - Materials science and engineering - University of Michigan, Michigan. 2011.

TIGRINHO, Luiz M. V.. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões**. 2011. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2011.

THESING, L.; et al.. **Experimental investigation of the hole expansion capability of a martensitic ahss steel with two punch geometries and a variety of hole diameters**. International Journal of Materials Engineering and Technology, 2016.

WITTE, H.. **Máquinas Ferramentas: Elementos básicos de máquinas e técnicas de construção**. Tradução: Mário F. de Brito. São Paulo: Hemus. 1998. 295 p.