

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE CONFORMAÇÃO NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE CHAPAS EM CENTROS DE USINAGEM CNC

Pablo Deivid Valle, pablo.valle@ufpr.br¹

Fred Lacerda Amorim, fred.amorim@pucpr.br²

Paulo Victor Prestes Marcondes, marcondes@ufpr.br¹

¹Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, CP 19011, Jardim das Américas, CEP:81531-980, Curitiba.

²Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Imaculada Conceição 1155, Prado Velho, CEP:80215-901, Curitiba.

Resumo: A Estampagem Incremental de Chapas (ISF - Incremental Sheet Forming) destaca-se pela agilidade e baixo custo na obtenção de produtos conformados por intermédio da adaptação de Centros de Usinagem CNC e programação CAD/CAM. A tecnologia ISF posiciona-se como um processo inovador e sintonizado à revolução 4.0, pelo fato de reduzir os tempos de manufatura, aproximar o cliente e assegurar a sustentabilidade. Desse modo, é importante investigar os principais parâmetros de processo para o uso seguro e otimizado do equipamento, do punção e dos dispositivos de apoio à fabricação. O presente trabalho teórico-experimental avaliou a estampabilidade de chapas de aço comercial ASTM A653 CS-A G90 no decorrer da impressão de geometrias do tipo tronco de cone na estampagem incremental em Centros de Usinagem CNC. O método estatístico escolhido foi o fatorial 2^2 completo e testado também o ponto central para se averiguar a respectiva linearidade do fenômeno. Os fatores investigados foram: o incremento vertical em Z, Δz (mm) e o diâmetro do punção d_p (mm), mantendo-se constante a velocidade de avanço do punção f (mm/min) e o ângulo de inclinação da parede α (°). Foi observado que o parâmetro Δz tem significativa influência na profundidade máxima de estampagem $h_{máx}$, onde os resultados mostraram que é possível dobrar o nível de conformabilidade do processo ajustando apenas o respectivo incremento vertical. Constatou-se também que o diâmetro do punção tem pouca influência na profundidade de estampagem. Entretanto, é requisito importante em termos de robustez da ferramenta e fator dependente da geometria de peça a ser obtida e, nesse caso, uma boa solução é a utilização de ferramentas conjugadas.

Palavras-chave: Estampagem Incremental de Chapas, Profundidade Máxima, Centro de Usinagem, Incremento Vertical e Diâmetro do Punção.

1. INTRODUÇÃO

Jeswiet et al (2005), registra que o processo de estampagem incremental de chapas por intermédio de um punção esférico rotativo ou não, com ponto único de contato sobre o metal, foi patenteado por Leszak em 1967, muito antes do processo ser tecnologicamente viável em termos financeiros. Todavia, hoje em dia, este método de conformação de peças é possível, tanto para a produção de pequenos lotes de produtos estampados para reposição, quanto na rápida fabricação de elementos especiais, isto é, na prototipagem de estampados como próteses e/ou peças customizadas. Nos dois casos, destaca-se o baixo investimento inicial em máquina-ferramenta, sistema de fixação da peça e ferramenta e, sobretudo, na agilidade de obtenção da chapa. Aspectos sintonizados com a chamada A Quarta Revolução Industrial, Schwab (2016).

Segundo De Lucca (2015), essa tendência já havia sido prevista também por Schmoeckel em 1991. Esses novos processos são especialmente atrativos por utilizarem centros de usinagem CNC, três ou mais eixos, como máquinas-ferramentas, ou seja, torna-se viável fabricar produtos estampados utilizando os equipamentos tradicionais de usinagem que estão amplamente disponíveis no parque fabril Brasileiro. Em se tratando de pequenos lotes consegue-se produzir peça de qualidade com razoável complexidade geométrica e em tempo curto, sem a necessidade de projeto e fabricação da matriz, resultando, consequentemente, num custo por peça absolutamente competitivo, agregando valor ao negócio.

Logo, a chamada estampagem progressiva ou estampagem incremental de chapas – ISF – do inglês *Incremental Sheet Forming* – consiste, desse modo, na estampagem de peças de metal com relativa complexidade e precisão, a partir de arquivos concebidos em CAD e estratégias de percurso do punção, em três ou mais eixos, definidas por intermédio de um software CAM comercial, Schaeffer (2004).

A trajetória da ferramenta é controlada por programa, utilizando a tecnologia CNC, permitindo, nesse sentido, que as chapas metálicas sejam estampadas através de pequenas deformações induzidas durante a trajetória da ferramenta. Outra possibilidade é a utilização de braço de robô automatizado como sistema de movimentação da ferramenta de conformação – FC –, ou seja, o produto é estampado de acordo com a trajetória percorrida pelo punção acoplado ao braço mecânico, contudo, esse é um conjunto que tende a ser mais complexo para o adequado controle e, possivelmente, mais caro do que o realizado em centros de usinagem CNC, Li et al (2014).

Normalmente, o dispositivo ISF está acoplado à mesa do equipamento e adequadamente zerado e alinhado aos eixos de movimentação da máquina, X, Y e Z, Fig. (1)(a). A chapa é fixada no dispositivo ISF por meio do elemento prensa-chapa com pressão de contato ajustada pelos parafusos prisioneiros, ou seja, podendo-se, assim, assegurar o torque exato ao conjunto, Fig. (1)(b). A Figura (1)(c) apresenta o formato final estampado na peça por intermédio do punção, sendo, nessa investigação, no formato tronco de cone. A trajetória da ferramenta de conformação – FC – é circular e programada diretamente na máquina CNC, com origem na coordenada (40,0,0).

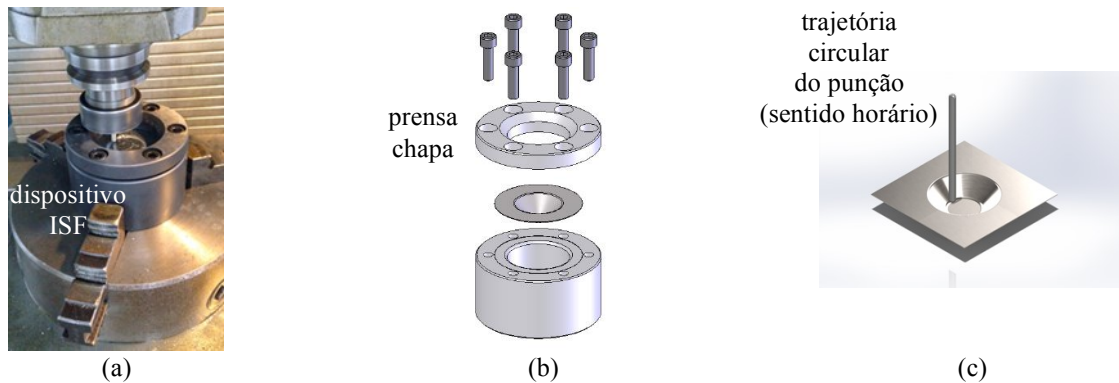


Figura 1. Estampagem Incremental: (a)Placa e dispositivo ISF montados sobre a mesa do centro CNC, (b) Fixação da chapa no dispositivo ISF, (c) Representação da impressão do tronco de cone.

Desse modo, a utilização de máquinas CNC's no processo de estampagem incremental de chapas é bastante comum e, assim sendo, duas das características críticas mais sensíveis à sua execução são; o limite máximo de esforço mecânico que o eixo árvore do equipamento pode suportar e a profundidade máxima – viável – de conformação da chapa ($h_{\text{máx}}$) sem gerar quaisquer danos à peça. Logo, além dos cuidados com a máquina-ferramenta CNC, deve-se também ser observado o limite máximo de estampabilidade da própria chapa, isto é, não se pode proporcionar tensões superiores àquelas suportadas pela combinação material/espessura do metal no decorrer do processo de deformação sob pena de danificar o produto. Todavia, em termos de aplicabilidade do processo ISF, quanto maior a profundidade de conformação mais largo torna-se o campo de aplicação da respectiva tecnologia, favorecendo, nesse cenário, a produção de peças em menores custo e tempo. Neste âmbito, Duflou et al (2007), reportam que o processo ISF proporciona maior nível de estampabilidade para as peças conformadas quando comparado com os processos convencionais de conformação que utilizam, tradicionalmente, matrizes de estampo. Os autores registram também que as variáveis de processo e de projeto que contribuem significativamente na determinação da profundidade máxima de conformação da peça ($h_{\text{máx}}$) são:

- a) O incremento por passe no eixo Z, Δz [mm]
- b) O diâmetro do punção, d_t [mm]

Outros parâmetros importantes:

- a) A rotação do punção, n [rpm]
- b) O lubrificante na interface punção e chapa, μ
- c) O ângulo de inclinação da parede a ser deformada, α [°]
- d) A velocidade de avanço do punção, f [mm/min]
- e) As propriedades do material e a espessura da chapa, t [mm]

Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi, fundamentalmente, a concepção de um modelo matemático de regressão para que seja possível predizer e estimar a profundidade máxima de conformação ($h_{\text{máx}}$) – viável – do processo de estampagem incremental de chapas de aço comercial ASTM A653 CS-A G90. Sendo que a geometria tronco de cone foi gerada por punção com ponto único de contato em centro de usinagem CNC. Utilizou-se, nesse caso, o método estatístico DoE fatorial 2^2 completo, com nível de confiança estabelecido em 99%. Os fatores principais selecionados para a investigação foram o incremento vertical da ferramenta Δz e o diâmetro do punção d_t . Dessa maneira, torna-se possível, sob tais estudos, otimizar o patamar máximo de deformação da peça assegurando integridade superficial e geométrica ao produto. Essa função estatística foi também testada em termos de normalidade do sinal ruído e de dispersão dos mesmos para a adequada aceitação estatística. Porquanto, a função determinada nesse trabalho auxilia a tomada de decisão tecnológica acerca das influências que cada variável significativa exerce na performance do processo ISF.

Adicionalmente, a pesquisa busca gerar informações que possam contribuir no desenvolvimento tecnológico do processo ISF por intermédio de outras análises, como:

- a) Identificar a região mais crítica sob deformação presente no decorrer do processo de estampagem incremental;
- b) Avaliar o nível de influência das variáveis significativas na profundidade máxima de conformação da peça ($h_{\text{máx}}$).

2. ESTADO DA ARTE

A estampagem incremental de chapas – ISF – é um processo de fabricação inovador e, razoavelmente acessível, cuja definição, conforme Kopac e Kampus (2005), consiste num processo de estampagem de chapas de metal, no qual um *blank* é conformado por um punção de tamanho pequeno, comandado por controle numérico, seja num centro de usinagem CNC, seja por intermédio de um braço de robô ou, até mesmo, por meio de sistemas especiais.

Dessa maneira, a estampagem pode ser realizada com matriz bastante simplificada ou até mesmo sem matriz. O processo parece ser muito interessante para pequenos volumes de produção e também para a prototipagem rápida de componentes de chapas customizados. O processo de estampagem incremental é, na verdade, um termo que descreve uma série de métodos de estampagem de chapas de metal. Em comum, estes métodos têm uma capacidade de formar geometrias com matrizes simples ou até com a ausência delas, ambos a baixo custo. O processo ISF não requer ferramentas caras para produzir peças complexas de chapas de metal, e o equipamento de estampagem pode ser adequado para uma grande quantidade de produtos sem grandes trocas ou investimentos complementares, Ambrogio et al (2012).

Bertol (2012), destaca que o processo de estampagem incremental de chapas vem revolucionando o setor metal-mecânico, em especial, a área de fabricação de pequenos lotes customizados, a exemplo do segmento de próteses humanas. Na Figura 2(a) verifica-se a base do modelo a ser obtido, na Fig. 2(b) o modelo no formato CAD para a posterior geração da estratégia CAM e, por fim, na Fig. 2(c) o esboço da peça sendo estampada por ISF num centro de usinagem CNC. Isto é, esta tecnologia permite que protótipos sejam fabricados em aço, titânio, alumínio, ou outros metais conformáveis e, inclusive, em polímeros, diretamente a partir de um modelo CAD 3D que serve como gabarito e referência para a trajetória do punção.

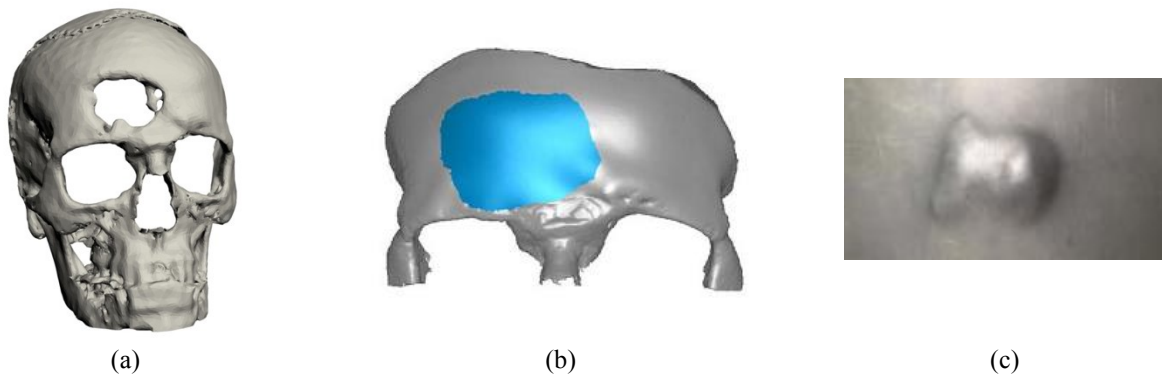


Figura 2. Aplicação da tecnologia ISF na obtenção de próteses humanas (Bertol 2012).
(a) Base do modelo a ser obtido, (b) Modelo a ser obtido (CAD/CAM), (c) Prótese conformada (ISF/CNC).

A trajetória é controlada numericamente pela máquina-ferramenta CNC, via programação CAM, o que significa que o produto final é obtido sem o uso de ferramentas convencionais de conformação mecânica dos metais, como matrizes e subsistemas, as quais elevariam o tempo e o custo de obtenção desse produto, Sena (2009).

Segundo Meier et al (2012), o uso de robôs cinemáticos também tem sido observado em pesquisas, e apresenta grandes vantagens em termos de área de trabalho e flexibilidade. Entretanto, a adição de erros devido às articulações dos robôs agrava o processo de estampagem incremental de chapas no que tange à exatidão da geometria final do componente. Esses erros, e até mesmo o efeito *springback*, podem ser compensados por intermédio de correções incorporadas na própria programação que conduzirá a trajetória do punção, Paniti (2014).

Diversos grupos de investigação têm feito pesquisas na área de estampagem incremental. A maior parte destas pesquisas é relatada para máquinas comerciais de ISF, ou seja, estampagem utilizando centros de usinagem CNC ou similares, Lamminen (2005).

De acordo com Hirt (2004), pode-se dizer que a estampagem incremental é um novo método de deformação plástica que permite criar um produto com determinada configuração/geometria, sem a utilização de punção e/ou matriz com características complexas. Na última década, esta tecnologia tem se desenvolvido intensamente como uma nova linha de pesquisa relacionada aos processos de conformação de chapas. A designação atribuída para este método de deformação por sucessivos incrementos abrange, ademais, várias técnicas que possuem aspectos em comum. Embora a técnica de deformação incremental possa ser interpretada de diferentes maneiras, segundo Ambrogio (2011), este processo distingue-se, obrigatoriamente, pelas seguintes características:

- Ferramenta genérica de pequena dimensão e ausência ou utilização de matrizes dedicadas;
- Contato contínuo entre a ferramenta e a chapa com movimento tridimensional 3D e controle do punção.

Apresenta-se na Figura (4) as diferentes configurações ou técnicas referentes ao processo de estampagem incremental de chapas – ISF – conforme Jeswiet et al (2005). As configurações da Fig. (3)(a) e (3)(b) possuem um sistema de fixação para a chapa fixo, enquanto nas configurações da Fig. (3)(c) e (3)(d) o sistema movimenta-se na vertical,

sincronizadamente, com a ferramenta de deformação da chapa. A última configuração Fig. (3)(d) – apresenta uma matriz dedicada com forma pré-definida, ou seja, mostra um gabarito com determinada geometria que permite imprimir a forma final da peça sobre a matriz modelo, deslocando, simultaneamente, o sistema de suporte da chapa no intuito de viabilizar o adequado ajustamento de posição chapa/ponta do punção e, desse modo, proporcionar maior precisão dimensional.

Estas últimas duas configurações – Fig. (3)(c) e Fig. (3)(d) –, normalmente, são implementadas em máquinas exclusivamente dedicadas para estas técnicas de deformação incremental, enquanto no caso das configurações – Fig. (3)(a) e Fig. (3)(b) – essas são associadas às máquinas-ferramentas CNC's, tipicamente um centro de usinagem tradicional, por exemplo. Isto é, pode-se dizer que a estampagem incremental de chapas apresenta dois principais tipos de variantes, a deformação incremental por ponto único (SPIF, do inglês *Single Point Incremental Forming*); e a deformação incremental por dois pontos (TPIF, do inglês *Two Point Incremental Forming*), Rauch et al (2009).

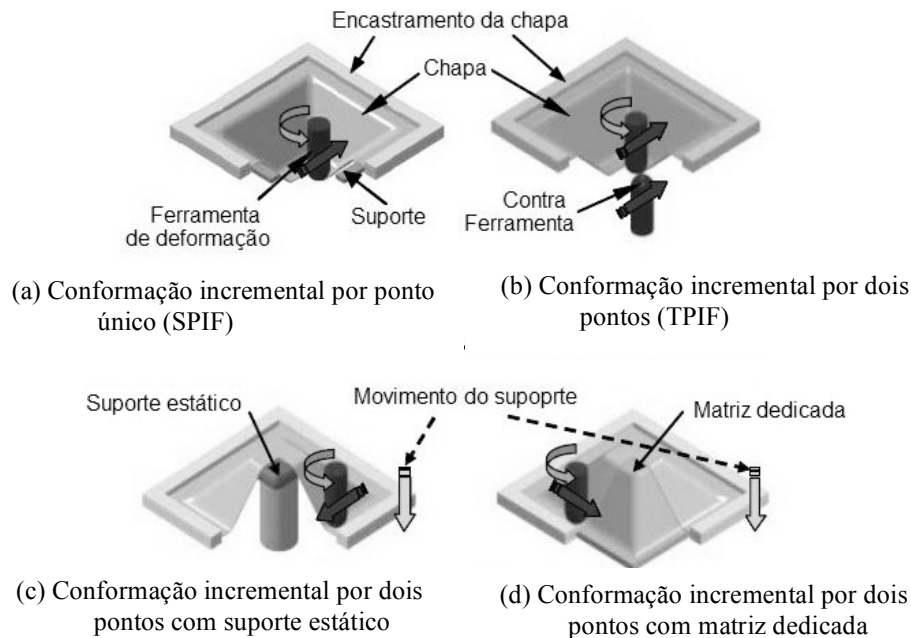


Figura 3. Variantes do processo de estampagem incremental (Jeswiet et al 2005).

A investigação da deformação incremental por ponto único foi impulsionada por Jeswiet et al (2005), entre outros, demonstrando que este método pode ser implementado numa máquina-ferramenta CNC, incluindo a aplicação dos softwares CAD/CAM para planejar a trajetória da ferramenta de conformação e possibilitar a fabricação de peças complexas. Neste tipo de estampagem incremental por ponto único, a superfície da chapa não está suportada, ou seja, é deformada em forma “livre” pelo punção que desliza sobre a superfície da chapa, como ilustrado pela Fig. (3)(a).

A deformação plástica é gerada pela ferramenta em rotação ou não, acoplada ao eixo vertical principal do sistema CNC, por meio de incrementos negativos executados gradualmente no eixo Z da máquina. O sistema de fixação nas extremidades da chapa evita que esta se desloque enquanto a conformação ocorre. Durante a deformação da chapa, a ferramenta de conformação está em contato com a superfície interna do componente que está sendo fabricado, gerando, incrementalmente, uma concavidade. Além da flexibilidade de aplicação e utilização de ferramentas de baixo custo, existem ainda outras vantagens relacionadas à aplicação do processo SPIF, a saber, Cerro et al (2006):

- O processo dispensa qualquer tipo de matriz mas precisa de uma zona de suporte para criar o ângulo de deformação;
- As tensões originadas na zona de mudança de ângulo são facilmente corrigidas e controladas pela pressão do punção;
- O custo de se fabricar protótipos é substancialmente menor e a estampabilidade dos materiais é acrescida;
- A máquina CNC pode ser utilizada para aplicação deste processo e o tamanho do componente limitado pela mesa;
- A qualidade superficial dos componentes pode ser controlada e o modo de operação é pouco ruidoso;

No entanto, Jeswiet et al (2005) também relata que existem algumas limitações neste processo, tais como:

- O tempo de formação do componente aumenta com a profundidade da geometria da peça a estampar;
- A utilização deste processo está limitada à produção de pequenos lotes de peças ou peças customizadas;
- Ocorre recuperação elástica, tornando-se necessário o desenvolvimento de algoritmos para a correção da geometria;
- A formação de paredes verticais não pode ser efetuada em um único passo.

Logo, percebem-se claramente vantagens tecnológicas que compensam o contínuo desenvolvimento do processo SPIF e, em especial, oportunidades para a redução dos custos de fabricação, gerando, até mesmo, ganhos em termos de versatilidade para o catálogo de produtos das empresas em tempos de mercado escasso.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento de experimentos DoE – *Design of Experiments* – é uma técnica utilizada para se planejar testes empiricamente, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, almejando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo na realização do ensaio, Montgomery et al (2004).

Isto posto, a presente pesquisa segue um rigoroso planejamento experimental do tipo fatorial completo 2^k , visto que esse modelo de planejamento permite a avaliação, em separado, dos efeitos individuais, ditos fatores puros, e dos efeitos de interação dos fatores combinados. Nesse trabalho, tem-se dois fatores importantes, variando em três níveis – baixo, central e alto – o diâmetro do punção e o incremento vertical, Tab. (1). O ponto central tem a finalidade de avaliar a linearidade de cada efeito.

Dessa maneira, o delineamento experimental DoE proposto foi 2^2 , totalizando 4 tratamentos com três repetições e o nível de confiança assumido de 99%, $\alpha=0,01$. Foram incorporados 5 repetições do ponto central ao arranjo estatístico para a devida avaliação da linearidade da função matemática gerada em cada caso.

Tabela 1. Níveis baixo, central e alto dos fatores principais.

Fatores	Níveis		
	-1	0	+1
a. Diâmetro do Punção d_t [mm]	5	6	8
b. Incremento Vertical Δz [mm]	0,40	0,60	0,80

Assim sendo, foram realizados 17 testes para avaliar a significância e o efeito de cada fator na variável resposta profundidade máxima $h_{m\acute{a}x}$. Ademais, a partir do tratamento estatístico dos dados gerados foi possível também estabelecer a descrição do modelo de regressão do fenômeno com seu erro experimental associado. Na sequência, foi avaliado o comportamento do sinal ruído no intuito de verificar se a distribuição do mesmo é normal e com média igual a zero, condições estas necessárias para o aceite estatístico do modelo matemático sob investigação teórico-experimental.

3.1. Material e Dispositivo ISF

O material do corpo de prova – CP – utilizado foi o aço comercial de alto grau de estampabilidade ASTM A653 CS-A G90, na espessura 0,43mm fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional CSN. A espessura pequena garante que as cargas geradas no processo não ultrapassem o próprio limite de resistência do conjunto e, consequentemente, não coloquem em risco a própria integridade do conjunto. O formato do CP foi um disco com diâmetro de 70mm. A geometria gerada foi um tronco de cone a partir do diâmetro de 40mm, concêntrico e limitado pela extremidade da ferramenta.

Não foi aplicada rotação ao eixo árvore a fim de reduzir o efeito decorrente do atrito entre as partes deslizantes punção/chapa e, dessa forma, aparentemente, favorecer o processo. Por outro lado, o aporte térmico gerado na interface peça/ferramenta pode, ocasionalmente, facilitar a deformação da chapa. Essa relação de compromisso não foi analisada nessa investigação. O dispositivo ISF foi especialmente projetado para essa investigação em aço SAE 4140 tratado termicamente e pode ser observado na Fig. (1).

3.2. Máquina CNC e Ferramenta de Conformação

A pesquisa foi conduzida através do centro de usinagem CNC ROMI DISCOVERY Modelo 4022, disponível no laboratório de usinagem do departamento de engenharia mecânica da UFPR, bem como foi utilizada uma placa três castanhas para fixar o dispositivo ISF sobre a mesa da máquina ferramenta, Fig. (4).

O material da ferramenta foi metal-duro K40 e, adicionalmente, revestida com AlTiCN, carbonitreto de titânio alumínio, no intuito de reduzir o coeficiente de atrito do topo esférico com a corpo de prova e, assim, a possível adesão entre o par de materiais peça/punção. O processo foi a seco e sem a adição de qualquer outro tipo de lubrificante, embora o punção tenha sido revestido.

3.3. Estratégia dos Testes e Método de Aquisição

Nesta investigação para a adequada análise das deformações sofridas pelo material foi gravada uma malha de círculos tangentes na superfície externa da chapa com diâmetro de 5mm, Fig. (4)(a), por meio do procedimento de foto-corrosão no lado da peça que não sofreu contato direto com a ferramenta. A respectiva malha favoreceu, sobremaneira, a averiguação de qual condição proporcionou o maior grau de estampabilidade em termos de $h_{m\acute{a}x}$. O experimento foi conduzido passe a passe, conforme as respectivas combinações dos tratamentos descritos anteriormente, até praticamente o rompimento da chapa, privilegiando, todavia, a cautela e a integridade. Desse modo, a profundidade máxima $h_{m\acute{a}x}$ foi medida a partir da base da chapa inicial até a posição mais rebaixada da base estampada, Fig. (4)(b).

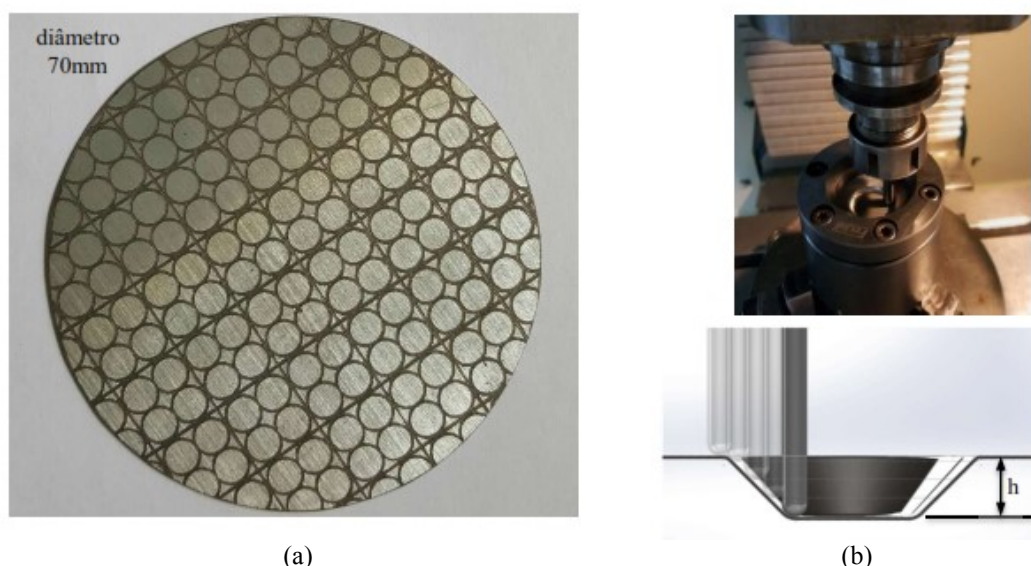


Figura 4. (a) Malha de círculos gravada no lado externo, (b) ISF em progresso até o rompimento da chapa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela (2) tem-se a configuração dos fatores principais em cada teste, bem como a sequência dos testes e os resultados obtidos nesse tratamento experimental.

Tabela 2. Arranjo experimental completo e resultados obtidos.

Fator		Tratamentos	Repetições (n)		
A	B		I - h(mm)	II - h(mm)	III - h(mm)
-	-	A 5; B 0,40	16,42	16,63	16,54
+	-	A 8; B 0,40	17,31	17,84	17,85
-	+	A 5; B 0,80	8,70	7,83	7,54
+	+	A 8; B 0,80	8,67	8,50	8,70
0	0	CENTRAL	12,45		
0	0	CENTRAL	12,25		
0	0	CENTRAL	11,30		
0	0	CENTRAL	11,24		
0	0	CENTRAL	12,65		

Na Figura (5) encontram-se os resultados obtidos na primeira rodada das observações. Na coluna da esquerda, verificam-se as fotografias em frente e verso do corpo de prova testado sob as condições de $d_t=5\text{mm}$ e $\Delta z=0,40\text{mm}$, onde, registra-se, não foram detectados rompimentos da peça até a profundidade de 42 vezes o incremento em Z, Δz . Todavia, ocorreu significativo afinamento da parede do tronco de cone e, dessa maneira, iminente possibilidade de dano decorrente da redução da espessura. Na coluna da direita, encontram-se as fotografias em frente e verso do corpo de prova testado sob as condições de $d_t=5\text{mm}$ e $\Delta z=0,80\text{mm}$, onde, destaca-se, ocorreu o rompimento da chapa na profundidade de 11 vezes o incremento em Z, Δz .

Percebe-se assim, claramente, que se mantendo o diâmetro do punção $d_t=5\text{mm}$ e variando apenas o incremento em Z, Δz , ocorre uma significativa alteração na profundidade máxima $h_{\text{máx}}$ atingida pelo processo de estampagem incremental, evidentemente, quando todos os demais parâmetros permanecem constantes. Isto é, no caso do incremento vertical ajustado para $\Delta z=0,80\text{mm}$, o corpo de prova rompeu na profundidade de $11 \times \Delta z$ para o corpo de prova na repetição $n=1$ e, nas repetições $n=2$ e $n=3$, a ruptura ocorreu ainda mais precocemente, quando a profundidade h atingiu apenas $10 \times \Delta z$. Contudo, na ocasião do incremento em Z, Δz , posicionado no nível baixo (-1) – nesse caso em $\Delta z=0,40\text{mm}$ – não foi detectada nenhuma evidência de rompimento até a profundidade de $42 \times \Delta z$, ou seja, até a dimensão aproximada de $h=16,80\text{mm}$ não houve cisalhamento da chapa sob investigação. Contudo, após o 40º passo, verificou-se uma intensa fragilização da parede da chapa. Do exposto, é possível constatar a nítida diferença de performance em termos de grau de estampabilidade para diferentes incrementos no eixo vertical Z.

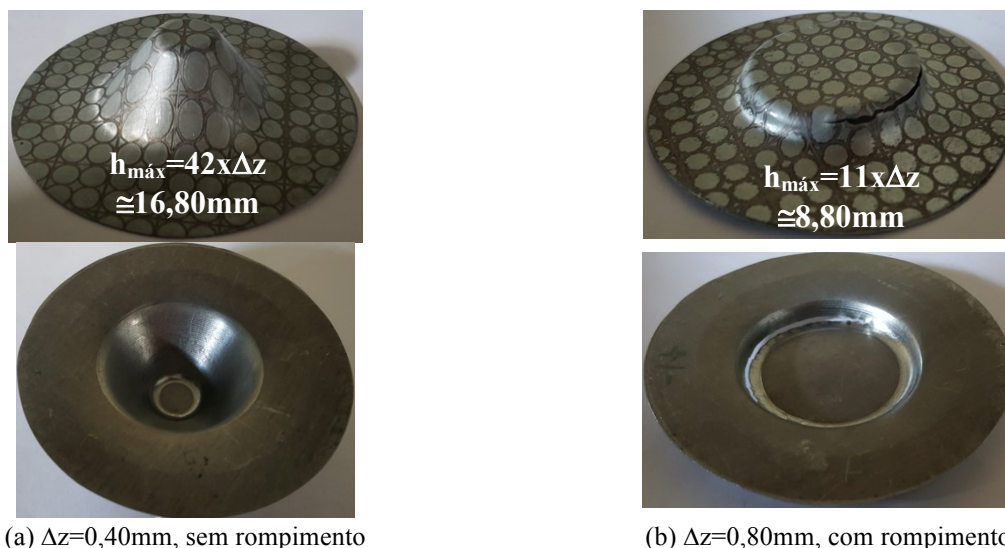


Figura 5. Corpos de prova deformados com $d_t=5\text{mm}$ e: (a) $\Delta z= 0,4\text{mm}$, (b) $\Delta z= 0,8\text{mm}$

Na condição onde o diâmetro do punção está ajustado em $d_t=8\text{mm}$ e, similarmente, variando apenas o incremento em Z, Δz , de 0,4mm para 0,8mm, tem-se resultados semelhantes aos descritos na avaliação anterior, posto que a profundidade máxima $h_{\text{máx}}$ atingida no ajustamento com menor incremento em Z é, significativamente, maior que aquela atingida quando o incremento em Z está no nível alto (+1), $\Delta z=0,8\text{mm}$, características estas ilustradas na Fig. (6). Nesse contexto, verifica-se, ademais, que a profundidade máxima é ligeiramente superior quando $d_t=8\text{mm}$ e $\Delta z=0,4\text{mm}$, uma vez que foram 44 passes enquanto que, na avaliação anterior, $d_t=5\text{mm}$ e $\Delta z=0,4\text{mm}$, foram 42 passes. Todavia, não é possível assegurar que a utilização de diâmetros maiores proporciona, estatisticamente, um maior grau de estampabilidade para a peça, sendo que esse aspecto deve ser investigado separadamente, haja vista ser muito importante e, em especial, ter forte dependência da área de projeto do produto.

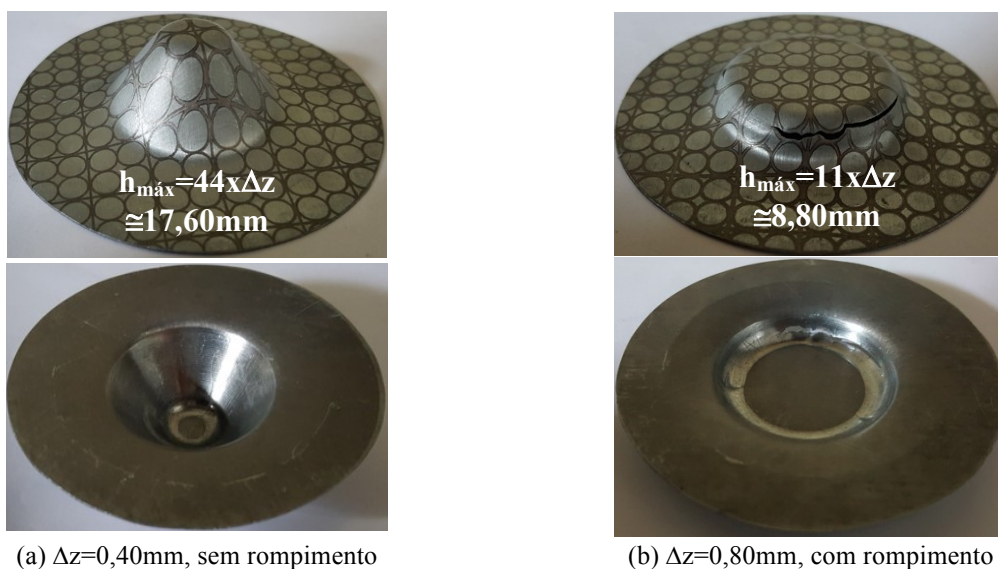


Figura 6. Corpos de prova deformados com $d_t=8\text{mm}$ e: (a) $\Delta z= 0,4\text{mm}$, (b) $\Delta z= 0,8\text{mm}$

No teste configurado com os fatores sob o ponto central, isto é, $d_t=6\text{mm}$ e $\Delta z=0,6\text{mm}$, Fig. (7), constatou-se que a performance é melhor que aquela observada quando o incremento em Z, Δz , está ajustado para 0,8mm, seja no caso de $d_t=5\text{mm}$ ou $d_t=8\text{mm}$. Por outro lado, o resultado observado em termos de profundidade máxima atingida $h_{\text{máx}}$ é pior que aquele observado quando o incremento em Z, Δz , está ajustado para 0,4mm, também no caso de $d_t=5\text{mm}$ ou $d_t=8\text{mm}$. Logo, pode-se inferir que, de fato, o incremento em Z, Δz , é fator preponderante no resultado da profundidade máxima possível de ser atingida e, quanto menor Δz , maior tende a ser a profundidade máxima obtida $h_{\text{máx}}$. Ademais, respondendo à questão problema formulada inicialmente, a principal contribuição dessa pesquisa é o modelo matemático inovador que prediz a profundidade máxima de deformação – $h_{\text{máx}}$ – no processo de estampagem incremental, Eq. (1).



$\Delta z = 0,60\text{mm}$, com rompimento

Figura 7. Corpos de prova deformados com $d_t = 6\text{mm}$ e $\Delta z = 0,6\text{mm}$

Desse modo, a equação obtida é função, evidentemente, dos fatores individuais e das interações de 2ª ordem significativos ao fenômeno em estudo e, adicionalmente, está associada à análise dos ruídos internos e externos. Sendo que o coeficiente de determinação equivalente encontrado para esse tratamento foi $R^2 = 98,48\%$. Nesse sentido, observou-se que somente os fatores individuais são significativos e a equação de regressão em unidade não codificada expressa conforme a seguir.

$$h_{\text{máx}} = 22,25 + 0,558d_t - 19,03\Delta z \quad (1)$$

Logo, o resultado da regressão linear múltipla indica que os 2 preditores significativos são responsáveis por 98,48% da profundidade máxima possível de ser obtida e, especificamente para os fatores puros, pode-se concluir:

- Para cada aumento de 1mm no diâmetro d_t , espera-se que a profundidade $h_{\text{máx}}$ aumente em 0,558 unidades;
- Para cada aumento de 0,1mm no incremento Δz , espera-se que a profundidade $h_{\text{máx}}$ aumente em 1,903 unidades.

A análise dos ruídos evidenciou que os mesmos têm comportamento normal e média igual a zero, isto é, o modelo matemático descrito representa com robustez a estatística do fenômeno. Além disso, a homocedasticidade também está assegurada, uma vez que a dispersão é consistente e sem qualquer viés. No que se refere a linearidade ou não da função matemática que expressa cada fator, a avaliação do ponto central evidenciou que pode-se considerar ambos os parâmetros – d_t e Δz – como fenômenos com comportamento linear à luz da profundidade máxima $h_{\text{máx}}$.

Por fim, verificou-se que a chapa sofre uma combinação de embutimento na direção vertical e estiramento ao longo do percurso da parede que está sendo deformada. A região crítica é a cinta final formada próximo da base mais profunda da geometria projetada. Ocorrência em concordância com a investigação conduzida por Malhotra et al (2012), Fig. (8).

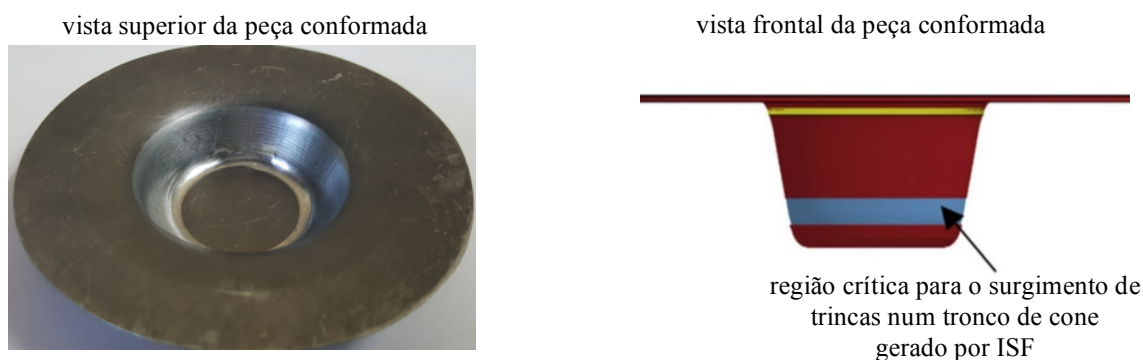


Figura 8. Peça conformada por ISF e em destaque a área circunferencial sujeita a danos (Malhotra et al 2012).

5. CONCLUSÃO

De todo o exposto, e a partir do experimento prático e das análises individuais de cada fator conclui-se, claramente, que o principal parâmetro a ser levado em consideração para a assertiva tomada de decisão em termos de profundidade máxima e, por conseguinte, o correto ajustamento do processo ISF ao conjunto centro de usinagem CNC/punção/sistema de fixação da peça é o incremento em Z, Δz . Nesse aspecto, infere-se também que, tanto menor for o incremento em Z,

Δz , tanto maior será a profundidade máxima $h_{\max}$ possível de ser atingida sem comprometer a integridade do conjunto e da própria peça a ser conformada.

Percebe-se, ademais, pela dinâmica da deformação, que o processo de estampagem incremental tem grande aplicabilidade em peças rasas, consistente na obtenção de perfis não muito salientes e até mesmo na produção de geometrias complexas, porém, e com muita atenção, deve-se levar em conta a permanente ressalva da profundidade máxima possível de ser atingida no respectivo processo sem que sejam excedidos os limites de segurança do sistema de fixação, de resistência da ferramenta e, em especial, de integridade do fuso da máquina CNC que suportará a maior parte dos esforços, sempre atendendo, evidentemente, aos requisitos de projeto tanto em termos de geometria do produto, quanto em termos de resistência da parede da peça que será exigida mecanicamente.

Conclui-se, portanto, que é viável atingir grandes profundidades de deformação com baixos patamares de esforços ajustando o incremento Δz , para o menor valor possível ao processo delineado em questão, de modo que a otimização e consequente viabilização de produção de peças por estampagem incremental de chapas – ISF – está fortemente condicionada à correta determinação do passe no eixo Z. Diante disso, percebe-se a grande oportunidade de desenvolvimento da tecnologia ISF fazendo uso de ambientes consagrados como CAE/CAD/CAM apoiando a utilização de centros de usinagem CNC, ou seja, softwares e conhecimento de engenharia amplamente dominados pela área fabril de pequenas, médias e grandes empresas.

Assim, constata-se pois, que a tecnologia ISF tende a assumir papel de relevância na fabricação de pequenos lotes e, em especial, na conformação de geometrias especiais, desde próteses humanas até perfis específicos que podem estampar a porta de um eletrodoméstico ou, até mesmo, o capô de um carro. Tem-se, assim, nitidamente, uma tendência de uso de máquinas CNC's na produção de peças conformadas por estampagem progressiva em vez de equipamentos especiais e caros.

Em razão disso, novas máquinas CNC's estão surgindo no mercado, motivo pelo qual não devem mais ser chamadas apenas de centros de usinagem CNC pois, além da remoção de material clássica por intermédio de fresamento, furação ou rosqueamento, referidas máquinas estão sendo utilizadas também na impressão de geometrias de forma em chapas finas. Isto é, essas máquinas-ferramentas tendem a absorver significativa diversidade de processos de fabricação como, por exemplo, os supracitados, e o próprio ISF, percebendo-se, assim, que a evolução dos equipamentos em termos de multifuncionalidade é crescente, necessária e alinhada com os anseios de flexibilização e sustentabilidade impostos pela realidade de mercado.

Por fim, as grandes empresas automobilísticas, indústrias da linha branca e fabricantes de protótipos em geral estão sendo impactados por essa nova possibilidade de obtenção de chapas estampadas a baixo custo e em prazos curtos. Isso significa que está em pleno curso o fenômeno da engenharia colaborativa, a qual está claramente influenciando as áreas de pesquisa e desenvolvimento de produto, uma vez que ela permite encurtar significativamente o tempo de projeto e manufatura do produto, bem como customizar certas características e, nesse sentido, atingir um público maior a preços competitivos. Assegura-se, por conseguinte, forte apelo sustentável à empresa e maior versatilidade ao parque fabril, proporcionando significativa vantagem competitiva num cenário cada vez mais dinâmico, agressivo e desafiador. Concluindo, contribui-se fortemente com a perenidade desejada pela organização.

6. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná e a FECIAL Indústria e Comércio LTDA.

7. REFERÊNCIAS

- Ambrogio, G., Filice, L., & Gagliardi, F., 2011, “Improving industrial suitability of incremental sheet forming process”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58(9), pp. 941–947.
- Ambrogio, G., Filice, L., & Gagliardi, F., 2012, “Improving industrial suitability of incremental sheet forming process”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 58(9-12), pp. 941–947.
- Bertol, L.S., 2012, “Potentialities of the use of incremental forming in computer aided design and manufacture of customized craniofacial implants”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Escola de Engenharia, UFRGS, Brasil, 133 p.
- Cerro, I., Maidagan, E., Arana, J., Rivero, A., Rodríguez, P.P., 2006 “Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177 (1–3), pp. 404–408.
- De Lucca, G. dos S., 2015, “Análise de Forças Durante Processo de Estampagem Incremental com o Auxílio de Extensometria”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Escola de Engenharia, UFRGS, Brasil, 99 p.
- Duflou, J., Tunçkol, Y., Szekeres, A., & Vanherck, P., 2007, “Experimental study on force measurements for single point incremental forming”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189(1-3), pp. 65–72.
- Hirt, G., Ames, J., Bambach, M., Kopp, R., 2004, “Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 53(1) pp. 203–206.

- Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., & Allwood, J., 2005, "Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54(2), 88–114.
- Kopac, J., & Kampus, Z., 2005, "Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 162-163, pp. 622–628.
- Lamminen, L., 2005, "Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design", Advanced Materials Research, Vol. 6-8, pp. 457-464.
- Li, Y., Liu, Z., Lu, H., Daniel, W. J. T., Liu, S., & Meehan, P. a., 2014, "Efficient force prediction for incremental sheet forming and experimental validation", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 73(1-4), pp. 571–587.
- Malhotra, R., Xue, L., Belytschko, T., & Cao, J., 2012, "Mechanics of fracture in single point incremental forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212(7), pp. 1573–1590.
- Meier, H., Zhu, J., Buff, B., & Laurischkat, R., 2012, "CAx Process Chain for Two Robots Based Incremental Sheet Metal Forming", Procedia CIRP, Vol. 3, pp. 37–42.
- Montgomery, D.C., Runger, G.C., Hubele, N.F., 2004, "Estatística Aplicada à Engenharia", Editora LTC, 2ª Ed., São Paulo, Brasil, 335 p.
- Paniti, I., 2014, "A novel, single-robot based two sided incremental sheet forming system", ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics; Proceedings Of. VDE, pp. 1–7.
- Rauch, M., Hascoet, J.-Y., Hamann, J.-C., & Plenel, Y., 2009, "Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications", Computer-Aided Design, Vol. 41(12), pp. 877–885.
- Schaeffer, L., 2004, "Conformação de Chapas Metálicas", Imprensa Livre, Porto Alegre, Brasil, 200 p.
- Schwab, K., 2016, "A Quarta Revolução Industrial", Ed. Edipro, São Paulo, Brasil, 159 p.
- Sena, J.I.V., 2009, "Estampagem Incremental: Um novo Conceito de Produção", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Portugal, 95 p.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE MAXIMUM STAMPING DEPTH ON THE INCREMENTAL SHEET FORMING PROCESS AT CNC MILLING MACHINING CENTERS

Pablo Deivid Valle, pablo.valle@ufpr.br¹
Fred Lacerda Amorim, fred.amorim@pucpr.br²
Paulo Victor Prestes Marcondes, marcondes@ufpr.br¹

¹ Federal University of Paraná, Jardim das Américas, Centro Politécnico, CP 19011, CEP:81531-980, Curitiba.

² Pontifical Catholic University of Paraná, Imaculada Conceição 1155, Prado Velho, CEP: 80215-901, Curitiba.

Abstract: Incremental Sheet Forming (ISF) stands out for the agility and low cost of obtaining forming products through the adaptation of CNC Milling Machining Centers and CAD / CAM programming. ISF technology positions itself as an innovative process tuned to the 4.0 revolution, by reducing manufacturing times, bringing the customer closer and ensuring sustainability. Thus, it is important to investigate key process parameters for safe and optimized use of equipment, tool and manufacturing support devices. The present theoretical-experimental work evaluated the stamping of ASTM A653 CS-A G90 commercial steel sheets during the forming of cone-type geometries in incremental sheet forming in CNC Machining Centers. The statistical method chosen was the full factorial 2^2 and also tested the central point to evaluate the respective linearity of the phenomenon. The factors investigated were: the vertical increment in Z, Δz (mm) and the tool diameter d_t (mm), keeping the tool feed rate f (mm/min) constant and the slope angle of the wall α (°). It was observed that the parameter Δz has a significant influence on the maximum depth of h_{max} forming, where the results showed that it is possible to double the process conformability level by adjusting only the respective vertical increment. It has also been found that the tool diameter has little influence on the stamping depth. However, it is an important requirement in terms of tool robustness and factor dependent on the part geometry to be obtained, and in this case, a good solution is the use of combined tools.

Palavras-chave: Incremental Sheet Forming, Maximum Stamping Depth, Milling Machine Centers, Vertical Increment and Tool Diameter.