



Desenvolvimento de produtos personalizados através de estampagem incremental para aplicações na medicina ortopédica

O desenvolvimento de órteses metálicas para pacientes com problemas ortopédicos nos membros superiores e inferiores e de próteses para vítimas de traumatismo craniano são processos de precisão. Para fabricar estes produtos individuais é utilizada a estampagem incremental, processo de conformação mecânica que permite obter produtos sem a utilização de moldes e matrizes, normalmente utilizados em processos de estampagem tradicionais.

Na economia globalizada atual, o campo da indústria da transformação sofreu importantes modificações na demanda de mercado. Palavras e expressões como diferenciação, redução de custos, minimização do ciclo concepção-produção, encurtamento do ciclo de vida (mas também manufatura sustentável) permeiam as estratégias corporativas atuais [1].

Estas expressões conduzem a alterações produtivas, com a necessidade de pequenos lotes e algumas vezes unitários, onde os consumidores exigem alterações constantes nas características geométricas do produto [2, 3]. Por outro lado, aspectos estéticos, ergonômicos e possibilidade de customização de produtos aumentam sua importância na indústria [2]. O novo desafio das empresas, então, é ter a capacidade de oferecer novos produtos, utilizando o mínimo *time-to-market*, ou seja, diminuindo o tempo gasto entre a concepção, desenvolvimento, fabricação e comercialização do produto final, pré-seriados

(produtos em fase de teste) ou protótipos [4].

Para atender este novo requisito de fabricação, a estampagem incremental de chapas (*ISF - Incremental Sheet Forming*) se mostra uma alternativa viável. Neste processo a deformação da chapa é feita em várias etapas através de uma ferramenta esférica ou semi-esférica, comandada por um equipamento CNC, sem a necessidade de ferramental específico (moldes e matrizes), possibi-

litando a produção de pequenas séries de peças com baixo custo de produção [5]. Na figura 1 é apresentada a estampagem incremental de ponto simples (*SPIF - Single Point Incremental Forming*), que é uma das modalidades da estampagem incremental e que utiliza apenas uma ferramenta de conformação, sem qualquer suporte inferior.

Na estampagem incremental, a ferramenta de perfil genérico (haste

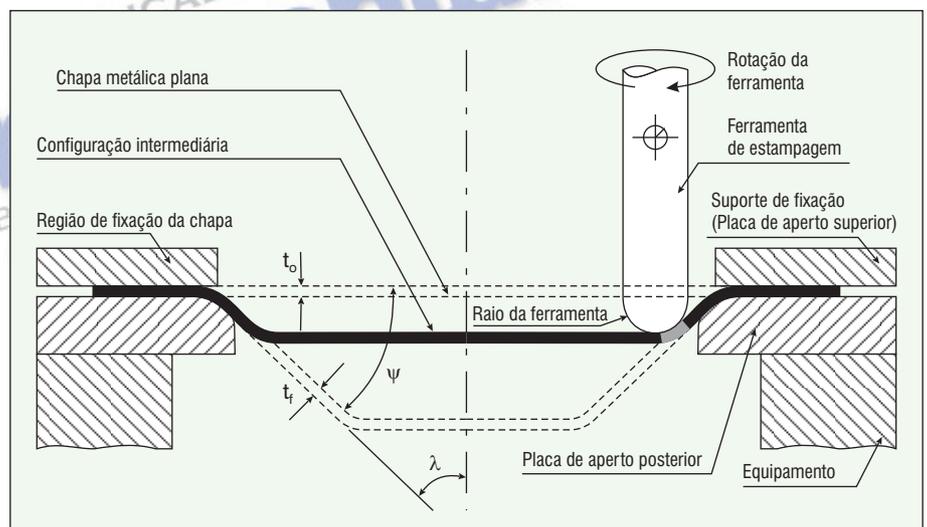


Figura 1 - Representação esquemática da ISF [6]

cilíndrica ou cilindro-cônica e ponta esférica ou semi-esférica) produz uma deformação plástica local de forma progressiva, aumentando a conformabilidade da chapa, quando comparada com os processos convencionais de estampagem [7].

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Como em todo processo, pode-se elencar vantagens e desvantagens, em termos técnicos, econômicos e comerciais.

Assim, a ISF apresenta como vantagens [1, 8]:

- a) redução do tempo de *setup*¹;
- b) flexibilidade;
- c) incremento da característica de conformabilidade;
- d) dispensa o uso de ferramentas especializadas;
- e) máquinas CNC² convencionais (centros de usinagem 3 eixos);
- f) possibilidade de estampagem de peças de dimensões variadas;
- g) acabamento superficial pode ser melhorado com o uso de lubrificantes e;
- h) operação é livre de ruídos intensos.

A redução do tempo de preparação de máquina ou *setup* é alcançada já que para diferentes peças é possível utilizar as mesmas ferramentas, o mesmo dispositivo prensa-chapas e os mesmos zeraamentos dos sistemas de coordenadas. A flexibilidade vem com a parametrização do processo, onde uma alteração na geometria do modelo CAD³ da peça reflete, imediatamente, na programação CAM⁴ e, conseqüentemente, nos códigos "G"⁵ que irão comandar o equipamento CNC, responsável pelo deslocamento da ferramenta sobre a chapa.

Já o tamanho da peça estampada é limitado pelas dimensões e não pela capacidade (potência) da máquina, uma vez que as forças de estampagem não aumentam de acordo com as dimensões da peça, devido à pequena e constante área da zona de contato, provocada pelo passo incremental da ferramenta.

A maior conformabilidade é observada em peças geradas através da ISF, atingindo profundidades maiores do que as peças obtidas por processos convencionais. As pequenas zonas de deformação plástica e a natureza incremental do processo contribuem para o aumento desta propriedade, tornando mais fácil a deformação [8].

De outro lado, o processo apresenta as seguintes desvantagens [1]:

- a) tempo muito alto para estampar a peça, limitando sua viabilidade comercial a pequenos lotes (maior desvantagem);
- b) baixa conformidade dimensional e geométrica entre a peça estampada e o modelo CAD, devido ao retorno elástico e ao acúmulo de tensões residuais que acabam deformando a chapa, embora existam algoritmos em desenvolvimento para compensar este problema;
- c) ângulos de parede próximos a 90° necessitam de várias etapas intermediárias de estampagem;
- d) dependendo da geometria produzida, as regiões externas da chapa que não sofrem a ação do punção se deformam após o relaxamento dos fixadores (devido ao retorno elástico), causando discrepâncias dimensionais e qualidade superficial [2].

Essa última desvantagem torna-

ria a estampagem incremental um processo não adequado para a manufatura de peças de precisão apurada. Essa não-adequação pode ser reduzida utilizando diferentes estratégias de movimentação de ferramenta e alterando outros parâmetros do processo, como o tamanho e velocidade da ferramenta, discretização do caminho da ferramenta, ou seja, do incremento vertical e utilizando tipos diferentes de lubrificantes [9].

APLICAÇÕES

De acordo com as características técnicas apresentadas, fica evidente que a ISF se aplica principalmente a pequenos lotes, peças especiais, protótipos e produtos personalizados. Sendo assim, a medicina ortopédica⁶, se torna uma área de grande importância para a ISF, já que as diferenças antropométricas⁷ entre os indivíduos são naturais e cada um necessita de produto com características próprias, melhorando sua performance e sua usabilidade [2, 10].

Na área da medicina ortopédica, as lesões causadas por fraturas, luxações, sub-luxações ou entorses nos membros inferiores são co-

¹ *Setup*: tempo de preparação. São as tarefas necessárias e relativas às atividades de preparação de um equipamento, desde o momento em que se tenha completado a última peça boa do lote anterior até o momento em que se tenha feito a primeira peça boa do lote posterior.

² CNC: do inglês Computer Numerical Control, que significa comando numérico computadorizado.

³ CAD: do inglês Computer Aided Design, significa projeto assistido por computador.

⁴ CAM: do inglês Computer Aided Manufacturing, significa fabricação assistida por computador.

⁵ Código G: linguagem de programação de máquinas operatrizes com comando numérico computadorizado.

⁶ Ortopedia: é a especialidade médica que se ocupa da prevenção e correção de deformidades do corpo humano.

⁷ Antropometria: processo ou técnica de mensuração do corpo humano ou de suas várias partes.

muns. A utilização de órteses⁸, também designadas por suportes ortopédicos, pode servir tanto para prevenção quanto para recuperação funcional das articulações. Uma pesquisa [11] apresenta os tipos de lesões do tornozelo, diagnóstico e tratamentos possíveis. Suportando até cinco vezes o peso do próprio corpo durante uma corrida, o funcionamento adequado do tornozelo depende principalmente do alinhamento e perfeito encaixe entre as partes ósseas móveis, unidas por ligamentos fibrosos.

Como exemplo de tratamentos preventivos, temos a utilização de botas ortopédicas, cuja função é restabelecer o alinhamento normal das partes ósseas e ligamentos que compõe os pés, tornozelos e joelhos. Acessórios como talas e suportes podem ser utilizados para imobilização total ou parcial de um membro que necessita recuperar sua função, sem causar dor.

PRÓTESES E ÓRTESES

As órteses, portanto, tem utilização temporária, são fixadas externamente e não substituem partes do corpo. Já as próteses⁹ são peças permanentes, podem ser externas ou internas e são utilizadas para substituir partes do corpo perdidas por amputações de membros (mãos, braços e pernas) ou destruição de partes ósseas do crânio, complicações que ocorrem com frequência em acidentes de trânsito.

Tanto em um caso como em outro, a finalidade da estampagem incremental é gerar peças que se adéquem perfeitamente a cada paciente, considerando as diferenças antropométricas entre os indivíduos. Além disso, o processo de manufatura da órtese ou prótese

deve ser rápido e ter baixos custos, devido à natureza emergencial do problema médico e para possibilitar sua aplicação a um maior número de pessoas.

ESTUDOS DE CASO

Um estudo descreve a manufatura de um suporte para tornozelo [2]. A idéia básica consiste naquilo que o autor define como “*round design*”¹⁰, no qual o ciclo inicia e termina no corpo do paciente, como é apresentado na figura 2.

O ciclo inicia com o escaneamento tridimensional a *laser*¹¹, sem nenhuma dor ou desconforto para o paciente. Esse escaneamento adquire os dados geométricos do tornozelo do paciente em formato digital, gerando uma “nuvem de pontos”, com a qual é possível obter uma superfície 3D, ou seja, um modelo CAD do tornozelo. O modelo CAD então é utilizado por um sistema CAD/CAM para gerar os códigos que irão comandar a máquina CNC. A chapa metálica será deformada de acordo com a trajetória descrita pela ferramenta e pelos parâmetros configurados no sistema CAD/CAM. A peça produzida é novamente escaneada e a comparação entre a peça real e o modelo gerado no início do processo é feita em um sistema CAD.

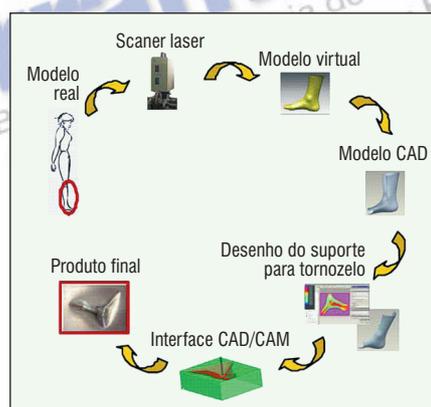


Figura 2 - Ciclo de desenvolvimento de produto [2]

O ciclo completo de engenharia reversa foi realizado a fim de adquirir a geometria do membro do paciente e utilizar esta informação na fase de manufatura para assegurar a melhor correspondência entre o suporte obtido e o corpo do paciente. A trajetória da ferramenta de estampagem é gerada automaticamente por um *software*¹² CAD/CAM (conforme a figura 3), muito embora alguns parâmetros tenham que ser experimentados e ajustados para obter um produto de melhor qualidade.

Consegue-se assim, com a peça obtida, substituir o uso de camadas espessas de preenchimento (gesso)

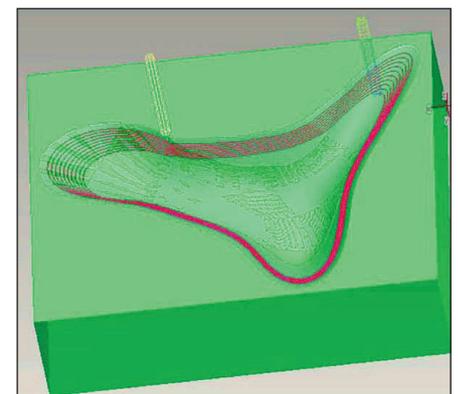


Figura 3 - Trajetória 3D da ferramenta [2]

⁸Órtese: refere-se unicamente aos aparelhos ou dispositivos ortopédicos de uso provisório, destinados a alinhar, prevenir ou corrigir deformidades ou melhorar a função das partes móveis do corpo. Exemplo: O aparelho dentário ortodôntico é uma órtese pois corrige a deformidade da arcada dentária (orto = reto, correto) [12].

⁹Prótese: é um componente artificial que tem por finalidade suprir necessidades e funções de indivíduos sequelados por amputações, traumáticas ou não. Exemplo: A dentadura ou um implante dentário é uma prótese pois substitui o órgão ou sua função (substitui os dentes) [12].

¹⁰Round design: do inglês, round = redondo e design = projeto, desenho. Neste caso, significa projeto cíclico.

¹¹Laser: do inglês, significa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ou seja, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação [12].

¹²Software: ou programa de computador, é uma sequência de instruções a serem seguidas e/ou executadas, na manipulação, redirecionamento ou modificação de um dado/informação.

por um suporte altamente customizado, com o menor espaçamento possível entre este e o tornozelo [10].

A estampagem incremental neste caso, se torna o candidato natural uma vez que o uso de ferramentas específicas (moldes e matrizes) foi absolutamente rejeitado, considerando a necessidade de somente um produto.

A estampagem da chapa é realizada em um centro de usinagem de 3 eixos, utilizando uma ferramenta com ponta semi-esférica, com a trajetória gerada automaticamente por um sistema CAD/CAM.

A geometria 3D obtida é dividida em duas partes, estampadas separadamente. Após a estampagem, a geometria final de cada parte é extraída da chapa original (cortada com *laser* ou jato d'água) e, finalmente, as duas partes obtidas são unidas para compor a órtese final que, neste caso, destina-se a um tornozelo.

Devido à característica incremental, se confirma a idéia de "aplicação localizada de tensão", fazendo com que cada ponto de deformação da chapa sofra a tensão total de deformação, derivada em incrementos progressivos. Esta particularidade resulta em um grande incremento da característica de conformabilidade, quando comparada com os processos tradicionais de estampagem [11].

Em outro estudo de caso, a questão central é a precisão dimensional da peça obtida. Conforme mostrado na figura 4, foi produzida uma placa craniana, de geometria complexa, utilizada em cirurgias para reconstrução do crânio [5].

Neste caso, a precisão é neces-

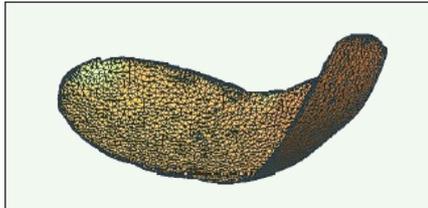


Figura 4 - Modelo CAD da prótese craniana [5]

sária para possibilitar o correto encaixe da prótese no crânio remanescente do paciente, sem ressaltos nem folgas. No processo de estampagem, o perfil da prótese foi estendido para um hemisfério.

Um cuidado especial foi observado na transição entre a placa craniana e a sua extensão. Os requisitos de precisão dimensional podem ser divididos em duas regiões: o contorno e o centro da placa. Diferentes estratégias foram aplicadas, visando obter a melhor correspondência entre o modelo original (obtido a partir do escaneamento do crânio do paciente) e a chapa estampada. Em um dos testes, foram utilizados os padrões do *software* CAD/CAM pré-ajustados. O desvio máximo foi de $-0,4$ a $+1,4$ mm e a figura 5 mostra que a maior parte deste desvio se situou próximo das bordas da placa, enquanto a região central ficou semelhante ao perfil do modelo original. Os melhores resultados foram obtidos com a trajetória helicoidal da

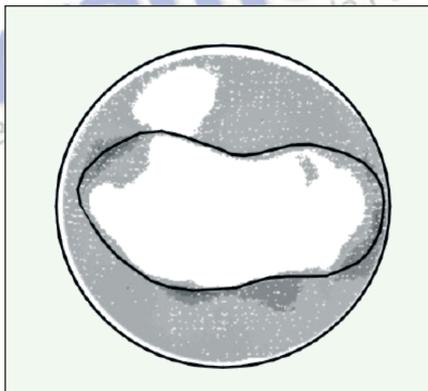


Figura 5 - As regiões escuras indicam a discrepância geométrica entre o modelo CAD original e o obtido [5]

ferramenta, aplicada de fora para dentro, obtendo desvios de 0 a $+0,3$ mm.

Requisitos de projeto

Através da análise dos estudos de caso, é possível estabelecer os equipamentos, as etapas e os custos de implantação para desenvolver um projeto de produtos ortopédicos manufaturados a partir da estampagem incremental.

Para a realização destas etapas (descritas no item Estudos de Caso), são listados na tabela 1 e visualizados na figura 6 os equipamentos e *softwares* necessários. Os custos médios apresentados foram obtidos através de consultas por telefone, correio eletrônico (*e-mail*) e através das páginas eletrônicas (*web sites*) dos fabricantes. No entanto, deve-se considerar que este projeto leva em conta a adaptação de recursos pré-existentes, originalmente destinados a aplicações seriadas para a área de usinagem, para a confecção de produtos personalizados. A maior parte dos equipamentos listados é comum em empresas do setor metalúrgico. O *scanner* 3D, embora não seja tão comum devido ao seu alto custo, é um dispositivo genérico, utilizado

Equipamento	Custo R\$
Scanner 3D (digitalizador tridimensional)	12.000,00
Computador (<i>Workstation</i>)	5.700,00
Software CAD	3.500,00
Software CAM	8.000,00
Máquina-ferramenta CNC (Centro de usinagem 3 eixos)	120.000,00
Dispositivo prensa-chapas	1.300,00
Ponto de apoio inferior (molde usinado em madeira MDF ou poliuretano PU - custo por unidade manufaturada)	120,00
Fresa de topo HSS para desbaste do molde diâmetro 10 mm	70,00
Fresa HSS ponta semi-esférica diâmetro 10 mm	120,00
Ferramenta de conformação (HSS ponta semi-esférica lisa, sem arestas de corte)	80,00
TOTAL	150.890,00

Tabela 1 - Custos totais de implantação

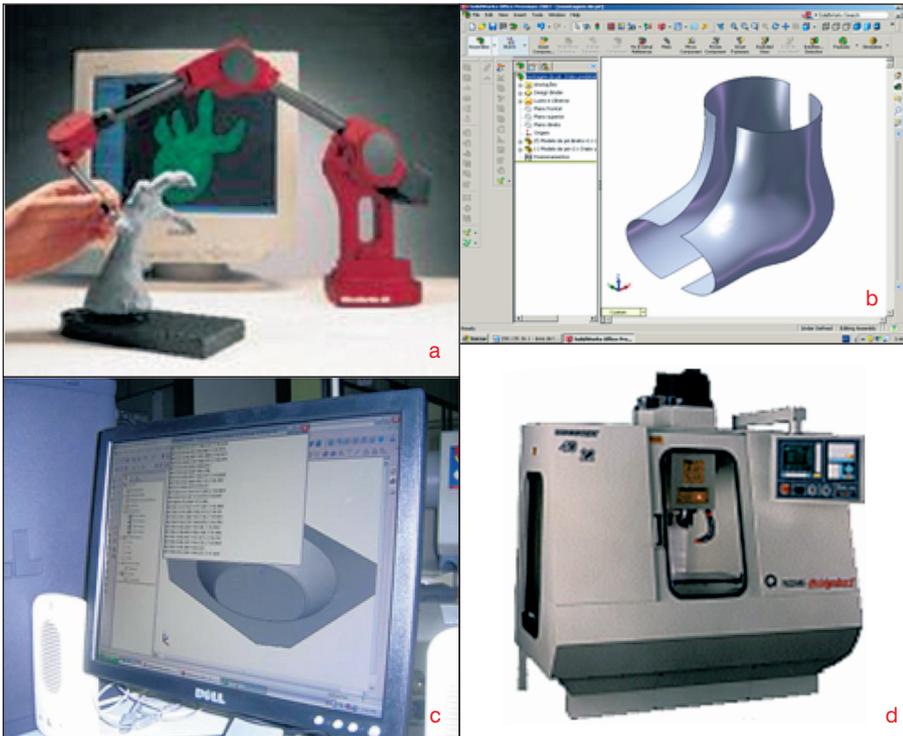


Figura 6 - Equipamentos e softwares necessários para o desenvolvimento de produtos ortopédicos: a) scanner 3D; b) software CAD; c) software CAD/CAM e de transmissão (pós-processador) e; d) máquina CNC

para outras aplicações como, por exemplo, reprodução de obras de arte e engenharia reversa. A etapa de escaneamento também pode ser substituída por uma tomografia, da qual pode se obter um arquivo vetorial IGES do membro do paciente. Já o dispositivo prensa-chapas e o ponto de apoio inferior são específicos para o tema proposto e, como se pode verificar, possuem baixo custo, muito inferior aos custos dos demais equipamentos. A apresentação dos valores, portanto, é feita apenas como referência, considerando a aquisição total dos equipamentos em um projeto experimental, de caráter social (utilizado para casos reais) e científico (para aprimoramento tecnológico), fomentado por órgãos governamentais ligados à área da saúde.

Em função de o material usado como ponto de apoio inferior (matriz) oferecer baixa resistência ao corte (MDF¹³ ou polímero popular-

mente conhecido como *cibatool*), as ferramentas de usinagem podem ser utilizadas muitas vezes sem apresentar desgaste considerável. Já a ferramenta de conformação, como trabalha com lubrificante em contato com a chapa, também tem alto grau de durabilidade.

Dispositivo prensa-chapas

O projeto do prensa-chapas foi idealizado considerando como aspecto primordial a possibilidade de execução das operações de usinagem do apoio inferior (matriz) e de estampagem incremental no mesmo dispositivo, sendo necessária apenas a fixação da placa de aperto superior (para prender a chapa) e não a troca de todo o dispositivo.

Utilizando o mesmo sistema de coordenadas de referência previamente estabelecido, é possível realizar as duas operações, com a troca automática de ferramentas definida no software CAM, contribuindo pa-

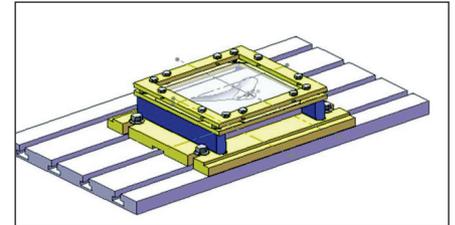


Figura 7 - Projeto do dispositivo prensa chapas

ra a flexibilidade e rapidez na execução das peças personalizadas.

CONCLUSÕES

Contabilizando apenas os equipamentos específicos (dispositivo prensa-chapas e ponto de apoio) temos um custo de R\$ 1.420,00. Se considerarmos o conforto e a eficácia que um produto personalizado pode trazer na recuperação de uma imperfeição ortopédica, pode-se concluir que o sistema é viável, considerando as limitações que o processo de estampagem incremental apresenta.

AGRADECIMENTOS

A Faculdade SATC pelo apoio logístico e ao LDTM/UFRGS pelo apoio tecnológico.

¹³ MDF: do inglês, significa *Medium-density fiberboard* e é um material derivado da madeira. A designação correta em português é placa de fibra de madeira de média densidade. É fabricado a-través da aglutinação de fibras de madeira com resinas sintéticas e outros aditivos. As placas de madeira são coladas umas as outras com resina e fixadas através de pressão [12].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Micari, F.; Ambrogio, G.; Filic, L.; *Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of the art and future trends*. J. Materials Processing Technology 191, pp. 390-395, 2007
- [2] Ambrogio, G.; De Napoli, L.; Filice, L.; Gagliardi, F.; Muzzupappa, M.; *Application of incremental forming process for high customized medical product manufacturing*. J. Materials Processing Technology 162-163, pp. 156-162, 2005
- [3] Tanaka, S.; Nakamura, T.; Hayakawa, K.; Nakamura, H.; Motomura, K.; *Incremental sheet metal forming process for pure titanium denture plate*. In: Proceedings of the ICPT 2005, Verona, Itália, 2005
- [4] Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., Mazzoni, L. *Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization*. Journal of Materials Processing Technology 197, pp. 59-67, 2008
- [5] Dufloy, J. R.; Lauwers, B.; Verbert, J.; Tunckol, Y.; De Baeremaeker, H.; *Achievable accuracy in single point incremental forming: case studies*. Katholieke Universiteit Leuven - Department of Mechanical Engineering, 2006
- [6] Martins, P. A. F.; Bay, N.; Skjoedt, M.; Silva, M. B.; *Theory of single incremental forming*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 57, pp. 247-252, 2008
- [7] Minutolo, F. C., Durante, M., Formisano, A., Langella, A. *Evaluation of the maximum slope angle of simple geometries carried out by incremental forming process*. Journal of Materials Processing Technology 194, pp. 145-150, 2007.
- [8] Jeswiet, J.; Micari, F.; Hirt, G.; Bramley, A.; Dufloy, J.; Allwood, J.; *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*. 2006
- [9] Hirt, G.; Ames, J.; Bambach, M.; Koop, R.; *Forming strategies and Process Modeling for CNC Incremental Sheet Forming*. Materials Technology/Precision Forming, Saarland University, Saarbrücken, Germany. Metal Forming Institute, RWTH Aachen, Aachen, Germany. Submitted by R. Kopp, Aachen Germany, 2004
- [10] Lesic, A.; Bumbasirevic, M.; *Ankle Fractures*. Current Orthopaed 18, pp. 232-244, 2004
- [11] Kim, T. J.; Yang, D. Y.; *Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process*. International Journal of Mechanical Sciences 42, pp. 1271-1286, 2000
- [12] www.wikipedia.org.br

Jovani Castelan - Licenciado em Desenho pela UDESC e Mestre em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Pesquisador/professor da Faculdade SATC, atuando nas áreas de CAD/CAM e design.

Lírio Schaeffer - Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Doutor na área de Conformação pela Universidade Técnica de Aachen na Alemanha (RWTH). Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais do CNPq, professor das disciplinas de processos de fabricação por conformação mecânica e vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Energia da UFRGS. Autor de vários livros sobre conformação mecânica.

Anderson Daleffe - Tecnólogo em Eletromecânica pela Faculdade SATC e Mestre em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Pesquisador/professor da Faculdade SATC, atuando nas áreas de usinagem CNC e processos de fabricação.