

UM MODELO FUNCIONAL DE ATIVIDADES DE APLICAÇÃO PARA MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA (MANUFATURA HÍBRIDA)

Angy Michell Posada

Efrain Rodriguez

Alberto José Alvares

Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil
e-mails: angy.posada@aluno.unb.br, efrain.rodriguez@aluno.unb.br, alvares@alvarestech.com

Resumo. *Manufatura híbrida combina as vantagens dos processos aditivos e subtrativos. Este trabalho apresenta um modelo funcional para realizar manufatura híbrida composto pelos módulos CAD, CAPP-CAM e CNC, descrita a través da técnica de modelagem IDEF0. A viabilidade do modelo proposto é validada com um caso de implementação usando um robô com estrutura paralela Delta Linear equipado com um cabeçote intercambiável (extrusor - spindle). Os resultados experimentais demonstraram as novas possibilidades de fabricação com processos híbridos.*

Palavras chave: *manufatura híbrida, manufatura aditiva, usinagem, planejamento de processos*

1. INTRODUÇÃO

Manufatura híbrida é uma nova tendência tecnológica de fabricação que permite produzir de maneira mais eficiente produtos com maior qualidade e altamente personalizados, aproveitando as vantagens de combinar processos de manufatura aditiva e subtrativa (Zhu, Dhokia, & Newman, 2013). Enquanto os processos de usinagem são baseados na remoção de volumes de material que geram desperdício do material sacrificado que está sendo removido, manufatura aditiva realiza a função inversa adicionando camadas sucessivas de material para formar objetos físicos. Além disso, os processos de usinagem são altamente limitados principalmente à fabricação de geometrias prismáticas ou rotacionais, enquanto manufatura aditiva habilita a fabricação de peças com geometrias complexas, ainda multimatérias e multicoloridas, tirando qualquer barreira para a liberdade do *design*. No entanto, os processos aditivos possuem uma grande desvantagem associada à baixa precisão dimensional e pobre qualidade superficial inerente da natureza do processo de sobreposição de camadas de material. Neste sentido, as capacidades dos processos subtrativos para fabricação de geometrias com alta qualidade superficial podem ser aproveitadas para complementar a manufatura aditiva na forma de processos híbridos. Este novo enfoque de manufatura tem atraído considerável atenção de pesquisadores e líderes industriais de todo o mundo nos últimos anos, sendo confiado para a nova geração de sistemas avançados de manufatura baseados em estações de trabalho multi-processos (Rauch, Laguionie, & Hascoët, 2014). Porém, o planejamento de processos híbridos ainda constitui uma tarefa complicada (Behandish, Nelaturi, & de Kleer, 2018). Em termos de desenvolvimento de plataformas de manufatura híbrida, existe uma área emergente com poucos trabalhos reportados até a data sobre o uso de robôs com capacidade para combinar técnicas de adição e remoção de material (Keating & Oxman, 2013; Li, Haghighi, & Yang, 2018).

Este trabalho apresenta um modelo funcional para manufatura híbrida (aditiva e subtrativa) que envolve a descrição das atividades associadas ao projeto CAD (*Computer Aided Design*), planejamento de processo CAPP-CAM (*Computer Aided Process Planning-Manufacturing*), e sistema de CNC (*Computer Numerical Control*). Propõe-se uma plataforma de máquina híbrida baseada sobre um robô Delta linear com capacidades para operar nos dois modos, aditiva e subtrativa, usando um cabeçote intercambiável (extrusor - *spindle*). A implementação é realizada com a impressão e usinagem de uma peça de teste. O trabalho está organizado assim: na seção 2 é descrita o modelo funcional; na seção 3 é apresentada a implementação usando o robô delta linear. Finalmente, a principal conclusão do trabalho é ressaltada.

2. MODELO FUNCIONAL PARA MANUFATURA HÍBRIDA

Com o intuito de desenvolver o modelo funcional para manufatura híbrida foi adotado o enfoque de Modelagem de Atividades de Aplicação (AAM-*Application Activities Modeling*) baseado na técnica de IDEF0 (*Integrated Definition Language 0*) usando o software AIØ WIN. A atividade principal ou nível superior (Atividade A0) está associada ao modelo funcional para manufatura híbrida propriamente dito. Dita atividade A0 é então desdobrada num segundo nível do AAM constituído por um conjunto de três atividades nomeadas “Módulo CAD” (Atividade A1), “Módulo CAPP-CAM” (Atividade A2) e “Módulo CNC” (Atividade A3), como é apresentado na Fig. 1. Cada uma dessas três atividades é descrita detalhadamente a seguir a través de desdobramentos em subníveis de subatividades.

2.1. O módulo CAD (Atividade A1)

Nesta atividade ocorre o desenho e modelagem 3D da peça que será fabricada com manufatura híbrida. Para isso, é usado um software CAD comercial como SolidWorks, SolidEdge, Catia, etc. O módulo CAD recebe como entrada um nome para o projeto (“Nome de Projeto”), as especificações de geometria (“Features de Projeto”) e as especificações de material, tolerância e acabamento superficial (“Features GD&T”). Por outro lado, as saídas deste módulo constituem os arquivos STEP e STL com o modelo da peça (atividades “Arquivo STEP-203 da Peça” e “Arquivo STL da Peça” respectivamente). Para o projeto CAD da peça esta atividade usa como mecanismos uma plataforma de software CAD (“Sistema CAD”), o engenheiro projetista (“Projetista”) e possivelmente a internet (“Internet”) quando são usados ambientes de projeto web como TinkerCAD ou STEP Modeler. Na parte dos controles são usadas as “Bibliotecas de Features e Operações de Modelagem”, recursos de “Interface Gráfica” e suportes do padrão ISO 10303-203 (ISO10303-203, 2011). Por sua vez, esta atividade é desdobrada em quatro subatividades A11, A12, A13 e A14 relacionadas à criação do esboço da geometria da peça (A11), o projeto 3D (A12) baseada nas operações de modelagem, adição das especificações de tolerância, material e acabamento (A13), e a geração do modelo 3D finalizado (A14) que é exportado nos arquivos STEP e STL para servir como entradas no seguinte módulo da atividade A2.

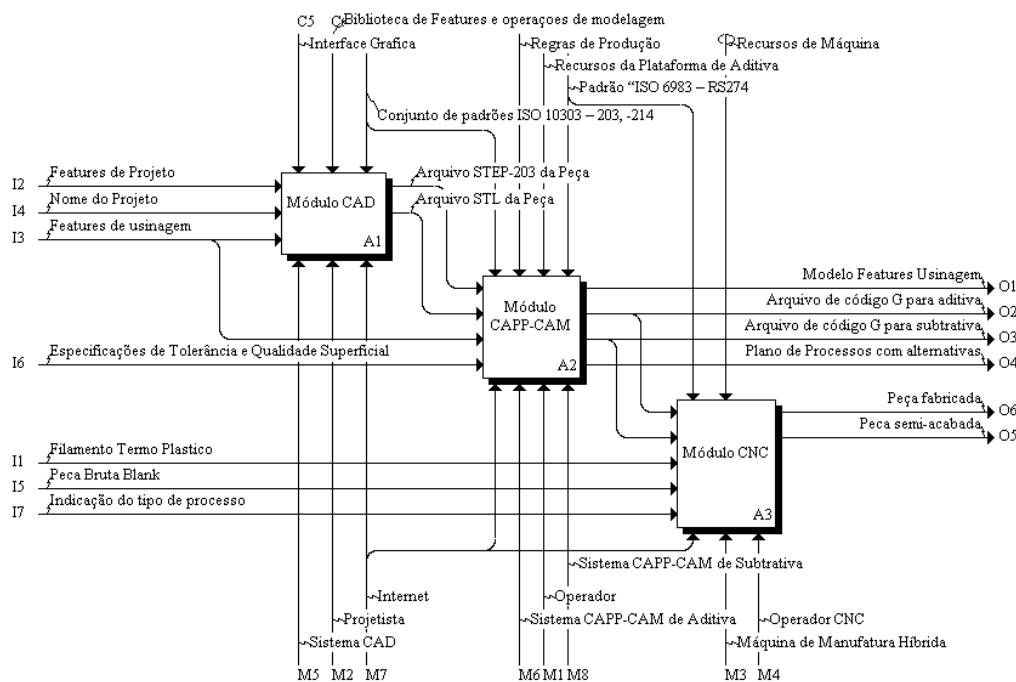


Figura 1. Segundo nível do modelo funcional: Módulo CAD, Módulo CAPP-CAM e Módulo CNC.

2.2. O módulo CAPP-CAM (Atividade A2)

A atividade do módulo CAPP-CAM tem sido desdobrada em duas subatividades mostradas na Fig. 2 denominadas “CAPP-CAM para Aditiva” (Atividade A21) e “CAPP-CAM para Subtrativa” (Atividade A22).

A atividade A21 está relacionada ao planejamento e modelagem CAM das operações de deposição de material associadas à peça sendo fabricada. Recebe como entrada o arquivo STL com o modelo 3D da peça gerado pelo módulo CAD. Além disso, também recebe como entrada as especificações de qualidade superficial que são considerados na definição dos parâmetros de processo. Então, a partir desta atividade são desdobradas um conjunto de subatividades relacionadas à importação do modelo STL (Atividade A211), definição do setup para manufatura aditiva (A212), especificação do material de suporte (A213), definição da estratégia de adesão da peça à base de impressão (A214), definição dos parâmetros de processo para aditiva (A215), fatiamento do modelo da peça (A216), verificação das camadas (A217), e geração do programa de controle numérico para aditiva (A218). A saída desta atividade é o programa NC em código G gerado pela subatividade A218 contendo as instruções para fabricar a peça a través do processo de manufatura aditiva (impressão 3D). Os controles envolvidos nesta atividade incluem os “Recursos da Plataforma de Aditiva”, “Regras de Produção” e o padrão “ISO 6983 – RS274”. Da mesma forma, os mecanismos usados por esta atividade incluem o “Sistema CAPP-CAM de Aditiva”, o engenheiro de manufatura “Operador” e a “Internet”. Outra saída desta atividade está relacionada ao conjunto de features para remoção de material com o processo de subtrativa, as quais são definidas de forma subjetiva pelo engenheiro de manufatura de acordo às especificações de projeto da peça.

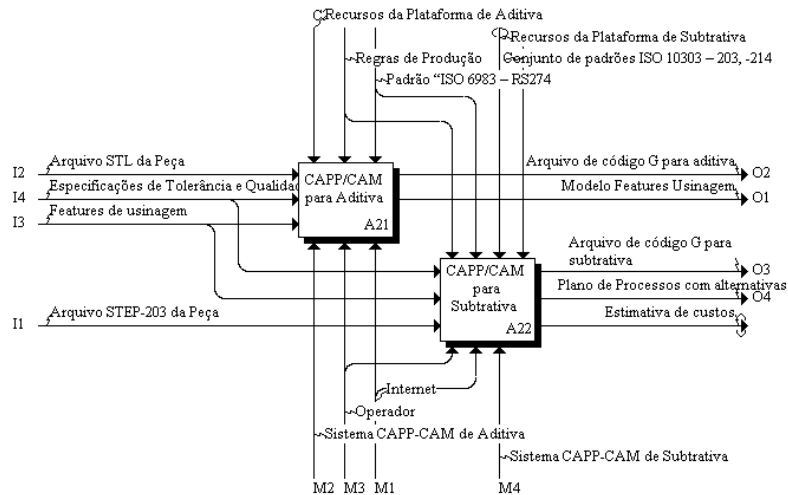


Figura 2. Desdobramento da atividade A2: módulos CAPP-CAM para Aditiva como para subtrativa.

Por outra parte, a atividade A22 (vide figura A22) concerne ao procedimento de planejamento e modelagem CAM das operações de usinagem que serão aplicadas sobre algumas das superfícies da peça. Desta forma, a atividade A22 recebe como entradas o modelo 3D da peça no formato STEP gerado no módulo CAD (A1), as especificações de tolerância e qualidade superficial, e as features de usinagem que serão envolvidas na definição dos parâmetros de processo e modelagem das operações. Dentro desta atividade encontram-se um conjunto de subatividades relacionadas com: importação do arquivo STEP com o modelo geométrico da peça (Atividade A221); análise das geometrias com especificações ou requerimentos de tolerâncias e qualidade superficial para estabelecer as operações de remoção de material com o processo de subtrativa (A222); determinação da sequência, considerando diferentes alternativas, das operações de remoção de material sobre as features de usinagem da peça (A223); definição do setup da peça enfatizando sobre o mecanismo de fixação estabelecido de acordo com as dimensões e forma da peça (A224); a subatividade subsequente envolve a definição das ferramentas de corte que serão usadas em cada operação baseado sobre a sequência definida e considerando aspectos relacionados ao material da peça e especificações dimensionais (A225); logo, a determinação das condições tecnológicas de usinagem incluindo velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, etc. (A226); a geração do programa de controle numérico para usinagem das superfícies da peça que o requerem ocorre na subatividade A227, a qual produz como saída o programa em código G com as instruções para o processo de subtrativa; finalmente, um plano de processo abrangendo todas as informações relevantes do processo que serão úteis na produção pode ser gerado na subatividade A228.

Os controles da atividade A22 incluem os “Recursos da Plataforma de Subtrativa”, “Regras de Produção”, o padrão ISO 6983 – RS274, e conjunto de padrões ISO 10303 – 203, -214. Do outro lado, os mecanismos sendo utilizados por esta atividade referem-se ao “Sistema CAPP-CAM de Subtrativa”, o “Operador” e a “Internet”. Finalmente, esta atividade tem como saídas o plano de processo e o programa NC de subtrativa em código G que servirá como entrada no seguinte módulo do modelo funcional.

2.3. O módulo CNC (Atividade A3)

A atividade A3 está associada ao módulo CNC do modelo funcional sendo proposta para manufatura híbrida. Esta atividade tem sido dividida nas quatro subatividades A31, A32, A33 e A34 apresentadas na Fig. 3. Sendo que nesta proposta a hibridação dos dois processos de manufatura (aditiva e subtrativa) é realizada no nível da máquina, ou seja, a máquina tem capacidade tanto para adicionar material quanto para removê-lo, foi necessário criar uma estratégia para indicar ao controlador da máquina o modo de operação dependendo do processo (adição ou remoção).

A subatividade A31 trata com a seleção do modo de operação da máquina, a qual recebe como entrada a indicação do tipo de processo, o arquivo de código G para aditiva, e o arquivo de código G para subtrativa. As saídas desta subatividade são compostas pelo “Modo de Operação”, os “Comandos para Aditiva”, e os “Comandos para Subtrativa”, dependendo sobre o modo de operação selecionado e que serão entrada nas atividades subsequentes. As atividades A32 e A33 correspondem à preparação da máquina de acordo com o processo (aditiva ou subtrativa), respectivamente. Dita preparação envolve colocação do material de fabricação, mecanismo de fixação da peça, mudança de ferramenta (de extrusor para *spindle* ou vice-versa), etc.; portanto, estas duas subatividades têm como controle os “Recursos da Máquina” que são disponíveis. Finalmente, a subatividade A34 corresponde ao processo de fabricação propriamente dito, onde a deposição do material e usinagem das superfícies especificadas da peça são realizadas pela máquina híbrida. Aqui, a peça semiacabada que primeiramente é fabricada com manufatura aditiva, sai para entrar na atividade de preparação da

máquina para subtrativa onde é devidamente fixada para ser usinada. No final a peça final tem-se a peça acabada fabricada a través dos dois processos.

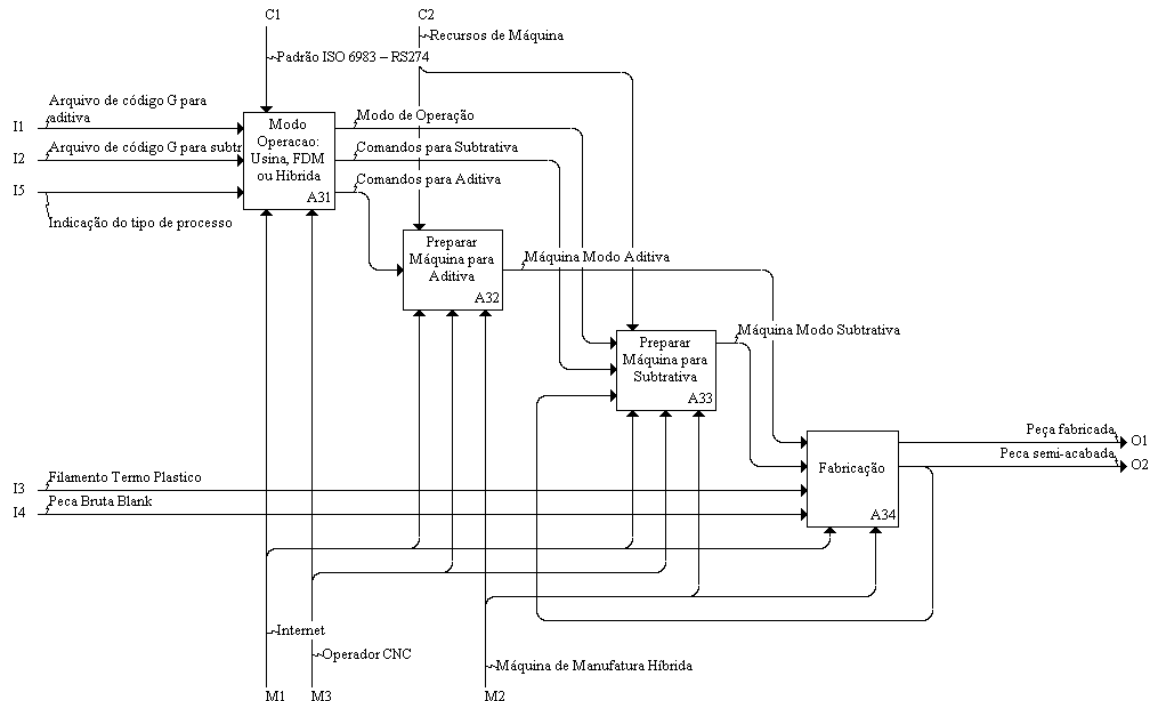


Figura 3. Detalhamento das subatividades do módulo CNC do modelo funcional.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO FUNCIONAL PROPOSTO

Com o intuito de validar o modelo funcional para manufatura híbrida proposto foi realizada uma implementação real com uma peça de exemplo (peça de plástico apenas ilustrativa) usando um robô com cinemática Delta linear (Rodriguez, Alvares, & Jaimes, 2019) equipado com um cabeçote intercambiável (extrusor - *spindle*). O procedimento de implementação é ilustrado na Fig. 4. O planejamento de processo para aditiva é realizado no software Slic3r, enquanto Mastercam é usado para o planejamento de subtrativa. O código G para aditiva é normalmente interpretado pelo controlador do robô para impressão 3D da peça de exemplo. A partir da impressão 3D é obtida a peça semiacabada que contém imperfeições sobre algumas superfícies. Para dar acabamento é usado o processo de usinagem, onde o código de função de máquina M37 junto com o parâmetro S1 indica ao robô o modo de operação subtrativa (e S0 para aditiva). Finalmente, depois de usar a superfície que requiere acabamento é obtida a peça final como mostrado na Fig. 4.

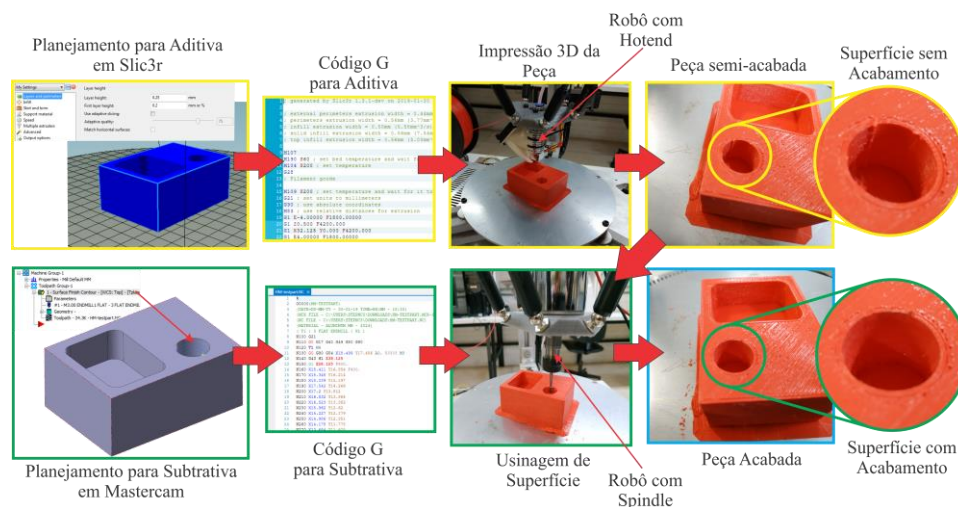


Figura 4. Procedimento de implementação do modelo funcional de manufatura híbrida proposta.

4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado um modelo funcional para um processo de manufatura híbrida (aditiva e subtrativa) usando a nomenclatura da técnica de modelagem do IDEF0. A ideia detrás do desenvolvimento deste trabalho foi, essencialmente, definir as atividades envolvidas num processo de manufatura híbrida dentro de uma sequência lógica, e entender o fluxo de informações ao longo de dita sequência. O modelo funcional global do processo foi dividido nas atividades principais CAD, CAPP-CAM e CNC. Os dois processos, aditivo e subtrativo, são integrados no nível da atividade CNC através de uma máquina com capacidades híbridas para fabricar peças com aditiva que em seguida podem ser também usinadas ou vice-versa. Um vídeo mostrando o sistema de cabeçote intercambiável encontra-se na URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kC8eF9iHLPu>. Em trabalhos futuros, pretende-se o desenvolvimento de um robô paralelo com cinemática reconfigurável e o aperfeiçoamento do cabeçote intercambiável aplicados na manufatura híbrida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências do governo federal do Brasil MEC/CAPES/CNPq pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Behandish, M., Nelaturi, S., & de Kleer, J. (2018). Automated process planning for hybrid manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 102, 115–127. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2018.04.022>
- ISO10303-203. (2011). Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 203: Application protocol: Configuration controlled 3D design of mechanical parts and assemblies.
- Keating, S., & Oxman, N. (2013). Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(6), 439–448. <http://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.05.001>
- Li, L., Haghighi, A., & Yang, Y. (2018). A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. *Journal of Manufacturing Processes*, 33, 150–160. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.05.008>
- Rauch, M., Laguionie, R., & Hascoët, J. Y. (2014). A STEP-NC approach for multi-process manufacturing, simulation and optimisation. *International Journal of Product Development*, 19(1/2/3), 21. <http://doi.org/10.1504/IJPD.2014.060035>
- Rodriguez, E., Alvares, A. J., & Jaimes, C. I. (2019). Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 095965181983691. <http://doi.org/10.1177/0959651819836915>
- Zhu, Z., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2013). The development of a novel process planning algorithm for an unconstrained hybrid manufacturing process. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 404–413. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.006>

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

A Functional Application Activities Model for Hybrid Additive-Subtractive Manufacturing

Angy Michell Posada

Efrain Rodriguez

Alberto José Alvares

Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Technology, University of Brasilia, Brasilia, Brazil
e-mails: angy.posada@aluno.unb.br, efrain.rodriguez@aluno.unb.br, alvares@alvarestech.com

Abstract. Hybrid manufacturing combines the advantages of both additive and subtractive processes. This work presents a functional model to realize hybrid manufacturing composed by the CAD, CAPP-CAM and CNC modules, described through the IDEF0 modeling technique. The feasibility of the proposed model is validated by using a linear Delta robot equipped with a changeable head (extruder - spindle). Based on the experimental results, hybrid manufacturing is possible with the proposed functional model.

Keywords: hybrid manufacturing, additive manufacturing, machining, process planning