

Soluções adaptativas de baixo custo e código-fonte aberto para o desenvolvimento de máquina de manufatura híbrida

1 INTRODUÇÃO

A prototipagem rápida surgiu no final da década de 80 e consiste na construção de peças em escala reduzida ou real a partir de um modelo tridimensional feito em programas CAD (do inglês *Computer Aided Design*, ou Desenho Assistido por Computador) (FOGGIATTO, 2006). Nos últimos anos, a prototipagem rápida tornou-se imprescindível em diversos campos, tais como medicina, educação, design de produtos, decoração, engenharia, entre outros, por viabilizar o manuseio precoce de peças e componentes próximas a seu formato final e a verificação de certos aspectos, tais como a forma, a cor, a integração e montagem de peças avulsas, durabilidade, formas de produção em escala, entre outros (NAGEL et al., 2012). A produção precoce de peças próximas a seu formato final também permite que desenvolvedores interajam com elas antes de sua produção em escala, a qual é uma etapa onde falhas de projeto podem causar atrasos no lançamento de produtos ou até mesmo resultar em um *recall* (VOLPATO et al., 2007). Outro aspecto positivo da prototipagem rápida, segundo Gorni (2001), é a redução estimada de 70% a 90% no tempo e custo de desenvolvimento de peças e componentes. Yamazaki (2016) destaca que tempo e custo são duas variáveis importantíssimas para a indústria, em razão da competição no mercado e da necessidade de entregar um produto com qualidade à frente de concorrentes.

Uma técnica bem conhecida da prototipagem rápida é a “manufatura aditiva”, que se caracteriza pela deposição de material, a qual acaba formando a estrutura tridimensional desejada. Tal técnica também é chamada de “impressão 3D”. O uso de técnicas de extrusão ou remoção de material, por sua vez, é conhecida por “manufatura subtrativa”, e caracteriza-se pelo uso das máquinas modernas de CNC (Comando Numérico Computadorizado). Atualmente a opção de combinar ambas as tecnologias de “manufatura aditiva” e “manufatura subtrativa” torna-se interessante para o desenvolvedor por integrar as características positivas de cada método e permitir a otimização da prototipagem de peças. A união desses dois métodos é conhecida como “Manufatura Híbrida” (ZHU et al., 2012) (RODRIGUEZ et al., 2016). De acordo com Lee et al. (2014), a manufatura híbrida torna a produção mais eficiente ao reduzir o volume de material e o tempo de produção quando a manufatura aditiva é realizada. Porém, como a manufatura aditiva pode resultar em peças com acabamento de baixa precisão, utiliza-se o processo de manufatura subtrativa em uma etapa posterior da prototipagem, o qual passa a eliminar deformações e aumentar a precisão do acabamento.

Máquinas de manufatura híbrida, ou máquinas híbridas, já estão disponíveis comercialmente, como o modelo *Integrex i-400* feita por Mazak (2022). No entanto, soluções comerciais de máquinas híbridas ainda possuem um alto custo de investimento (BRECHER et al., 2012). Soluções alternativas adotadas por acadêmicos e indústrias procuram tirar benefício de estrutura ferramental e maquinário já disponíveis para implementar técnicas de manufatura híbrida. Um exemplo é a adaptação de ferramentas de fresagem em impressoras 3D feita por Anzalone et al. (2015). Outro exemplo é a implantação de um dispositivo de manufatura aditiva (FDM, do inglês, *Fused Deposition Modeling*, ou Modelamento por Deposição Fundida) em uma máquina CNC de cinco eixos, a qual foi apresentada por Kale et al. (2018).

O objetivo do artigo é apresentar o desenvolvimento de uma máquina híbrida robusta e de fácil manuseio, que utiliza uma máquina de fabricação de circuitos impressos e um sistema eletrônico de baixo custo e programado com código-fonte aberto, que seja capaz de operar com apenas um *software* de controle como proposto por Santos et al. (2018), e que seja uma alternativa aos métodos apresentados por Rodriguez et al. (2016) e Kale et al. (2018). Além disso, o desenvolvimento e



utilização dessa máquina pode ser uma ótima ferramenta de ensino e aprendizado caso seja utilizada em disciplinas da engenharia para ajudar os alunos a desenvolverem conceitos relacionados a manufatura aditiva, subtrativa e híbrida. Disciplinas aplicadas com a utilização de máquinas de alta tecnologia pode tornar os alunos mais preparados e autônomos em sua aprendizagem ao ingressarem no mercado de trabalho (SANTOS e OTA, 2020). Principalmente se o curso envolver trabalhos em grupo de forma colaborativa ou cooperativa entre integrantes de diferentes cursos de graduação para tornar a integração entre parte mecânica e eletrônica ainda mais efetiva (GUEDES e SANTOS, 2020).

2 TÉCNICAS DE MANUFATURA PARA PROTOTIPAGEM RÁPIDA

2.1 Manufatura Aditiva

A confecção de uma peça a partir da manufatura aditiva é feita através da adição de material em camadas, que se sobrepõem uma à outra, como uma espécie de soldagem do material (MARTINEZ et al., 2019), o que forma por fim o objeto tridimensional, que fora previamente desenhado pelo projetista através de ferramentas CAD. A Figura 1 apresenta o modelo e o objeto resultante da deposição de várias camadas. A manufatura aditiva, também conhecida por impressão 3D, pode ser feita a partir de diferentes materiais, tais como polímeros, pó, cerâmica, metal, compostos alimentícios, gel, concreto, entre outros (Frazier, 2014). Segundo Ambrosi e Pumera (2016), os polímeros são os mais utilizados atualmente para impressão. Alguns exemplos são o PLA, ABS, policarbonatos, nylon e PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*, ou Polietileno Tereftalato Glicol). Existem também materiais que se solidificam quando expostos a raios gama ou a óxido de etileno e são comumente usados em aplicações médicas (MÜLLER e WINGS, 2016).

A manufatura aditiva é indicada a usuários que desejam construir rapidamente peças com alta complexidade geométrica e que não demandam um acabamento impecável (NAGEL et al., 2012). Alguns exemplos conhecidos, segundo Karunakaran et al. (2010), são os métodos LENS (do inglês *Laser Engineered Net Shaping*), SLA (do inglês *Stereolithography*), SLS (do inglês *Selective Laser Sintering*) e SDM (do inglês *Shape Deposition Manufacturing*). Apesar da manufatura aditiva não ser a técnica mais adequada quando se deseja maior precisão e qualidade no acabamento sua popularidade aumenta a cada ano, tanto no meio acadêmico quanto no meio industrial e de uso pessoal. Espalin et al. (2014) acreditam que o uso de impressoras 3D será ainda mais frequente e popular, frente à possibilidade de confecção de componentes elétricos e eletrônicos como os presentes em um *smartphone*.

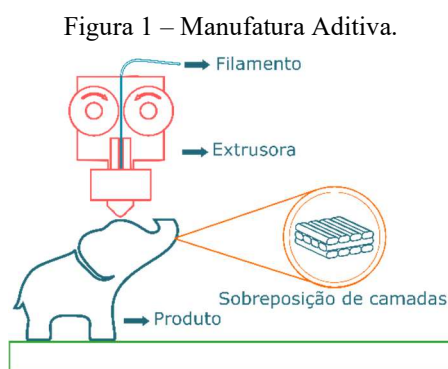


Figura 1 – Manufatura Aditiva.

Fonte: Confeccionado pelo autor.

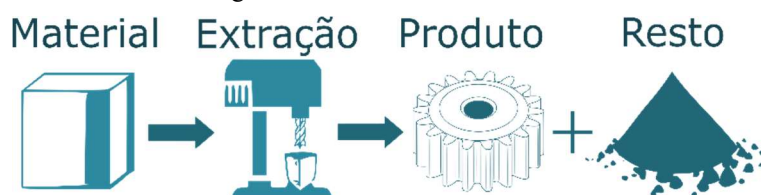
2.2 Manufatura Subtrativa

Segundo Müller e Wings (2016), a máquina de fresagem CNC é o melhor exemplo de aplicação da tecnologia de manufatura subtrativa, cujo objetivo principal é controlar os movimentos da ferramenta e/ou da peça de trabalho para extrair material do sólido inicial, formando um novo objeto que corresponda ao modelo tridimensional desenhado. A Figura 2 descreve esse processo.



De acordo com Souza (2004) cabe ao desenvolvedor realizar o desenho do sólido desejado e estabelecer as ferramentas e método de extração a serem utilizados. Fresamento, perfuração, aplainamento e torneamento são os métodos de extração de material mais comuns. A partir deles, é possível construir uma peça com ótimo acabamento e alta resistência mecânica, os quais são umas das principais vantagens da tecnologia de manufatura subtrativa (PEREIRA, 2017). Em contrapartida, o resto do desbaste decorrente da necessidade de confeccionar uma peça a partir de uma única camada de matéria prima, a incapacidade de construir sólidos de geometrias complexas e o tempo elevado de produção são as principais desvantagens da manufatura subtrativa (BOIVIE et al., 2011; DU et al., 2016).

Figura 2 – Manufatura Subtrativa.

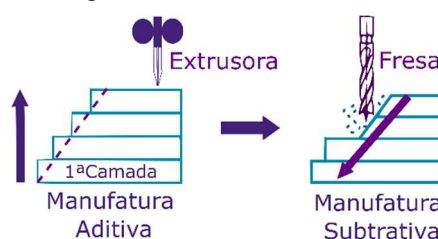


Fonte: Confeccionado pelo autor.

2.3 Manufatura Híbrida

A manufatura híbrida consiste na combinação de duas ou mais tecnologias para criar uma forma de confeccionar peças, sendo possível, segundo Chu et al. (2014), combinar até 14 diferentes técnicas de confecção. A Figura 3 apresenta as etapas da manufatura híbrida que é desenvolvida neste artigo, composta de manufatura aditiva e manufatura subtrativa. De acordo com Lorenz et al. (2015), a primeira etapa da manufatura híbrida consiste em adicionar material em camadas para construir um sólido de baixa resolução no menor intervalo de tempo. A segunda etapa consiste em utilizar a tecnologia de manufatura subtrativa para cortar as rebarbas e melhorar o acabamento. De acordo com Zhu et al. (2013), as áreas acadêmica e industrial têm muito interesse na manufatura híbrida, uma vez que diminui a quantidade de material removido, reduz o uso da ferramenta de extração, diminui o tempo de prototipagem e aumenta as áreas de aplicação. Todos esses fatores resultam em uma melhoria da eficiência na produção de novos protótipos.

Figura 3 – Manufatura híbrida.



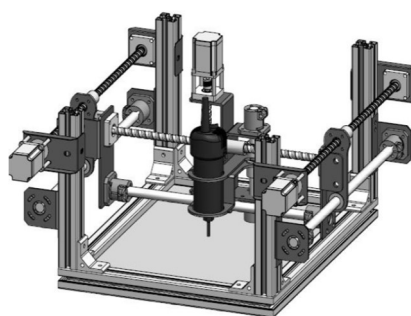
Fonte: Confeccionado pelo autor.

3 PROPOSTA DE MÁQUINA HÍBRIDA DE BAIXO CUSTO E SOFTWARE UNIFICADO

A Figura 4 apresenta a estrutura mecânica usada para a máquina híbrida desenvolvida, que consiste em uma máquina intercambiável entre impressora 3D e fresadora CNC. Propôs-se o uso da estrutura mecânica móvel e programável proposta e construída por Delmondes e Rodrigues (2016) e aplicada inicialmente na confecção de placas de circuito impresso, e na metodologia de Santos et al. (2018), a qual incluiu na estrutura novos elementos que permitiram a implantação de troca de ferramentas.

Figura 4 – Máquina intercambiável e estrutura mecânica.





Fonte: DELMONDES e RODRIGUES, 2016.

Para a eletrônica embarcada da máquina híbrida, foi instalado o sistema embarcado Arduino Mega conectado ao módulo complementar de acionamento Ramps versão 1.4. O sistema Arduino é programado pelo usuário através do *firmware* de código-fonte aberto Marlin (2017), o qual possui rotinas e estruturas lógicas adequadas ao projeto de manufatura aditiva e subtrativa. Em geral, máquinas industriais utilizam apenas um *software* de controle com funções nativas para executar processos de manufatura híbrida. Porém, tais programas são protegidos de maneira a bloquear seu uso em máquinas que não sejam produzidas pelos mesmos fabricantes. Até o presente momento, os autores só identificaram *softwares* protegidos com funções nativas de manufatura híbrida.

Porém, existem algumas alternativas para possibilitar a manufatura híbrida. A primeira alternativa é apresentada por Rodriguez et al. (2016), na qual dois *softwares* de controle distintos são utilizados para executar a manufatura aditiva e subtrativa em ambientes de controle e supervisão separados. Uma alternativa é apresentada por Lee et al. (2014), em que se utiliza três *softwares*, sendo um comercial e dois elaborados pelos autores, utilizados em conjunto para gerar o caminho da ferramenta e converter o caminho em instruções que podem ser reconhecidas pelos controladores. Como alternativa, neste trabalho é apresentada uma metodologia que utiliza apenas o *software* não protegido de impressão *Simplify3D* (2017), com algumas modificações não usuais, desenvolvidas pelos autores e disponibilizadas em Aguiar (2020), para permitir a manufatura híbrida.

4 CONFIGURAÇÃO E TESTE PARA IMPLANTAÇÃO DA MÁQUINA HÍBRIDA

4.1 Configuração e testes para Manufatura Subtrativa

Para a realização da manufatura subtrativa, foi instalado na estrutura mecânica, uma tupa elétrica de 530 watts com velocidade regulada entre 0 e 30.000 rotações por minuto. A tupa passa a ser controlada pelo novo sistema embarcado instalado na máquina. De acordo com Delmondes e Rodrigues (2016), a tupa é responsável por rotacionar uma fresa instalada em seu eixo, tornando possível a fresa no sentido vertical de sólidos de diversos materiais, tais como alumínio, madeira e plástico. A Figura 5 apresenta a montagem da tupa na estrutura mecânica.

Figura 5 – Tupa fixada na máquina.

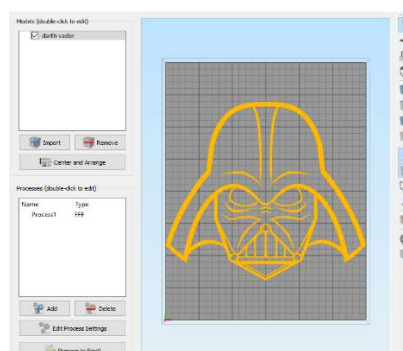


Fonte: DELMONDES e RODRIGUES, 2016.

A regulagem de altura é feita rapidamente pelo usuário de forma manual e sem a utilização de ferramentas. Após a instalação da tupa, que pesa cerca de 1500 gramas, efetuou-se testes para corrigir os parâmetros de movimentação decorrente do peso acrescentado à estrutura mecânica. Para validar a utilização da máquina em processos de manufatura subtrativa os autores elaboraram um modelo tridimensional no *software* de modelagem Blender. A Figura 6 apresenta o modelo elaborado no *software* Simplify3D. O modelo possui espessura uniforme de 3 mm e foi manufaturado em três materiais: MDF (do inglês *Medium-Density Fiberboard*, ou madeira de fibra de média densidade), acrílico e placa de fenolite.

Como as peças fresadas tinham no máximo 3 mm de altura, foi imprescindível o uso da função de auto-nivelamento. Essa função compensa os desníveis da superfície, mapeando diversos pontos da área de trabalho (KNOP et al., 2018). Ao término do processo de auto-nivelamento, os dados de superfície são gravados automaticamente na memória não volátil (*EEPROM*) do microcontrolador Atmega 2560 do Arduino Mega. Após o autonivelamento, funções especiais foram habilitadas e configuradas pelos autores para permitir que o *Simplify3D* executasse a manufatura subtrativa, tendo em vista que ele não possuiu funções e suporte nativo para este tipo de aplicação. Tais funções especiais e parâmetros podem ser encontrados no material suplementar Aguiar (2020), na pasta *Router CNC Configuration*.

Figura 6 – Modelo tridimensional no *Simplify3D* para manufatura subtrativa.



Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Figura 7 mostra o resultado da validação da manufatura subtrativa nos três materiais. Primeiramente, utilizou-se o MDF por apresentar características mecânicas favoráveis de fresagem. Utilizou-se uma fresa reta com diâmetro de 6mm acoplada à tupa, com metade da velocidade nominal, ou seja, 15.000 rpm. O modelo foi separado em três camadas de 1mm, para que a ferramenta penetrasse o MDF gradualmente. Para o acrílico utilizou-se os mesmos parâmetros aplicados ao



MDF. Para a placa de fenolite, fez-se penetração unitária de 1 mm, utilizando fresa reta com diâmetro de 3.2 mm e velocidade nominal da tupa, ou seja, 30.000 rpm.

4.2 Configuração e Testes para Manufatura Aditiva em ABS

Para a implantação da manufatura aditiva na máquina híbrida, foi necessário incluir uma mesa aquecida, extrusora, sensores de temperatura e relé de estado sólido na estrutura mecânica. Foi feita também a troca dos conectores do módulo Ramps por um modelo que possui proteção contra inversão de polaridade e maior resistência mecânica. Em virtude da extrusora não possuir o mesmo formato da tupa, um novo suporte mecânico foi construído para a extrusora ser posicionada no mesmo lugar.

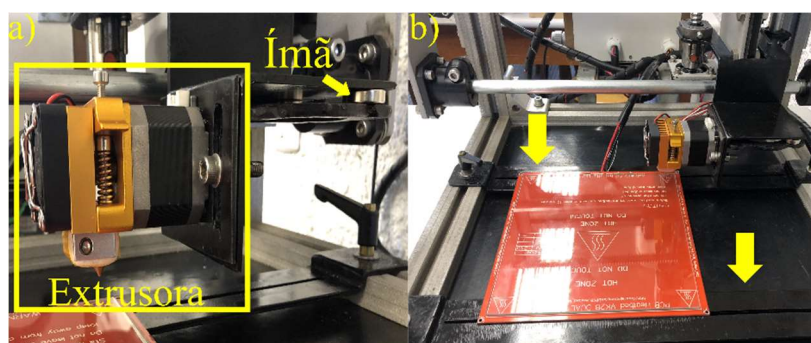
Figura 7 – Manufatura subtrativa em MDF, acrílico e placa de fenolite (da esquerda para direita).



Fonte: Confeccionado pelo autor.

A Figura 8 (a) apresenta o novo suporte para a inclusão da extrusora na máquina híbrida. Esse suporte possui dois componentes móveis para o ajuste da posição do bico da extrusora em relação à superfície de impressão. Utilizou-se quatro ímãs de neodímio com 10 mm de diâmetro por 4 mm de espessura para facilitar a fixação do suporte da extrusora à estrutura mecânica no eixo vertical. A Figura 8 (b) apresenta a mesa aquecida e as guias metálicas. Duas guias metálicas ajustáveis foram inseridas para fixar a mesa aquecida. A principal função das guias é descartar a necessidade de furar qualquer ponto da estrutura, caso o usuário precise modificar a posição da mesa

Figura 8 – (a) Suporte de fixação da extrusora com ímãs. (b) Suporte da mesa aquecida

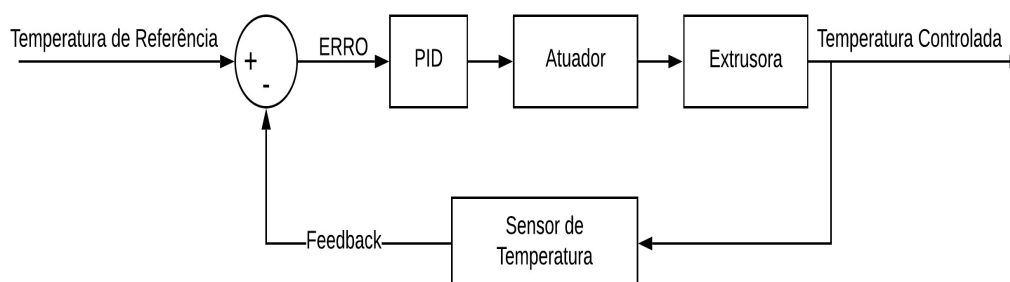


Fonte: Confeccionado pelo autor.

O material selecionado para o processo de impressão 3D foi o ABS. Esse material precisa ser aquecido pela extrusora, em temperaturas entre 230°C e 240°C. Para controlar a temperatura da extrusora com estabilidade e precisão foi utilizado um controlador proporcional integral derivativo (PID), conforme o controle de malha fechada apresentado na Figura 9.



Figura 9 – Controle de malha fechada



Fonte: Confeccionado pelo autor.

O controlador PID regula a temperatura da extrusora pela variação da tensão média sobre os terminais da resistência de aquecimento, a qual é feita através de Modulação por Largura de Pulso (ou PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*). Para a implantação do controlador PID, utiliza-se a rotina PID Autotune do firmware Marlin, que utiliza o método de ajuste Ziegler-Nichols (ZIEGLER e NICHOLS, 1942). Esse é um método heurístico que define os ganhos proporcional, integral e derivativo automaticamente. Para a manufatura aditiva com ABS, é necessário o uso de uma mesa aquecida com temperatura de aproximadamente 100°C para auxiliar a aderência do filamento sobre a superfície. Nesse caso não foi realizado o controle PID, pois a temperatura máxima alcançada pela mesa ficou próxima de 100°C.

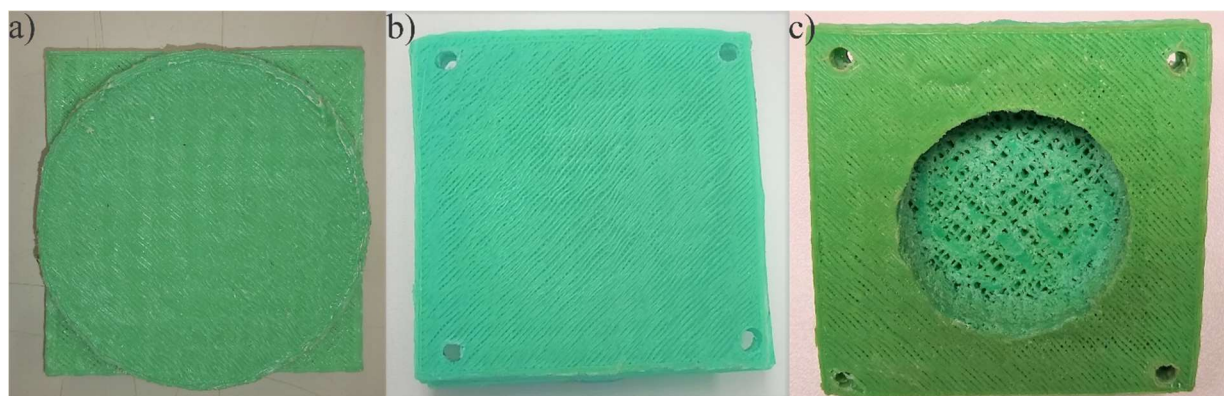
4.3 Testes para Manufatura Híbrida

Para o sólido a ser usado para testes do funcionamento da máquina híbrida, foi selecionado um mancal. Esse modelo foi concebido para ser confeccionado a partir da manufatura híbrida, que neste trabalho une a técnica de fresagem CNC (manufatura subtrativa) e impressão 3D de polímeros (manufatura aditiva). Primeiramente a peça selecionada foi impressa através da manufatura aditiva. A Figura 10 mostra o resultado da manufatura ativa. Esse processo demorou onze horas e doze minutos e gastou 48 gramas de filamento, em um total de 15,6 metros.

Logo após a impressão, a extrusora foi substituída pela tupa, para o fresamento e o acabamento da peça, até o desenho projetado. Uma ferramenta de corte com diâmetro de 3,2 mm foi fixada na tupa para fresar quatro furos nas extremidades. O processo levou cerca de dois minutos para ser concluído. O resultado é apresentado na Figura 12. Note que esses furos foram feitos com a fresa porque a técnica subtrativa apresenta melhor precisão e acabamento do que a impressão 3D.

Por fim, a parte interna da peça foi fresada com a tupa em velocidade nominal, para evitar o travamento do eixo de rotação. A Figura 13 apresenta o produto final após a etapa de manufatura subtrativa. A máquina híbrida demorou apenas seis minutos para executar esse processo de fresagem. O acabamento do desbaste central é característico de processos de manufatura subtrativa por apresentar superfície uniforme. Os resultados foram satisfatórios e mostram que o uso do Arduino Mega, do módulo Ramps 1.4 e do único *software Simplify3D* são efetivos para a confecção de peças por manufatura híbrida.

Figura 10 – (a) Mancal impresso em ABS. (b) Mancal com furos nas extremidades. (c) Acabamento final do mancal.



Fonte: Confeccionado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

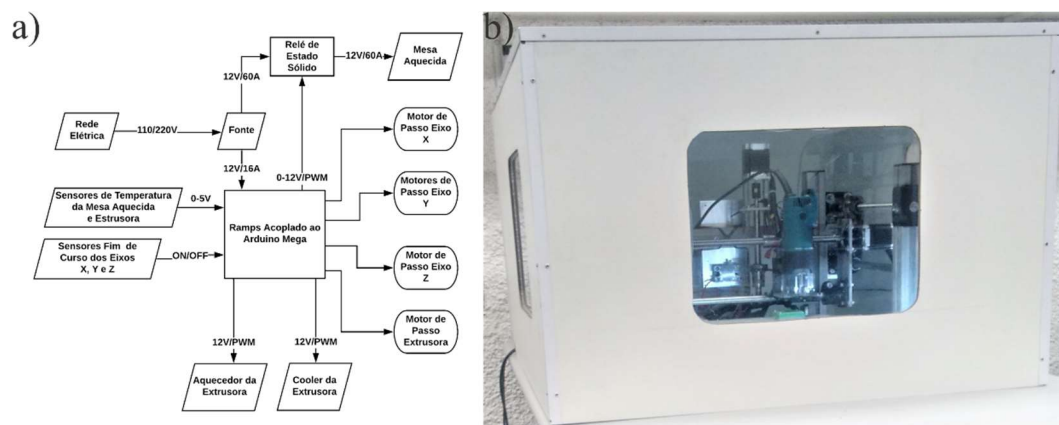
5.1 Montagem Final da Máquina Híbrida

A Figura 11 (a) apresenta um diagrama de blocos com a estrutura necessária para a realização da manufatura subtrativa e da manufatura aditiva na máquina híbrida proposta. O resultado da máquina, com todos os periféricos devidamente instalados e configurados, pode ser visto na Figura 11 (b). Um acervo com a documentação completa da máquina está indexado publicamente em Aguiar (2020), hospedado na plataforma de repositórios GitHub.

5.2 Discussões acerca do desenvolvimento da Máquina Híbrida

A instalação da tupa na estrutura mecânica resultou em um aumento do esforço realizado pelos motores para movimentação da mesa. Contudo, a corrente fornecida pelos acionadores foi elevada para aumentar a faixa de torque, juntamente com a diminuição da velocidade dos eixos. Isso permitiu que a máquina conseguisse, além de movimentar o peso excedente, realizar maior esforço ao fresar materiais mais duros, p. ex., o acrílico. Porém, o acionamento e o controle de velocidade da tupa ainda são feitos de forma manual. Portanto, assim que o processo de manufatura termine, o usuário precisa desligar a tupa manualmente.

Figura 11 – (a) Diagrama de Blocos da Máquina Híbrida. (b) Máquina Híbrida após as modificações.



Fonte: Confeccionado pelo autor.

Note que para tornar o processo de manufatura subtrativa mais eficiente é necessário sempre selecionar a ferramenta mais adequada para cada processo. As fresas utilizadas foram todas selecionadas de acordo com o material de trabalho, evitando quaisquer esforços excedentes pela máquina. O *software Simplify3D* permitiu o uso e deslocamento da tupa mesmo sem suporte nativo



para este tipo de ferramenta. Uma desvantagem, porém, é que o caminho pelo qual a fresa percorre pode não ser o mais otimizado. A instalação do suporte com ímãs permitiu que a troca entre a tupa e a extrusora fosse feita de maneira rápida e sem dificuldades. O mesmo suporte também permitiu uma redução de custo de fabricação e maior facilidade de implantação, quando comparado com máquinas industriais que possuem sistemas automatizados de troca.

Durante os primeiros testes para a extrusão, observou-se que as bordas das peças começaram a curvar-se para cima, o que resultou no descolamento das camadas inferiores. Esse problema impossibilitava o término do processo de impressão 3D, pois o bico da extrusora deslocava a peça e a inutilizava devido ao aumento de altura da peça. Em um dos testes o vidro que cobre a mesa aquecida acabou quebrando, e danificou os acoplamentos dos motores. Para contornar este problema, um gabinete foi construído, conforme pode ser visto na Figura 11 (b). O objetivo do gabinete é manter a temperatura interna constante, pois o ABS é um termoplástico que sofre contração quando exposto à variação de temperatura.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do conjunto de eletrônica embarcada de baixo custo e de código-fonte aberto composto pelo Arduino Mega, módulo Ramps 1.4 e firmware Marlin combinado com o software não protegido de controle e supervisão Simplify3D permitiu que processos de manufatura híbrida fossem realizados a partir de um único software (SANTOS et al., 2018). A combinação da técnica de fresagem CNC e impressão 3D foi possível apenas em função da estrutura mecânica robusta e de fácil instalação tanto para a tupa quanto para a extrusora. A estrutura mecânica robusta permitiu integrar todos os periféricos necessários de cada tecnologia à máquina, enquanto a facilidade de manuseio foi viabilizada pela utilização de ímãs e conectores de engate rápido.

Além disso, do ponto de vista didático a máquina híbrida apresentada pode ser uma ótima ferramenta para tornar o aprendizado de conceitos de manufatura aditiva, subtrativa e híbrida mais efetiva em cursos de engenharia. Outra vantagem é que a construção dessa máquina pode ser feita de forma colaborativa em diferentes cursos de graduação, como resultado a construção do conhecimento se torna ainda mais próxima do cotidiano e dos desafios que engenheiros encontram na prática profissional.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, J. P. **Hybrid Machine**. Disponível em: <https://github.com/JoaoPedroAguiar/Hybrid_Machine>. Acesso em: 7 abr. 2022. Publicado em: Agosto de 2020.

AMBROSI, Adriano; PUMERA, Martin. 3D-printing technologies for electrochemical applications. **Chemical Society Reviews**, v. 45, n. 10, p. 2740-2755, 2016.

ANZALONE, Gerald C.; WIJNEN, Bas; PEARCE, Joshua M. Multi-material additive and subtractive prosumer digital fabrication with a free and open-source convertible delta RepRap 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, 2015.

BOIVIE, Klas; DOLINSEK, Slavko; HOMAR, David. Hybrid manufacturing: integration of additive technologies for competitive production of complex tools and products. In: **Proceedings of the International Research/Expert Conference: "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT**. 2011.





BRECHER, Christian et al. Integrative production technology for high-wage countries. In: **Integrative production technology for high-wage countries**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 17-76.

CHU, Won-Shik et al. Hybrid manufacturing in micro/nano scale: a review. **International journal of precision engineering and manufacturing-green technology**, v. 1, n. 1, p. 75-92, 2014.

DELMONDES, R.; RODRIGUES, L. **Cnc intercambiável aplicada a confecção de placas de circuito impresso**. Dissertação de Graduação— Pontifícia Universidade Católica de Goiás. 2016.

DU, Wei; BAI, Qian; ZHANG, Bi. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 1018-1030, 2016.

ESPALIN, David et al. 3D Printing multifunctionality: structures with electronics. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 5, p. 963-978, 2014.

FOGGIATTO, José Aguiomar. O uso da prototipagem rápida na área médico-odontológica. **Revista Tecnologia e Humanismo**, v. 30, n. 20, p. 60-8, 2006.

FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and performance**, v. 23, n. 6, p. 1917-1928, 2014.

GUEDES, Leonardo Guerra; SANTOS, João Pedro Aguiar. Diagnóstico e avaliação da aplicação de metodologias ativas nos cursos de engenharia da pontifícia universidade Católica de Goiás e da Universidade Federal de Goiás. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 16897-16910, 2019.

GORNI, Antonio Augusto. Introdução à prototipagem rápida e seus processos. **Revista Plástico Industrial**, v. 230, p. 239, 2001.

KALE, Anuja et al. Optimization of hybrid manufacturing process parameters by using FDM in CNC machine. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 012088.

KARUNAKARAN, K. P. et al. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 26, n. 5, p. 490-499, 2010.

KNOP, David Nery Henriques et al. Aspectos técnicos e contribuições na graduação: o surgimento de uma impressora 3D. **Ciência, Inovação e Tecnologia**, p. 22, 2018.

LEE, Wei-chen; WEI, Ching-chih; CHUNG, Shan-Chen. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 11, p. 2366-2374, 2014.

LORENZ, K. A. et al. A review of hybrid manufacturing. In: **2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium**. University of Texas at Austin, 2015.





MARLIN. **Marlin Versão 1.1.8.** GitHub. (2017). Disponível em: <<https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>>. Acesso em: 5 out. 2020.

MARTINEZ, Andressa Carmo Pena et al. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 14, n. 1, p. 125-141, 2019.

MAZAK. **INTEGREX i-400 AM.** Disponível em: <<https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/>>. Acesso em: 7 abr. 2022.

MÜLLER, Marcel; WINGS, Elmar. An architecture for hybrid manufacturing combining 3D printing and CNC machining. **International Journal of Manufacturing Engineering**, v. 2016, 2016.

NAGEL, Jacquelyn KS; LIOU, Frank W. Hybrid Manufacturing System Design and Development. **Manufacturing System**, p. 223-224, 2012.

PEREIRA, Daniel António Barros. **Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e acabamento superficial para diferentes ferramentas de fresagem.** 2017. Tese de Doutorado.

RODRIGUEZ, Jorge; IKONOMOV, Pavel; CHOUDHURY, Alamgir A. Development of a 3-D Printer and CNC Milling Desktop Machine for Manufacturing Labs. In: **2016 ASEE Annual Conference & Exposition.** 2016.

SANTOS, João Pedro Aguiar et al. Investigação e Aperfeiçoamento de um Sistema de Impressão 3D e Fresagem Intercambiável. **Brazilian Technology Symposium**, p. 102-106), 2018.

SANTOS, João Pedro Aguiar; OTA, João Inácio. Proposta multimetodológica de ensino para a disciplina de design de placas de circuito impresso. **Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2020, Evento Online. Disponível em: http://www.abenge.org.br/sis_artigos.php. Acesso em 07 abri. 2022.

SIMPLIFY3D. **Simplify3D Versão 4.0.** [Windows]. Disponível em: <<https://https://www.simplify3d.com/>>. Acesso em: 7 abri. 2022.

SOUZA, André João de et al. Aplicação de multisensores no prognóstico da vida de ferramenta de corte no torneamento. 2004.

VOLPATO, Neri; FERREIRA, Cristiano Vasconcellos; SANTOS, JRL dos. Integração da prototipagem rápida com o processo de desenvolvimento do produto. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações.** São Paulo, Edgard Blücher, p. 17-44, 2007.

YAMAZAKI, Taku. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. **Procedia Cirp**, v. 42, p. 81-86, 2016.

ZHU, Z.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. A novel process planning approach for hybrid manufacturing consisting of additive, subtractive and inspection processes. In: **2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.** IEEE, 2012. p. 1617-1621.





ZHU, Zicheng et al. A review of hybrid manufacturing processes—state of the art and future perspectives. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 26, n. 7, p. 596-615, 2013.

ZIEGLER, John G. et al. Optimum settings for automatic controllers. **trans. ASME**, v. 64, n. 11, 1942.

Low-cost, open-source adaptive solutions for the hybrid manufacturing machine development

Abstract: *Hybrid Manufacturing technology allows more efficient use of the materials and high-resolution rapid prototyping parts, blending the benefits of both additive and subtractive manufacturing. However, commercially available solutions have a high cost of acquisition while small-scale industry and academic institutions have 3D printing and machining tools not natively ready to perform hybrid manufacturing, which demands custom-made solutions that may bring significant cost reduction. The paper presents the development of a hybrid manufacturing machine based on existing CNC machining tool and extruder, both adapted to a circuit board printer and controlled by a unique management and slicing software for both additive and subtractive manufacturing. It is a machine that can also enable the development of teaching and learning activities in order to prepare future engineers to work with hybrid manufacturing to optimize the construction of new products to make human development more sustainable.*

Keywords: *3D Printing. Additive Manufacturing. Computer Numerical Control (CNC). Hybrid Manufacturing. Subtractive Manufacturing. Rapid Prototyping.*

