

# Desenvolvimento de uma Ferramenta de Corte a Laser de Baixo Custo para um Robô Industrial

Carla Pereira Castro \* Renato de Sousa Dâmaso \*

\* Grupo PET Eng. Mecatrônica, CEFET-MG / Unidade de Divinópolis, Minas Gerais, Brasil (e-mail: carla.esc1@hotmail.com, renatosd@cefetmg.br).

**Abstract:** This article deals with the development of the MDF wood Laser cutting tool for the industrial robot Comau Smart5 Six. To obtain cuts, tests were performed to analyze variables such as the number of passes of the Laser beam, cutting speed, and cutting effectiveness. In this way, the construction stages of the project's hardware and software are presented, explaining the necessary procedures for using the tool, culminating in a qualitative analysis of the cut obtained used as an example. This tool seeks to contribute to the rapid prototyping process of projects developed at the CEFET-MG Divinópolis Unit, in addition to allowing other works to be carried out that explore Laser technology added to the industrial robot.

**Resumo:** Este artigo trata do desenvolvimento de uma ferramenta de corte a Laser em madeira MDF para o robô industrial Comau Smart5 Six. Para obtenção de cortes foram realizados testes de forma a analisar variáveis como número de passadas de feixe Laser, velocidade de corte e efetividade de corte. Dessa forma, são apresentadas as etapas de construção do *hardware* e *software* do projeto, explicitando os procedimentos necessários para utilização da ferramenta, culminando em uma análise qualitativa do corte obtido, utilizado como exemplo. Com essa ferramenta busca-se contribuir no processo de prototipação rápida de projetos desenvolvidos no CEFET-MG Unidade Divinópolis, além de permitir que sejam realizados outros trabalhos que explorem a tecnologia Laser agregada ao robô industrial.

*Keywords:* Laser Cut; Laser Diode; Industrial Robot; MDF Cutting.

*Palavras-chaves:* Corte a Laser; Diodo Laser; Robô Industrial; Corte de MDF.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde 1960, a tecnologia *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Laser, em português, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação) tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento, por exemplo, medicina, entretenimento, tecnologia da informação e principalmente nas indústrias de fabricação de chapas metálicas (Caristan (2004), Bagnato (2008)). Essa variedade de aplicação do Laser dá-se devido às propriedades específicas do mesmo, que resulta em características como precisão geométrica e mínima zona termicamente afetada (ZTA), possibilitando que a sua utilização seja essencial em determinadas atividades (Bagnato (2008)).

Tais propriedades originam-se do princípio de funcionamento do Laser, que consiste na focalização de um feixe eletromagnético de alta intensidade em uma superfície reduzida. Isso leva ao rápido aquecimento pontual e na queima ou na vaporização do material da amostra (Cidade et al. (2016)). O Laser de diodo, utilizado no presente trabalho, incorpora um meio de ganho em sua cavidade óptica ressonante. O meio de ganho óptico consiste em um material que normalmente absorve a radiação incidente

em algum intervalo de comprimento de onda de interesse. A cavidade óptica ressonante suporta várias ondas estacionárias ou modos de cavidade, em que elas ocorrem onde o comprimento da cavidade é um múltiplo de meio comprimento de onda. Se o ganho resultante for suficiente para superar as perdas de algum modo óptico ressonante da cavidade, diz-se que este modo atingiu o limiar e será emitida luz relativamente coerente. A cavidade ressonante fornece uma resposta positiva necessária para a radiação que está sendo amplificada, de modo que uma oscilação de Laser possa ser estabelecida e sustentada acima dos níveis de bombeamento limite (Coldren et al. (2012)). Assim, ao atingir a amostra, a radiação aquece a superfície e efeitos físicos e químicos levam à remoção de material, apresentando efeitos de gravação ou, até mesmo, corte total da mesma.

Com relação ao corte à Laser de MDF (*Medium-Density Fiberboard*), o produto mais utilizado comercialmente para este fim é a máquina de corte que emprega o Laser de CO<sub>2</sub>. Essas máquinas podem cortar chapas de MDF superiores a 6 mm de espessura, dependendo da potência do Laser, ao contrário dos diodos Laser que limitam-se ao corte de chapas de MDF com 3 mm de espessura (Albuquerque (2018)). Isso ocorre porque a madeira absorve de forma acentuada o comprimento de onda do Laser de CO<sub>2</sub>

\* Agradecimento à Diretoria de Graduação do CEFET-MG pelo apoio financeiro ao grupo PET Eng. Mecatrônica.

de  $10,6 \mu\text{m}$  (Wairimu (2011)). Apesar da limitação de espessura apresentada pelos diodos Laser, as máquinas com Laser de CO<sub>2</sub> apresentam custos e dimensões elevados (Dias (2015)), inviabilizando a realização de determinados projetos. Esse problema leva a utilização de emissores Laser com custos mais reduzidos e que possam levar a resultados semelhantes, como o diodo Laser.

Segundo Ramos (2011), instituições como universidades e as empresas de design têm cortadores a Laser que assumem o papel de máquinas de prototipagem. Essa forma de utilização se justifica pela redução de tempo entre o design de determinado objeto e a sua fabricação, devido à facilidade de transferência de dados para as cortadoras a Laser, podendo ser realizada a produção de vários protótipos com diferentes *upgrades*. Dessa forma, Ramos (2011) assinala que o alto custo de uma máquina comercial de corte faz com que, em geral, esta não seja uma opção para quem a utiliza para prototipagem, o que leva essas instituições à fabricação de suas próprias máquinas de corte.

Diante do exposto, tem-se que a produção de máquinas de corte a Laser atrelada à utilização do diodo Laser na mesma, mostra-se uma alternativa economicamente vantajosa no que diz respeito à exploração dos benefícios do corte a Laser. Dessa forma, neste artigo consta o desenvolvimento de uma ferramenta de corte a Laser de MDF a partir de recursos disponíveis no CEFET-MG/Unidade Divinópolis, visando contribuir no processo de prototipação diversamente utilizado no curso de Engenharia Mecatrônica.

Para realização desse projeto foi utilizado o Robô Comau Smart5 Six, presente na instituição, que é responsável por realizar a trajetória de corte, controlar a potência e o acionamento do diodo Laser. Visto que o robô possui 6 graus de liberdade (GDL), a ferramenta Laser pode ser orientada de forma generalizada e movimentada no espaço, possibilitando a realização de outros processos de natureza subtrativa, como gravação e usinagem (Soares (2017)). Além desses processos, há também o corte de MDF proposto no presente trabalho. Portanto, a utilização do robô confere versatilidade à ferramenta desenvolvida, já que há a possibilidade de produzir peças 3D, a partir de processos de produção de duas dimensões e meia (2.5D) e três dimensões (3D) (Celani and Pupo (2008), Pupo et al. (2008)).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Especificações do diodo Laser

A escolha do diodo Laser baseou-se na oferta mercadológica, tendo em vista que no período de compra, o diodo Laser com maior potência disponível no mercado era o de 15 W de luz pulsada, mostrado na Figura 1. Desse modo, esse possui um comprimento de onda entre 445 nm e 450 nm, na cor azul, com distância focal ajustável entre 15 mm e 50 mm. Visto que a distância focal pode ser manualmente ajustada, foi necessária a realização de procedimentos de calibração, já que para um corte eficiente é necessário ter a menor área de incidência possível.

Com relação à fonte de alimentação do Laser, sua tensão de funcionamento é de 12 Vcc, com corrente nominal menor que 4 A e frequência menor que 12 kHz. Além disso, o Laser conta com um circuito eletrônico, mostrado na Figura 1, que possui uma entrada TTL (em português, Lógica Transistor-Transistor), em que a tensão pode ser modulada entre 0 V e 5 V. Com tal modulação por largura de pulso (PWM) é possível modificar a potência de saída do Laser, de modo a possibilitar que haja também a gravação de superfícies de MDF. Ademais, o Laser e a fonte de alimentação são equipados com dissipadores de calor e pequenos ventiladores acoplados a eles, podendo o Laser trabalhar em temperaturas de 15 a 45 graus, como especificado pelo fornecedor (Eletro (2020)).

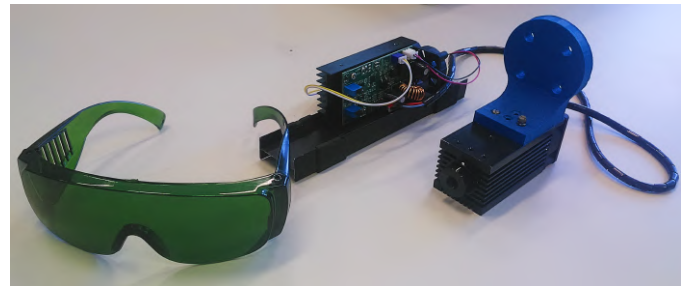


Figura 1. Óculos de segurança, diodo Laser e sua fonte de alimentação

### 2.2 Equipamento de proteção

Em virtude dos riscos que o Laser traz à saúde visual é necessária a utilização de equipamento de proteção individual (EPI) que resguarde o operador do equipamento durante procedimentos relacionados ao corte do MDF. Dessa forma, foi adquirido um óculos de proteção, mostrado na Figura 1, que possui uma densidade óptica (DO) de 4+, que corresponde a 0,01% de transmissão da luz. Segundo o vendedor (Eletro (2020)), o óculos é capaz de proteger comprimentos de onda de 200 nm a 2000 nm, o que assegura o uso do mesmo para o diodo Laser utilizado.

Além disso, o Laboratório de Robótica conta com divisórias que separam o ambiente de circulação de pessoas e o robô industrial utilizado no presente trabalho. Dessa forma, o ambiente de corte não oferece risco aos demais usuários do laboratório e ao próprio usuário da ferramenta. Ainda assim, foi colocada uma placa de sinalização voltada para o ambiente externo à área do robô, de forma a advertir sobre a existência ou utilização do feixe de Laser naquele ambiente. Na Figura 2 observa-se a placa utilizada como alerta afixada no laboratório.

Tais medidas de segurança, foram tomadas tendo em vista a Norma Regulamentadora N°26, responsável por estabelecer orientações para sinalização de segurança no ambiente de trabalho por meio de placas e cores que indicam riscos à saúde do profissional (Brasil (2015)).

### 2.3 Projeto Mecânico

O projeto mecânico do trabalho baseou-se na ferramenta de gravação desenvolvida por Camargos (2016), já que a



Figura 2. Placa de sinalização fixada no laboratório

forma física da mesma influencia na modelagem cinemática do robô e da ferramenta. Dessa forma, foi feita uma peça de acoplamento no SolidWorks, produzindo-a no material ABS a partir da impressão 3D. Na Figura 1 é possível visualizar a peça de acoplamento, na cor azul, fixada ao diodo Laser.

#### 2.4 Robô Comau Smart5 Six

Para realizar a movimentação do Laser foi utilizado o robô Comau Smart5 Six, presente no Laboratório de Robótica do CEFET-MG / Unidade Divinópolis (Figuras 2 e 3). Esse robô industrial consiste em um manipulador com 6 graus de liberdade (GDL) de propósito geral. Ou seja, dependendo da ferramenta presente na sua extremidade (*end effector*) diferentes tarefas podem ser executadas, tais como solda, corte, montagem, furação, pintura. Ressalta-se que o robô possui alta repetibilidade (0,05 mm) e conta com *encoders* absolutos em seus motores, garantindo também precisão nas execuções de atividades às quais o mesmo é aplicado (Robotics (2007)).



Figura 3. Robô Industrial utilizado e sua unidade controladora

Essa versatilidade das aplicações do robô também depende da tarefa programada para execução na unidade controladora. Como padrão dos robôs COMAU, a linguagem de programação utilizada no mesmo é a PDL2 (*Programming Development Language 2*), derivada da linguagem Pascal. Com esta é possível que o robô realize movimentos complexos, envie e receba informações sobre arquivos e dispositivos, monitore até 255 eventos e estados por programa, incluindo portas de entrada/saída, dentre outras funcionalidades (Robotics (2014)). Para realizar a programação *offline* em PDL2, a fabricante disponibiliza

o *software* WinC5G, onde é possível realizar a escrita, tradução e depuração de códigos em PDL2. Isso possibilita que o usuário seja alertado dos possíveis erros presente no código antes do mesmo ser implementado na controladora.

Além disso, o robô conta com entradas/saídas digitais (I/O) na unidade controladora, de modo que estas podem ser configuradas e utilizadas pelo programa PDL2 (Robotics (2010)). Essas I/O foram utilizadas para realizar o acionamento do Laser, de modo que ele seja ligado e desligado conforme a necessidade de corte ao longo da trajetória dada pelo desenho.

### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Conversão de Código-G para PDL2

Visto que o robô Comau SmartSix utiliza a PDL2 como linguagem de programação, faz-se necessário que a trajetória de corte esteja implementada nesta linguagem. Para isso, a peça é vetorizada em arquivos com extensão *.dxf* ou *.plt*, e em seguida é convertido para Código-G, por meio do software All to G-Code Converter. Com isso, tem-se um arquivo na extensão *.tap* que contém as instruções de movimentação para uma máquina CNC, caracterizando assim a linguagem Código-G.

Após isso, realiza-se a conversão de Código-G para PDL2, utilizando um software de conversão desenvolvido para o processo de gravação no trabalho de Camargos (2016), em que este foi modificado para atender as necessidades do processo de corte do presente trabalho. Para a gravação em MDF, a conversão ocorre de modo que o robô percorre a trajetória estabelecida apenas uma vez. Este código-fonte foi modificado de modo que o usuário estabelecesse a quantidade de vezes que o robô percorrerá tal trajetória, já que com o Laser utilizado não é possível realizar o corte com apenas uma passada do Laser pela superfície de corte. Esse número estabelecido pelo usuário depende da calibração prévia realizada com o Laser, já que o mesmo possui ajuste de foco que determinará o diâmetro do raio e consequentemente a qualidade do corte do MDF, tendo em vista aspectos como rugosidade e zona termicamente afetada.

Vale destacar que a trajetória percorrida pela ferramenta do robô ocorre em uma altura fixa estabelecida durante a calibração. Após a especificação de tal altura as coordenadas são inseridas no programa na parte de Offset da mesa de trabalho, vista na Figura 4. Estabelecer tais coordenadas é importante, pois qualquer modificação de distância no eixo Z levaria o ponto focal do Laser, considerado ponto central da ferramenta (TCP, de *Tool Center Point*), a sair do plano médio da chapa de MDF. Essa condição reforça a importância da calibração do Laser, de que a chapa não tenha empenamentos e que seja posicionada horizontalmente nivelada. A interface do programa utilizada neste projeto pode ser vista na Figura 4.

A partir da interface percebe-se alguns campos de configuração que permitem a realização de ajustes nos parâmetros de corte. Essas e outras opções de ajustes são listadas a seguir:

- (1) Campo para definir a quantidade de vezes que o Laser percorrerá a trajetória de corte.

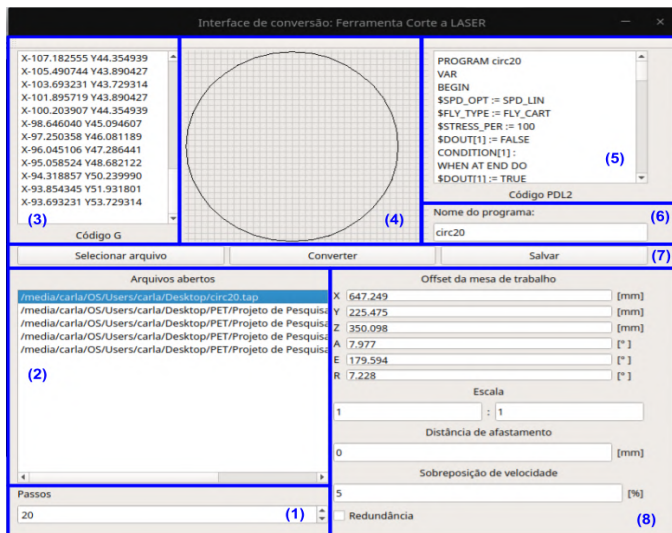


Figura 4. Interface gráfica para conversão de Código-G para PDL2

- (2) Lista para exibição de arquivos abertos.
- (3) Campo para exibição do Código-G.
- (4) Campo para plotagem do desenho selecionado.
- (5) Campo para exibição do código PDL2 após a conversão.
- (6) Botões que permitem a realização de ações como: seleção de um arquivo .tap, conversão dos códigos, salvar o código convertido.
- (7) Campo para definir o nome do arquivo que será salvo.
- (8) Aba de configurações do corte com os seguintes ajustes.
  - (a) Offset da mesa de trabalho ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ).
  - (b) Fator de escala, com campo para ampliação e redução.
  - (c) Distância de afastamento, entre um conjunto fechado de segmentos e outro é realizado um movimento no eixo Z+ com a distância especificada. Esse movimento foi programado baseado no funcionamento de uma fresadora CNC.
  - (d) Sobreposição da velocidade de gravação, em porcentagem.

Uma vez obtido o código em PDL2 da trajetória de corte, o mesmo é traduzido e depurado no software WinC5G, distribuído pela fabricante do braço robótico, para fins de detecção de possíveis incoerências ou erros no código.

### 3.2 Controle de Potência e Acionamento do Laser

O programa desenvolvido para conversão de Código-G para PDL2 prevê o momento que o Laser deverá ligar ou desligar. Para isso, a controladora do robô por meio de suas saídas digitais envia um sinal para o Arduino responsável por acionar o Laser. Além disso, o microcontrolador realiza o controle de potência do Laser, por meio de um sinal PWM, que é enviado ao Laser por meio de uma entrada/saída TTL presente no mesmo. O valor do PWM enviado ao Laser é definido pelo usuário, a partir do Monitor Serial da IDE do Arduino, tendo em vista os resultados realizados durante a calibração.

### 3.3 Calibração do Laser e Integração das partes

Testado o funcionamento das partes anteriormente descritas, foram realizadas as calibrações do Laser, de modo a escolher o menor diâmetro focal, tendo em vista variáveis como potência do Laser e velocidade de movimentação do robô.

O ajuste focal ocorre na cabeça do Laser, por meio da rotação da lente final de forma a modificar o diâmetro do ponto focal. Dessa forma, antes da calibração é necessário determinar a velocidade do robô, posição e orientação inicial do robô, o valor de sinal PWM e estabelecer manualmente a posição da cabeça, consequentemente o seu foco. Assim, foram determinadas trajetórias que modificassem a altura do Laser em relação à superfície de corte de modo que ao longo da trajetória a mudança de altura da ferramenta resultaria em marcas de diferentes espessuras na superfície.

Esse procedimento sistemático ocorreu de modo a variar a velocidade do robô, buscando assim a melhor combinação das variáveis. Obtidas tais variáveis e com as demais configurações da ferramenta, pode ser realizado o corte da peça em MDF.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os procedimentos anteriores e subsequentes ao processo de corte do MDF, são mostrados na Figura 5 na forma de um fluxograma simplificado, de modo a facilitar para o usuário a utilização da ferramenta.

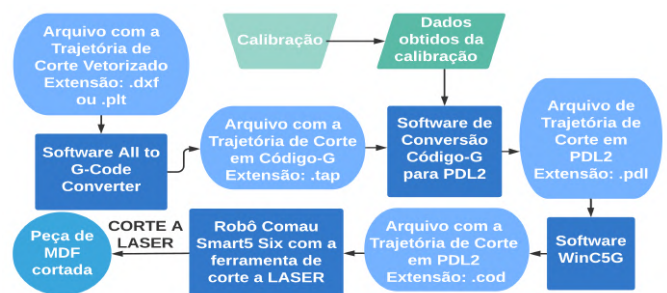


Figura 5. Panorama geral de funcionamento do sistema de corte Laser

A partir da Figura 5 é possível analisar os arquivos com suas respectivas extensões e os dados que são inseridos nos softwares utilizados. Com relação ao hardware, na Figura 6(a) é mostrada a ferramenta de corte a Laser desenvolvida.

### 4.1 Calibração

Utilizando os procedimentos descritos na Seção 3.3, foram realizados sete testes de focalização, como indicado na Figura 7. Nela percebe-se que houveram testes em que os diâmetros de marcação foram um tanto quanto espessos e outros apresentaram pequenos diâmetros. Em geral, no meio da trajetória do robô a espessura do feixe de luz foi pequena e no final da trajetória houve um alargamento do mesmo. Portanto, pequenas e grandes distâncias do

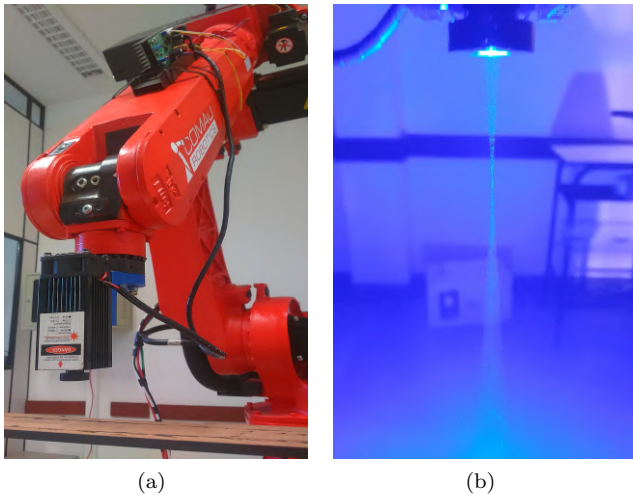


Figura 6. Diodo Laser acoplado ao robô industrial e fonte de alimentação fixada ao braço (Figura 6(a)). Foco no feixe de luz Laser (Figura 6(b)).

Laser para com a superfície de gravação não configuram um menor diâmetro do ponto focal.

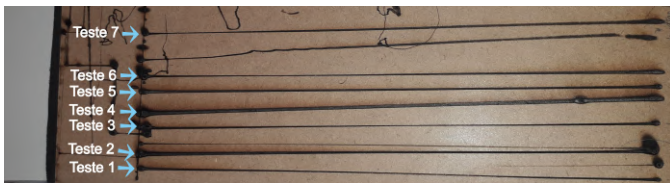


Figura 7. Testes de Focalização

Em cada um dos testes variou-se o número de voltas na cabeça do Laser, onde estão presentes as lentes de focalização. Na Tabela 1 pode ser vista a configuração das variáveis de teste.

Tabela 1. Configuração dos testes realizados

Testes	Voltas na cabeça do Laser	Velocidade do Robô	Status
1	2	5%	Considerado
2	3	25%	Considerado
3	2	5%	Considerado
4	6	5%	Descartado
5	1	5%	Considerado
6	3	5%	Considerado
7	4	5%	Considerado

A partir da Tabela 1 e da Figura 7 pôde-se perceber que a velocidade do robô não tem grande interferência na espessura da marcação, como visto nos testes 2 e 6 que não apresentaram diferença significativa entre si. A partir de uma análise visual desses testes pôde-se perceber que quanto menor a velocidade do robô, maior a profundidade de corte, visto que a incidência do raio Laser em uma determinada área é maior.

Além disso, os testes 1 e 3 mostram que, para as mesmas configurações da ferramenta, é possível obter resultados semelhantes, possibilitando o estabelecimento de um padrão entre as peças cortadas.

Dos testes de calibração realizados, a pior marcação obtida foi a do Teste 4, que em toda trajetória apresentou uma espessura maior que os demais testes, de modo que tal configuração foi opção descartada para uma possível realização de corte. A partir de uma análise visual, concluiu-se que a melhor posição da cabeça do Laser foi a com 4 voltas (Teste 7) da sua posição original (cabeça completamente enroscada à estrutura do Laser). Para essa posição das lentes e com a observação da marca deixada no MDF (Figura 7), definiu-se a altura ideal entre a cabeça do Laser e a superfície de corte (altura no início da trajetória). As coordenadas dessa posição foram inseridas no software de conversão.

#### 4.2 Corte

Para realização desse corte tomado como exemplo, utilizou-se o Laser com potência máxima e a sua cabeça com 4 voltas distantes da posição original. Além disso, o robô percorreu a mesma trajetória 20 vezes, ou seja, um número de passos igual a 20 foi inserido como dado no software de conversão. Esse percurso foi realizado com o braço robótico configurado para trabalhar com 5% de sua velocidade máxima. Realizadas todas as configurações e etapas vistas na Figura 5, obteve-se o corte mostrado na Figura 8.

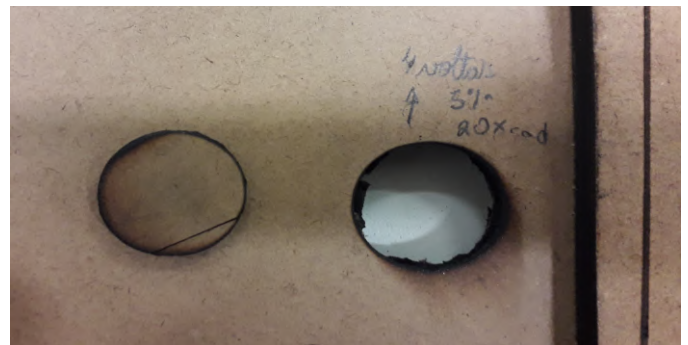


Figura 8. Corte circular em MDF de 3 mm

A peça consiste em um círculo de 20 mm de diâmetro, em um MDF de 3 mm de espessura, em que parte da execução dessa tarefa de corte pode ser vista em Castro (2020). Percebe-se que as bordas da peça na extremidade inferior do MDF cortado entrou em processo de carbonização, de modo que o corte não apresentou um bom resultado nessas camadas. Dessa forma, obteve-se uma queima desigual do MDF a medida que as camadas do material entraram em contato com o Laser.

Uma possível justificativa para tal problema é que o feixe de luz possui um formato cônico infinito, como pode ser visto na Figura 6(b). Ocorre que o ponto de focalização é único, logo qualquer lugar diferente deste possui um diâmetro maior que tal ponto. Desse modo, apenas a superfície superior do MDF é atingida por tal ponto. A medida que uma camada do MDF é cortada, as demais são atingidas por um raio Laser com diâmetro maior que o ponto de focalização. Portanto, uma possível melhoria é fazer com que a medida que o MDF é cortado, o robô se movimente na direção perpendicular à superfície cortada de modo que apenas o ponto focal entre em contato com todas as camadas do MDF.

Como um dos aspectos propostos era que a ferramenta Laser fosse de baixo custo, são dispostos na Tabela 2 os custos do projeto.

Tabela 2. Custos da ferramenta de corte a Laser de MDF para um robô industrial

Componentes	Valor Total (R\$)
Diodo Laser, fonte de alimentação e óculos de proteção	2080,00
Suporte de acoplamento do Laser ao robô (Material ABS)	19,50
Porcas e parafusos	2,00
Arduino	60,00
<b>Total</b>	<b>2161,50</b>

Percebe-se que o maior investimento da ferramenta consistiu na aquisição do Laser. Apesar disso, o custo total da ferramenta foi bastante reduzido quando comparado ao valor das máquinas de corte a Laser comerciais. No mercado é possível encontrar máquinas com os mais diversos valores, que se apresentam no intervalo de R\$ 5000,00 a R\$70000,00. Como exemplo de uma máquina comercial, tem-se a Máquina CNC Router do fabricante Nagano apresenta valor de R\$12149,10 (Nagano (2020)).

## 5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, buscou-se desenvolver uma ferramenta de corte a Laser para um robô industrial, de modo a contribuir no processo de prototipação do CEFET-MG/Unidade de Divinópolis. Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a ferramenta encontra-se operacional, embora seja possível realizar outros procedimentos de calibração e novos cortes, visando uma otimização de sua eficiência e qualidade.

Ademais, pode-se também concluir que a produção da ferramenta cumpre com seu objetivo de ser de baixo custo, já que esta possui um valor inferior às máquinas comerciais de corte a Laser. Portanto, para instituições que possuam um robô industrial, a ferramenta proposta no trabalho mostra-se um recurso economicamente viável como instrumento para corte de chapas de MDF, quando o foco não está numa escala de produção elevada.

Além disso, o arranjo obtido permite uma área de trabalho bastante grande, em função do alcance do robô empregado. Como perspectivas, tem-se que a disponibilidade da ferramenta Laser permite a proposição e o desenvolvimento de trabalhos que envolvam o estudo da interação do Laser com outros tipos de materiais e chapas, como madeira balsa com maior espessura e chapas de acrílico, onde o acabamento superficial do corte pode ter uma melhor qualidade. Outra perspectiva está no emprego dos recursos de posicionamento e orientação generalizadas no espaço de trabalho do robô, o que permite gravações em superfícies e cortes em objetos 3D.

## REFERÊNCIAS

Albuquerque, A.L. (2018). *Quais materiais posso usar na máquina de corte a laser?* Disponível em: <https://fazmakerspace.com.br/quais-materiais-posso-usar-na-maquina-de-corte-a-laser/>. Acesso em: 30 de Maio de 2020.

Bagnato, V.S. (2008). *Laser e suas aplicações em Ciência e Tecnologia*. Editora Livraria da Física.

Brasil (2015). *Norma Regulamentadora Nº26 - Sinalização e Segurança*. Ministério do Trabalho e Emprego, Disponível em: <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR26.pdf>. Acesso em: 30 de Maio de 2020.

Camargos, R.L. (2016). *Projeto e construção de uma ferramenta de gravação a laser em madeira para um robô industrial*. CEFET-MG Campus Divinópolis.

Caristan, C.L. (2004). *Laser cutting guide for manufacturing*. Society of manufacturing engineers.

Castro, C.P. (2020). *Vídeo da Ferramenta de corte a Laser*. PET Eng. Mecatrônica CEFET-MG, Disponível em: <https://youtu.be/q6fa2r7YIHQ>. Acesso em: 10 de Setembro de 2020.

Celani, M.G.C. and Pupo, R.T. (2008). Prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção: definições e estado da arte no brasil. *Cadernos de pós-graduação em arquitetura e urbanismo*, 8(1).

Cidade, M.K., Palombini, F.L., Lima, N.F.F., and Duarte, L.C. (2016). Método para determinação de parâmetros de gravação e corte a laser CO2 com aplicação na joalheria contemporânea. *Design Tecnologia*, 11.

Coldren, L.A., Corzine, S.W., and Mashanovitch, M.L. (2012). *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*. Wiley, 2 edition.

Dias, M.B. (2015). *Proposta de desenvolvimento de uma máquina de corte a Laser para facilitar a prototipagem*. Universidade de Brasília.

Eletro, A. (2020). *Loja Arduo Eletro*. Disponível em: <https://www.arduoeletro.com/>. Acesso em: 15 de Junho de 2020.

Nagano (2020). *Máquina CNC Router Laser corte e gravação 50W*. Agrotama, Disponível em: <https://www.agrotama.com.br/produtos/maquina-cnc-router-laser-corte-e-gravacao-sensor-fluxo-de-agua-eixo-rotativo-60x40cm-60w-220v/nagano-102040523,104,1199/>. Acesso em: 10 de Setembro de 2020.

Pupo, R.T. et al. (2008). Ensino da prototipagem rápida e fabricação digital para arquitetura e construção no Brasil: definições e estado da arte. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*.

Ramos, J.D. (2011). *Design and testing of components for a low cost laser cutter*. Ph.D. thesis, MIT.

Robotics, C. (2007). *Smart SiX Technical Specifications*. Comau Robotics.

Robotics, C. (2010). *Smart SiX Transport and Installation*. Comau Robotics.

Robotics, C. (2014). *PDL2 Programming Language Manual*. Comau Robotics.

Soares, S.d.J. (2017). *Usinagem a laser de modelos 3D por meio da gravação de múltiplas camadas em máquinas galvanométricas pós-objetivas*. Master's thesis, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Design).

Wairimu, G. (2011). *Study on effects of CO2 laser machining conditions on cut parameters and microstructures*. Master's thesis, Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, Nairobi, Kenya. Master of Science (Mechatronic Engineering).