

PROCESSO DA FABRICAÇÃO DE PRÓTESES MECÂNICAS ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA

Ronye Guimarães Rosa, Fundação Hermínio Ometto UNIARARAS, ronye.guima@gmail.com

Profa. Cintia Abdelnur Lopes, Centro Universitário Hermínio Ometto Uniararas, cintia_abdelnur@yahoo.com.br

Resumo. *Esse artigo tem por objetivo expor o processo de fabricação de uma prótese mecânica funcional através de manufatura aditiva, para indivíduos que nasceram com má formação congênita ou perderam parte ou um membro completo do corpo, evidenciando essa como uma alternativa viável para a produção dos dispositivos visando alcançar as diretrizes de baixo custo, capacidade de customização alta, fácil manutenibilidade e baixo tempo de produção porém mantendo características importantes como resistência mecânica, baixo peso e durabilidade porém se trata de uma tecnologia pouco disseminada e possui obstáculos a serem superados no entanto é possível notar que na última década tem se tornado mais popular e tem seu acesso facilitado para pessoas de poder aquisitivo menor através principalmente de ONGs e plataformas de código aberto que viabilizam a produção de equipamentos e peças por indivíduos com pouco conhecimento técnico tornando-se uma opção viável na confecção de dispositivos protéticos.*

Palavras chave: Prótese. Fabricação. Manufatura Aditiva.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o número de pessoas que nascem com algum problema congênito ou sofrem amputação em algum nível é bem expressivo e tem crescido substancialmente nas últimas duas décadas (Roeder *et al.*, 2017, p.2 apud Zuniga *et al.*, 2015, p.1-9). No Brasil, de acordo com dados do ministério da saúde, no ano de 2011 foram realizados procedimentos de amputação em cerca de 50.000 indivíduos desse total sendo 6% de membros superiores (LOPES e ALMEIDA, 2013, p.1 apud Saúde, M. da, 2013). Devido ao elevado valor para a aquisição de uma prótese funcional, muitas vezes, os pacientes não conseguem adquirir ou não ficam satisfeitos com o dispositivo adquirido, ao se levar em conta, além do fator financeiro, os fatores psicológico, ergonômico e estético do dispositivo protético (ROEDER *et al.*, 2017, p.2).

Paralelo a esse problema existe uma alternativa que vem se mostrando muito acessível no que diz respeito à fabricação de próteses mecânicas funcionais, o processo de manufatura aditiva, popularmente conhecido como 'impressão 3D'.

Manufatura aditiva é um processo de fabricação surgido nos anos de 1980 utilizado em primeiro lugar para confeccionar protótipos, a chamada prototipagem rápida na indústria, posteriormente outras formas do processo surgiram e recentemente tem se popularizado abrangendo ramos que antes não atuava, como por exemplo medicina, engenharia e artes plásticas (MAIA, 2016, p.43 apud CAMPBELL; BOURELL. GIBSON, 2012, p.255-258; LIENEKE *et al.*, 2016, p.43).

O desenvolvimento de dispositivos protéticos a baixo custo possui características como elevada resistência mecânica, baixo peso, estrutura funcional, manutenção descomplicada com peças de reposição de fácil fabricação e capacidade de customização, que faz com que parcelas da população, principalmente crianças fiquem mais à vontade e tenham facilidade em se adaptar a prótese. Isso gera inclusão social além de torná-los autossuficientes em tarefas corriqueiras, porém que se tornam difíceis de serem executadas para quem perdeu parte, um ou mais membros do corpo (ROEDER *et al.*, 2017, p.2-3).

1.1 ACESSIBILIDADE

O cenário nacional de indivíduos que necessitam de próteses mecânicas é amplo, de acordo com o Censo realizado no ano de 2010, cerca de 45.606.048 brasileiros, 23.9% da população, possuem algum tipo de deficiência, desse total 7% possuem deficiência motora, desse valor 5.32% não possuem um membro ou parte dele (IBGE, 2010). De acordo com estudo feito pelo Ministério da Saúde em 2008, cerca de 1 milhão de brasileiros aguardavam por próteses fornecidas pelo governo, onde o tempo de espera varia de acordo com estado, sendo de pelo menos um ano em São Paulo e podendo chegar a mais de três anos em estados como Amazonas e Goiás. Esse número, porém pode ser muito maior visto que muitos pacientes não dão entrada para solicitação de próteses pois tem conhecimento de que a espera será demasiadamente grande (FOLHA DE SÃO PAULO, 2008).

A alternativa para cidadãos que perderam parcialmente ou totalmente os membros, mas que preferem próteses estética e funcionalmente melhores do que as que o governo oferece é recorrer a próteses fabricadas por empresas privadas localizadas no país ou importar os dispositivos de países que estão na vanguarda desse segmento, porém dispositivos que utilizam alta tecnologia possuem valor extremamente alto de mercado, custando de US\$15.000 a US\$100.000 (RESNIK *et al.*, 2012, p.712).

2. MANUFATURA ADITIVA

O processo de fabricação por manufatura aditiva, popularmente conhecido como impressão 3D, teve seu conceito criado pelo Norte-Americano Chuck Hull em 1984. Hull definiu o processo como a criação de um objeto sólido, através da impressão de sucessivas camadas extremamente finas de material que ao ser atingido por radiação ultravioleta solidifica-se, com o auxílio de um software que modela o objeto que desejasse fabricar. A esse processo ele denominou como *Stereolithography* (SLA) ou estereolitografia. Diferentemente da maioria dos processos de fabricação comumente usados que tem como princípio a remoção de material, a estereolitografia deposita camadas de material, essa característica por si só é uma vantagem do processo sobre os demais pois a perda de material é mínima. (DABAGUE, 2014, p.10). Em 1989 Scott Crump criou a *Fused Deposition Modeling* (FDM) trata-se de um processo no qual o material, geralmente um termoplástico ABS é derretido e tracionado através de um perfil que o deposita sobre uma plataforma, a cada camada depositada o perfil sobe e deposita a subsequente (DABAGUE, 2014, p.10).

2.1. Funcionamento da impressora 3D

As impressoras 3D possuem uma composição enquanto máquinas relativamente simples, basicamente são construídas de peças e partes de fácil acesso no mercado, algumas dessas peças inclusive podem ser fabricadas pelas próprias impressoras como peças de reposição (LOPES e ALMEIDA, 2013, p.8). Funcionando de maneira similar a uma máquina *Computer Numerical Control* (CNC) amplamente usadas em processos de usinagem, essas impressoras trabalham em um sistema de planos cartesianos onde a máquina possui uma mesa que move-se através do eixo Y e um bico de extrusão que move-se através de um eixo X, além de ter a possibilidade de regular a altura do bico em relação a mesa através do eixo Z, porém diferentemente das máquinas de usinagem que retiram material de um objeto, as impressoras 3D adicionam material através de camadas ao receberem comandos de um circuito eletrônico (AZEVEDO, 2013, p.3). Independentemente de qual processo será empregado, todos constituem em utilizar um modelo digital *Computer Aided Design* (CAD) da peça desejada, “fatia-lo” em seções transversais utilizando um software específico para que sejam depositadas camadas de material, seja polímero, resina, gesso ou ligas metálicas, que serão aquecidas até o ponto de fusão para que haja a união das camadas, facilitando a criação de peças complexas (PEREIRA, 2014, p.5).

2.2. Estrutura principal

O primeiro componente que faz parte da máquina é sua estrutura principal, que normalmente é fabricada de materiais leves e resistentes para compor seu quadro, materiais como placas de madeira e perfis de alumínio são os mais usados, porém qualquer material disponível como aços ou até mesmo tipos de polímeros podem ser empregados para a fabricação da mesma (RITTER, 2014, p.19-20).

2.3. Sistema de extrusão

Um dos componentes primordiais nas impressoras 3D é o sistema de extrusão onde ocorre a fusão da matéria-prima, geralmente são fabricados de alumínio e latão além do bronze que é usado por ter ótima condutividade térmica, característica que auxilia no processo, unidos a esse componente está o elemento de aquecimento, em geral um resistor ou cartucho de aquecimento além de um sensor de temperatura por onde é possível conhecer e controlar o aquecimento do material usado no processo (RITTER, 2014, p.20).

2.4. Placa de construção

A placa de construção, comumente conhecida como mesa aquecida é o componente da máquina que serve como base para deposição do material afim de formar a peça desejada, como trata-se de uma peça móvel pois percorre o eixo Y é interessante que seja fabricada do material mais leve possível como madeira ou alumínio, sendo também necessário um sistema de isolamento térmico e um sistema de regulação de nível mecânico (RITTER, 2014, p.21).

2.5. Software CAD

Para a realização da concepção digital da peça desejada é estritamente necessário o uso de um *software* de desenho digital, largamente usados na indústria de manufatura. Os que possuem maior frequência de uso são *Autodesk AutoCAD*, *Autodesk Inventor*, *CATIA* e *SketchUP* (SANTANA, 2015, p.33). Um editor gráfico muito utilizado no segmento de dispositivos mecânicos é o *Blender*, uma plataforma *Open-source* (gratuita) que está disponível em vários sistemas operacionais e possui fácil manuseio (PAULA, 2014, p.199).

2.6. Software de “fatiamento”

Subsequentemente ao processo de conversão do arquivo para o formato STL um *software* de “fatiamento” faz-se necessário pois a plataforma CAD trabalha com extensões incompatíveis de arquivo. Nesta etapa o modelo é dividido em várias camadas além de determinar o trajeto que o bico extrusor depositará o material havendo a possibilidade de configurar e alterar uma série de parâmetros como a área máxima de impressão, espessura do bico extrusor, espessura do filamento e altura de camadas. De iniciativa *Open-source* o *software Cura* é um dos mais usados atualmente devido a sua capacidade de trabalhar nas mais variadas plataformas (AZEVEDO, 2013, p.5).

2.8. Software de impressão

Utilizando o *G-code* como base este *software* permite configurar o trajeto de impressão da máquina bem como realizar ajustes com uma interface gráfica que possibilite o fácil acesso as funções, alterando tanto para o modo automático como para manual além de transmitir ao operador as temperaturas da máquina em tempo real e viabilizar a parada da impressão a qualquer momento, o *software* usado em maior escala para essa função é o *Pronterface* (AZEVEDO, 2013, p10).

3. MATÉRIA-PRIMA

As diversas formas de manufatura aditiva utilizam as mais variadas matérias-primas, no entanto próteses mecânicas são habitualmente fabricadas através de *FDM (Fused Deposition Modeling)*. Neste processo, polímeros são predominantemente usados e os mais comuns para o processo são o PLA e ABS (PEREIRA, 2014, p.21).

PLA (Polylactic Acid) é um componente de origem vegetal extraído do milho e trigo, portanto tornando-se biodegradável, como propriedades mecânicas possui boa tenacidade e boa resistência além de um reduzido percentual de *wart* (encolhimento devido ao resfriamento) (MONCALVO, 2016, p.15).

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) é um copolímero sendo composto por outros três polímeros (acrilonitrila-butadieno-estireno), suas principais propriedades mecânicas são alta resistência e boa flexibilidade, sendo um polímero solúvel em acetona, que pode ser usada para melhorar seu acabamento superficial (MONCALVO, 2016, p15). De acordo com SALINAS (2014 apud SANTANA, 2015, p.65) o ABS possui facilidade em ser lixado, colado ou pintado, porém ao ser aquecido libera monóxido de carbono além de cianeto de hidrogênio que são prejudiciais.

4. PARAMETRIZAÇÃO

Ainda que as amputações sejam recorrentes tanto de membros superiores quando inferiores, os esforços relacionados a fabricação de dispositivos por manufatura aditiva estão voltados para os membros superiores. Devido a significativa importância das mãos na execução das mais variadas atividades, desde as mais simples do cotidiano até aquelas que possuem alto grau de destreza e precisão, além da grande quantidade de movimentos possíveis devido aos graus de liberdade, reproduzir fielmente um membro como este perdido é uma tarefa árdua (MAIA, 2016, p.26 apud BILLOCK, 1986, p.57-65).

Para MAIA (2016, p.31-32 apud BURN; TA; GOGOLA, 2016) a principal dificuldade ao se fabricar uma prótese é encontrar parâmetros que possam ser usados para dimensionar o dispositivo. Esse obstáculo se acentua quando os dispositivos são direcionados para crianças visto que uma prótese infantil necessita de boa resistência mecânica, leveza, facilidade em manutenção e ser esteticamente atraente, nesse quesito ainda mais do que dispositivos usados por adultos, também é preciso levar em conta que as próteses infantis devem ser substituídas regularmente devido ao crescimento.

5. PLATAFORMAS OPEN SOURCE

Plataformas *open source* são comunidades *online* que visam criar e/ou aprimorar um *software* ou produto através do papel ativo dos consumidores, que podem participar mais amplamente no desenvolvimento, ao invés do modelo tradicional onde apenas especialistas participam (AFFONSO, 2017, p.35).

A RepRap (*Replicating Rapid – Prototyper*) é uma iniciativa *open source* que se iniciou em 2012 e visa a popularização da tecnologia de manufatura aditiva através do desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida com o método de *FDM (Fused Deposition Modeling)* a baixo custo devido à sua capacidade de auto replicação das peças, tornando acessível e disseminando essa tecnologia para qualquer indivíduo. (REPRAP, 2017).

O projeto *e-nabling the future (e-NABLE)* foi criado nos Estados Unidos em 2013 com o objetivo de criar e fornecer projetos de dispositivos protéticos de forma totalmente gratuita, contando com voluntários em todo o mundo que desenvolvem, fabricam e doam esses dispositivos (e-NABLE, 2016).

A Figura 2 exemplifica alguns desses modelos produzidos por esses projetos.

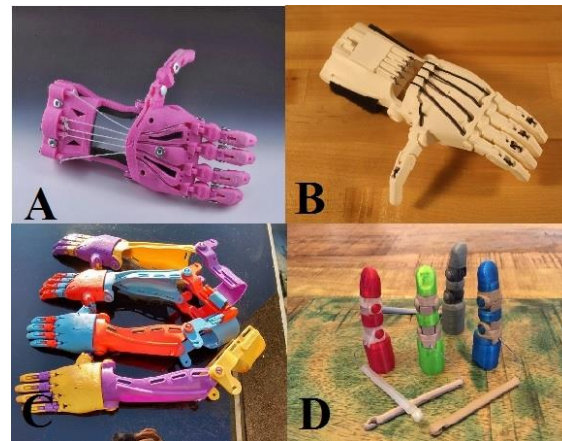


Figura 1. Modelos disponibilizados pela e-NABLE: A) Cyborg Beast; B) Raptor Reloaded; C) Unlimbited Arm; D) Knick's Finger, e-NABLE (2017)

6. DIFICULDADES DO PROCESSO

Como ocorre com todos os processos de fabricação, na manufatura aditiva existem desvantagens que a limitam tornando-a incapaz de alcançar todo o seu potencial, podendo citar o ritmo de fabricação que se impõem de acordo com a quantidade e complexidade das peças desejadas, o tamanho restrito da maioria dos equipamentos de impressão disponíveis que limita o tamanho das peças produzidas (RITTER, 2014, p.23-24).

Sendo o FDM (*Fused Deposition Modeling*) e uma plataforma *open source* o conjunto mais largamente utilizado encontram-se dificuldades principalmente no que tange a parametrização do equipamento devido as variações de temperatura no sistema de extrusão e no aquecimento da mesa em relação ao que foi programado no software de controle, afetando a qualidade final da peça e influenciando sua resistência estrutural (AZEVEDO, 2013, p.21).

Em relação ao tempo de processo, este é linearmente proporcional ao tamanho da peça produzida. No caso de fabricação de dedos o tempo médio de impressão é de 2,30 horas e para peças maiores pode-se chegar em média de 36 horas de trabalho (ROEDER et al., 2017, p.9).

7. CUSTOS

De acordo com Abreu (2015, p.41) “o mercado da impressão 3D pode ser dividido em impressoras 3D profissionais e impressoras 3D *desktop*, baseando-se esta caracterização basicamente nos custos.” Com base nisso equipamentos ditos profissionais são aqueles que ultrapassam o valor de 4500 € e impressoras 3D *desktop* são aquelas que ficam com valor abaixo de 4500 € (ABREU, 2015, p.41 apud WOHLERS, 2015). Em sua dissertação Raulino (2011, p.82) construiu uma máquina de código aberto pertencente ao projeto RepRap do modelo Mendel totalmente funcional por cerca de R\$2.000,00.

Para estimar os custos com matéria-prima Roeder et al. (2017, p.5-8) realizaram uma pesquisa de mercado com as principais empresas especializadas que fornecem os filamentos de ABS e PLA, dentre elas escolheram aquela que possuía o menor custo, cerca de R\$120,00 por quilo de filamento PLA e R\$85,00 por quilo de ABS. A seguir dividiram as condições de necessidade de dispositivo protético de acordo com a ausência de membros que apresentam-se desde a ausência ou má formação de dedos até o antebraço na altura do cotovelo. A questão de peso também foi considerada visto que uma prótese para substituir um dedo pesa cerca de 16,86 gramas, um modelo para mão pesa 126,29 gramas e um modelo de substituição acima do cotovelo pode pesar 358,55 gramas, isso sem contabilizar as peças de fixação e cabeamento. O tempo também foi um fator determinante para se estimar os custos de produção de um dispositivo protético, isso varia de acordo com o tipo de dispositivo, a quantidade de matéria-prima utilizada e a complexidade geométrica do mesmo (ROEDER et al., 2017, p.9). As condições expostas por ROEDER são intrinsicamente as mesmas expostas na figura 1.

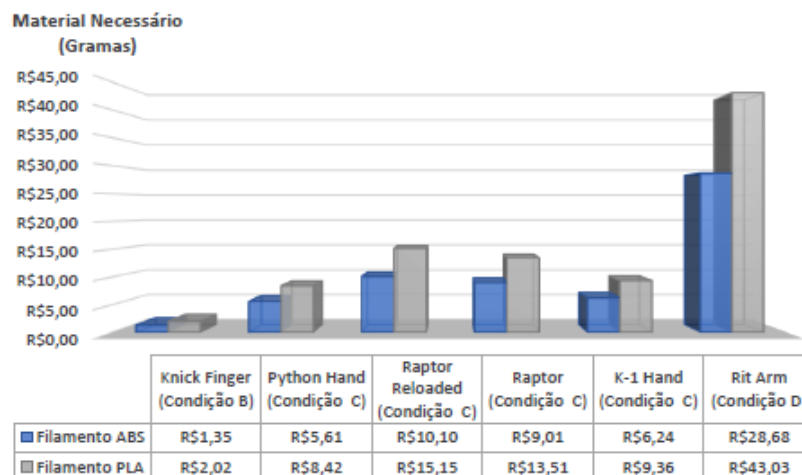


Figura 2. Relação de preço de materiais para confecção de próteses, Roeder et al. (2017)

8. CONCLUSÃO

O presente artigo foi resultado de uma intensa pesquisa bibliográfica acerca das dificuldades de pessoas de baixa renda com problemas de má formação congênita ou amputação de membros superiores que buscam próteses mecânicas funcionais a baixo custo e customizáveis bem como uma possível alternativa para sanar esse problema através da manufatura aditiva. Durante a elaboração do artigo foi possível entender o processo de fabricação desses dispositivos desde o seu dimensionamento, escolha do modelo mais adequado para cada grau de ausência ou amputação do membro, materiais utilizados e parametrização.

Fica evidente que financeiramente essa é uma alternativa mais viável do que a oferecida atualmente por grandes empresas fabricantes de próteses além de funcionalmente melhor do que aquela oferecida pelo governo, no entanto por se tratar de uma tecnologia relativamente nova, ainda é pouco popular. Como todo processo, possui suas restrições e limitações como elevado custo de máquinas, profissionais e treinamento técnico adequado para operação porém a disseminação do conteúdo através de iniciativas *open source* com comunidades trabalhando em conjunto tanto no que tange projetos de dispositivos prontos quanto em projetos de máquinas fabris que podem ser fabricadas por qualquer indivíduo sem muito conhecimento técnico na área ajudam a tornar essa uma opção interessante para pessoas que não podem aguardar em grandes listas de espera, não tem condições de pagar milhares de reais em uma prótese ou mesmo não conseguem se adaptar a prótese por não ser funcional ou agradável visualmente.

9. REFERÊNCIAS

- ABREU, Sofia Alexandra Chaves. Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. **Porto: FEUP, 2015.**
- AFFONSO, Cláudia Andressa Cruz. Gestão de configuração e colaboração em plataformas de apoio as comunidades *Open Source Design*. **São Carlos: USP, 2017.**
- AZEVEDO, Fábio Mariotto de. Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D. **São Carlos: USP, 2013.**
- BURN, M. B.; TA, A.; GOGOLA, G. R. Three-dimensional printing of prosthetic hands for children. *The Journal of hand surgery, Elsevier*, 2016.
- CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, **Emerald Group Publishing Limited**, v. 18, n. 4, p. 255–258, 2012.
- COLLUCI, Cláudia. 1 Milhão de deficientes no Brasil esperam por próteses, **FOLHA DE SÃO PAULO, 2008.** Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff1205200812.htm>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

DABAGUE, Leonardo, Augusto Moraes. O processo de inovação no seguimento de impressoras 3D. **Curitiba: UFPR, 2014.P10.**

E-NABLE. e-NABLE. Disponível em:<enablingthefuture.org>. Acesso em: 16 ago. 2017.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas, **Censo 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_preliminares_amostra/default_resultados_preliminares_amostra.shtm>. Acesso em: 21 mar. 2017.**

LIENEKE, T. *et al.* Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for fused deposition modeling. **Procedia CIRP, Elsevier**, v. 43, p. 286–291, 2016.

LOPES, Jeferson Andris Lima; ALMEIDA, Lucas Coelho. Metodologia para concepção de prótese ativa de mão utilizando impressão 3D. **Brasília: UNB, 2013.**

MAIA, Bruno Alves. Parametrização dimensional, por modelo de regressão, de próteses de mão para crianças, confeccionadas por manufatura aditiva. **Catalão: UFG, 2016.**

MONCALVO, Felipe Cardoso. Análise dimensional para capacidade de uma máquina de FDM. **Rio de Janeiro: UFRJ, 2016.**

PAULA Filho, Wilson Pádua. Multimídia: Conceito e aplicações. **2ed. Rio de Janeiro, 2014.**

PEREIRA, Frederico David Alencar de Sena. Desenvolvimento de um cabeçote para extrusão de filamento fundido aplicado a manufatura aditiva. **Campinas: UNICAMP, 2014.**

RAULINO, Bruno Ribeiro. Manufatura aditiva: desenvolvimento de uma máquina de prototipagem rápida baseada na tecnologia FDM (modelagem por fusão e deposição). **Brasília: UnB, 2011.**

RESNIK, Linda *et al.* **Advanced upper limb prosthetic devices: implications for upper limb prosthetic rehabilitation.** Disponível em: <[http://www.archives-pmr.org/article/S0003-9993\(11\)00975-0/abstract](http://www.archives-pmr.org/article/S0003-9993(11)00975-0/abstract)>. Acesso em: 21 abr. 2017.

REPRAP. **RepRap.** Disponível em:<reprap.org>. Acesso em: 15 ago. 2017.

RITTER, Gustavo Marques. Influência os parâmetros de uma impressora 3D sobre a produção de peças. **Horizontina: FAHOR, 2014.**

ROEDER, Alexandre Ziger *et al.* Análise Econômica da aplicação de monofilamento de ABS e PLA no desenvolvimento de próteses com impressão 3D para membros superiores. **Joinville: UNISOCIESC, 2017.**

SALINAS, Richard. **3D Printing with RepRap Cookbook.** Birmingham: Packt Publishing, 2014. p. 346.

SANTANA, Leonardo. Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA. **Florianópolis: UFSC, 2015.**

ZUNIGA, J. *et al.* Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences. **BMC research notes, Springer**, v. 8, n. 1, p. 1–9, 2015.

10. AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e amigos pelo apoio, a minha orientadora Cintia Abdelnur Lopes pela paciência e por ser solícita, a Geane Poteriko da Associação Dar a Mão pelo incentivo e ao Alexandre Roeder pelo suporte durante minha pesquisa.

11. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.