

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Resíduos e Reciclagem

**METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE UM MODELO PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS
TECNOLÓGICOS**

**METHODOLOGY FOR THE ELABORATION OF A MODEL FOR THE RECYCLING OF
TECHNOLOGICAL WASTE**

Matheus Fanfa Da Veiga, Leandro José Teikowski, Jacson Patrick Heck, Emitério Da Rosa Neto, Nelson

Kank Neto e Iuri Castro Figueiró

RESUMO

Atualmente o contexto de sustentabilidade e gestão ambiental são temas de grande relevância no cenário brasileiro e mundial. Em vista disto as pessoas estão cada vez mais orientadas e estimuladas a contribuir para a preservação do meio ambiente. Diante desta problemática o presente trabalho pretende relacionar os problemas ambientais em nossa sociedade, em específico, o lixo eletrônico, e seu destino e possíveis formas de reaproveitamento. Com este objetivo de analisar uma forma de reaproveitamento de sucatas eletrônicas, é proposto o desenvolvimento de uma metodologia de reciclagem de lixo eletrônico através da elaboração de um protótipo de um sistema de reciclagem de plásticos de carcaças de eletrônicos em pequena escala, transformando-as em filamentos (matéria prima) para utilização em impressoras 3D. O estudo e aplicação são realizados na Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, no campus de Santo Ângelo. O protótipo apresenta aplicabilidade satisfatória, auxiliando na criação dos filamentos e utilização para a impressão em 3D dentro da universidade.

Palavras-Chave: Reciclagem, Sustentabilidade, Extrusora, Impressora 3D.

ABSTRACT

Currently the context of sustainability and environmental management are topics of great relevance in the Brazilian and world scenario. In view of this people are increasingly oriented and encouraged to contribute to the preservation of the environment. Faced with this problem, the present work intends to relate the environmental problems in our society, in particular, electronic waste, and its destination and possible forms of reuse. With the objective of analyzing a form of reuse of electronic scrap, it is proposed the development of a methodology for the recycling of electronic waste through the elaboration of a prototype of a plastic recycling system of small-scale electronic carcasses, transforming them into filaments (raw material) for use in 3D printers. The study and application are carried out at the Integrated Regional University of Alto Uruguai and Missões, in the Santo Ângelo campus. The prototype presents satisfactory applicability, assisting in the creation of filaments and use for 3D printing within the university.

Keywords: Recycling, Sustainability, Extruder, 3D Printer.

Sustentabilidade: Resíduos e Reciclagem

METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE UM MODELO PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS TECNOLÓGICOS

METHODOLOGY FOR THE ELABORATION OF A MODEL FOR THE RECYCLING OF TECHNOLOGICAL WASTE

RESUMO

Atualmente o contexto de sustentabilidade e gestão ambiental são temas de grande relevância no cenário brasileiro e mundial. Em vista disto as pessoas estão cada vez mais orientadas e estimuladas a contribuir para a preservação do meio ambiente. Diante desta problemática o presente trabalho pretende relacionar os problemas ambientais em nossa sociedade, em específico, o lixo eletrônico, e seu destino e possíveis formas de reaproveitamento. Com este objetivo de analisar uma forma de reaproveitamento de sucatas eletrônicas, é proposto o desenvolvimento de uma metodologia de reciclagem de lixo eletrônico através da elaboração de um protótipo de um sistema de reciclagem de plásticos de carcaças de eletrônicos em pequena escala, transformando-as em filamentos (matéria prima) para utilização em impressoras 3D. O estudo e aplicação são realizados na Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, no campus de Santo Ângelo. O protótipo apresenta aplicabilidade satisfatória, auxiliando na criação dos filamentos e utilização para a impressão em 3D dentro da universidade.

Palavras-chave: Reciclagem, Sustentabilidade, Extrusora, Impressora 3D.

ABSTRACT

Currently the context of sustainability and environmental management are topics of great relevance in the Brazilian and world scenario. In view of this people are increasingly oriented and encouraged to contribute to the preservation of the environment. Faced with this problem, the present work intends to relate the environmental problems in our society, in particular, electronic waste, and its destination and possible forms of reuse. With the objective of analyzing a form of reuse of electronic scrap, it is proposed the development of a methodology for the recycling of electronic waste through the elaboration of a prototype of a plastic recycling system of small-scale electronic carcasses, transforming them into filaments (raw material) for use in 3D printers. The study and application are carried out at the Integrated Regional University of Alto Uruguai and Missões, in the Santo Ângelo campus. The prototype presents satisfactory applicability, assisting in the creation of filaments and use for 3D printing within the university.

Keywords: Recycling, Sustainability, Extruder, 3D Printer.

1 INTRODUÇÃO

A destinação e reutilização correta de resíduos urbanos, domésticos ou industriais, são atualmente uma das grandes preocupações da sociedade em âmbito mundial. Dentre os resíduos urbanos, devido ao avanço tecnológico, tem observado o aumento da produção dos resíduos tecnológicos, ou seja, lixo eletroeletrônicos.

Normalmente os equipamentos eletroeletrônicos são destinados ao lixo quando a população faz a troca por um novo eletrônico e, em alguns casos, há o descarte de forma incorreta prejudicando o meio ambiente. Os componentes destes equipamentos podem ser reutilizados, pois a vida útil dos mesmos permite esta reutilização. Além disso, alguns materiais que não possuem um valor comercial, tendo um destino correto proporcionam uma aplicação sustentável junto à sociedade.

Diante da proposta de encontrar uma solução que contribuísse para a redução dos problemas gerados pelo descarte de lixo eletrônico, analisaram-se diversas possibilidades de aplicação prática. Com a crescente aplicabilidade dos processos de prototipagem na engenharia, onde equipamentos são capazes de materializar instantaneamente uma ideia, reforçou-se a ideia de um estudo nessa área ao analisar os dados de um crescimento acelerado das impressões 3D de uso amador nos últimos anos, mesmo com seus custos de matéria prima elevados. Isto indica um interesse e uma futura dispersão desta tecnologia nos lares, como ocorreu com a impressora de papel. Em função do crescimento desse processo, também há um aumento da demanda de matéria prima com menor custo.

As impressoras em três dimensões (impressoras 3D) produzem peças em volume em um curto período de tempo, independentemente de sua forma geométrica com aplicações em diversos segmentos. Esse processo de impressão 3D transforma um fio (filamento) de plástico em peças, através de movimentos de uma extrusora em três dimensões controlados por um computador pessoal comum (SHAPEWAYS, 2016).

Neste contexto, o presente trabalho busca elaborar o modelo que utilize grande parte das carcaças de eletrônicos compostos do plástico ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), o qual é o material mais utilizado para fabricar os filamentos para impressoras 3D (SHAPEWAYS, 2016). Também verificou-se no mercado, que os equipamentos para fabricar filamentos possuem um custo elevado, são importados e desenvolvidos para produção industrial de plásticos em grande escala.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de reciclagem de lixo eletrônico através da elaboração de um protótipo de um sistema de reciclagem de plásticos de carcaças de eletrônicos em pequena escala, transformando-as em filamentos (matéria prima) para utilização em impressoras 3D. Este protótipo consiste em uma trituradora para transformar as carcaças em partículas menores e um sistema de extrusão para transformar estas partículas em um filamento.

Este processo também tem como objetivo de solucionar o problema do baixo valor do plástico, que gera um desinteresse por parte das empresas recicladoras. Tal problema é visível, sendo comum encontrar objetos de plástico abandonados no meio ambiente. Desta forma a utilização de impressoras 3D, poderiam fomentar a reciclagem em pequena escala, absorvendo os resíduos plásticos de ABS dos aparelhos eletrônicos.

Sendo assim optou-se por um estudo e aplicação prática de um modelo de reciclagem na URI Campus Santo Ângelo, reciclando o plástico de seus resíduos eletrônicos e transformando em matéria prima para impressoras 3D.

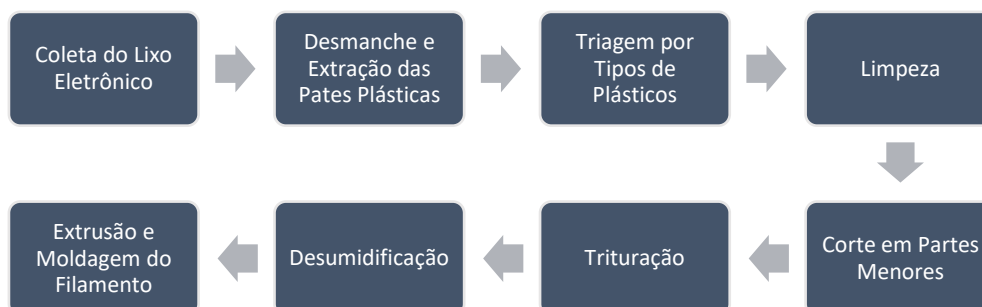
2 PROCESSO INICIAL DE RECICLAGEM

Impressão 3D é o nome dado ao método de criação de uma peça em três dimensões a partir de um modelo digital. A impressão é realizada por um processo aditivo, onde camadas de material são inseridas continuamente compondo assim objetos de diversas formas. É uma técnica diferente das formas mais comuns, como a usinagem, onde a formação do objeto é dada mediante a remoção do material. Na impressão 3D o formato do modelo é dado ao fundir um fio (filamento), adicionando material a peça impressa havendo pouca ou nenhuma sobra (AZEVEDO, 2013).

Porém, esta matéria prima ainda possui um custo elevado. Para verificar o custo médio atual, analisou-se os preços de alguns vendedores regulamentados do país, encontrou-se o valor de R\$ 91,65 como preço médio por kg de filamento ABS com 1,75mm de diâmetro (SETHI3D.COM, 2017). Este valor é anunciado como material não reciclado, pois percebeu-se que a venda de filamentos reciclados é pouco explorada e não se encontrou empresas regulamentadas para este tipo de filamento no Brasil. Estas informações encontradas motivaram a ideia de desenvolver um sistema de reciclagem para reduzir os custos de fabricação pelo próprio usuário da tecnologia de impressão 3D.

Para o desenvolvimento do projeto definiu-se uma metodologia de reciclagem para o Campus Santo Ângelo, que pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama do processo desenvolvido.



Fonte: Autor

2.1 COLETA DO LIXO ELETRÔNICO

Primeiramente, coletou-se os eletrônicos descartados pela URI Campus de Santo Ângelo. A maioria destas sucatas possui relação com a área de informática, que possui uma vida útil reduzida (AMBIENTE, 2011). Dentre os itens que se encontraram estão: monitores de tubo, CPUs, impressoras, plotters, scanners, mouses e teclados. Analisou-se e certificou-se que a maioria dos itens possuem partes plásticas identificadas com potencial de reciclagem.

2.2 DESMANCHE E EXTRAÇÃO DAS PARTES PLÁSTICAS

No laboratório de eletrônica do curso de Engenharia Elétrica, desmontaram-se os equipamentos separando-os em partes plásticas das placas eletrônicas, fios, cabos e metais de estruturas. Após esta separação, por exemplo, foi possível extrair das placas eletrônicas inúmeros componentes para serem utilizadas em aulas práticas nos laboratórios do curso. As

partes de interesse para este projeto são as estruturas em plástico, constituídas dos mesmos materiais disponíveis no mercado na forma de filamento para impressoras 3D. Entregou-se o restante do material separado para o setor responsável da universidade para o descarte correto.

2.3 TRIAGEM E LIMPEZA

Na maioria dos plásticos dos dispositivos eletrônicos de origem nobre, está gravado em alto relevo sua composição química. A identificação pode ser encontrada abaixo do símbolo que indica que o material é reciclável. A Figura 1 mostra a parte plástica de um leitor de CDs, onde a mesma apresenta a sua composição em ABS.

Segundo ABRE, não existe no Brasil nenhuma legislação que defina a aplicação da simbologia de reciclagem, somente orientação ao mercado com base nas Normas NBR ISO 14.021:2004 bem como NBR 13.230:2008, ambas publicadas pela ABNT.

Figura 2 - Identificação encontrada nas sucatas de plástico.



Fonte: autores.

Diante dos tipos de filamentos para impressoras 3D existentes no mercado, separaram-se para a reciclagem peças plásticas compostas de ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), que é o mais utilizado nas impressões 3D. Devido à quantidade significativa existente nas sucatas plásticas encontradas, também se separou para os testes peças em PC (Policarbonato) e PP (Polipropileno), que não são muito exploradas na área de prototipagem. Algumas das principais propriedades dos plásticos utilizados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedade dos plásticos utilizados

Valores Máximos	ABS	PC	PP	Unidade
Densidade	1080	1200	906	Kg/m ³
Cisalhamento	1050	700	500	MPa
Resistência à tração	60	75	38	MPa
Temperatura de serviço	-20 a 80	-100 a 130	-10 a 105	° C
Temperatura de fusão	175	225	165	° C
Calor específico	1675	1500		J / kg. ° C
Condutividade térmica	0.19	0,21	0,22	W/m.K

Fonte: MATBASE, 2003.

Apesar desta identificação estar na maioria das estruturas plásticas estudadas, outras técnicas para identificação também foram testadas para tentar reciclar as peças sem identificação. Uma técnica baseada na cor de chama possibilitou uma identificação rápida e sem processos laboratoriais complexos. Porém, estas são bem limitadas e causaram alguns

problemas durante os testes, pois existem estruturas plásticas que são compostas de misturas de mais de um tipo de plástico (WIEBECK; HARADA, 2005).

Devido às impurezas causarem muitos problemas de entupimento do bico do protótipo desenvolvido, este processo necessitou de uma limpeza baseada em banho de água com sabão, removendo-se a poeira e outros tipos de sujeira coladas nas peças a serem testadas. Para secagem não foram utilizadas toalhas ou papéis, pois suas estruturas podem soltar fragmentos. Então se deixou as peças secarem em uma sala fechada longe de fontes de poeira.

2.4 CORTE E TRITURAÇÃO

Após as peças estarem limpas e secas, procedeu-se com o processo de corte com uma serra do tipo tico-tico em formato de tiras, para reduzir o volume e facilitar a trituração. Ao certificar-se de que é possível a triagem e a reutilização dos materiais limpos e cortados, estudou-se a possibilidade de proceder com um processo de trituração, para transformar os plásticos em flocos.

Com isso, resolveu-se desenvolver uma trituradora pequena e de baixo custo (Figura 3). Dentre os tipos de trituradoras existentes, verificou-se que o melhor tipo seria o modelo Shredder. Pesquisou-se por desenhos técnicos prontos e encontrou-se um modelo de trituradora Shredder no formato tridimensional do fabricante de trituradoras FilaMaker Inhaber Marek Pantel. Este modelo consiste em dois eixos com discos de aço intercalados entre si com o objetivo de forçar o material a ser triturado em duas direções, fazendo o mesmo cisalhar (FILAMAKER, 2011).

Adaptou-se o desenho para um tamanho menor e modificou-se a estrutura dos dentes e de engrenagens, pois o desenho original era voltado à trituração de embalagens plásticas de alimentos. Estas embalagens possuem paredes mais finas e, então, para penetrar e cisalhar melhor as paredes espessas das carcaças dos eletrônicos, adicionou-se pontas nos disco de corte. Também se desenhou um modelo próprio de engrenagens, para aproveitar o corte a laser e não necessitar de uma usinagem complexa posterior.

Após a adequação do desenho, solicitou-se o recorte das peças em chapas de aço para uma empresa especializada em corte a laser. Para os eixos onde ficam presos os discos de corte, utilizou-se uma talhadeira de aço em formato hexagonal e usinou-se a mesma em um torno para o encaixe dos rolamentos e engrenagens. Também foi definida uma estrutura de fixação em qualquer tipo de mesa, reduzindo os custos de uma estrutura própria de apoio.

Com a trituradora montada, definiu-se inicialmente sua utilização por manivela com tração humana devido à segurança proporcionada. Esta preocupação tornou o processo mais complicado, pois o esforço humano exigido pode tornar o processo desconfortável. Porém, a resposta do braço humano a um incidente é mais rápida do que com a utilização de um motor.

Figura 3 – (a) Trituradora desenvolvida e b) Trituração de PP de carcaça de televisão.

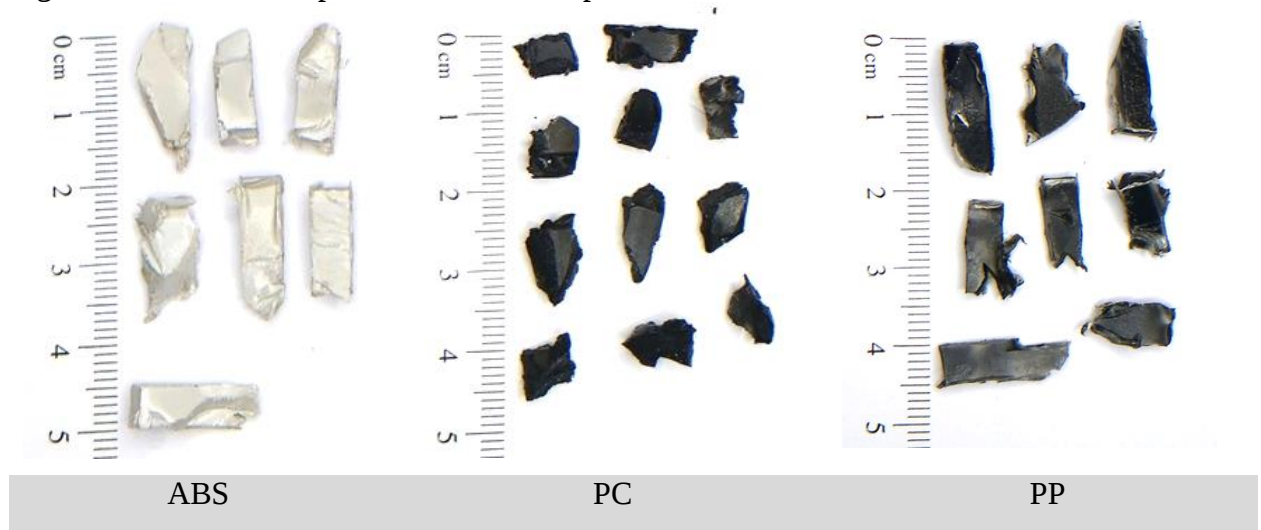


Fonte: autores.

Após, procedeu-se com os testes de trituração, onde conseguiu-se reduzir as carcaças em flocos. Durante os testes, verificou-se que o tamanho do grão variou de acordo com o tipo de material e o número de vezes que passou por este processo. Na primeira vez que os materiais foram triturados, os volumes dos grãos nas três dimensões foram definidos pela espessura da parede do plástico no eixo Z, pela largura do disco (5mm) em X e pela capacidade de cisalhamento em Y.

O pior caso ocorreu ao triturar o ABS, onde os flocos ficaram com comprimentos superiores a 15 mm (Figura 4-ABS), necessitando passar novamente pelo processo de trituração para melhorar o processo de fabricação do filamento. O tamanho com a maior moda nesse caso foi o de 15 mm x 5 mm x espessura da parede do plástico triturado. Já a trituração de PC, resultou flocos menores que 10 mm (Figura 4 - PC).

Figura 4 – Amostras de plásticos triturados apenas uma vez.



Fonte: autores.

É importante ressaltar que, após a trituração do material, algumas partículas de ferro soltas foram identificadas na proporção de aproximadamente 40 flocos de plástico para uma de aço de aproximadamente 0,3 mm. Essas impurezas podem causar o entupimento do bico da impressora 3D, pois o ponto de fusão do aço é superior ao ponto de fusão do plástico. Resolveu-se o problema com um ímã de neodímio que coletou as partículas de ferro.

3 PROTÓTIPO DE EXTRUSORA

Diante dos excelentes resultados obtidos com a trituradora, prosseguiu-se com o desenvolvimento um sistema de extrusão para transformar este plástico em filamento. O sistema consiste em fundir o plástico e moldá-lo em um fio cilíndrico com diâmetro de 1,75 mm.

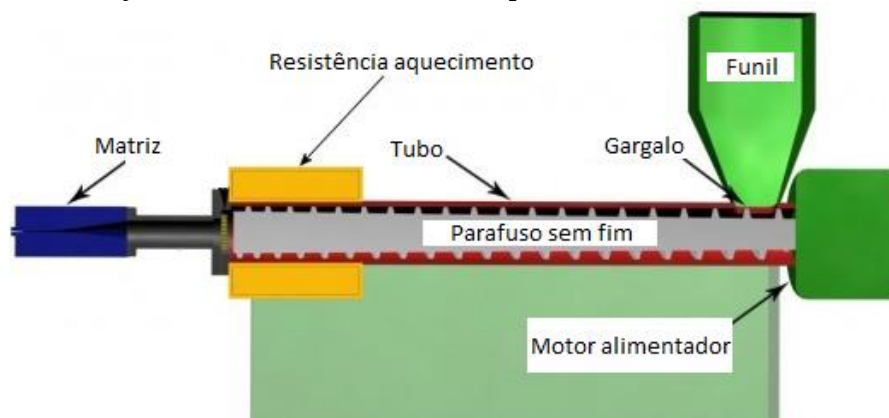
Primeiramente analisou-se a viabilidade de construção do sistema, pois esta tecnologia necessita de controles eletrônicos e mecânica elaborada. Para isso estudou-se os sistemas existentes para fundir e moldar plásticos.

Nestes estudos verificou-se que esses processos de extrusão consistem em forçar a passagem de um determinado material fundido através de uma matriz. Com a extrusão do material, o mesmo consegue penetrar e copiar o modelo conseguindo-se obter formas e características desejadas, e desta forma, obter o desenvolvimento de um fio (filamento).

Em seguida, verificou-se que a melhor tecnologia de máquina extrusora é a de ciclo infinito, que não necessita parar o processo para reabastecer a matéria prima. Esse tipo de extrusora é composta por um tubo de aço com uma broca ou eixo com rosca sem fim que é interligada a um motor elétrico com a função movimentar o parafuso sem fim (Figura 5). Na parte inicial do tubo, há uma espécie de funil, o qual por ação da gravidade faz com que as partículas de material plástico caiam no canal de alimentação (gargalo) (3DPRINTING, 2016).

Com o motor em movimento o material é empurrado em direção ao elemento aquecedor derretendo o plástico, que logo após passa por um filtro eliminando partículas impróprias. Depois da fundição, o material vai em direção a uma matriz, na qual tem a finalidade de moldar o plástico, fazendo com que ele saia com o tamanho desejado. Na figura 5 é mostrado de forma simples uma máquina extrusora de ciclo infinito.

Figura 5 - Identificação encontrada nas sucatas de plástico.



Fonte: 3DPRINTING, 2016.

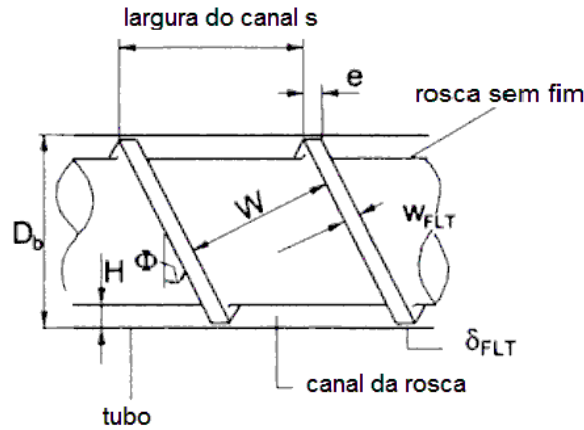
Diante a verificação da existência de máquinas desse tipo na indústria dos filamentos, resolveu-se desenvolver um modelo de baixo custo. Com os recursos possíveis, projetou-se a mesma para conseguir processar os flocos com o tamanho resultante na trituradora.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE PARAFUSO SEM FIM

Inicialmente pesquisaram-se as equações relacionadas ao dimensionamento do parafuso sem fim. Porém, o intuito foi desenvolver um sistema de extrusão que consiga processar os grãos triturados apenas uma vez (Figura 4). Para isso utilizou-se as equações

apresentadas por POLYMER SCI & ENG,(2002) onde é possível calcular a vazão do plástico dentro de um tubo.

Figura 6 - Parafuso sem fim e suas variáveis para o projeto.



Fonte: RAO; SCHOTT, 2002.

Para calcular o fluxo de plástico na extrusora é utilizada a Equação 1, mostrada a seguir.

$$G = 60 \cdot \rho_o \cdot N \cdot \eta_F \cdot \pi^2 \cdot H \cdot D_b \cdot (D_b - H) \cdot \frac{W}{W + W_{FLT}} \cdot \sin \Phi \cdot \cos \Phi \quad (1)$$

Onde:

- D_b – Diâmetro fuso;
- S – Passo; v – Número hélices;
- W_{FLT} – Espessura da hélice;
- W – Espaço vazio ente hélices;
- H – Profundidade da hélice;
- η_F – Eficiência do plástico;
- N – Rotação fuso;
- ρ_o – Densidade;
- Φ - Ângulo da hélice;
- G – Fluxo de plástico.

Utilizou-se a Equação 1 para calcular se o raio do parafuso e a velocidade do motor de 25 RPM são capazes de transportar os flocos da triturados até a extrusora a uma velocidade que seja possível obter um bom resultado. Com os cálculos, testaram-se vários formatos de parafuso para o melhor resultado, levando-se em consideração também a capacidade de fabricação do mesmo com os recursos disponíveis.

Calculou-se o parafuso mais adequado, fixando o diâmetro em 29 mm para comportar o tamanho do floco triturado e 25 cm de comprimento para uma isolamento térmica com o funil. Utilizaram-se as propriedades do ABS (Tabela 1) para os cálculos da Equação 1, que resultou na vazão de plástico máxima de 5,29 kg/h. Esse fluxo é satisfatório para o molde na forma de furo de 1,7 mm.

Inicialmente pesquisou-se no mercado uma broca comum de baixo custo para servir de parafuso sem fim (Figura 5). No entanto, não foi possível adquirir esta peça com valor acessível e nas dimensões necessárias. Com isso, para reduzir os custos e poder chegar ao resultado desejado, resolveu-se desenhar um parafuso sem fim (caracol) e usinar em madeira. Após moldou-se esse modelo na areia de fundição e fabricou-se um caracol de alumínio fundido, com as características desejadas, seguindo as técnicas de fundição descritas em HARPER (1981).

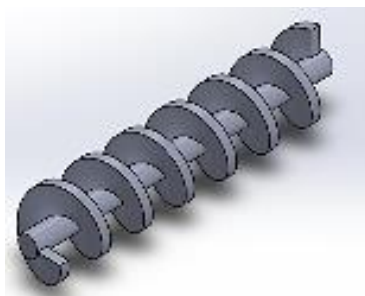
Para o desenho em três dimensões, fez-se necessária a utilização do *software* Solidworks (Figura 7 –a) e para converter o desenho nos movimentos da máquina CNC (Comando Numérico Computacional), utilizou-se o *software* EdgeCam. Ambos com licença adquirida pela universidade (URI).

Para usinar o modelo em madeira deste caracol, utilizou-se uma fresadora CNC modelo 6090, com quarto eixo do tipo torno. Essa etapa transformou o desenho em três dimensões em um sólido de madeira com as mesmas medidas, através da retirada de material de um cilindro maciço de madeira (Figura 7 - b). Utilizou-se no CNC a ferramenta fresa topo reto com diâmetro de 5 mm.

Para obter uma cópia, moldou-se em areia de fundição o caracol de madeira, conseguindo-se extrair facilmente o molde através do giro do modelo (Figura 7 - c). Esta técnica normalmente não é utilizada, mas foi a mais adequada devido à ausência de ângulo de extração do modelo em seu comprimento. Após moldar, deitou-se o molde e acrescentou-se um massalote (reserva de alumínio para compensar os efeitos da dilatação térmica) em todo o comprimento.

Com o molde pronto, fundiu-se alumínio em um forno elétrico (Figura 7-d) e vazou-se no molde. Na segunda tentativa, o alumínio fundido preencheu e copiou o formato do caracol de maneira satisfatória para a aplicação. Em seguida desmoldou-se (Figura 7-e), cortou-se o massalote, retirou-se as sobras indesejadas e usinou-se as partes necessárias em um torno mecânico (Figura 7-f).

Figura 7- (a) Desenho em três dimensões do caracol; (b) Usinagem do modelo do caracol em madeira; (c) molde em areia de fundição; (d) Alumínio fundido no cadinho; (e) Desmoldagem após a solidificação do alumínio fundido; (f) Acabamento no caracol em alumínio fundido desenvolvido.



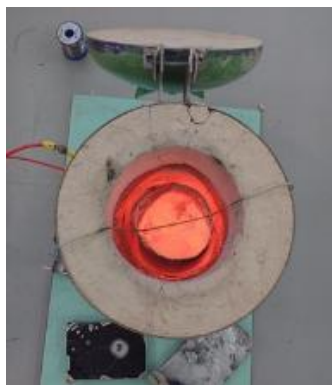
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: autores.

3.2 SISTEMA DE AQUECIMENTO PARA EXTRUSÃO

Adaptou-se uma resistência de uma torradeira sucateada em um cilindro de alumínio usinado em um torno, para aquecer e fundir o plástico. Através da Equação 2 verificou-se que a potência de 300 W da resistência encontrada é suficiente para fundir todo o volume de acordo com a capacidade térmica dos plásticos, ou seja, a resistência consegue aquecer e fundir os 5,29 kg/h, o que torna menos preocupante, pois com apenas um fio de 1,7 mm nunca se atingiria a capacidade máxima possível.

$$P_T = Q_m [C_p \cdot \Delta T + \lambda_f] \quad (2)$$

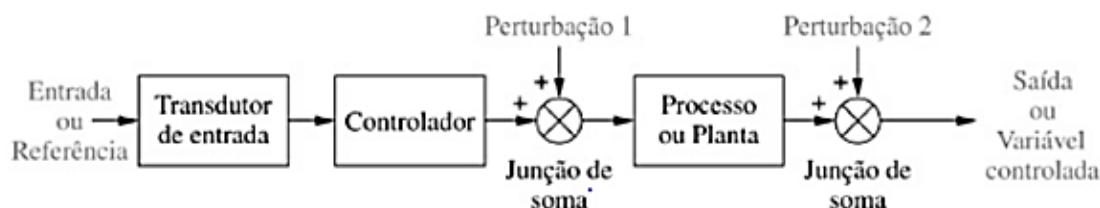
Onde:

- P_T – Potência do aquecedor;
- Q_m – Fluxo de material a ser fundido;
- C_p – Capacidade térmica do fundido;
- ΔT – Diferença de temperatura;
- λ_f – Calor de fusão.

3.3 SISTEMA DE CONTROLE

O desenvolvimento de uma extrusora exigiu circuitos de controle de temperatura e de velocidade do motor. Esse sistema de controle nada mais é do que processos desenvolvidos no intuito de conseguir uma atuação de uma saída pretendida, obtendo um desempenho esperado, a partir de uma entrada já estabelecida (NISE, 2012). A Figura 8 ilustra de uma forma simplificada um sistema de controle, onde a entrada retrata uma saída pretendida. Os sistemas de controle podem ser em malha fechada, onde a saída não é medida e corrigida para o valor desejado, ou em malha aberta, onde somente é definida a saída e o sistema não compensa perturbações que podem afetar seu valor.

Figura 8 – Sistema em malha aberta.



Fonte: NISE, 2012.

Para o controle da velocidade do motor utilizou-se um controle de malha aberta com a tecnologia PWM, que é o ajuste da tensão RMS através largura do pulso em um sinal de onda quadrada periódico (SIMAS, 2010). Projetou-se este controle de velocidade do motor de 24V do parafuso com a frequência de 20Hz. Para isso, utilizou-se um circuito com o oscilador 555 que produz e permite o ajuste da largura de pulso que alimenta e altera a velocidade do motor.

No controle de temperatura utilizou-se um sistema de malha fechada controlado por um microcontrolador. Através de um potenciômetro ajusta-se a temperatura desejada na extrusora, de acordo com o ponto de fusão de cada material. Um sensor de temperatura do tipo NTC envia uma tensão proporcional a temperatura ao microcontrolador, que aciona um TRIAC que liga a resistência quando a temperatura for inferior a temperatura desejada. Quando a mesma for superior, a resistência é desligada automaticamente até a temperatura ser inferior novamente. Esse processo produziu um erro de 3 °C na temperatura desejada.

Programou-se o microcontrolador para exibir as variáveis de temperatura e velocidade em um display. A Figura 9 mostra o circuito de controle elaborado para o controle de temperatura e velocidade do protótipo.

Figura 9 – Circuito de controle de temperatura e velocidade.



Fonte: autores.

3.4 ACABAMENTOS E AJUSTES

Ao concluir a parte eletrônica, utilizou-se um tubo com diâmetro interno de 25mm para adicionar o parafuso em seu interior, como esquematizado na Figura 5. Para o molde do fio, usinou-se e utilizou-se um bico de aço inoxidável com um furo de 1,7 mm no centro e fabricou-se uma estrutura para segurar todos os componentes do sistema. Adaptou-se o motor de 24V com caixa de redução no eixo do parafuso sem fim (Figura 10).

Figura 10 – Extrusora desenvolvida para reciclagem de plásticos.



Fonte: autores.

Conectou-se o circuito à parte mecânica e efetuaram-se os ajustes do sistema na parte mecânica, eletrônica e de programação. Inicialmente o sistema apresentou muitos problemas, principalmente devido ao fato de que o sistema exigiu um torque fora do planejado ao cisalhar alguns pedaços de flocos que não entravam completamente entre as hélices do parafuso. Atenuou-se este problema afiando o tubo no bocal de entrada, facilitando o corte do material.

Outro problema que se verificou durante os testes foi o aparecimento de bolhas de ar no filamento, que reduziu a densidade do plástico. Atenuou-se esse problema com um ajuste fino da temperatura em relação a corrente máxima suportada pelo motor, pois verificou-se que quanto menor a temperatura de fusão, maior a densidade e melhor o formato do filamento. Porém, o torque exigido tornou-se maior com a temperatura menor, mantendo a corrente do motor no limite máximo. Para resolver este problema também se intensificou o processo de desumidificação do plástico triturado.

4 FABRICAÇÃO E TESTES DO FILAMENTO

Primeiramente, teve-se como resultado a trituradora, a qual se tornou uma ferramenta de muita utilidade para o processo de reciclagem. Sem este equipamento não seria possível desenvolver todos os testes. Após os testes da extrusora, iniciou-se a fabricação do filamento, onde uma demonstração dos resultados são apresentados na Figura 11, apenas para o plástico PC. Testaram-se também o ABS e o PC nestas mesmas etapas.

Mesmo com os problemas encontrados conseguiu-se um melhor resultado na moldagem do filamento de PC na temperatura de 240 °C. Este material apresentou uma menor concentração de inclusão de ar no filamento resultante, aproximadamente 20%, que possibilitou desenvolver uma peça com qualidade. A concentração de ar foi verificada através do peso comparado com peso e a densidade do material.

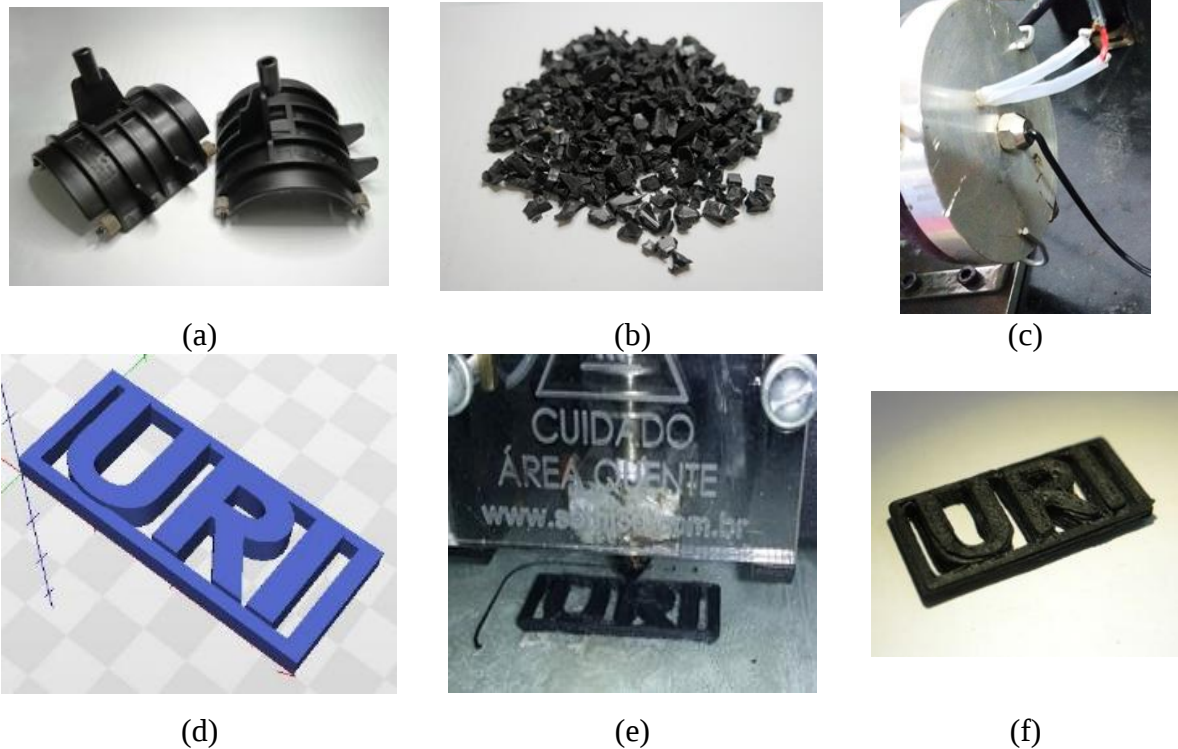
Testou-se também o ABS, que resultou em um filamento com uma concentração de ar maior, em uma proporção de aproximadamente 30 %. A impressão desse filamento resultou em uma qualidade em que é possível desenvolver peças com qualidade para a maioria das aplicações. O PP não apresentou inclusão de ar considerável.

As peças de sucata trituradas (Figura 11-a) para fabricar este filamento faziam parte do sistema mecânico de uma impressora de papel (plotter), onde uma amostra do resultado da trituração pode ser verificada na Figura 11- b. Em seguida fundiram-se os flocos e moldou-se o fio na extrusora desenvolvida. Após, utilizou-se a impressora 3D da universidade para imprimir uma peça retangular de 35 x 15 x 4 mm com o filamento desenvolvido.

Como não é comum o uso de PC em impressoras 3D, utilizaram-se as mesmas configurações de impressão do ABS, onde no início da impressão verificou-se a dificuldade dos fios se colarem entre si, mas ao longo da impressão o problema desapareceu, proporcionando uma impressão com qualidade suficiente para a maioria das aplicações.

Os mesmos resultados descritos na Figura 11 foram obtidos com o PP. Porém o este apresentou muitos problemas até se conseguir ajustar a impressora em configurações que permitiram a impressão com este filamento.

Figura 11- Etapas desenvolvidas para obtenção do filamento e da impressão 3D em PC; (a) Peças em PC retiradas de um plotter sucateado; (b) Flocos resultantes da trituração; (c) Extrusão dos flocos e fabricação do filamento; (d) Desenho em 3D para impressão; (e) Impressora 3D imprimindo com o filamento fabricado; (f) Peça impressa com plástico reciclado de acordo com o desenho em 3D.



Fonte: autores.

Figura 12 – Peças resultantes das impressões 3D com os filamentos fabricados.



Fonte: autores.

5 CONCLUSÃO

No decorrer do desenvolvimento do protótipo, o maior desafio foi que partes processo apresentaram problemas de engenharia, de logística e financeira. Contudo, ainda assim conseguiu-se desenvolver a aplicação prática proposta neste modelo para fabricação e testes das amostras.

Nessas etapas do trabalho pode ser considerado como primeiro resultado a trituradora, a qual se tornou uma ferramenta de utilidade primordial para o restante do processo, tendo em vista que permite a produção de material triturado para a demanda de uma impressora 3D doméstica. Portanto é importante ressaltar que sem este equipamento não seria possível o desenvolvimento dos testes práticos.

Devido ao tempo e aos recursos utilizados na extrusora de filamentos desenvolvida, não se conseguiu fabricar filamentos em grandes quantidades, apenas produziram-se amostras com o árduo controle manual do diâmetro do fio.

Após a estruturação e construção de todas as etapas, conseguiu-se imprimir o desenho em 3D com o texto URI em alto relevo, mostrando assim a possibilidade de fabricar filamentos para impressoras na universidade aproveitando alguns resíduos provenientes do lixo eletrônico. Este modelo é importante para o futuro da universidade, pois a reciclagem de resíduos aplicada à produção de protótipos pode trazer benefícios, principalmente relacionados à responsabilidade ambiental nos laboratórios, empresas e instituições de ensino.

Diante da proposta de desenvolver um modelo que possibilite a reutilização ou reciclagem de eletrônicos sucateados para o campus da URI Santo Ângelo, pode-se concluir que o houve um desenvolvido satisfatório e de grande importância para futuros estudos e aplicações.

REFERÊNCIAS

3DPRINTING. **3D PRINTING**. Disponível em: <<http://3dprintingforbeginners.com/start-here/>>.

AMBIENTE, M. DO M. **Ministério do Meio Ambiente**.

FILAMAKER. **Mini shredder**. Disponível em: <<http://filamaker.eu/product/mini-shredder>>.

GTMAX3D. **ABS**. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/categoria/342363.html>>.

MATBASE. **Natural and Synthetic-Polymers - Material Properties**. Disponível em: <<https://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/thermoplastics/commodity-polymers/material-properties-of-acrylonitrile-butadiene-styrene-general-purpose-gp-abs.html#properties>>.

NISE, N. S. **ENGENHARIA DE SISTEMAS DE CONTROLE Sexta Edição**. [s.l: s.n.].

POLYMER SCI & ENG. Extrusion Outline. p. 19, 2002.

RAO, N. S.; SCHOTT, N. R. Analytical Procedures for Troubleshooting Extrusion Screws. In: **Understanding Plastics Engineering Calculations**. [s.l: s.n.]. p. 12.

SETHI3D.COM. **ABS**. Disponível em: <<https://www.sethi3d.com.br/>>.

SHAPEWAYS. **3D Modeling for 3D Printing Tutorial for Beginners**. Disponível em: <<https://www.shapeways.com>>.

SIMAS, E. **Técnicas de Modulação.** Disponível em:
<http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/03-EletPot_Tecnicas_de_Modulacao.pdf>.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações.** São Paulo: Arliber Editora, 2005.