

# GERAÇÃO DE PRÓTESES ORTOPÉDICAS CONTENDO RESÍDUOS DE ROCHAS E PEAD GERADAS EM IMPRESSÃO 3D

## GENERATION OF ORTHOPEDIC PROSTHESTS CONTAINING DIMENSION STONES WASTE AND HDPE GENERATED IN 3D PRINTING

**Nathalia Santos Eiriz**

Aluno de Graduação de Engenharia Química, 7º período, UERJ  
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: agosto de 2015 a julho de 2018,  
nathez@cetem.gov.br

**Roberto Carlos da Conceição Ribeiro**

Orientador, Engenheiro Químico, D.Sc.  
rcarlos@cetem.gov.br

### RESUMO

Segundo a Organização Mundial da Saúde 190 milhões de pessoas no mundo apresentam algum tipo de deficiência física e necessitam utilizar algum tipo de prótese. No entanto, o acesso a uma prótese de qualidade não é um processo fácil para a população menos favorecida devido aos altos custos do material. Dessa forma, estudar a aplicação de produtos mais baratos e que garantam qualidade mecânica em novos materiais é de grande importância para que essa parcela da população possa ter acesso a esses materiais. Com isso, o objetivo deste trabalho é gerar próteses ortopédicas utilizando polietileno de alta densidade (PEAD) reforçado com resíduos gerados no corte e beneficiamento de rochas calcárias ornamentais por meio de impressão 3D. Para tal, previamente, o resíduo foi avaliado tecnicamente e também segundo critérios de risco à saúde humana e ecotoxicológicos. Posteriormente, geraram-se compósitos, por meio de extrusão e injeção, formados por PEAD e resíduos de rochas nas seguintes proporções: 10,30 e 50%, em massa, utilizando-se como compatibilizante o ácido esteárico ou o anidrido maléico. Os compósitos foram avaliados termicamente por TGA e ainda foram obtidas imagens de MEV. Os melhores desempenhos foram obtidos com o compatibilizante PE-MA e comprovados no MEV. Dessa forma, conclui-se que com a incorporação de apenas 10% de resíduo na matriz do PEAD, em presença de PE-MA, é possível a formação de um compósito que pode ser utilizado em impressoras 3D para geração de próteses com resistência mecânica requerida e baixo custo.

**Palavras chave:** prótese, compósito, resíduo de rocha.

### ABSTRACT

According to the World Health Organization 190 million people worldwide have some type of physical disability and need to use some type of prosthesis. However, access to a quality prosthesis is not an easy process for the underprivileged population due to the high costs of the material. In this way, studying the application of cheaper products and guaranteeing mechanical quality in new materials is of great importance for this part of the population to have access to these materials. With this, the objective of this work is to generate orthopedic prosthesis using high density polyethylene (HDPE) reinforced with residues generated in the cutting and processing of limestone ornamental rocks through 3D printing. For that, previously, the waste was evaluated technically and also according to human and ecotoxicological risk criteria. Subsequently, composites were generated, by means of extrusion and injection, formed by HDPE and rock residues in the following proportions: 10, 30 and 50% by mass, using as compatibilizing stearic acid or maleic anhydride. The composites were thermally evaluated by TGA and SEM images were still obtained. The best performances were obtained with the compatibilizer PE-MA and proven in the SEM. In this way, it is concluded that with the incorporation of only 10% of the residue in the HDPE matrix, in the presence of PE-MA, it is possible to form a composite that can be used in 3D printers

**Keywords:** prosthesis, composite, waste.

## 1. INTRODUÇÃO

Das 190 milhões de pessoas espalhadas pelo mundo que sofrem com algum tipo de deficiência física (OMS, 2018), cerca de 90% não possui recursos financeiros suficientes para a aquisição de próteses médicas que possam lhe gerar maior qualidade de vida. Dessa forma, cabem aos pesquisadores de todo o mundo, estudar a criação de novos produtos resistentes e com um custo mais acessível para atender a essa parcela da população.

Nesse contexto, aparece o setor de rochas ornamentais, que em 2017 gerou cerca de 200.000 toneladas de rochas, colocando o Brasil como o 4º maior produtor mundial (SINDIROCHAS, 2017). Porém, dessa produção, estima-se que cerca de 80% sejam considerados resíduos, que são descartados em aterros sem nenhum tipo de tratamento. No entanto, tais resíduos possuem composições químicas e mineralógicas pré-definidas e podem ser aplicados em diversos setores industriais como, por exemplo, o setor polimérico, como carga reforçante e de estabilidade.

Segundo a Gazeta do Povo (2018) o método de impressão 3D, que utiliza filamentos poliméricos como carga, já é considerado a quarta revolução industrial, devido à geração de diversas peças, em pouco tempo e com baixo custo. No entanto, os materiais impressos, não apresentam elevada resistência mecânica (EIRIZ E RIBEIRO, 2017) e não poderiam ser aplicados na geração de próteses médicas, por exemplo.

Dessa forma, buscando inovar na tecnologia de impressão 3D, focado no mercado industrial de próteses para prototipagem e manufatura, busca-se reforçar os polímeros utilizados como filamentos com cargas minerais, especificamente os resíduos de rochas ornamentais, que representam um problema ambiental grave no Brasil.

## 2. OBJETIVO

Verificar a viabilidade técnica e toxicológica da utilização de resíduo de calcário branco ornamental como carga na matriz do polietileno de alta densidade (PEAD) na geração de próteses ortopédicas por meio de impressão 3D.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Materiais Utilizados

O resíduo utilizado é proveniente do corte do calcário ornamental branco do Rio Grande do Norte (RN) e foi utilizado na granulometria inferior a 0,053 mm. O polímero utilizado foi o PEAD fornecido pela BRASKEM HA7260, com índice de fluidez  $20\text{g}.10\text{min}^{-1}$  e densidade  $0,955\text{ g}.\text{cm}^{-3}$ . Enquanto os compatibilizantes utilizados foram o polietileno enxertado com 0,26% de anidrido maleico (PE-MA) de índice de fluidez  $1,5\text{g}.10\text{min}^{-1}$ , e o ácido esteárico.

### 3.2. Ensaios Ecotoxicológicos e de Avaliação de Risco à Saúde Humana

Primeiramente, o resíduo foi analisado por meio da técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado (ICP-OES) para se determinar os teores dos seguintes elementos químicos: Alumínio, Antimônio, Arsênio, Bário, Boro, Cádmio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Manganês, Mercúrio, Molibdênio, Níquel, Prata, Selênio, Vanádio e Zinco. Todos os teores encontrados foram avaliados em planilhas da CETESB que é baseada na Resolução CONAMA 420 para verificação do risco à saúde humana do resíduo disposto no meio ambiente.

Os ensaios ecotoxicológicos foram realizados segundo ASTM E1676-04, ABNT-12648 (ABNT, 2011) e ABNT-NBR 12713 (ABNT, 2009).

### 3.3. Processamento dos Compósitos

O processamento dos compósitos de PEAD com 10, 30 e 50%, em massa, de resíduo e também com 5 e 7,5, em massa, de compatibilizante, alternando entre o PE-MA e o ácido esteárico, estão indicados na Tabela 1. Foram produzidos corpos de prova nessas composições para posteriores ensaios.

**Tabela 1:** Composição dos compósitos.

Corpo de prova	Resíduo (%)	Ácido esteárico (%)	PE-MA (%)
C1	10,0	5,0	0,0
C3	30,0	7,5	0,0
C4	50,0	5,0	0,0
C6	10,0	0,0	5,0
C8	30,0	0,0	7,5
C9	50,0	0,0	5,0

### 3.4. Ensaio Mecânicos e Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

No ensaio de flexão seguiu-se a norma ASTM D 790. Realizando-se aMEV nos corpos de prova fraturados.

### 3.5. Análise Termogravimétrica (TGA)

Esta análise foi realizada para avaliar a estabilidade térmica dos compósitos, todas as composições e polímero puro. Para tal, foi utilizado o equipamento NETZSCH STA 409 PC/PG.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

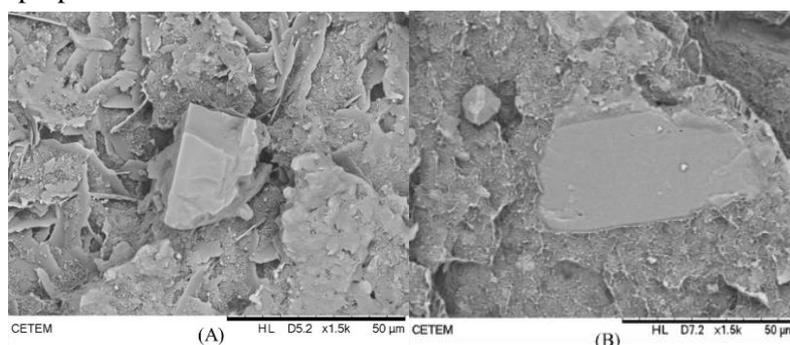
### 4.1. Avaliação de Risco a Saúde Humana

Os elementos químicos analisados que apresentaram teor significativo foram somente: alumínio, bário, boro, cobre, ferro, manganês, selênio, vanádio e zinco. Entretanto, ao serem inseridos esses teores nas planilhas CETESB, nenhum apresentou risco à saúde humana, sendo somente o vanádio um risco para ingestão de água subterrânea a partir da lixiviação do solo. Em relação aos ensaios ecotoxicológicos, o resíduo foi classificado como sem toxicidade.

### 4.2. Resistência Mecânica e MEV

A resistência ao impacto Izod é aumentada à medida que a carga de resíduo é adicionada à mistura. As amostras que apresentavam 10% de resíduo apresentaram 30 J/m e com 50% de resíduo, esse valor aumenta para cerca de 40 J/m, quando se utiliza ácido esteárico como compatibilizante. Já quando se utiliza oPE-MA, a resistência com 10% de resíduo é 35 J/m, chegando a 45 J/m nas amostras com 50% de resíduo, indicando que este compatibilizante favorece a interação resíduo/polímero.

Essa diferença de interação é comprovada nas imagens obtidas pelo MEV (Figuras 1A e B), pois na imagem 1A (onde se utilizou ácido esteárico), verifica-se aderência não uniforme do mineral com o polímero, pois se verificam espaços vazios no entorno do mineral. Já na Figura 1B (contendo PE-MA), nota-se que o mineral está totalmente aderido na matriz, sem espaços vazios, corroborando que esse compatibilizante permite melhor interação resíduo/polímero, que reflete em suas propriedades mecânicas.



**Figura 1A:** MEV amostra C1 (1.500x). **Figura 1B:** MEV amostra C8 (1.500x).

### 4.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

A Figura 2A apresenta as curvas de TGA do polímero puro, do resíduo e dos compósitos com o resíduo mineral. Observa-se inicialmente a diferença do percentual de perda de massa entre o resíduo e o polímero. Enquanto a perda do polímero está em torno de 90%, a do resíduo está em torno de 45%. Dessa forma, a perda de massa dos compósitos está entre esses dois percentuais. Nota-se que as composições C8 e C9 apresentaram os menores percentuais de perda de massa.

A Figura 2A demonstra um leve aumento da temperatura dos compósitos comparado ao do polímero puro, em torno de 50°C. A temperatura de degradação dos compósitos está em torno de 450°C. Este aumento da temperatura indica aumento da estabilidade térmica do material com a adição do resíduo.

Já a Figura 2B mostra a curva DTG das amostras, a qual fornece a primeira derivada da curva TG em função da temperatura. Nesta curva fica evidente os dois picos de degradação, o maior, entre 450 e 500°C, referente ao polímero e o menor, entre 700 e 800°C, referente ao resíduo. As temperaturas na curva DTG estão mais evidentes e corroboram o discutido na curva de TGA.

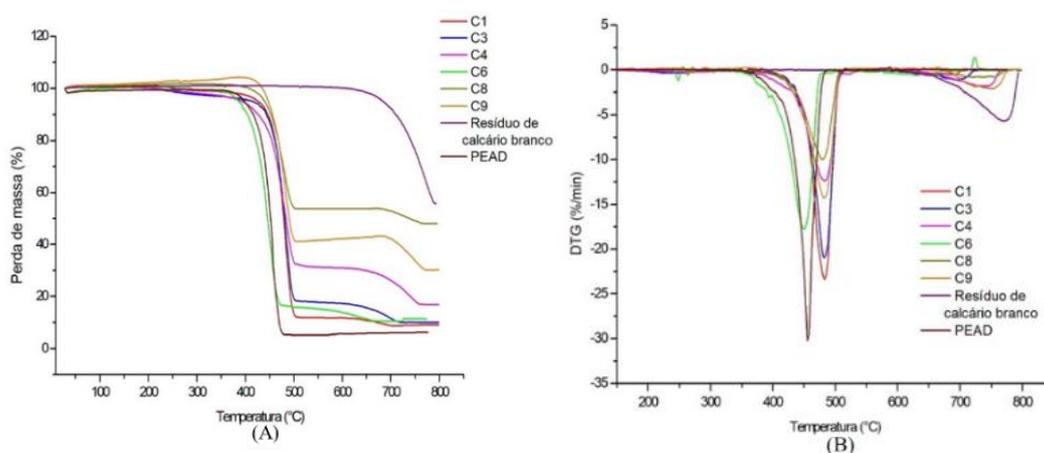


Figura 2A: Curvas de TGA. Figura 2B: Curvas de DTG.

### 4.4. Impressão 3D

Realizou-se a impressão de uma prótese de perna em impressora 3D na Divisão de Desenho Industrial – DVDI do INT, utilizando o compósito com 50,0% de resíduo e 5,0% de PE-MA, pois foram encontradas as melhores condições técnicas.

## 5. CONCLUSÕES

Conclui-se que a aplicação dos resíduos na matriz do polímero permitiu a geração de compósitos com maior resistência mecânica, com estabilidade térmica e sem risco à saúde humana e ecotoxicológico. Além disso, as imagens de MEV, indicaram maior aderência do resíduo com o polímero quando se utilizou PE-MA como compatibilizante. Foi possível gerar uma prótese ortopédica de uma perna infantil, com 50 % de resíduo e 5% de PE-MA, em impressora 3D, com custos mais baixos que as próteses geradas no mercado.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro, ao CETEM e ao INT pela infraestrutura, à D. Sc. Márcia Gomes de Oliveira e ao técnico Maicon Martins do INT.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OMS – Organização Mundial de Saúde, relatórios mundiais de saúde, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 12.713. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda – Método de ensaio com *Daphnia* spp. (Crustacea, Cladocera). Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 12.648. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica – Método de ensaio com algas (Chlorophyceae). Rio de Janeiro, 2011.

ASTM (American Society for Testing and Materials), E1676-04 Standard guide for conducting laboratory soil toxicity or bioaccumulation tests with the lumbricid earthworm *Eisenia fetida* and the enchytraeid potworm *Enchytraeus albidus*. 2004.

ASTM D790 – 17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

CETESB, <http://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/planilhas-para-avaliacao/>, Acessado em janeiro de 2018.

CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009, Ministério Do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2009.

EIRIZ, N.S. e RIBEIRO, R.C.C., Próteses ortopédicas formadas por resíduos de rochas e polietileno de alta densidade (PEAD). In: XXIII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM. Rio de Janeiro (Brasil), 2017.

[www.gazetadopovo.com.br](http://www.gazetadopovo.com.br); acessado em junho de 2018.

SINDIROCHAS, Exportações e Importações de 2017, informativo mensal, [www.sindirochas.com](http://www.sindirochas.com)