

GERAÇÃO DE CORAIS ARTIFICIAIS CONTENDO RESÍDUOS DO BENFICIAMENTO DO CALCÁRIO CARIRI

GENERATION OF ARTIFICIAL CORALS CONTAINING RESIDUES FROM THE PROCESSING OF CARIRI LIMESTONE

Pedro Paulo Cardoso Lima

Graduando em Licenciatura em Física, 8º período, IFRJ
Estagiário CETEM/MCTI, outubro de 2025 até agosto de 2026
pplima@cetem.gov.br

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro

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

RESUMO

Os recifes de corais são estruturas rígidas formadas por organismos marinhos que recobrem um esqueleto de calcário. No entanto, esta rigidez está sendo afetada pelo aumento da temperatura dos oceanos causado pelo aquecimento global que torna o coral frágil, a exploração, o pisoteamento decorrente da visitação, movimentação das embarcações, pesca predatória e até mesmo pelo lixo deixado nessas regiões. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi produzir corais para recompor recifes danificados e melhorar o desenvolvimento da fauna e flora marinha por meio da manufatura aditiva (MA), ou seja, a impressão 3D de uma pasta contendo resíduos oriundos do beneficiamento do Calcário Cariri com percentuais de 0-100% associados com argila comercial com posterior sinterização a 1.000 °C por 1 h como descrito na patente desenvolvida pelo grupo BR 1020240117077. Os corpos de prova foram avaliados por meio de dureza, índices físicos, modelagem molecular e avaliação de risco ambiental antes e após serem submetidos a ambientes marinhos com salinidade de 35%. Os resultados indicaram que a composição com 60% de resíduo e 40% de argila foi a mais adequada, pois obteve valores de dureza de 320 HLD, porosidade de 70% e densidade de 2.600 kg.m⁻³ antes e após submissão a ambiente salino, e foram similares aos valores de um coral verdadeiro. A confecção de corais artificiais utilizando-se resíduos do beneficiamento do Calcário Cariri, que contém também quartzo, permitiu maior estabilidade ao material e manteve a integridade do coral, permitindo novamente a pigmentação. Não foram verificados riscos toxicológicos.

Palavras-chave: Recifes de corais, calcário marinho, impressão 3D.

ABSTRACT

Coral reefs are rigid structures formed by marine organisms that cover a limestone skeleton. However, these corals are being destroyed by the increase in ocean temperatures caused by global warming, which makes the coral fragile, exploitation, trampling resulting from visits, movement of vessels, predatory fishing and even the garbage left in these regions. Thus, the objective of the work was to recompose these coral reefs for the development of marine fauna and flora through additive manufacturing (AM), that is, the 3D printing of a paste containing waste from the processing of Cariri Limestone Marble with percentages of 0-100% associated with different percentages of clay with subsequent sintering at 1,000 °C for 1 h as described in the patent developed by the BR group 10 2024 011707 7. The specimens were evaluated using hardness, physical indexes, color and environmental risk assessment before and after being submitted to a marine environment with salinity of 35%. The results for the composition of 60% marine limestone and 40% clay were similar to those of the natural corals, before and after their exposure to saline environment, with a hardness value of 320 HLD, 70% porosity, and density

of 2,600 kg.m⁻³ before and after exposure in a saline environment were similar to the values of a real coral. The making of artificial corals through 3D printing using waste from the processing of Cariri Limestone Marble also containing quartz, allowed greater stability to the material and maintained the integrity of the coral, allowing pigmentation again. No toxicological risks were verified, and salinity did not affect the artificial coral.

Keywords: Coral reefs, Cariri Limestone Marble waste, 3D printing.

1. INTRODUÇÃO

Os recifes de corais são definidos como estruturas rígidas que resistem à ação das ondas e correntes marinhas e são formados por organismos marinhos que recobrem um esqueleto de calcário (Figura 1A). De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, os recifes de corais são encontrados em mais de 100 países e territórios. No entanto, eles estão sob o implacável estresse do aquecimento causado pelas mudanças climáticas, a pesca excessiva, o desenvolvimento costeiro insustentável e o declínio da qualidade da água. Dessa forma, a perda irrevogável dos recifes de coral é catastrófica (Figura 1B). Uma análise que examinou 10 regiões de recifes de coral ao redor do mundo, mostrou que a destruição dos mesmos está relacionada com o branqueamento causado pelas altas temperaturas da superfície do mar, que transformam o CaCO₃ em CaO e CO₂, não havendo mais interação com as algas zooxantelas que conferem as diferentes cores dos recifes de corais. Além disso, a exploração, o pisoteamento decorrente da visitação, movimentação das embarcações, pesca predatória e até mesmo pelo lixo deixado nessas regiões agravam o problema (Freitas et al., 2012; Correia e Gabler, 2023). Os recifes de coral, tão frágeis e de tamanha importância, estão se acabando e as causas dessas ameaças são difíceis de serem enfrentadas, na medida em que são extremamente difusas, e resultam de todo um paradigma de desenvolvimento. Dessa forma, o desenvolvimento de pesquisas científicas deve ser realizado para sua recuperação (Ribeiro et al., 2024). Nesse contexto, aparece um calcário conhecido comercialmente como Calcário Cariri que é uma rocha da formação Caatinga, de ambiente continental e provém de alteração de calcários de formação salitre, de ambiente marinho. É identificado como mármore quando, além do padrão estético apreciado no Brasil, evidenciam-se as propriedades físicas e tecnológicas do material utilizado como rocha ornamental. Desde a lavra ao beneficiamento estima-se que mais de 80% do material seja considerado resíduo tornando-se um potencial material para recomposição dos corais.



Figura 1A: Recifes íntegros QUI no Unsplash.



Figura 1B: Recifes de corais destruídos (Stock – Focused collection).

2. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi a geração de corais marinhos, por meio de impressão 3D em pasta cerâmica, constituídos por resíduo do beneficiamento do Calcário Cariri e argila comercial do tipo porcelana em diferentes proporções.

3. METODOLOGIA

3.1. Origem dos Materiais

Utilizou-se resíduo de rocha calcária oriundo do Estado do Ceará (Cariri) e uma argila do tipo porcelana, fabricada pela empresa Pascoal.

3.2. Análises Química, Mineralógica

A análise química do resíduo e da argila foi realizada pelo método de Fluorescência de Raio-X. Já a avaliação mineralógica foi realizada por Difração de Raio-X na Coordenação de Análises Químicas e Mineralógicas do CETEM – COAMI.

3.3. Peneiramento a Úmido

O resíduo do beneficiamento do calcário Cariri apresentava tamanho de partículas grosseiras e, por isso, foi peneirado a úmido abaixo de 0,020 mm.

3.4. Confecção dos Corpos de Prova

Foram preparados corpos de prova nas seguintes proporções de resíduo do calcário Cariri argila porcelana (%): 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50, 60/40 e 70/30. Posteriormente, cada um deles foram sinterizados à 1.000°C, como descrito em Ribeiro *et al.*, 2024.

3.5. Caracterização dos Copos de Prova

Avaliou-se a dureza dos corpos de prova após a sinterização, por meio do aparelho portátil digital de impacto LEEB Equotip 550 da marca Proceq. Além disso, determinou-se a porosidade, absorção de água e massa específica dos corpos de prova segundo a norma NBR12766 de 06/2010.

3.6. Ensaio em Condições Salinas

Os corpos de prova foram submetidos em aquários contendo solução salina a 35% (similar a salinidade do mar brasileiro) sob a presença de oxigenação, durante 540h, no Laboratório de Biologia da UERJ e na presença da zooxantela Rosa bengal. Ao final do processo avaliou-se dureza e porosidade, absorção de água e massa específica novamente. Além da verificação da pigmentação.

3.7. Avaliação de Risco Ambiental

Devido a colocação do material em ambiente marinho, foi-se necessária a realização de um estudo de avaliação de risco ambiental para verificação de possível liberação de elementos tóxicos que podem contaminar a flora e a fauna da região. Para tal, utilizaram-se padrões da CETESB, 2001- Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas e US EPA. “*Guidelines for Ecological Risk Assessment*”, 1998.

3.8. Confecção do Coral em Impressão 3D

Após as determinações das melhores condições técnicas e ambientais processou-se o coral na impressora 3D da marca Duraprint 3D, com base na análise tomográfica de um coral verdadeiro no Laboratório de Recuperação Avançada de Petróleo (LRAP) -COPPE UFRJ. O processamento ocorreu quando a pasta na proporção 40% de resíduo e 60% de argila abasteceu a cuba da impressora 3D e a peça desejada foi impressa com condições de temperatura variando de 25 a 30°C, pressão variando de 1,5 a 3 bar, abertura do bico de impressão de 1 a 2 mm, com velocidade de impressão variando de 10 a 20 mm/s, fator de extrusão na faixa de 25 a 35%, densidade variando de 0 a 15% e altura de camada de deposição na faixa de 0,9 a 1,5 mm como indicado na Figura 3.



Figura 2: Ensaio em aquários UERJ (água salgada 35% p/v).

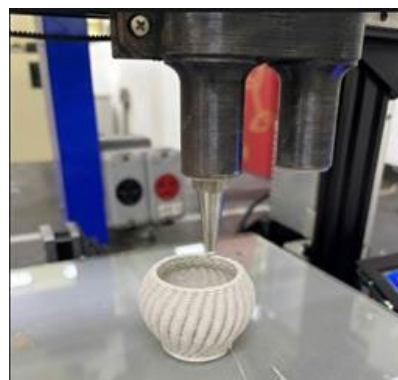


Figura 3: impressão 3D do coral.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análises Química (FRX) e Mineralógica (DRX)

Os resultados de FRX indicaram que o calcário apresenta em média 50% de CaO, 2%SiO₂, 5% MgO e 43% de perda por calcinação. Já a argila comercial apresenta 55% de SiO₂, 30% de Al₂O₃, 5% de Na₂ e 10% de perda por calcinação. Os resultados de DRX indicaram a presença majoritária de calcita para o resíduo e traços de quartzo e dolomita e a argila apresenta picos de caulinita, albita, quartzo, muscovita e vermiculita.

4.2. Avaliação Colorimétrica

O resíduo grosseiro apresenta valor de luminosidade (L) de 52,04° e à medida que o tamanho de partícula diminui os valores de L aumentam para 70,07° em 0,044 mm, 76,14° em 0,025 mm, 75,27° acima de 0,02 mm e abaixo de 0,020 para 80,50°, valor este muito similar ao coral original do fundo do mar que apresenta valor de L de 81,26, indicando ser a fração mais adequada para utilização.

4.3. Avaliação dos Corpos de Prova

A Figura 4 apresenta os resultados da dureza das amostras em função do percentual de resíduo, antes e após submissão a ambiente salino. Verifica-se que a dureza do corpo de prova sem resíduo é de 466 HLD (material rico em SiO₂) e à medida que se adicionam percentuais de calcário a dureza se reduz gradativamente, chegando-se a em torno de 200 HLD com 100% de resíduo. Porém, comprando-se com um coral marinho que apresenta dureza de 210 HLD, todos os corpos de prova encontram-se adequados para utilização. Isso ocorre, pois na composição do resíduo de rocha não há apenas calcita, mas também quartzo, como observado na difração de raios-X, o que permite a geração de um coral artificial mais resistente que o coral real. Além disso, há que se observar que as condições salinas não afetaram a dureza dos compósitos.

4.4. Porosidade e Densidade

A Figura 5 apresenta os resultados da porosidade das amostras em função do percentual de resíduo de rocha onde se verifica uma porosidade em torno de 35% para amostra isenta de calcário e à medida que se aumenta o percentual de resíduo a porosidade aumenta, chegando-se a cerca de 80%, valor este similar à de um coral real. Já na Figura 6, observam-se os resultados de densidade e verifica-se pouca variação da mesma, principalmente porque caulinita, presente na argila, e calcário tem densidades muito similares (~2.600 kg.m⁻³). A salinidade não afetou a porosidade nem a densidade dos CPs.

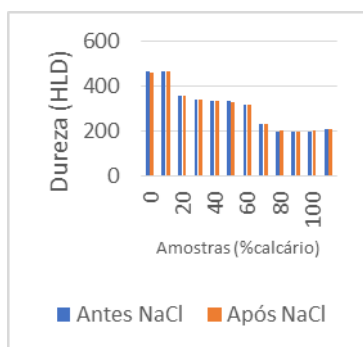


Figura 4: Dureza (HLD).

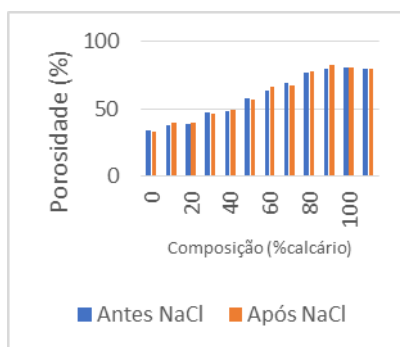


Figura 5: Porosidade dos CPs (%).

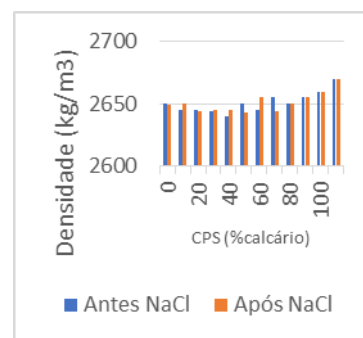


Figura 6: Densidade (kg.m⁻³).

4.5. Avaliação de Risco Ambiental

Os resultados indicaram que não há elementos tóxicos sendo liberados pelos novos corais produzidos e submetidos ao ambiente salino. Pôde-se verificar também que após a colocação das algas zooxantelas em contato com os corais houve pigmentação rosa nos mesmos.

4.6. Confeção do Coral

Na Figura 7 encontra-se a avaliação tomográfica de um coral verdadeiro que serviu de base para geração de melhores parâmetros de impressão com tamanho de camada de 1 mm, 5% de preenchimento retilíneo e extrusão de 1 mm, utilizando 40%, me massa de calcário marinho e 60% de argila, como pode ser observado na Figura 8.

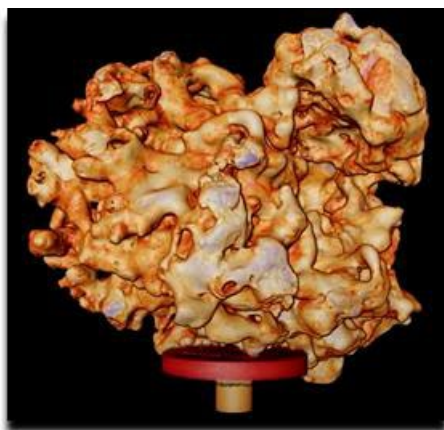


Figura 7: Análise tomográfica do coral verdadeiro.



Figura 8: Coral gerado em impressora 3D.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que é possível gerar corais artificiais com composição contendo 60% de resíduos do beneficiamento do Mármore Bege Bahia, com tamanho de partícula inferior a 0,020 mm, com luminosidade superior a 80°; e 40% de argila, baseado nas condições de processamento descritas na patente BR 1020240117077. Com essa proporção obtiveram-se valores de dureza de 320 HLD, porosidade de 70% e densidade de 2.600 kg.m⁻³ antes e após submissão a ambiente salino e foram similares aos valores de um coral verdadeiro do fundo do mar. Após a confecção de corais artificiais por meio de impressão 3D utilizando-se resíduo contendo também quartzo, este permitiu maior estabilidade ao material e manteve a integridade do coral, permitindo novamente a pigmentação por partes das algas que entraram em contato com os mesmos, tornando-os rosa. Não foram verificados riscos toxicológicos e a salinidade não afetou o coral artificial.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CETEM pela infraestrutura, aos colegas do Lacon, ao Instituto de Biologia da UERJ e à Fundação financiadora do estágio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR12766 de 06/2010 - Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente

CORREIA, A. R. L., E GABLER, B. C. (2023). Recifes de corais e os impactos da ação antropogênica. Revista Multidisciplinar Do Nordeste Mineiro, 4(1). Recuperado de <https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/1000>

FREITAS, L. M.; OLIVEIRA, M. D. M. e KIKUCHI, R. K.P., (2012). Os mecanismos de sobrevivência dos corais diante do impacto das mudanças climáticas sobre o ecossistema de recifes, Cadernos de Geociências, v. 9, n. 2.

RIBEIRO, R. C. C.; RIBEIRO, M. L.; CONCEIÇÃO, M. N. E CASTRO, N. F., (2024). Geração de corais artificiais utilizando pasta de resíduos minerais por meio de impressão-3d em pasta, depósito de pedido de privilégio de invenção nº BR 10 2024 011707 7 no INPI em, 12 de junho de 2024.

US EPA Guidelines for Ecological Risk Assessment, (1998). USEPA EPA/630/R095/002F. U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, Washington, DC, 175 pp.