

# Série Tecnologia Ambiental

## **Produção de piso gerador de energia constituído por resina e resíduos do mármore Bege Bahia**

**Roberto Carlos da Conceição Ribeiro  
Lucas Marques Palermo de Aguiar  
Williane Gomes de Figueiredo  
Pedro Paulo Cardoso Lima  
Marceli Nascimento da Conceição  
Henriette Santos Branco  
José Marcos do Rosário Barreira  
Ana Clara Soares**



## **SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Produção de piso gerador de energia constituído por resina e resíduos do mármore Bege Bahia**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Luiz Inácio Lula da Silva**

Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**

**Luciana Santos**

Ministra de Estado

**Luis Manuel Rebelo Fernandes**

Secretário Executivo

**Isa Assef dos Santos**

Subsecretária de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Silvia Cristina Alves França**

Diretora

**Robson Araujo D’Avila**

Coordenador de Administração - COADM

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

**Paulo Fernando Almeida Braga**

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

**Marisa Nascimento**

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

**Leonardo Luiz Lyrio da Silveira**

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

# SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

STA - 141

## **Produção de piso gerador de energia constituído por resina e resíduos do mármore Bege Bahia**

**Roberto Carlos da Conceição Ribeiro**

Engenheiro Químico, D.Sc., Pesquisador do CETEM/MCTI

**Lucas Marques Palermo de Aguiar**

Bolsista de Iniciação Científica – CETEM/MCTI

**Williane Gomes de Figueiredo**

Bolsista de Iniciação Científica – CETEM/MCTI

**Pedro Paulo Cardoso Lima**

Bolsista de Iniciação Científica – CETEM/MCTI

**Marceli Nascimento da Conceição**

Engenheira Química, D.Sc., bolsista PCI do CETEM

**Henriette Santos Branco**

Arquiteta, D.Sc., pesquisadora colaboradora CETEM

**José Marcos do Rosário Barreira**

Engenheiro de Materiais, D.Sc., pesquisador colaborador CETEM

**Ana Clara Soares**

Engenheira de Materiais, D.Sc., pesquisadora colaboradora CETEM

**CETEM/MCTI**

2025

# SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

**Editor:** Luis Gonzaga Santos Sobral

**Subeditor:** Andréa Camardella de Lima Rizzo

**CONSELHO EDITORIAL:** Saulo Rodrigues P. Filho (UNB), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánches (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG), Luís Alberto Dantas Barbosa (UFBA), Ricardo Melamed (UNB), Marcello F. Veiga (University of British Columbia-Canadá), Bruce Marshall (University of British Columbia-Canadá).

Não existe uma definição única que se enquadre na ampla diversidade que o tema “Tecnologias Ambientais” abrange. Em primeiro lugar, o campo das Tecnologias Ambientais é caracterizado por um alto grau de diversidade e heterogeneidade. Em geral, o termo é usado para incluir tecnologias e aplicações que supostamente ajudam a reduzir o impacto negativo da atividade industrial e dos serviços, de usuários privados ou públicos, no meio ambiente. O conceito se refere, normalmente, a tecnologias “no final do processo” (end-of-pipe) integradas a tecnologias limpas e de recuperação de áreas contaminadas. No entanto, também pode abranger questões de sentido mais amplo, como monitoramento, medição, mudança de produtos ou gerenciamento de sistemas ambientais. As tecnologias ambientais são, portanto, de natureza interdisciplinar e podem ser aplicadas em qualquer etapa da cadeia produção-consumo. Tendo isso em mente, a *Série de Tecnologia Ambiental* tem por objetivo congrega especialistas, tais como: pesquisadores, tecnologistas, professores etc., do CETEM em particular, para que divulguem suas pesquisas em áreas tão diversas para servirem como estímulo para os novos e futuros pesquisadores.

There is no single definition that fits the wide diversity that the theme “Environmental Technologies” covers. First, the field of Environmental Technologies is characterized by a high degree of diversity and heterogeneity. In general, the term is used to include technologies and applications that are supposed to help reduce the negative impact of industrial activities and services, by private or public users, on the environment. The concept usually refers to technologies “at the end of the process” (end-of-pipe) integrated with clean technologies and recovery of contaminated areas. However, it can also cover broader issues such as monitoring, measuring, changing products or managing environmental systems. Environmental technologies are, therefore, of an interdisciplinary nature and can be applied at any stage of the production-consumption chain. Bearing this in mind, the “Environmental Technology Series” aims at bringing together specialists, such as: researchers, technologists, professors etc., from CETEM in particular, to disseminate their research in such diverse areas to serve as a stimulus for new and future researchers.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Copyright © 2025 CETEM/MCTI

Todos os direitos reservados.  
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação de copyright (Lei 5.988)

Valéria Cristina de Souza  
Diagramação e Editoração Eletrônica

André Luiz Costa Alves  
Projeto Gráfico

Informações:  
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
Homepage: [www.cetem.gov.br](http://www.cetem.gov.br)

#### CIP – Catalogação na Publicação

P964

Produção de piso gerador de energia constituído por resina e resíduos do mármore  
Bege Bahia / Roberto Carlos da Conceição Ribeiro / [et al.]. – Rio de Janeiro:  
CETEM/MCTI, 2025.

47 p. - (Série Tecnologia Ambiental; 141).

ISBN 978-65-5919-067-6.

1. Rochas ornamentais. 2. Mármore Bege Bahia – resíduos. 3. Geração de  
Energia. 4. Piezoelétrico. I. Ribeiro, Roberto Carlos da Conceição. II. Aguiar,  
Lucas Marques Palermo. III. Figueiredo, Williane Gomes. IV. Lima, Pedro Paulo  
Cardoso. V. Conceição, Marceli Nascimento. VI. Branco, Henriette Santos.  
VII. Barreira, José Marcos do Rosário. VIII. Soares, Ana Clara. IX. Centro de  
Tecnologia Mineral. X. Série.

CDD 552.4

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI  
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

# SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	10
1   INTRODUÇÃO	13
1.1   Produção da Rochas Onamentais	13
1.2   Mármore Bege Bahia	14
1.3   Geração de Resíduos	15
1.4   Sistema de Britagem	21
1.5   Pisos Geradores de Energia	22
2   OBJETIVO	24
3   METODOLOGIA	25
3.1   Materiais	25
3.2   Geração de Corpos de Prova	26
3.3   Ensaio de Índices Físicos	27
3.4   Determinação de Dureza Superficial	27
3.5   Ensaio de Cor e Brilho	29
3.6   Ensaio da Tensão Produzida por Pastilhas de 25mm e 35 mm	29
3.7   Montagem do Circuito	30
3.8   Software Utilizado	31
3.9   Protótipo	32
4   RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1   Corpos de Prova Gerados	34
4.2   Índices Físicos	34

4.3   Dureza	36
4.4   Cor e Brilho	36
4.5   Avaliação dos Diâmetros das Pastilhas Piezo	38
4.6   Geração do Piso Final - Protótipo	39
5   CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44



## RESUMO

Desde a lavra ao beneficiamento do Mármore Bege Bahia são gerados resíduos sem valor comercial e a utilização desse material na produção de rochas aglomeradas artificialmente permite a fabricação de pisos e um novo subproduto ao setor. Porém, não obstante a produção apenas de uma rocha artificial surge um dos grandes papéis do estudo de engenharia elétrica que é buscar fontes renováveis que se mostrem suficientemente eficientes para conseguir abastecer a demanda energética atual. Materiais piezoelétricos têm sido estudados como uma possível forma de geração de energia e o objetivo desse trabalho foi associar esse sistema piezo entre a rocha artificial formada com resíduo do Mármore Bege Bahia e a tela de entelamento para geração de energia quando pisada. Para tal, os resíduos grosseiros, provenientes da etapa de extração, foram submetidos a um processo de cominuição em britador com abertura de 1,0 e 0,5 mm, BB1,0 e BB0,5, respectivamente. Foram produzidas diferentes composições granulométricas variando o percentual de BB1,0, BB0,5 e resíduo fino (BBf), mantendo o percentual mássico de resíduo em 90% e 10% da resina epoxídica. Foi determinada a dureza superficial (HDL), porosidade e absorção de água além da análise colorimétrica de todas as amostras. As amostras com maior compactação apresentaram as seguintes variações na granulometria: 40 a 60% para BB1,0, 25 a 35% para BB0,5 e 15 a 25% para BBF. Os resultados de dureza indicaram valores de 500 HLD, muito semelhantes aos de uma rocha sã. Além disso, foram observados valores máximos de porosidade de 0,08% e de absorção de água de 0,04%, também próximos aos de uma rocha sã. Entre a rocha e a tela de entelamento traseiro foi montado um circuito contendo pastilhas piezoelétricas em conjunto com o microcontrolador Arduino Uno, aderido à base da rocha artificial formada com resíduos do Mármore Bege Bahia. Desse modo, o sinal gerado pelo piezo era enviado para o Arduino, visando processá-lo e posteriormente

alimentar os LEDs por meio da sua própria alimentação interna. Assim, mantendo-se uma taxa constante de energia pôde-se realizar o acendimento das luzes à medida que se exercia uma força normal ao piso.

**Palavras-chave**

Resíduos do mármore Bege Bahia, geração de energia, piezoelétrico.

## ABSTRACT

From the mining to the processing of Bahia Beige Marble, waste with no commercial value is generated, and the use of this material in the production of artificially agglomerated rocks allows the manufacture of flooring and a new byproduct for the sector. However, despite the production of only an artificial rock, one of the major roles of the study of electrical engineering arises, which is to seek renewable sources that prove to be sufficiently efficient to supply the current energy demand. Piezoelectric materials have been studied as a possible form of energy generation and the objective of this work was to associate this piezo system between the artificial rock formed with residue from Bahia Beige Marble and the covering screen to generate energy when stepped on. For this purpose, the coarse residues from the extraction stage were subjected to a comminution process in a crusher with openings of 1.0 and 0.5 mm, BB1.0 and BB0.5, respectively. Different granulometric compositions were produced by varying the percentage of BB1.0, BB0.5 and fine residue (BBf), maintaining the mass percentage of residue at 90% and 10% of the epoxy resin. The surface hardness (HDL), porosity and water absorption were determined in addition to the colorimetric analysis of all samples. The samples with higher compaction presented the following variations in granulometry: 40 to 60% for BB1.0, 25 to 35% for BB0.5 and 15 to 25% for BBF. The hardness results indicated values of 500 HLD, very similar to those of an original rock. In addition, maximum porosity values of 0.08% and water absorption of 0.04% were observed, also close to those of a healthy rock. A circuit containing piezoelectric tablets was assembled between the rock and the rear wedging screen, together with the Arduino Uno microcontroller, adhered to the base of the artificial rock formed with waste from Bahia Beige Marble. In this way, the signal generated by the piezo was sent to

the Arduino, in order to process it and subsequently power the LEDs through its own internal power supply. Thus, maintaining a constant energy rate, it was possible to turn on the lights as a normal force to the floor was exerted.

**Keywords**

Bahia Beige Marble waste, power generation, piezoelectric.



## 1 | INTRODUÇÃO

### 1.1 | Produção das Rochas Ornamentais

A produção e o consumo de rochas ornamentais no Brasil apresentaram crescimento notável nas últimas décadas, impulsionados pela sua ampla utilização em revestimentos externos de prédios, pisos, paredes, mesas, pias, entre outros. O processo de extração dessas rochas começa nas pedreiras, onde os blocos são retirados por cortes realizados com fios diamantados. Posteriormente, esses blocos são encaminhados às serrarias para beneficiamento e geração das chapas finais. Nesse contexto, a Bahia se destaca como o terceiro maior produtor de rochas ornamentais do Brasil, possuindo a mais completa diversidade de cores do país, incluindo as renomadas rochas azuis, além de mármore, granitos, arenitos e conglomerados. Entre os materiais mais reconhecidos está o calcário comercialmente conhecido como Bege Bahia, um material abundante na região do rio Salitre. Essa rocha é tipificada na formação Caatinga, de ambiente continental, e é identificada como mármore quando, além do seu apreciado padrão estético, demonstra propriedades físicas e tecnológicas adequadas para utilização como rocha ornamental (VIDAL et al., 2019; RIBEIRO, 2022).

Caracterizada por sua tonalidade bege, além de pequenos grãos de quartzo e uma aparência brechóide, quando a rocha é composta por fragmentos consolidados. Conforme mencionado por Vasconcelos et al. (2009), o Mármore Bege Bahia é encontrado em localidades como Campo Formoso, Mirangaba, Umburanas, Jacobina e Orolândia, no interior do Estado da Bahia, sendo este

último o principal centro de exploração, responsável por aproximadamente 90% da produção. No entanto, desde a lavra ao beneficiamento, mais de 80% em massa do material processado é resíduo, sendo estocado em aterros nas cidades.

## 1.2 | Mármore Bege Bahia

Segundo Frasca et al. 2025, o Mármore Bege Bahia é um tipo de pedra natural incomum e um recurso mineral e econômico vital de Orolândia, município do Estado da Bahia, Nordeste do Brasil, que é explorado desde a década de 1960. Geologicamente, trata-se de um calcrete, calcário pedogênico quaternário, pertencente à Formação Caatinga, idade Pleistocênica. Foi formado pela dissolução *in situ* de carbonato e reprecipitação do calcário marinho da Formação Salitre Neoproterozóica após alteração química, física e biogênica em um ambiente árido/semiárido. Esses processos resultaram em um calcário de tom claro, estruturalmente semelhante a uma brecha, caracterizado por um arranjo heterogêneo de fragmentos calcários em uma matriz de micrita, tipicamente exibindo cavidades irregulares e centimétricas com cristais de calcita cobrindo suas paredes, lembrando geodos. O Bege Bahia possui boas características tecnológicas para sua utilização como pedra natural, e os tons terrosos e os padrões distintos – principalmente a presença generalizada de cavidades – conferem a este calcário bege claro único um aspecto visual semelhante ao do travertino. Por isso, também é nomeado e comercializado como “Travertino Nacional” ou “Travertino Brasileiro”. Por isso, têm sido utilizadas inúmeras vezes desde meados do século XX em design de interiores, pisos e revestimentos de residências e em fachadas e colunas de edifícios modernos em todo o país. Abrange também importantes edifícios

do patrimônio brasileiro, como o Supremo Tribunal Federal em Brasília, capital do Brasil. As características geológicas e tecnológicas do calcrete Bege Bahia, somadas à sua importante contribuição para a sustentabilidade social e econômica da região de Ourolândia, e para o setor de pedras naturais brasileiro, mostram sua importância como pedra patrimonial. Além disso, a área de ocorrência de calcretes na região de Ourolândia é de importância no âmbito da geoconservação devido aos seus significativos sistemas cársticos desenvolvidos nas Formações Salitre e Caatinga com relevantes sítios espeleológicos e paleontológicos.

### 1.3 | Geração de Resíduos

Desde a lavra até o beneficiamento, mais de 70% do material extraído se torna resíduo, sendo estocado em aterros locais (Figuras 1 a 10). Esse alto índice de desperdício representa um grave problema ambiental que necessita de soluções sustentáveis. Dessa forma, com o crescimento da população global e o aumento das preocupações ambientais, torna-se essencial aproveitar os resíduos (RIBEIRO et al. 2023), estocados em aterros, transformando-os em produtos que possam ser reintroduzidos no mercado, alinhando-se, assim, com os princípios da economia circular. Uma alternativa promissora e de alto potencial econômico para as indústrias de rochas em um mercado globalizado e competitivo é a produção de placas de rochas aglomeradas artificialmente, utilizando resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais e uma pequena quantidade de resina polimérica.





**Figura 1:** Disposição de resíduos do mármore Bege Bahia.



**Figura 2:** Tanques de retenção de resíduos.



**Figura 3:** Disposição de resíduos do mármore Bege Bahia.



**Figura 4:** Disposição de resíduos do mármore Bege Bahia.



**Figura 5:** Disposição de resíduos do mármore Bege Bahia.



**Figura 6:** Blocos considerados resíduos.



**Figura 7:** Pilhas de blocos residuais.



Fonte: M.H.B.O.F, 2024.

**Figura 8:** Estoque de resíduos de blocos.





Fonte: M.H.B.O.F, 2024.

**Figura 9:** depósito de resíduos de blocos e cascalhos.



Fonte: M.H.B.O.F, 2024.

**Figura 10:** Vista geral de um empreendimento cercado por resíduos.

## 1.4 | Sistema de Britagem

Muitas empresas da região, com a preocupação cada vez mais acentuada acerca da geração de resíduos, têm instalado em suas unidades, sistemas de britagem (Figura 11) para cominuição dos resíduos grossos gerando um novo subproduto.

Parte do resíduo passa por um processo de britagem, o qual destina-se a reduzir o tamanho das maiores rochas em menores agregados de diferentes tamanhos que, posteriormente, serão destinados a setores de construção civil, aumentando o lucro dessas empresas, mitigando-se, assim, o impacto ambiental e corroborando, cada vez mais, que as empresas do setor estão se modernizando e se adequando para minimização de resíduos transformando-os em subprodutos auxiliando, assim, na melhoria das condições ambientais e da circularidade do Bege Bahia e seus resíduos dentro da cadeia produtiva.



Fonte: M.H.B.O.F, 2024.

**Figura 11:** Britagem do Mármore Bege Bahia.

## 1.5 | Pisos Geradores de Energia

Uma alternativa promissora e economicamente viável para a indústria de rochas ornamentais é a produção de placas de rochas aglomeradas artificialmente. Essa técnica consiste em utilizar resíduos da indústria de rochas ornamentais, combinados com uma pequena quantidade de resina polimérica, para formar chapas com propriedades mecânicas superiores às das rochas naturais. Essas placas apresentam baixa porosidade e absorção de água reduzida, tornando-se altamente adequadas para revestimentos de pisos e paredes.

Um dos grandes papéis do estudo de engenharia elétrica é buscar fontes renováveis que se mostrem suficientemente eficientes para conseguir abastecer a demanda energética atual. Para alcançar esse objetivo, diversas formas de geração de energia como a eólica, solar, hidrelétrica, são constantemente aprimoradas e estudadas, visando aumentar cada vez mais sua eficiência. Nesse cenário, a procura por novas formas de geração de energia também se mostra crucial para se resolver a questão energética global. Tendo em vista isso, materiais piezoelétricos têm sido estudados como uma possível forma de geração de energia em pequena e média escala. O uso de cristais piezos não são recentes no mundo da eletrônica, já fazendo parte de diversos circuitos para sensoramento, sendo importantes, sobretudo, na detecção de vibrações, variação de pressão e deformação sobre o material (SODANO et al., 2003; KIM, 2022 e SAFAEI et al., 2019). Todavia, explorar sua capacidade para geração de energia a ser consumida por diversos tipos de cargas é um estudo que teve como objetivo esse trabalho. Montar circuitos contendo pastilhas piezoelétricas em conjunto com o microcontrolador Arduino Uno, aderido à base da rocha artificial formada com resíduos do Mármore Bege Bahia permite que o sinal seja gerado pelo piezo e

enviado para o Arduino, visando processá-lo e posteriormente alimentar os LEDs por meio da sua própria alimentação interna. Assim, mantendo-se uma taxa constante de energia pode-se realizar o acendimento das luzes à medida que se exerce uma força normal sobre o piso.

Devido à sua baixa porosidade e baixa absorção de água, a rocha artificial apresenta propriedades mecânicas superiores às das rochas naturais, tornando-as mais adequadas para revestimento de paredes e pisos (LEE et al., 2008). Dessa forma, associar um sistema piezoelétrico a essas rochas pode ser uma maneira de gerar energia a partir da força exercida pela pisada, proporcionando economia na conta de luz para quem as adquirir.



## 2 | OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi utilizar o resíduo da lavra e do beneficiamento do Mármore Bege Bahia, em diferentes tamanhos de partículas, para a fabricação de pisos de rocha aglomerada artificial com resina epoxídica. Além disso, buscou-se a integração de cristais piezoelétricos aderidos a essas rochas, entre o sistema de entelamento, utilizando o microcontrolador Arduino Uno, na geração de energia elétrica a partir da pressão exercida pela pisada no material.

### 3 | METODOLOGIA

#### 3.1 | Materiais

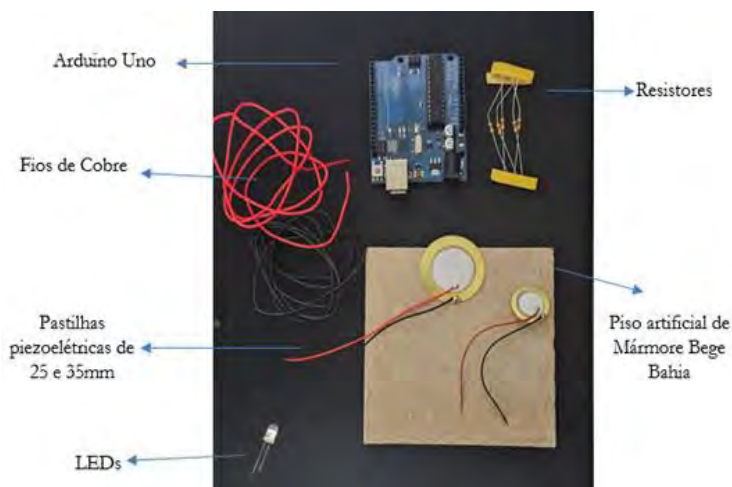
Os resíduos utilizados foram provenientes da lavra e beneficiamento do Mármore Bege Bahia da cidade de Ourolândia, como indica a Figura 12.



**Figura 12:** Localização da região de Ourolândia – BA.

Os resíduos advindos da extração foram separados em três partes. Duas porções desse resíduo foram fragmentados na britadeira denominada como ESSA, com abertura de aproximadamente 1,0

(BB1,0) e 0,5 cm (BB0,5), dando origem a duas variações granulométricas. A terceira porção desse resíduo, denominada como fino (F), foi proveniente do tear multifio do corte de chapas. A resina utilizada foi a epoxídica da marca *Epoxyfiber* na proporção de 1:2 do agente catalisador. Além disso, foram utilizadas pastilhas piezoelétricas, de diâmetros de 25 e 35mm, um microcontrolador Arduino, periféricos eletrônicos, para elaboração dos circuitos como resistores e fios de cobre como, indicado na Figura 13.



**Figura 13:** Materiais usados na produção do piso gerador de energia.

### 3.2 | Geração de Corpos de Prova

Foram utilizadas diferentes proporções de rocha com granulometria variada e diferentes proporções de resina com o objetivo de encontrar a melhor compactação e menor quantidade de resina (R). Na Tabela 1 podem ser observadas 29 combinações.

A produção das rochas aglomeradas envolveu a mistura dos resíduos com resina epóxi. Inicialmente, foram testadas diferentes proporções de resina até que, ao final do processo, foi possível fixar-se a utilização de 10% de resina em relação ao peso dos resíduos, com o objetivo de testar amostras com menor quantidade de resina. A mistura foi, então, inserida em um recipiente e homogeneizada manualmente. Posteriormente, o material foi deixado em repouso para permitir a secagem natural da resina.

### 3.3 | Ensaio de Índices Físicos

Para determinar a porosidade, absorção de água e densidade específica dos corpos de provas, utilizou-se a norma NBR 15845-2. A norma estabelece tempos mínimos de saturação (48 horas) e secagem (24 horas) até se alcançar massa constante, e uma temperatura de secagem de 70 °C no procedimento experimental, para todos os tipos de rochas.

### 3.4 | Determinação de Dureza Superficial

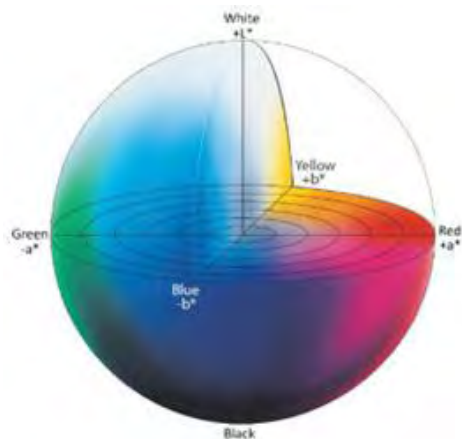
O ensaio de dureza foi conduzido utilizando um durômetro portátil, da marca *Equotip 3*. Este teste foi realizado em dez pontos diferentes no corpo de prova para garantir uma avaliação mais precisa. A escala utilizada HLD (*Leeb Hardness Scale*) é um método de medição de dureza dinâmica que examina a resistência de um material à deformação por impacto.

**Tabela 1:** Composição de cada amostra em percentual mássico.

Amostra	BB1,0	BB0,5	F	R	Amostra	BB1,0	BB0,5	F	R	Amostra	BB1,0	BB0,5	BBF	R
1	-	-	100	15	11	80	20	-	20	21	60	20	20	8
2	-	-	100	20	12	90	10	-	20	22	65	15	15	10
3	-	100	-	10	13	-	90	10	10	23	65	15	15	15
4	-	100	-	15	14	-	90	10	20	24	40	30	30	10
5	-	100	-	20	15	-	90	10	25	25	45	35	20	10
6	-	100	-	25	16	-	95	5	10	26	50	25	25	10
7	60	40	-	15	17	-	95	5	25	27	60	20	20	10
8	60	40	-	20	18	30	50	20	10	28	60	20	20	9
9	70	30	-	15	19	40	40	20	10	29	60	25	15	10
10	70	30	-	20	20	60	25	15	15					

### 3.5 | Ensaio de Cor e Brilho

O ensaio para determinar a coloração média dos corpos de prova foi realizado utilizando um colorímetro *Sphere Gloss* da marca BYK. O uso desse equipamento possibilitou a obtenção de valores para os componentes de cor nos eixos a, b e L, bem como para o brilho (G), como representa a Figura 14.

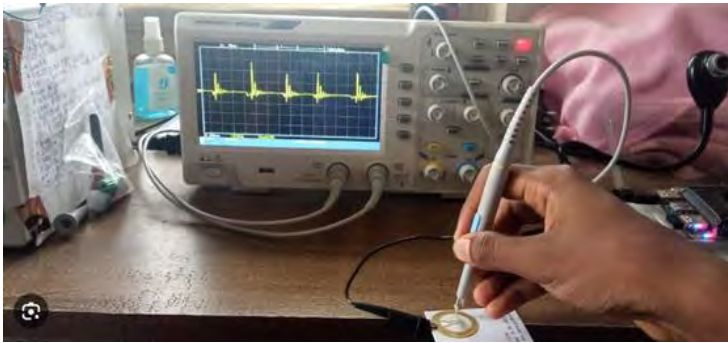


**Figura 14:** Distribuição colorimétrica, padrões L, a e b.

### 3.6 | Ensaio da Tensão Produzida por Pastilhas de 25mm e 35mm

O primeiro passo, anterior à montagem dos circuitos, foi avaliar se a diferença em diâmetro das pastilhas piezoelétricas afetava a eficiência para conversão eletromecânica de energia. Para isso, foi montado um esquema de conexão com um osciloscópio e cada pastilha (Figura 15), visando identificar se havia uma relação entre o tamanho da pastilha piezoelétrica e o pico de tensão produzido. Na ausência de prensa, para controlar a pressão aplicada com

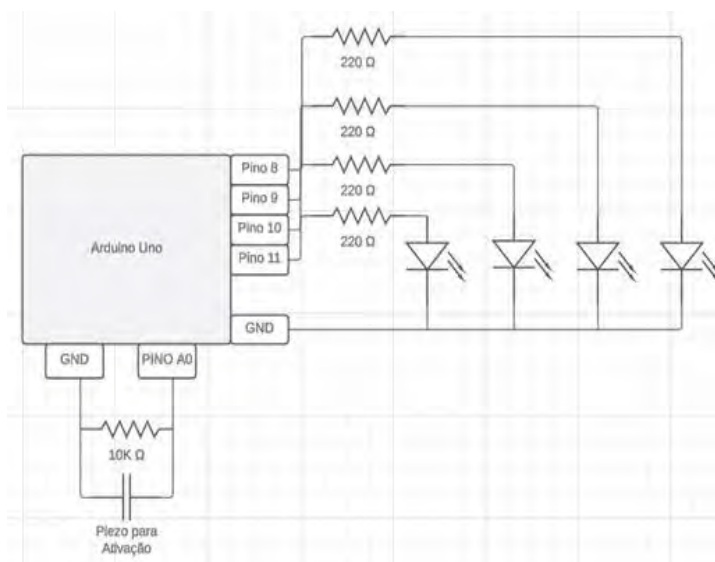
precisão, foram realizadas 100 medições de tensão para o pisar de um mesmo indivíduo. O número grande de medições teve como objetivo principal reduzir o erro presente na variação de pressão aplicada e tentar obter um resultado médio mais fidedigno para ser feita a comparação.



**Figura 15:** Circuito para medição da tensão produzida por cada pastilha.

### 3.7 | Montagem do Circuito

Para fazer a montagem de um circuito, que se baseava na emissão de sinal de um piezo para acionar o sistema de iluminação, utilizou-se o microcontrolador Arduino Uno e outros componentes eletrônicos, tais como resistores e fios de cobre. Desse modo, o sinal gerado pelo piezo era enviado ao microcontrolador, que por sua vez foi responsável por analisar esse sinal e posteriormente realizar a alimentação dos LEDs, resultando uma taxa constante de energia capaz de manter as luzes acesas (Figura 16).



**Figura 16:** Esquema eletrônico do circuito piezoelétrico.

### 3.8 | Software Utilizado

Para podermos controlar os diversos pinos digitais e analógicos do Arduino, foi usado o software *Vscode* para ser escrito um código em C++ (Figura 17). Dessa forma, o objetivo do código era ser capaz de interpretar um determinado valor de tensão da pastilha fazendo uso de um limiar de sinal recebido. Assim, pôde-se ter certeza de que a energia recebida não era proveniente de ruídos que poderiam impactar o piezo, mas de uma pisada para, de fato, ser ativado o circuito de iluminação. Após essa verificação do sinal recebido, os pinos digitais do Arduino iriam energizar os LEDs conectados no terminal do controlador acendendo um de cada vez em um intervalo de 500ms, simulando a utilização do circuito para acendimento das luzes de uma escadaria.



```

int tempoAtual = 0;
int tempoAnterior = 0;

int limiar = 400;

void desligarLEDs() {
    digitalWrite(PINO_LED1, LOW);
    digitalWrite(PINO_LED2, LOW);
    digitalWrite(PINO_LED3, LOW);
    digitalWrite(PINO_LED4, LOW);
}

void ligarLEDs() {
    tempoAtual = millis();
    while (millis() - tempoAtual < 1000) {
        digitalWrite(PINO_LED1, HIGH);
        if (analogRead(PINO_SENSOR_DESATIVAR) > limiar) {
            desligarLEDs();
            return; // Retorna para o loop
        }
        delay(50); // Delay para Estabilizar a leitura do sensor
    }

    tempoAtual = millis();
    while (millis() - tempoAtual < 1000) {
        digitalWrite(PINO_LED2, HIGH);
        if (analogRead(PINO_SENSOR_DESATIVAR) > limiar) {
            desligarLEDs();
            return; // Retorna para o loop
        }
        delay(50); // Delay para estabilizar a leitura do sensor
    }

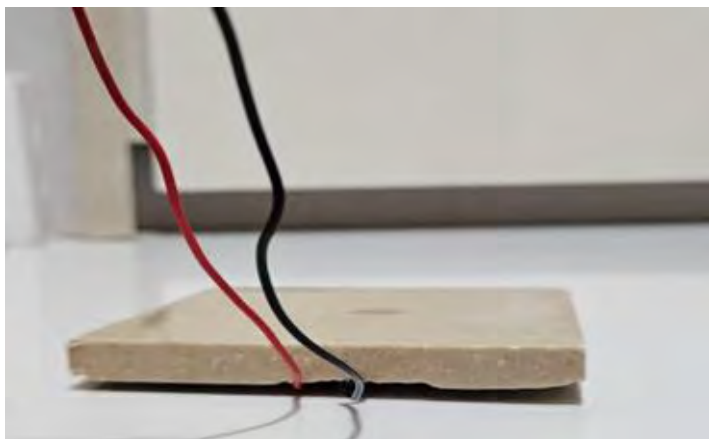
    tempoAtual = millis();
    while (millis() - tempoAtual < 1000) {
        digitalWrite(PINO_LED3, HIGH);

```

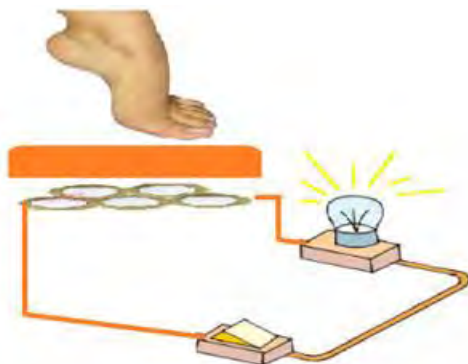
Figura 17: Pequeno recorte do código elaborado.

### 3.9 | Protótipo

Montou-se um protótipo do piso contendo o circuito com a quantidade de pastilhas adequadas na parte inferior (Figura 18) e, à medida que as pessoas exercerem uma força normal ao piso, o sistema gera o sinal elétrico (Figura 19). Tal circuito foi interligado a uma maquete que representa um sistema de casas onde as lâmpadas se acendem com o estresse mecânico aplicado ao piso material.



**Figura 18:** Piso com a pastilha.



**Figura 19:** Geração de energia pela força da pisada.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 | Corpos de Prova Gerados

A Tabela 2 apresenta os 29 corpos de prova produzidos com 10 cm de diâmetro, onde se pode observar as características físicas e a uniformidade da composição. A compactação das diferentes granulometrias foi observada e as amostras com baixa compactação foram descartadas.

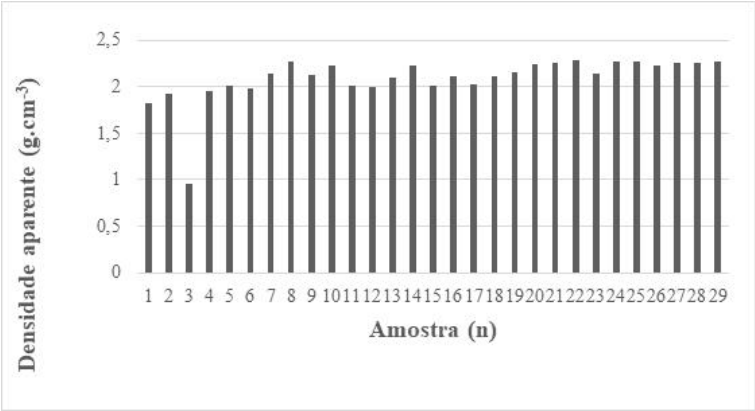
**Tabela 2:** Corpos de prova gerados com resina e resíduos do Mármore Bege Bahia – rocha artificial.

n	Amostra	n	Amostra	n	Amostra	n	Amostra	n	Amostra	n	Amostra	n	Amostra	n	Amostra
1		5		9		13		17		21		24		27	
2		6		10		14		18		22		25		28	
3		7		11		15		19		23		26		29	
4		8		12		16		20							

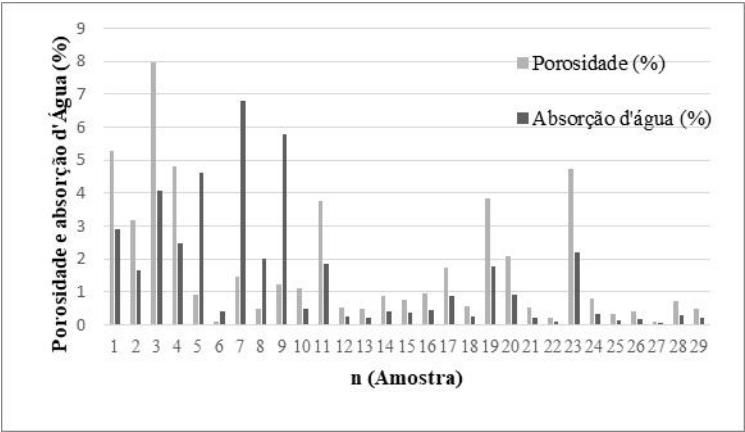
4.2 | Índices Físicos

Nas Figuras 20 e 21 estão apresentados os valores dos ensaios de índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água) das amostras. A densidade aparente média foi de 2,250 g.cm<sup>-3</sup> para as amostras 8, 10, 14, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28 e 29, indicando uma estrutura densa e compacta. Amostras com densidade aparente mais baixa (cerca de 0,954 g.cm<sup>-3</sup>) sugerem maior porosidade e menor compactação. A porosidade média foi de 0,4% para as amostras 6, 8, 12, 13, 18, 24, 25, 26, 27, 28 e 29, apontando uma estrutura com poucos poros e resistente.

A absorção de água média foi de 0,28% para as amostras 6, 10, 12, 13, 14, 15, 24, 25, 26, 27, 28 e 29, indicando uma estrutura impermeável e densa, similar a uma rocha natural.



**Figura 20:** Distribuição dos resultados de densidade aparente em (g.cm<sup>-3</sup>).



**Figura 21:** Distribuição percentual dos resultados dos testes de porosidade aparente e absorção d'água.

4.3 | Dureza

A Tabela 3 apresenta os resultados de dureza obtidos em todas as composições. Os resultados do ensaio de dureza nos corpos de prova variaram de 100HLD a 550HLD. Em geral, os valores menores foram apresentados pelas amostras que continham partículas mais finas, indicando uma baixa resistência mecânica. Por outro lado, valores em torno de 550 HLD foram encontrados nas amostras 9, 10, 20, 25, 26, 27, 28 e 29, indicando boa resistência. Esses resultados sugerem que a granulometria das partículas desempenha um papel crucial na determinação da resistência mecânica das amostras.

**Tabela 3:** Dureza (HLD) das amostras.

n	Dureza (HLD)	n	Dureza (HLD)	n	Dureza (HLD)	n	Dureza (HLD)
1	207	9	514	16	233	23	436
2	117	10	548	17	424	24	473
3	112	11	482	18	438	25	550
4	227	12	434	19	385	26	524
5	279	13	304	20	459	27	479
6	316	14	429	21	300	28	526
7	540	15	450	22	506	29	487
8	463						

4.4 | Cor e Brilho

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos testes de cor e brilho. Os valores de luminosidade (L), e os índices a e b não apresentaram variação significativa, com valores em torno de 70, 4 e 14°, respectivamente, indicando o tom bege claro. Já em relação

ao brilho da amostra, a reflexão da superfície, foi observada variação significativa com valores entre 0,60 e 16,39° e, devido à absorção diferenciada da resina, influenciada pela granulometria dos cristais presentes nos resíduos de rochas. Esses cristais, compostos por minerais, têm um papel significativo nos testes de cor e brilho, impactando diretamente na estética das rochas.

**Tabela 4:** Resultado de colorimetria.

n	L	a	b	G	n	L	a	b	G
1	74,28	3,70	14,63	2,00	16	70,43	4,07	15,42	11,60
2	69,86	3,79	14,54	6,80	17	79,47	3,53	13,00	2,50
3	70,64	3,44	14,00	1,20	18	67,52	3,83	15,37	5,30
4	68,26	3,34	13,41	3,40	19	65,77	4,14	15,26	0,40
5	68,77	3,34	14,54	2,10	20	70,97	4,80	17,06	6,10
6	68,20	4,12	15,15	1,6	21	67,83	3,84	14,18	1,30
7	66,13	4,40	14,70	0,60	22	69,84	4,68	16,07	7,00
8	71,70	4,36	16,39	16,30	23	71,70	4,36	16,39	16,30
9	70,57	4,32	15,33	6,30	24	68,85	4,74	15,75	1,00
10	68,92	3,97	15,78	3,30	25	67,40	3,98	15,51	4,40
11	70,47	4,24	16,42	1,00	26	68,57	4,47	15,83	4,80
12	65,77	5,31	16,97	1,00	27	70,08	4,16	15,80	4,60
13	67,35	3,77	12,14	5,90	28	72,09	4,33	15,85	7,50
14	69,97	4,57	16,32	1,60	29	70,97	4,80	17,06	6,10
15	66,63	3,81	14,64	2,50					

Na Figura 22 pode ser observado um exemplar no formato final do piso a ser fabricado, amostra 50BB1,0/25BB0,5/25BBF/10R. Na tentativa de reduzir a quantidade de resina uma amostra 50%

BB1,0/20% BB0,5/ 20% BBf apresentou boas características de aglutinação da resina mesmo ao reduzir a quantidade de resina para 9%.



**Figura 22:** Corpo de prova resultado da composição 50BB1,0/25BB0,5/25BBF/10R.

#### 4.5 | Avaliação dos Diâmetros das Pastilhas Piezo

Pela análise dos dados obtidos, não houve uma variação notória ao utilizarmos pastilhas de 25mm ou 35mm. A mediana da tensão gerada - linha preta dentro dos blocos - e o terceiro quartil – face superior dos blocos, se mostram suficientemente próximos, não havendo justificativa para ser optado por um piezo em detrimento do outro. Os box-plots, mostrados na Figura 23, apresentam os

resultados comparativos da tensão gerada por cada pastilha utilizando um osciloscópio, os quais verificam que piezos geram energia na forma de corrente alternada, sendo as de diâmetro de 25mm mais eficazes, sendo escolhidas para montagem do sistema. Uma grande vantagem do microcontrolador ser acoplado ao circuito é a versatilidade que isso traz ao protótipo. Uma vez que o Arduino permite que seja escrito um código capaz de controlar seus diversos pinos digitais e analógicos, poderíamos associar outros periféricos ao circuito, tais como motores, displays de LCD, sensores diversos e quaisquer outros componentes eletrônicos que possam ser controlados via o microcontrolador.



**Figura 23:** Box-Plot de cada pastilha após medição no osciloscópio.

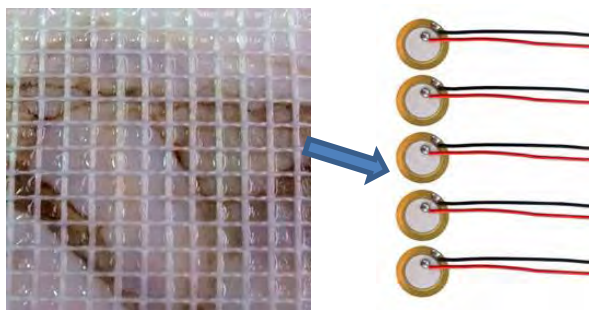
## 4.6 | Geração do Piso final – Protótipo

Baseado nos resultados obtidos, pôde-se montar um piso constituído com os piezos de 25 mm que foram afixados na parte inferior do piso de resina e resíduos do Mármore Bege Bahia entre a tela de entelamento como apresentado na Figura 24. Desse piso



saiu um conjunto de fios que se associavam aos LEDs de uma maquete que simula uma residência, e ao pressionar a plataforma de rocha ornamental, um sinal é enviado para uma entrada do Arduino que acionou todo o sistema de iluminação, como verificado na Figura 25 e o sistema aceso, após aplicação de força mecânica, na Figura 26.

Vale ressaltar que o sistema de entelamento consiste na colocação de uma tela de vidro (Figura 27) na parte posterior da rocha. A tela de vidro é usada no processo de beneficiamento das rochas ornamentais para exercer a função de reforço, atribuindo mais resistência às chapas. Na fixação de rochas, a tela e a resina aplicada criam uma camada resistente e flexível, impedindo o rompimento das chapas. Entre a rocha artificial e a referida tela, adicionou-se o sistema de pastilhas piezoelétricas.



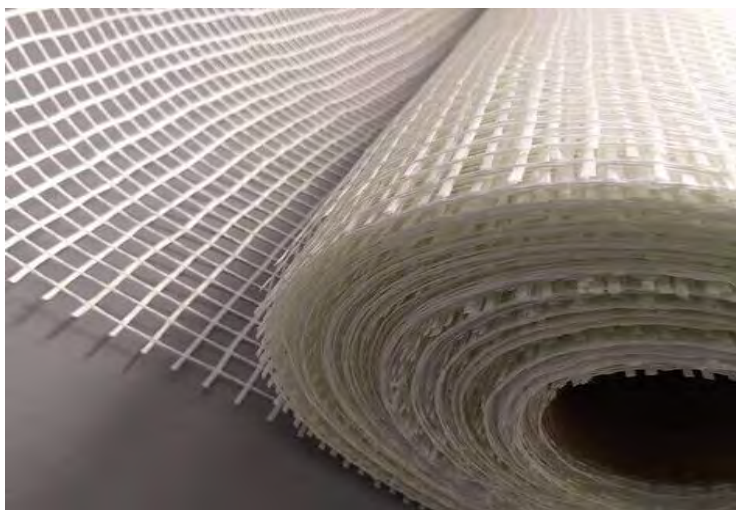
**Figura 24:** Sistema de entelamento da rocha e colocação das pastilhas piezo.



**Figura 25:** Protótipo da rocha com as pastilhas interligadas na maquete.



**Figura 26:** Protótipo da rocha com as pastilhas interligadas na maquete permitindo o acendimento após se exercer a força mecânica.



**Figura 27:** Tela de vidro usada no entelamento das rochas.

## 5 | CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram a viabilidade da produção de pisos utilizando resíduos da lavra e do beneficiamento do Mármore Bege Bahia em associação com resina epoxídica.

A composição 50BB1,0/25BB0,5/25BBF/10R destacou-se por apresentar características semelhantes às das rochas naturais, incluindo dureza de 524 HLD, densidade aparente de 2,230 g/cm<sup>3</sup>, porosidade aparente de 0,42% e absorção de água de 0,19%.

Além disso, o sistema piezoelétrico integrado ao piso artificial e tela de vidro mostrou-se funcional para a geração de energia elétrica, sendo ativado corretamente quando submetido à pressão normal.

Dessa forma, a pesquisa confirma que a combinação entre materiais reciclados e tecnologia piezoelétrica pode resultar em um produto inovador, sustentável e com potencial para aplicação prática no mercado de revestimentos, contribuindo para mitigação do impacto ambiental causado pelos resíduos do Mármore Bege Bahia e contribuição na circularidade do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FRASCÁ, M.H.B.O., CASTRO, N.F., RIBEIRO, R.C.C., MAGALHÃES, A.C.F.; NAVARRO, F.C. Bege Bahia: the Calcrete Known as Brazilian Travertine, Geoheritage, (2025) <https://doi.org/10.1007/s12371-024-01060-7>

KIM, Y.G. (2022). Piezoelectric strain sensor with high sensitivity and high stretchability based on kirigami design cutting. *npj Flexible Electronics*, v. 6, n. 1.

SAFAEI, M.; SODANO, H.A.; ANTON, S.R. (2019). A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008-2018). *Smart Materials and Structures*, v. 28, n. 11.

LEE, M.Y.; Ko, C.H.; CHANG, F.C.; LO, S.L.; LIN, J.D.; SHAN, M.Y.; LEE, J.C. (2008). Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. *Cement & Concrete Composites* 30, 583-587.

RIBEIRO, R.C.C.; BASTOS, D.C.; CONCEIÇÃO, M.N.; BASTOS, M.M.T. (2023). Processo para geração de cápsulas de café biodegradáveis contendo resíduos de rochas ornamentais como fontes de fertilizantes de solos, Patente BR 1020230116655.

RIBEIRO, R.C.C. (2022). Geração de Pisos geradores de energia contendo resíduos do Mármore Bege Bahia, Chamada CNPq/CT-Mineral N° 28/2022 - PD&I, Gestão e Extensão Tecnológica, Infraestrutura Laboratorial, Capacitação e Formação de RH para Mineração e Transformação Mineral em Micro, Pequena e Média Escala.

SODANO, H.A.; PARK, G., LEO, D.L.; INMAN, D.J. (2003). Use of piezoelectric energy harvesting devices for charging batteries, in *Smart Structures and Materials: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, pp. 101-108, San Diego, California, USA.

VASCONCELOS, C.S.A. (2009). Caracterização do rejeito fino gerado na serragem, do mármore Bege-Bahia. In: XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Gramado - RS.

VIDAL, F.W.H.; GUERRA, E.A.; ARRAES, T.M.; SILVA, C.F.C.E.; COSTA, J.A.V. ; BEZERRA, F.D. ; SILVA FILHO, R.T.; BRAGA, T.E.N.; CASTRO, N.F. (2019). Apoio do governo federal ao desenvolvimento tecnológico e à extensão tecnológica para arranjos produtivos locais (APL) de base mineral caso APL de rochas ornamentais.

## SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2024, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 390 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

### Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

**STA-140 – Georreferenciamento da região de extração do mármore Bege Bahia – Revisão da Literatura.** Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Marcelle Lemos de Amorim Cerqueda, Rosana Elisa Coppêde Silva e Caroline Martins de Sousa, 2025.

**STA-139 – Avaliação de riscos ecológico da disposição dos resíduos oriundos da lavra e beneficiamento do mármore Bege Bahia.** Cristiane Andrade de Lima, Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Caroline Martins de Sousa, Manuella de Lima Ribeiro e Pedro Paulo Cardoso Lima, 2025.

**STA-138 – Estudo de uma porcelana que ornamenta o mosaico da fonte do Jardim das Princesas do Museu Nacional do Rio de Janeiro.** Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Manuella de Lima Ribeiro, Marcelle Lemos de Amorim Cerqueda e Rosana Elisa Coppêde Silva, 2025.

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)  
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **NOVAS PUBLICAÇÕES**

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.





## Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

## O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na cidade Universitário, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 47 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.