

**PISO GERADOR DE ENERGIA FORMADO POR ROCHA AGLOMERADA  
DE RESÍDUOS DO MÁRMORE BEGE BAHIA**  
**ENERGY-GENERATING FLOOR MADE FROM AGGLOMERATED STONE  
OF BEIGE BAHIA MARBLE WASTE**

**Williane Gomes de Figueiredo**

Aluna de engenharia química, 5º período, UERJ  
Período PIBIC/CETEM: 10 de outubro de 2023 a setembro de 2024  
willianegomes2@hotmail.com

**Roberto Carlos da Conceição Ribeiro**

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

**Marceli do Nascimento da Conceição**

Orientadora, Química, D.Sc.  
mconceicao@cetem.gov.br

**RESUMO**

O Brasil representa um dos maiores produtores de rochas ornamentais no mundo, ocupando a 5ª posição. Dentre as principais rochas destaca-se o Mármore Bege Bahia que se trata de um calcário de coloração bege. Desde a lavra ao beneficiamento são descartados pedaços menores dos grandes blocos que por não apresentar valor comercial são descartados em aterros. Dessa forma, a utilização desse material na produção de rochas aglomeradas artificialmente permite a fabricação de pisos que associados a um sistema piezoelétrico pode gerar energia. Assim, o trabalho teve como objetivo estudar a aplicação do resíduo oriundo do beneficiamento do mármore Bege Bahia (BB) em diferentes frações granulométricas para ser aplicado como pisos de rocha aglomerada artificial. 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 HDL, 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.

**ABSTRACT**

Brazil is one of the largest producers of ornamental stones in the world, ranking 5th. Among the main stones is Beige Bahia Marble, a beige-colored limestone. From quarrying to processing, smaller pieces of large blocks are discarded as they have no commercial value and are disposed of in landfills. Thus, the use of this material in the production of artificially agglomerated stones allows for the manufacture of floors that, when associated with a piezoelectric system, can generate energy. The aim of this study was to investigate the application of waste from the processing of Beige Bahia Marble (BB) in different grain sizes for use as artificial agglomerated stone flooring. To this end, coarse residues from the extraction stage were subjected to a comminution process using a crusher with openings of 1.0 mm and 0.5 mm, BB1.0 and BB0.5, respectively. Different grain size compositions were produced, varying the percentage of BB1.0, BB0.5, and fine residue (BBf), while maintaining a mass percentage of 90% residue and 10% epoxy resin. Surface hardness (HLD), porosity, and water absorption were determined, in addition to colorimetric analysis of all samples. The samples with the highest compaction showed the following variations in grain size: 40 to 60% for BB1.0, 25 to 35% for BB0.5, and 15 to 25% for BBf. Hardness results indicated values of 500 HLD, very similar to those of sound rock. Additionally, maximum porosity values of 0.08% and water absorption of 0.04% were observed, also close to those of sound rock.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, um dos mármore mais renomados é o Mármore Bege Bahia, também conhecido como travertino, uma variante da rocha calcária, 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 Ourolândia, 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.

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.

Devido à sua baixa porosidade e baixa absorção de água, as chapas de rocha artificial apresentam 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

A pesquisa teve como objetivo utilizar o resíduo da lavra e do beneficiamento do Mármore Bege Bahia em diferentes tamanhos de partículas para criar pisos de rocha aglomerada artificialmente com resina epoxídica, capaz de suportar um sistema piezoelétrico gerador de energia.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais

Os resíduos utilizados foram provenientes da lavra e beneficiamento do Mármore Bege Bahia. 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.

### 3.2 Geração dos 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 pode ser observado 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, fixou-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.

**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	20	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					

### 3.3 Ensaio de Índices Físicos

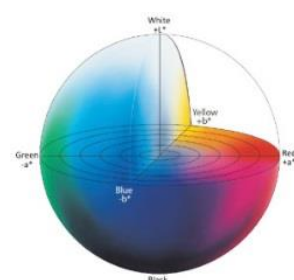
Para determinar a porosidade, absorção de água e densidade específica dos corpos de provas, utilizou-se a norma NBR 15845-2. A norma estabelece tempos mínimos de saturação (48 horas) e secagem (24 horas) até se alcançar massa constante, e uma temperatura de secagem de 70 °C no procedimento experimental,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

### 3.4 Determinação de Dureza Superficial

O ensaio de dureza foi conduzido utilizando um durômetro portátil, *Equotip 3* da marca. 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.

### 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*. Este 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 1.



**Figura 1:** Representação dos eixos de cor e brilho.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Índices Físicos

As Figuras 2 e 3 apresentam 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  $0,954 \text{ g.cm}^{-3}$ ) 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.

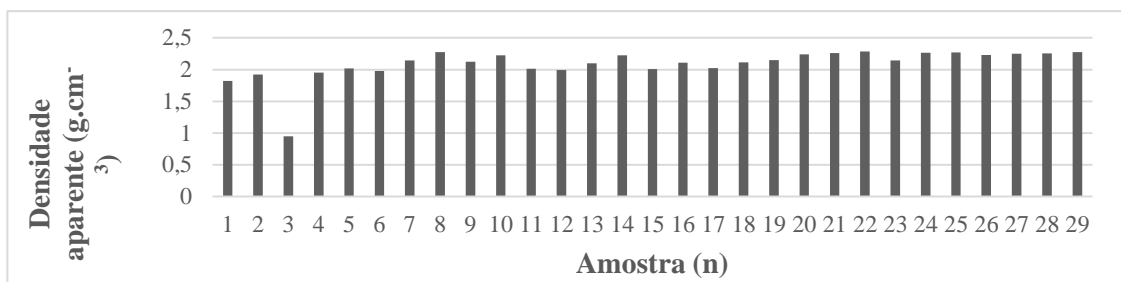


Figura 2: Distribuição dos resultados de densidade aparente em ( $\text{g.cm}^{-3}$ ).

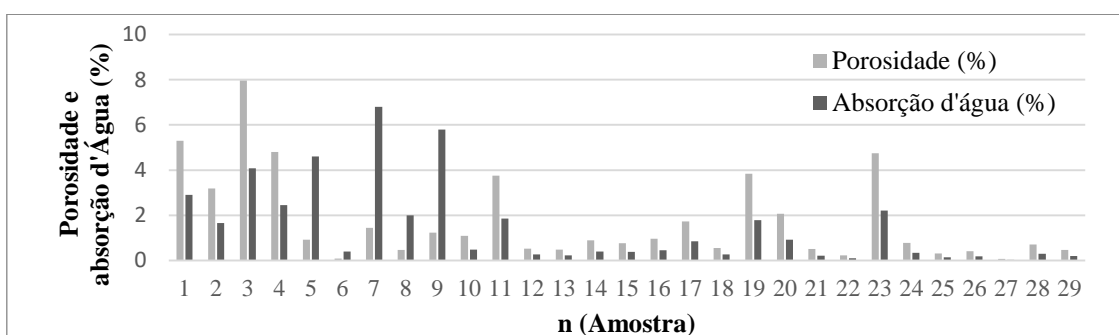


Figura 3: Distribuição percentual dos resultados dos testes de porosidade aparente e absorção d'água.

## 4.2 Dureza

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em todas as composições. Os resultados do ensaio de dureza nos corpos de prova variaram de 100HLD a 550HLD. o 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 2: 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						

### 4.3 Cor e Brilho

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados obtidos no teste 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 3:** Resultado do teste de cor e brilho.

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 2 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 4:** Corpo de prova realizado da composição 50BB1,0/25BB0,5/25BBF/10R.

## 5. CONCLUSÕES

É possível produzir o piso contendo resíduos da lavra e do beneficiamento do Mármore Bege Bahia em associação com a resina epoxídica, porém a proporção 50BB1,0/25BB0,5/25BBF/10R destacou-se com características semelhantes às de 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%. Nos testes de cor e brilho, os valores médios nos eixos L, a, b e G foram 68,57, 4,47, 15,83 e 4,80°, respectivamente. Esses resultados indicam que essa composição pode ser uma boa opção para a produção de pisos, oferecendo qualidade e durabilidade satisfatórias.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pela infraestrutura, ao CNPq pelo apoio financeiro.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15485-2:2015. Rochas para revestimento – Métodos de Ensaio. Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. FRASCA, M.H.B.O.; YAMAMOTO, J.K. Investigation of Test Specimen Size and Shape on Absorption Measurements of Granite Dimension Stone. Dimension stone use in the built environment, [S. l.], p. 12-13, 2021.

KONICA, M. (2024) Controle de cor na indústria cerâmica: medindo e classificando cerâmicas. Disponível em: <<https://sensing.konicaminolta.us/br/blog/controle-de-cor-na-industria-ceramica-medindo-e-classificando-ceramicas/>>. Acesso em: 06 jun. 2024.

LEE, M.Y., Ko, C.H., Chang, F.C., Lo, S.L., Lin, J.D., Shan, M.Y. e 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.; LIMA, C.A.; MOREIRA, T.C. (2015) Avaliação de risco à saúde humana da aplicação de resíduos gerados na lavra e beneficiamento do mármore bege Bahia como carga no setor polimérico, Série Tecnologia Mineral, STA-86. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral, p.9-15

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.

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.