

DURABILIDADE DE BLOCOS DE ENCAIXE DE SOLO-CIMENTO COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CALCÁRIO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE *

*Bruno Rangel França¹
Jonas Alexandre²
Sérgio Rafael Cortes de Oliveira³
Sérgio Neves Monteiro⁴
Markssuel Teixeira Marvila⁵
Afonso Rangel Garcez Azevedo⁶
Euzébio Bernabé Zanelato⁷*

Resumo

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS, o setor de rochas ornamentais vem crescendo consideravelmente nos últimos anos no Brasil. Sua produção no ano de 2013 atingiu 10.500,00 toneladas, com equivalência de 78,00 milhões de m² de chapas serradas, sendo 16,50 milhões de m² para mármore. No processo de beneficiamento dos blocos de mármore, cerca de 20% a 30% dos blocos são transformados em resíduos, gerando toneladas de materiais que poluem o solo e são tratados como rejeitos. Nesse contexto, este trabalho objetiva estudar a durabilidade de blocos de encaixe de solo-cimento com a incorporação de resíduo calcário proveniente do beneficiamento do mármore. Para viabilizar o estudo foram confeccionados corpos de prova com adições de 30%, 40% e 50% de resíduo em substituição parcial do agregado na mistura de solo-cimento e analisadas suas propriedades físicas, químicas e mineralógica. Após o período de cura, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem e avaliados os parâmetros de absorção de água e resistência a compressão simples antes e após a degradação acelerada. O programa experimental estabelecido mostrou que a adição de resíduo na mistura, se torna viável para a confecção dos blocos de encaixe de solo-cimento, visto que os resultados obtidos com a incorporação do resíduo alcançaram um decréscimo nos valores de perda de massa e de absorção de água, e um aumento na resistência mecânica.

Palavras-chave: Solo-cimento; Resíduo mármore; Durabilidade.

DURABILITY OF SOIL-CEMENT BLOCKS WITH THE INCORPORATION OF LIMESTONE RESIDUE FROM THE PROCESSING OF MARBLE

Abstract

According to data from the Brazilian Association of the Ornamental Rocks Industry - ABIROCHAS, the ornamental rock sector has grown considerably in recent years in Brazil. Its production in the year 2013 reached 10,500.00 tons, with an equivalence of 78.00 million m² of sheets sawn, with 16.50 million m² for marbles. In the process of processing marble blocks, about 20% to 30% of the blocks are transformed into waste, generating tons of materials that pollute the soil and are treated as tailings. In this context, this work aims to study the durability of soil-cement block with an incorporation of limestone from the processing of marble. In order to make the study feasible,

* Contribuição técnica ao 72º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

specimens were prepared with 30%, 40% and 50% additions to the soil-cement mixture and analyzed for their physical, chemical and mineralogical properties. After the curing period, the specimens were submitted to the wettability and drying durability tests and the parameters of water absorption and resistance to simple compression before and after the accelerated degradation were also evaluated. The established experimental program showed that the addition of residue in the mixture becomes feasible for the preparation of soil-cement blocks, since the results obtained with the incorporation of the residue reached a decrease in the values of loss of mass and water absorption, and an increase in mechanical strength.

Keywords: Soil-cement; Marble residue; Durability.

- ¹ *Engenheiro Civil, mestrando em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ² *Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ³ *Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalúrgico, doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Civil, mestrando em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro Civil, doutorando em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Civil, doutorando em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O grande impacto ambiental causado pela produção mineral tem forçado as indústrias de mineração e beneficiamento de rochas ornamentais a adquirir novos conceitos e soluções técnicas que objetivem a sustentabilidade de suas atividades.

Nas últimas três décadas, o setor de rochas ornamentais vem sendo uma das atividades industriais que mais cresce no Brasil. A produção brasileira estimada pela ABIROCHAS (Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais) atingiu a equivalência de 10.500.000 toneladas no ano de 2013, com consumo interno de 7.880.000 toneladas equivalente a 78,00 milhões de m² de chapas serradas, sendo 16,50 milhões de m² para mármore [1]. Em consequência da grande produção de rochas ornamentais, são geradas toneladas de rejeitos que ocupam grandes espaços ao ar livre e poluem o solo. No processo de beneficiamento do mármore, cerca de 20% a 30% dos blocos são transformados em resíduos em forma de pó que são classificados como inertes e não biodegradáveis. A adoção de práticas de reaproveitamento e reciclagem desses detritos em indústrias é desejável, pois contribui para o desenvolvimento sustentável bem como para a redução dos custos.

As construções modulares de blocos de encaixe prensados de solo-cimento vêm se destacando e ganhando espaço na construção civil, pois estes são confeccionados com encaixe do tipo macho e fêmea utilizando um processo construtivo que minimiza desperdícios, pois toda construção é planejada do início ao fim (Figura 1). O bloco de encaixe prensado é um produto que valoriza a incorporação de resíduos descartados, sendo eles de diversos tipos e origens. Em muitos casos, adições desses tipos de materiais trazem vantagens técnicas e, com isso, a redução dos custos do produto final.



Figura 1. Construção em blocos de encaixe de solo-cimento.

Neste viés, diversas pesquisas sobre a incorporação dos resíduos gerados pelas indústrias mineradoras e beneficiadoras de pedras ornamentais como mármore e granitos vêm sendo desenvolvidas ao longo dos tempos, sempre buscando contribuir para o desenvolvimento sustentável e um maior aproveitamento de resíduos na construção civil, blocos prensados de encaixe [2,3], concretos [4], tijolos cerâmicos [5], argamassas [6].

Alves e Segantini [3], pesquisaram a incorporação do resíduo calcário do beneficiamento do mármore (pó de mármore) em adições de até 40% de resíduo em

substituição parcial do agregado em uma mistura de solo-cimento para a produção de blocos de encaixe e verificou que os blocos produzidos com a incorporação destes resíduos apresentaram maior resistência à compressão simples que os produzidos com traço convencional e satisfizeram as exigências prescritas por norma.

Levando em consideração a complexidade dos mecanismos de degradação, a vida útil dos insumos da construção civil e os elevados custos de obras civis, avaliar a durabilidade de um produto é certamente um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de um novo material [7].

Por durabilidade compreende-se que é a capacidade de um material manter sua integridade quando imposto à ações de agentes ambientais. O processo em que ações químicas e físicas atuam sobre uma determinada estrutura, fazendo com que um dado material sofra transformações irreversíveis que são capazes de comprometer sua qualidade e valor, é chamado degradação. Os fatores ou agentes de degradação ao qual os solos estabilizados estão submetidos são as variações de temperatura e umidade, além das solicitações impostas.

Através de estudos pré-determinados é possível perceber e quantificar a degradação através de seus indicadores, que expressam variações no desempenho do material ou em suas propriedades que são mensuradas durante sua avaliação ou utilização. A preservação das propriedades é substancial para justificar o desempenho do produto ao decorrer de sua vida útil. Uma das diversas formas utilizadas para avaliar a durabilidade de um material é quantificar através de longos ciclos de secagem e molhagem a perda de massa e a variação dimensional.

Portanto, estudar e compreender a durabilidade de blocos de encaixe de solo-cimento com a incorporação de resíduo calcário do beneficiamento do mármore bem como sua tecnologia, com os resultados voltados a apresentar alternativas na composição e fabricação do produto e também oferecer mais uma opção para o destino final do resíduo calcário poderá apontar tendências e mudanças no cenário da construção civil rumo à adoção de técnicas de construção mais sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram utilizados os seguintes materiais: um solo argilo arenoso proveniente do município de Campos dos Goytacazes-RJ onde foi passado em peneira ABNT nº 8 (2,34mm); resíduo calcário proveniente do beneficiamento do mármore que foi coletado na base da empresa Polita Mármore localizada no município de Cachoeiro do Itapemirim – ES em forma de lama, que foi submetido a secagem natural ao ar livre em temperatura ambiente durante 7 dias. O material seco foi beneficiado em peneira ABNT nº 40 (0,074mm) por via seca. Foi utilizado o cimento Portland CP V da marca Nassal, que apresenta características físicas, químicas e mecânicas compatíveis para a fabricação de blocos de encaixe de solo-cimento. Sua escolha foi devido a suas características quanto ao ganho de resistência inicial, que permitiu uma melhor logística de transporte dos blocos de encaixe após moldagem para realização dos ensaios. A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento local.

Inicialmente o resíduo do beneficiamento do mármore foi caracterizado fisicamente através da massa específica real dos grãos, granulometria e limites de Atterberg. Foi caracterizado quimicamente através da análise química por fluorescência de raios-x em um equipamento (Shimadzu EDX-700). Para a caracterização mineralógica foi realizada a difração de raio-x em equipamento (Shimadzu XRD-6000). Em seguida, com base em diversos estudos realizados [2,3,8] foram estabelecidas as dosagens da mistura, tendo fixado o teor máximo de cimento Portland em 10% da massa total e substituindo parcialmente o solo (agregado miúdo) pelo resíduo calcário nas proporções de 30%, 40% e 50%. Todos os traços são comparados com a mistura de referência (0%). Os blocos foram moldados nas dimensões de 30x15x7cm em uma prensa hidráulica modelo 7000 turbo (Ecomáquinas) a uma pressão de 150 psi com umidade de moldagem de 16% obtida no ensaio de compactação NBR 12023 [9] e após a conformação passaram pelo processo de cura, que foi realizada em câmara úmida a uma temperatura controlada de 23° C e 95% de umidade em um período de 7 dias.

Na figura 2 ilustra-se a produção dos blocos.



Figura 2. Produção dos blocos de solo-cimento e resíduo de mármore.

A metodologia empregada para a realização do ensaio de degradação acelerada (durabilidade por molhagem e secagem) baseou-se na NBR 13554 [10]. Acrescentou-se a esta metodologia, para avaliar melhor os parâmetros de degradação, a determinação da absorção de água e da resistência à compressão simples NBR 10836 [11], cujos resultados foram comparados para as amostras submetidas a degradação e as não submetidas à degradação.

Foram moldados 18 corpos-de-prova para cada traço, totalizando 72 unidades produzidas, em que 6 unidades foram ensaiadas a compressão simples, 6 unidades para o ensaio de absorção de água e 6 unidades foram submetidas aos fatores de degradação acelerada e, posteriormente, a resistência à compressão simples.

Para calcular a perda de massa dos corpos-de-prova, após o período de 7 dias de cura, os blocos foram submetidos a 6 ciclos de 48 horas de molhagem em água e secagem em estufa, cujo limite máximo atribuído pela NBR 13554 [10] é de 10%. Como parâmetro indicativo da durabilidade do material, usa-se a seguinte expressão:

$$Pm = \frac{(Mi - Mfc)}{Mi} \times 100 \quad (1)$$

sendo:

Pm a perda de massa do corpo-de-prova, em %;

Mfc a massa final corrigida do corpo-de-prova, em g;

Mi a massa inicial calculada por ocasião da moldagem do corpo-de-prova, em g.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a distribuição granulométrica do resíduo do mármore indicando que a quantidade de fração argila é da ordem de 19,9 %, o teor de silte é de 73,9 % e o teor de areia fina é cerca de 5,9 %. A massa específica real dos grãos do resíduo calcário foi de 2,75 g/cm³ e este resultado reflete a mineralogia do resíduo de pó de mármore. Os limites de Atterberg indicaram que o material é classificado como não plástico.

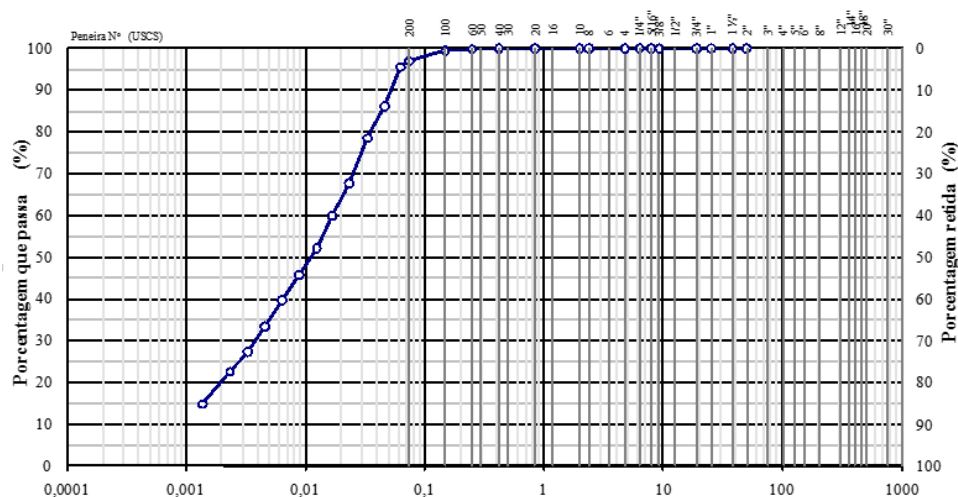


Figura 3. Curva granulométrica do resíduo de mármore.

A Tabela 1 apresenta a análise química do resíduo de mármore. É possível ver que o resíduo de mármore é composto em sua maioria por óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que são elementos característicos das rochas carbonáticas [12]. Pode-se observar que este resíduo apresenta composição característica de um material calcário dolomítico, pela relação MgO/CaO que está em torno de 0,19, ou seja, entre 0,08 e 0,25 [13].

Tabela 1. Composição química (% em massa) do resíduo do mármore.

Composição química (%)	
CaO	72,56
MgO	13,96
SiO ₂	9,75
K ₂ O	1,46
Fe ₂ O ₃	1,35
SO ₃	0,80
Er ₂ O ₃	0,04
CuO	0,03
SrO	0,03

A Figura 4 apresenta o difratograma de raio-x do resíduo do mármore. É possível notar os picos típicos da calcita (CaCO_3) expressa pela letra “C” e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) indicada pela letra “D”, que são as principais constituintes das rochas carbonáticas, confirmando os dados apresentados pela análise química do material.

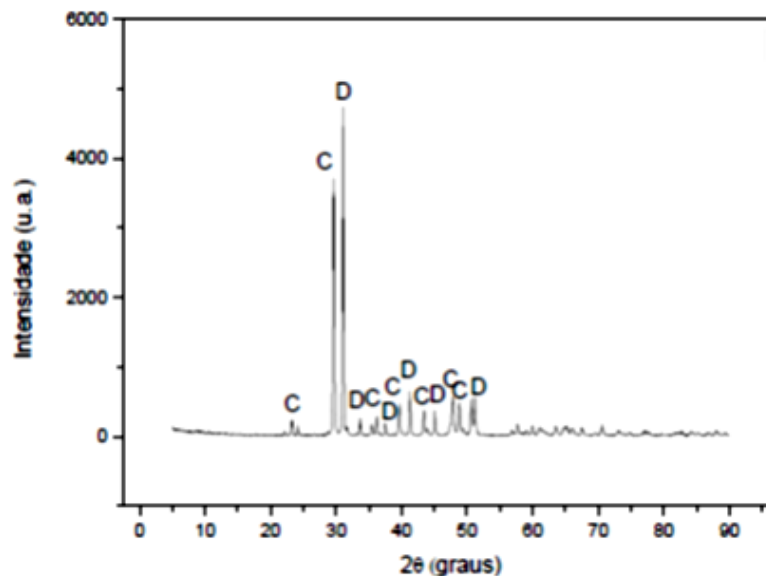


Figura 4. Difratograma de raio-x do resíduo de mármore

Os resultados dos ensaios de absorção de água realizados aos 28 dias estão apresentados na Figura 5. É possível notar uma diminuição da absorção de água com a adição de até 40% do resíduo do mármore em comparação com o traço referência. Observou-se que para todas as misturas os valores de absorção de água permaneceram dentro dos limites de 20% estipulados pela NBR 10836 [11].

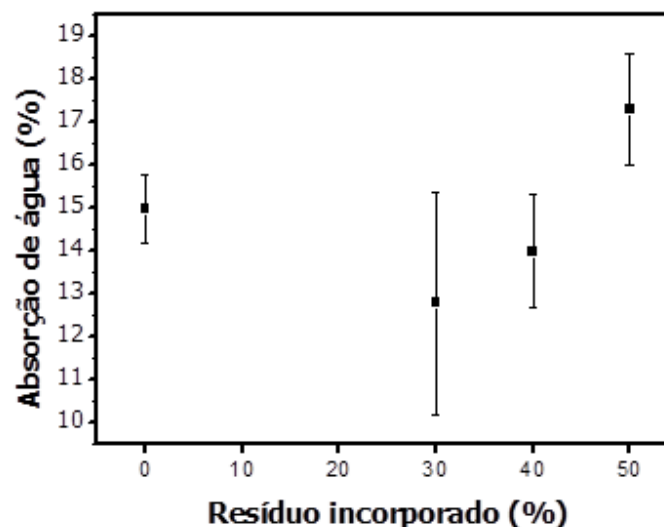


Figura 5. Resultados da absorção de água para os traços.

Os valores de resistência à compressão simples obtidos no ensaio aos 28 dias podem ser observados na Figura 6. Nota-se que a resistência a compressão aumenta com a incorporação do resíduo do mármore na mistura em até 30% de adição comparado ao traço de referência e, com o aumento do teor de incorporação do resíduo na mistura em 40% e 50% houve um decréscimo em sua resistência mecânica, devido ao aumento da porosidade, evidenciado pelo aumento da absorção de água. Os valores obtidos com a incorporação do resíduo do mármore foram maiores que 2,0 MPa atendendo os limites definidos pela NBR 10836 [11].

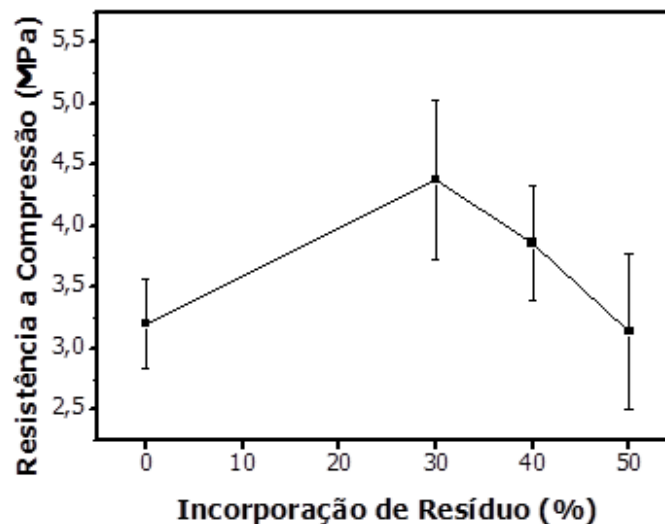


Figura 6. Resultados da resistência à compressão simples para os traços.

Na Figura 7 é apresentado o resultado do ensaio de degradação acelerada (durabilidade) por sucessivas molhagens e secagens dos blocos de solo-cimento e resíduo de mármore a fim de se obter a perda de massa do produto. Os valores obtidos no ensaio ficaram abaixo do limite de 10% estipulado pela NBR 13554 [10]. Nota-se que com a incorporação do resíduo de mármore na mistura de solo-cimento obteve-se um desempenho melhor nos parâmetros de durabilidade do material em comparação com o traço de referência. A incorporação de 30% do resíduo na mistura propiciou uma menor perda de massa em comparação com os traços de 40% e 50%, que pode ser devido a sua porosidade, também apontada pelo ensaio de absorção de água.

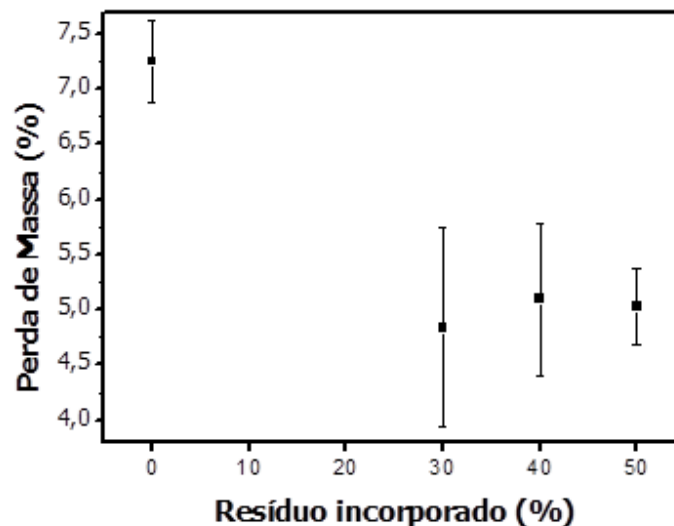


Figura 7. Resultados da perda de massa obtidos através do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem dos traços.

Os corpos-de-prova submetidos aos ensaios de durabilidade foram ensaiados à compressão simples aos 28 dias, a fim de se obter mais um parâmetro de resistência pós degradação acelerada, servindo como parâmetro de comparação com as amostras que não foram submetidas a degradação. A Figura 8 apresenta os resultados de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova submetidos a degradação comparados com os resultados à compressão simples dos corpos-de-prova que não foram submetidos a degradação. Observa-se que os resultados de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio de degradação acelerado foram superiores aos resultados de compressão obtidos para os corpos-de-prova que não passaram pela degradação; pode-se dizer que é consequência da conformação dos blocos de encaixe que são submetidos à elevadas forças de prensagem e alinhado a um baixo teor de umidade na mistura que é feita em formato de “farofa-úmida” e, conseqüentemente por conta da hidratação das partículas de cimento dadas lentamente. Através dos sucessivos ciclos de molhagem e secagem as partículas de cimento anidro contidas nos corpos-de-prova sofreram hidratação proporcionando aumento da resistência. Pode-se observar também que para a adição de 30% de resíduo do mármore na mistura ocorreu um aumento na resistência à compressão seguida de uma leve diminuição com a estabilização da resistência para os outros teores, porem todos elevados em relação aos valores de referência.

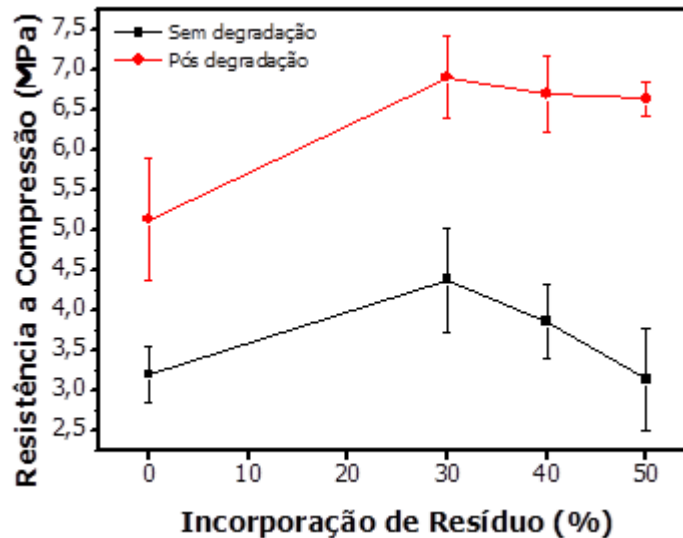


Figura 8. Resultados da resistência à compressão simples pós degradação acelerada dos traços.

4 CONCLUSÃO

A partir do presente estudo é possível concluir a viabilidade da incorporação do resíduo calcário proveniente do beneficiamento do mármore na confecção de blocos de encaixe de solo-cimento, visto que os parâmetros de resistência à compressão, absorção de água e durabilidade evidenciaram um melhor desempenho do bloco com a adição do resíduo. O teor de 30% de adição de resíduo na mistura apresentou uma tendência bem definida nos parâmetros analisados. Com o aumento da adição do resíduo em 40% e 50% ficou evidente o aumento na absorção de água e decréscimo na resistência mecânica e maior perda de massa em relação ao traço 30%. O estudo evidenciou também a tendência do ganho de resistência do bloco após o ensaio de durabilidade que pode ser análogo ao ganho de resistência com o decorrer do tempo e exposição a qual o produto estará submetido.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2014) - *Sumário Mineral*. São Paulo.
- 2 Destefani, A.Z. Adição de resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais para a produção de blocos prensado de encaixe. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos de Goytacazes, Universidade Federal do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2009.
- 3 Alves, R. P.; Segantini, A. A. S. Estudo da utilização de resíduos de mármore na composição de tijolos prensados de solo-cimento. In: Congresso de Iniciação Científica da Unesp, Ed.26., 2014, Ilha Solteira. Anais... Ilha Solteira: Unesp, 2014.
- 4 Kumayama, R.; Alcântara, M. A. M.; Cruz, W. S.; Segantini, A. A. S.; Pinheiro, L. M. Estudo das propriedades mecânicas do concreto auto adensável com o emprego de pó de mármore e substituição parcial dos agregados por pérolas de

- poliestireno expandido. In: Congresso Brasileiro de Concreto, Ed.56., 2014, Natal. Anais... Natal: Ibracon, 2014.
- 5 Sutcu, M.; Alptekin, H.; Erdogmus, E.; Gencil, O. Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 82, p.1-8, 2015.
 - 6 Moura, W. A.; Gonçalves, J. P., Leite, R. S., Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas para revestimento e confecção de lajotas para piso. In: *Revista Sitientibus*, UEFS, Feira de Santana/Ba, v.26, p.49 - 62, 2002.
 - 7 Oliveira, D. F., Santos, V. S., Lira, H. L., Melo, A. B., Neves, G. A. Durabilidade de compósitos de concreto Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, V.I, 2 (2006) ISSN 1809-8797. 2006 Disponível em: www.dema.ufcg.edu.br/revista.
 - 8 Lajaruna, M.A.V. Estudo do solo-cimento auto adensável para a fabricação de tijolos de pó de mármore e resíduo de construção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2016.
 - 9 Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Solo Cimento - Ensaio de Compactação: NBR 12023.
 - 10 Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Solo-cimento - Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio: NBR 13554.
 - 11 Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Bloco vazado de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Método de ensaio: NBR 10836.
 - 12 Menezes, R.R., Almeida, R.R., Santana L.L., Ferreira, H.S., Neves, G.A., Ferreira, H.C.; *Revista Matéria* v. 12, n. 1, p. 225 – 235, 2007.
 - 13 P.S. Santos; *Ciência e Tecnologia de Argilas*, Ed. Edgard Bluccher Ltda, São Paulo, 1989, Vol. 1.