

Propriedades de um concreto leve estrutural com incorporação de argila expandida e resíduo de granito

Properties of structural lightweight concrete with expanded clay and the granite cut waste

Hayala Karoline Santos Rodrigues¹, Herbet Alves de Oliveira¹,
Fernanda Martins Cavalcante de Melo¹, Vanessa Gentil de Oliveira Almeida¹

¹Instituto Federal de Sergipe – IFS, Rua Café Filho, 260, CEP 49200-000, Estância, Sergipe, Brasil
e-mail: hayala_line@hotmail.com, herbetalves148@gmail.com, fernanda.melo@ifs.edu.br; vanessa.gentil@hotmail.com

RESUMO

O concreto leve tem sido utilizado para fins estruturais e para a redução do peso próprio das estruturas de concreto. A utilização da argila expandida como agregado graúdo é economicamente viável na fabricação desses concretos devido à redução de massa específica que este tipo de agregado proporciona. Em busca de um desenvolvimento sustentável, a indústria da construção civil vem utilizando resíduos gerados em empresas do setor de rochas ornamentais como uma alternativa de minimizar os impactos ambientais. Assim, nesta pesquisa foram produzidos concretos leves com a incorporação do resíduo proveniente do corte de granito em substituição parcial ao agregado miúdo (areia), nas proporções de 5%, 10% e 15%. Foram produzidas uma mistura de referência do concreto leve utilizando-se argila expandida, areia e cimento, e misturas com substituição do agregado miúdo natural por porcentagens do resíduo do corte do granito, mantendo-se constante o fator água/cimento, a sílica ativa e o superplastificante. Os corpos de prova produzidos foram caracterizados por meio de ensaios físicos (determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica), ensaio de resistência mecânica (compressão axial) e durabilidade. As formulações realizadas apresentaram valores de massa específica e resistência à compressão compatíveis com o concreto leve estrutural. Com os resultados dos ensaios, concluiu-se que a substituição de 15% do resíduo foi a que apresentou maior resistência à compressão, massa específica satisfatória (menor que 2000 kg/m³) e melhor fator de eficiência. Adicionalmente, com relação à durabilidade do concreto, as formulações com a incorporação do resíduo de granito apresentaram-se mais resistentes ao ataque por sulfatos.

Palavras-chave: Concreto Leve. Argila Expandida. Resíduo de Granito.

ABSTRACT

Lightweight concrete has been used for structural purposes and to reduce the self-weight of concrete structures. The use of expanded clay as a coarse aggregate is economically viable in the manufacture of these concretes due to the reduction in specific mass that this type of aggregate provides. In search of sustainable development, the civil construction industry has been using waste generated by companies in the ornamental stone sector as an alternative to minimize environmental impacts. Thus, in this research, lightweight concrete was produced with the incorporation of waste from granite cutting in partial replacement of fine aggregate (sand), in proportions of 5%, 10% and 15%. A reference mixture of lightweight concrete was produced using expanded clay, sand and cement, and mixtures with replacement of the fine natural aggregate by percentages of waste from the cutting of the granite, keeping constant the water/cement factor, silica fume and the superplasticizer. The produced test specimens were characterized by physical tests (determination of water absorption, void index and specific mass), mechanical resistance test (axial compression) and durability. The formulations performed presented specific mass and compressive strength values compatible with structural lightweight concrete. With the results of the tests, it was concluded that the replacement of 15% of the

residue was the one with the highest compressive strength, satisfactory specific mass (less than 2000 kg/m³) and the best efficiency factor. Additionally, with regard to the durability of concrete, the formulations with the incorporation of granite waste were more resistant to attack by sulfates.

Keywords: Lightweight Concrete. Expanded Clay. Granite Waste.

1. INTRODUÇÃO

O concreto convencional é um dos materiais mais utilizados na construção civil. De acordo com a NBR 6118 [1] o valor adotado da massa específica é de 2400 kg/m³, representando uma grande parcela das ações totais de carga na estrutura, o que implica em construir fundações cada vez mais resistentes, mas de elevado custo. Sendo assim, é benéfico que sua massa específica seja reduzida [2]

A substituição do agregado graúdo por argila expandida é uma das alternativas para reduzir o peso da estrutura. O produto gerado com essa substituição, quando comparado ao concreto convencional, apresenta uma maior taxa de absorção de água, menor massa específica e boa resistência mecânica, bem como resistência ao fogo, além de bom isolamento térmico e acústico [3], [4]. De acordo com a NBR 8953 [5] o concreto pode ser classificado como normal, leve, pesado ou denso. O concreto normal apresenta massa específica seca compreendida entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, enquanto o leve apresenta massa específica seca inferior a 2000 kg/m³ e o pesado, massa específica seca superior a 2800 kg/m³.

Por possuir uma baixa massa específica, o concreto leve reduz consideravelmente o peso próprio dos elementos cimentícios, influenciando diretamente na economia da etapa de infraestrutura em uma obra [6] A utilização deste concreto, quando comparado ao concreto convencional, proporciona também uma redução nos custos com formas e cimbramentos devido à redução das solicitações. Com a ocorrência da redução no peso dos materiais manuseados e o aumento da produtividade pode-se obter economia com transporte e montagem de construções pré-fabricadas [7] Esse tipo de concreto pode, ainda, ser utilizado nas construções de lajes, pontes, recuperação estrutural, plataformas marítimas e em peças pré-fabricadas [8]

Na sociedade atual existe uma preocupação com as questões ambientais, a partir da qual se demanda das empresas que devolvam atividades que não agridam o meio ambiente. O setor da construção civil, preocupado com a sustentabilidade, vem desenvolvendo pesquisas destinadas à criação de fontes alternativas de matérias-primas. Uma das alternativas é a reutilização dos resíduos de beneficiamento das rochas ornamentais, especialmente o granito, em matrizes cimentícias [9].

Os resíduos provenientes da indústria de rochas ornamentais geram uma grande quantidade de material que, na maioria das vezes, são descartados de maneira irregular. No processo de corte, serragem e polimento é gerada uma lama com cerca de 20% de umidade, a qual é prejudicial ao meio ambiente quando descartada diretamente nos rios, pois pode ocasionar o assoreamento, poluindo suas águas e causando impactos ambientais [10-13]. Ainda, cumpre ressaltar que a eliminação do resíduo do pó do granito gera um grande problema por não ser biodegradável. Adicionalmente, ele acaba poluindo o ar (causando infecções nos olhos e problemas asmáticos) e a terra (o pó preenche os poros do solo, assim impedindo o deslocamento das águas subterrâneas e reduzindo a produtividade do solo) [14] Diante dos fatos, é observada a necessidade de encontrar destinos alternativos para o seu reaproveitamento.

A utilização de materiais com características de filler (a exemplo do pó do granito) preenche os vazios existentes no concreto na zona de transição interfacial e apresenta-se como material redutor de plasticidade, podendo provocar variações nas propriedades de absorção de água, retração e resistência mecânica à compressão. Outro ponto bastante relevante é o possível aumento da dureza devido ao enriquecimento da massa de argila com quartzo presente no resíduo de granito [10].

Diversos autores OLIVEIRA *et al.* [15], VIJAYALAKSHMI *et al.* [16], SOARES [17], SINGH *et al.* [18], MEDINA *et al.* [19], MASHALY *et al.* [20], GHORBANI *et al.* [21] vêm pesquisando sobre a utilização deste tipo de resíduo na construção civil, porém, o estudo da aplicação de resíduos de rochas ornamentais em concreto leve com argila expandida ainda é escasso na literatura da área.

SINGH *et al.* [18], ao substituir a areia natural pelo pó do granito na produção de concreto convencional, observaram uma perda gradual da trabalhabilidade, que pode ser atribuída ao aumento do atrito interno devido à incorporação do resíduo com textura angular e rugosa. Todavia, os autores analisaram que esse efeito pode ser mitigado com o uso de superplastificante. Eles destacam, ainda, que ocorreu a redução da absorção de água e que a substituição de 25% do resíduo resultou no aumento da resistência à compressão, o que está relacionado à introdução de partículas finas do resíduo na mistura, diminuindo o volume e a conectividade dos poros capilares.

GHANNAM [22], a fim de explorar o uso do pó do granito como substituto parcial da areia na produção de concretos, adicionou o resíduo em diferentes proporções, concluindo que a substituição de 10% de areia pelo pó resultou em um concreto com aumento das resistências à compressão, à tração e à flexão

quando comparado ao concreto convencional.

CHEN *et al.* [23] estudaram sobre a incorporação do resíduo de polimento de granito como substituição de areia. Os resultados mostraram que ocorreu um melhor desempenho da argamassa ao preencher os vazios entre as partículas de areia, o que resultou na redução da porosidade e aumento na densidade. Ainda, os autores abordam que a adição do resíduo para substituir 15% a 20% de areia, por volume, aumentou a resistência mecânica entre 31,2% a 70,9%, melhorando também a reologia e a impermeabilidade.

JAIN *et al.* [24] utilizaram o resíduo de granito como alternativa de agregado miúdo para a produção sustentável de concreto autoadensável. Nesta pesquisa, constatou-se que as propriedades no estado fresco foram prejudicadas pela incorporação do resíduo. No entanto, no estado endurecido, a incorporação do resíduo de granito gerou melhores resultados de densidade, absorção, resistência à compressão e flexão.

Por sua vez, MASHALY *et al.* [20] mostraram que a substituição do resíduo em até 20% pelo cimento apresentou perda insignificante nas propriedades físicas e mecânicas, obtendo maior resistência à abrasão, congelamento e descongelamento.

Já GHORBANI *et al.* [21] revelam que as misturas de concreto com diferentes porcentagens de pó mostraram uma maior resistência ao ataque ácido quando comparadas ao concreto de referência. Os autores concluíram que o uso de pó como substituição parcial do cimento pode ser considerado uma maneira eficaz de melhorar a resistência das misturas de concreto ao ataque ácido.

Por sua vez, BINICI e AKSOGAN [25] investigaram a durabilidade de concretos com diferentes composições, como granito granular natural, areia de sílica e pós de resíduos de mármore e basalto como agregado miúdo. Nessa pesquisa, observou-se que a resistência ao sulfato dos concretos com adições minerais, ao final de 90 dias, foi superior à do concreto convencional.

Desta forma, esta pesquisa tem como objetivo produzir um concreto leve estrutural com a incorporação do resíduo proveniente do corte de granito em substituição parcial ao agregado miúdo (areia) nas proporções de 5%, 10% e 15%, bem como avaliar suas propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização das matérias-primas

O aglomerante empregado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, resistente a sulfatos (CPV-ARI-RS). O agregado miúdo foi adquirido do comércio local da cidade de Estância/SE, extraído de rios. Foi utilizado o resíduo do corte de granito, coletado em empresa da referida cidade, sendo que o mesmo foi passado na peneira de 0,074 mm. O agregado leve foi a argila expandida, nas dimensões de 5 mm (C0500) e 15 mm (C1506). O superplastificante utilizado foi o MC-Techniflow 520 (Aditivo plastificante multifuncional mid-range de pega normal). E, por fim, a sílica ativa, que apresenta em suas propriedades químicas (teor de $\text{SiO}_2 > 85\%$) e físicas (superfície específica média de $20 \text{ m}^2/\text{g}$)

Os agregados foram caracterizados por meio de ensaios físicos de análise granulométrica, conforme a NBR NM 248 [26], e massa unitária, segundo a NBR NM 45 [27]. As massas específicas do resíduo de corte do granito e do cimento foram determinadas de acordo com a NBR 16605 [28] e para o agregado miúdo, por meio da NBR NM 52 [29].

Foi realizada a caracterização química do resíduo de granito por meio da difratometria de Raios-X, em equipamento da RIGAKU, utilizando-se espaçamento de $1^\circ/\text{min}$. Os percentuais dos óxidos constituintes das amostras foram determinados através de medidas semi-quantitativas, pela técnica de fluorescência de Raios-X (FRX). As medidas foram realizadas em vácuo, em um equipamento da marca Bruker, modelo S4 Pioneer, utilizando-se amostras com massa em torno de 10 g, que foram prensadas no formato de corpos cilíndricos com diâmetro de 20 mm e espessura de 3 mm, aproximadamente.

2.2 Preparação das Formulações

A dosagem do concreto leve realizada no presente trabalho foi uma adaptação experimental do traço utilizado por SANTOS [30].

A Tabela 1 apresenta as formulações que foram realizadas e o traço em massa do concreto leve. Foram preparadas a formulação referência (MR), sem resíduo, e mais três misturas com as substituições em massa do agregado miúdo em 5%, 10% e 15% pelo resíduo de granito. Foi mantida constante a relação água/cimento em 0,45 e adicionados, em todas as formulações, 1,25% de superplastificante e 10% de sílica ativa, em relação à massa do cimento. Os testes experimentais realizados inicialmente nesta pesquisa indicaram que 20% ou mais de resíduo incorporado reduz drasticamente a consistência, inviabilizando a produção dos corpos de prova. A utilização da sílica ativa na composição dos concretos leves estruturais,

além de evitar o fenômeno de segregação do agregado de argila expandida, também contribui para redução da espessura da zona de transição interfacial entre agregado e a matriz de cimento [31].

Tabela 1: Traço em massa do concreto leve

FORMULAÇÃO	CIMENTO	AREIA	ARGILA C0500	ARGILA C1506	RESÍDUO	RELAÇÃO a/c	SP	SA
MR	1	2,11	0,86	0,33	-	0,45	0,0125	0,1
5%	1	1,90	0,86	0,33	0,21	0,45	0,0125	0,1
10%	1	1,79	0,86	0,33	0,31	0,45	0,0125	0,1
15%	1	1,69	0,86	0,33	0,41	0,45	0,0125	0,1

Legenda: MR - mistura de referência; 5% mistura com 5% do resíduo do pó de granito; 10% mistura com 10% do resíduo do pó de granito; 15% mistura com 15% do resíduo do pó de granito; a/c: relação água/cimento utilizado na preparação das misturas; SP – superplastificante em relação à massa do cimento, 1,25% ; SA - sílica ativa em relação à massa do cimento, 10%

As etapas de mistura dos materiais na betoneira para o concreto de referência foram baseadas no estudo de ROSSIGNOLO [32]: primeiramente adicionou-se cimento, areia e 50% da água, misturados por 1 minuto; sem parar a betoneira, adicionou-se a sílica ativa e o superplastificante, diluído em 50% do restante da água, misturados por mais 1 minuto; e, por último, ainda com a betoneira em movimento, foram adicionadas as argilas C0500 e C1506, misturadas por mais 1 minuto. Para as misturas do concreto leve com argila expandida e resíduo do corte de granito seguiram-se as etapas prescritas para o concreto de referência, sendo que na segunda etapa foi acrescentado o resíduo de granito.

Para cada traço foram moldados 9 (nove) corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para realização dos ensaios de resistência à compressão axial, determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, ao passo em que para o ensaio de durabilidade foram moldadas 3 (três) corpos de prova prismáticos de dimensões 50 mm de largura, 50 mm de altura e 200 mm de comprimento. Após 24 horas, foram desmoldados e imersos em água potável com adição de cal, onde permaneceram por 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 5738 [33].

2.3 Ensaios realizados no estado fresco e endurecido

Os concretos leves foram caracterizados em seu estado fresco por meio do ensaio da consistência (*slump test*), segundo as prescrições da NBR 67 [34], e no estado endurecido, após os 28 dias de cura. Foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de resistência à compressão axial, por meio da NBR 5739 [35], determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, pela NBR 9778 [36], e o ensaio de durabilidade, que foi determinado através de uma adaptação da norma DNER – ME 089 [37], seguindo-se as etapas: passado o período de 28 dias de cura, os corpos de prova foram imersos em um recipiente contendo uma solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), à temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$, pelo tempo mínimo de 16 horas.

Após o período de imersão, os corpos de prova prismáticos foram retirados da solução e colocados na estufa para secar a $105 (\pm 5)^\circ\text{C}$ até obter constância de massa. Depois de completado o ciclo final, as amostras foram lavadas em solução de cloreto de Bário (BaCl_2) para retirar o excesso de sulfato de sódio e, em seguida, lavadas com água corrente. O processo de imersão e secagem constitui um ciclo que foi repetido por cinco vezes. Livres da solução, as amostras foram levadas à estufa até obter constância de massa.

As propriedades do concreto no estado endurecido foram avaliadas com o auxílio de análise estatística. Foi realizada a análise de variância (ANOVA), na qual é gerado um parâmetro p , o qual, se for menor que o nível de significância adotado pelo teste (0,05), demonstra que fator em estudo influencia significativamente no resultado analisado; caso contrário, o fator não exerce influência significativa [38].

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização das matérias-primas

Os resultados da caracterização das matérias-primas são apresentados na Tabela 2 e a curva granulométrica do agregado miúdo natural com o resíduo de granito, na Figura 1. As massas unitárias do resíduo do corte de granito são menores em relação às da areia, o que favorece a redução da massa específica do concreto. Pode-se observar que o resíduo de granito é mais fino do que a areia, o que pode ser demonstrado, por exemplo, na peneira 0,15 mm, em que passou 10% da areia e 50% do resíduo. Por ser mais fino, o resíduo contribui principalmente para o preenchimento dos vazios deixados pelo desajuste, ou desarrumação dos agregados,

assim contribuindo para o aumento de resistência mecânica.

Tabela 2: Caracterização física das matérias-primas utilizadas no concreto leve

MATÉRIA-PRIMA	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	MASSA UNITÁRIA COMPACTADA (g/cm ³)	MASSA UNITÁRIA SOLTA (g/cm ³)	DIÂMETRO MÁXIMO (mm)	MÓDULO DE FINURA
Cimento	3,037	-	-	-	-
Areia	2,632	1,630	1,595	2,36	1,79
Resíduo do corte de granito	2,766	1,267	1,192	2,36	0,83
Argila Expandida C0500	1,560	0,909	0,823	4,75	3,60
Argila Expandida C1506	1,110	0,522	0,532	19	6,56
Sílica ativa	2,174	-	-	-	-

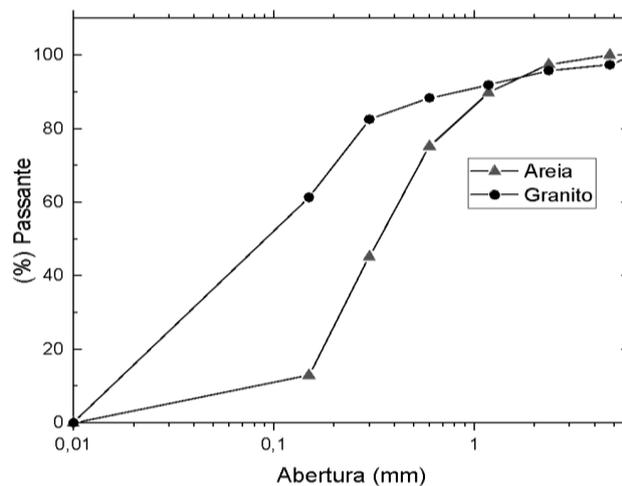


Figura 1: Análise granulométrica do agregado miúdo e do resíduo de granito

Na Figura 2 é apresentada a difratometria de Raios-X do resíduo de granito. Com o resultado da análise de difratometria de Raios-x, é observada a predominância das fases biotita, albita, calcita e quartzo. Assim, os resultados do ensaio estão de acordo com o apresentado na pesquisa de MOREIRA e HOLANDA [38].

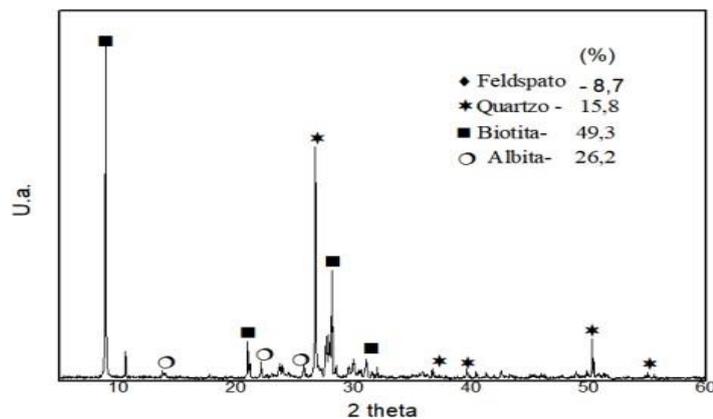


Figura 2: Padrão de difratometria de Raios- X do resíduo de granito. Legenda: U-a. – unidade arbitrária.

Na Tabela 3 é apresentada a análise química do resíduo. O resíduo de granito apresenta composição química com a presença de óxidos, SiO₂, CaO, Al₂O₃, MgO e Fe₂O₃, além dos álcalis K₂O e Na₂O, presentes na albita e feldspato e é compatível em materiais cimentícios na construção civil, entre outras aplicações por

ser inerte [39].

Tabela 3: Análise química do resíduo (%)

Matéria-prima	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	ZrO ₂	TiO ₂	SO ₂
Resíduo	48,67	2,86	19,67	14,05	10,90	-	0,25	0,24	2,49	1,09

3.2 Ensaios realizados no estado fresco e endurecido

O concreto no estado fresco foi avaliado por meio da consistência utilizando-se o ensaio de abatimento do tronco de cone. Os resultados são apresentados na Tabela 4. Foi observado um aumento do índice de consistência das formulações, na medida em que aumentava a quantidade de resíduo em 45%, 90% e 190%, respectivamente.

Tabela 4: Ensaio de abatimento do tronco de cone nos concretos leves

FORMULAÇÕES	ENSAIO DE ABATIMENTO (mm)
MR	110
5%	160
10%	210
15%	320

Na pesquisa de JAIN *et al.* [24] é possível verificar que 20% (menor percentual adotado no estudo) de substituição do agregado miúdo por resíduo de granito resultou em melhor trabalhabilidade, reduzindo assim a dosagem de superplastificante (SP) em relação ao concreto sem o resíduo. Os autores explicam que o efeito de preenchimento das partículas do resíduo de granito pode ter proporcionado uma lubrificação eficiente entre as partículas e resultado em maior fluidez.

Na Figura 3 são apresentados os resultados de absorção de água por imersão para todas as formulações, que representam a média de três valores encontrados no ensaio. Os resultados mostraram-se significativos, de acordo com a ANOVA, ou seja: $F=50,8$, F crítico=3,49 e $p= 4,26 \times 10^{-7}$. Assim, pode-se observar que houve um aumento no valor de absorção para todos os percentuais de substituição, o que foi verificado por GAMEIRO [40], que avaliou o desempenho de durabilidade de um concreto estrutural contendo resíduos gerados pela indústria da marmoraria. Segundo o autor, a compactação da mistura é comprometida pela rugosidade do resíduo, resultando no pior empacotamento e maior retenção de ar, gerando uma união porosa e produzindo um concreto com maior absorção de água por imersão.

Na formulação com 5% de resíduo pode ser observado um aumento de absorção de água mais significativo em relação às demais misturas, fato este pode ser atribuído a uma maior presença de vazios, possivelmente não eliminados no procedimento de adensamento, pois essa formulação resultou na menor massa específica (Figura 4).

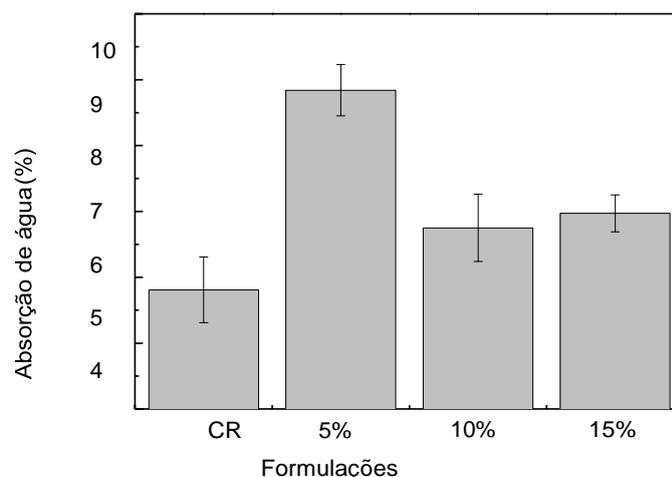


Figura 3: Absorção de água das formulações investigadas

JAIN *et al.* [24], ao pesquisarem o concreto autoadensável com o resíduo do granito, observaram que, quando substituíram inicialmente os 20% do resíduo pelo agregado miúdo, a absorção diminuiu e, conforme foi acrescentando até completar 100%, a absorção também foi aumentando. Dessa forma, os autores concluíram que esse aumento pode ser devido à formação de um grande número de vazios na matriz do concreto.

Segundo uma pesquisa realizada por GHORBANI *et al.* [21], a mistura de concreto com adição de 5% de pó de granito obteve a menor absorção de água, enquanto a mistura com 20% do pó exibiu a maior absorção de água. Os autores concluíram que o uso do pó em até 10% pode diminuir levemente a absorção de água da mistura.

Os resultados de massa específica estão plotados na Figura 4. De acordo com a ANOVA, o $F=1,14$, $F_{crítico}=3,2$ e $p=0,36$. Assim, pode-se concluir que o resíduo de granito não apresentou influência significativa de massa específica. JAIN *et al.* [24] e NASCIMENTO *et al.* [41] encontraram resultados semelhantes a esta pesquisa, sem diferença significativa nos valores de massa específica, quando substituíram a areia por resíduo de granito, em até 20% e 40%, respectivamente. Ainda, registra-se que mesmo para um percentual de incorporação de 15% de resíduo é possível produzir um concreto leve, pois todas as formulações obtiveram massa específica inferior a 2000 kg/m³; sendo assim, são considerados concretos leves, de acordo com a NBR 8953 [5]

A formulação com 5% do resíduo apresentou-se com menor massa específica e, como já relatado, foi justamente a que apresentou maior absorção (Figura 3). De acordo com os estudos do concreto leve com argila expandida realizados por GRASSI e ANTUNES [42], a absorção de água e massa específica é inversamente proporcional, ou seja, à medida em que se aumenta a absorção de água, a massa específica reduz.

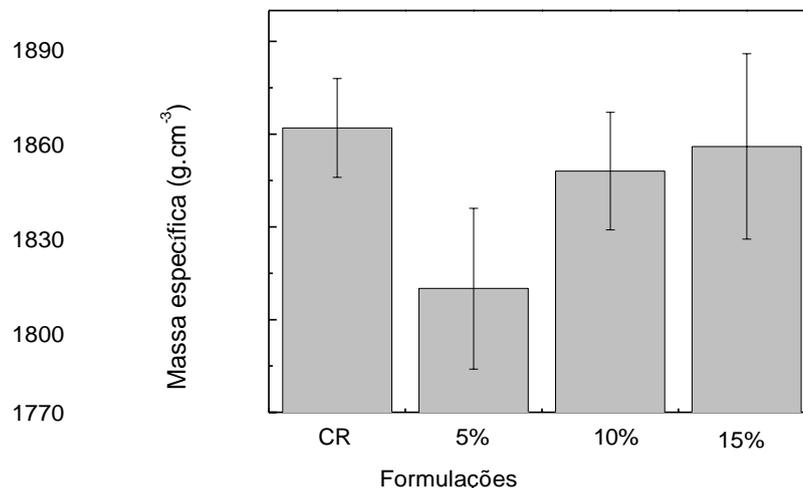


Figura 4: Massa específica das formulações investigadas

Segundo SOARES [17], ao adicionar o resíduo do granito (pó) frente à matriz cimentícia, nas proporções de 5%, 10% e 15%, com diferentes relações a/c, foi observada a tendência de redução da massa específica com o aumento do resíduo. Esse comportamento pode estar ligado à dificuldade de adensamento, o que pode gerar mais ar incorporado e, por consequência, diminuição nos valores referentes a essas massas.

GHORBANI *et al.* [21], em sua pesquisa, constataram que as amostras com 20% do resíduo do pó do granito, em substituição parcial do cimento, reduziram a massa específica do concreto em 26,5% em relação à mistura de referência.

Na Tabela 5 são apresentadas as médias dos resultados da resistência à compressão axial. Utilizando a ANOVA, foi observado o valor de $F=0,92$, $F_{crítico}=3,22$ e $p=0,456$. Portanto, a substituição do resíduo não compromete a resistência do concreto leve. Semelhante a essa pesquisa, VIJAYALAKSHMI *et al.* [16] verificaram que a substituição de até 15% da areia pelo resíduo não altera a resistência do concreto. Portanto, todas as formulações podem ser aplicadas para fins estruturais, pois, segundo a NBR 8953 [5] o concreto leve para ser utilizado como elemento estrutural deve apresentar resistência à compressão aos 28 dias de idade, acima de 20 MPa. Desta forma, todas as formulações podem ser aplicadas para fins estruturais, alcançando um dos objetivos deste trabalho.

Tabela 5: Resistência à compressão axial aos 28 dias de idade dos concretos leves

FORMULAÇÕES	Resistência à compressão axial (MPa)
MR	32,80 ± 0,60
5%	31,76 ± 2,03
10%	33,46 ± 1,88
15%	34,88 ± 2,97

GHANNAM [22], a fim de explorar o uso do pó do granito como substituto parcial da areia, adicionou o resíduo em diferentes proporções, concluindo que a substituição de 10% resultou em um concreto com aumento da resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão, quando comparado ao concreto convencional.

Por sua vez, JAN *et al.* [24] observaram que, para todas as formulações e durações de cura, a resistência à compressão inicialmente aumentou no nível de substituição de 20% do resíduo de granito. A resistência superior ou comparável até o nível de substituição de 40% do resíduo foi atribuída ao melhor efeito de preenchimento, que estava relacionado ao menor tamanho (Tabela 2) e à forma irregular das partículas do resíduo de granito. As partículas menores preencheram efetivamente as lacunas entre as maiores partículas de agregado, bem como as partículas de cimento e areia. Além disso, a rugosidade superficial das partículas do resíduo fez um intertravamento adequado com a pasta cimentícia, levando a uma melhor zona de transição interfacial entre o agregado e a pasta e, assim, melhorou a resistência à compressão.

Além da massa específica aparente, o concreto leve estrutural pode ser classificado através do fator de eficiência, que relaciona o valor de resistência à compressão e ao de massa específica aparente do concreto (Ver Tabela 6) [43].

De acordo com RODRIGUES [44], o fator de eficiência é aplicado especialmente aos concretos leves de alto desempenho (CLAD). Diante da avaliação realizada dos traços utilizados em obras, o concreto leve foi classificado e, por meio dessa análise, foi possível concluir que o fator de eficiência encontrado para todos os concretos desta pesquisa está na faixa de concreto leve estrutural, que tem valores compreendidos entre 10 MPa.dm³/kg e 25 MPa.dm³/kg.

Tabela 6: Fator de eficiência dos concretos leves

FORMULAÇÕES	Fator de Eficiência (MPa.dm ³ /kg)
MR	17,68±0,26
5%	17,36±1,19
10%	18,16±1,01
15%	18,84±1,71

Para a análise de durabilidade, os corpos de prova prismáticos foram pesados e imersos em solução Na₂SO₄. Na Tabela 7 são apresentados os resultados do ensaio de durabilidade das formulações dos concretos leves de referência e com o resíduo do corte de granito. O valor de massa inicial e final de cada formulação foi calculado utilizando-se a média dos corpos de prova e, a partir disto, calculou-se o ganho de massa.

Tabela 7: Ensaio de durabilidade por meio da imersão em sulfato de sódio

FORMULAÇÕES	MASSA INICIAL (G)	MASSA FINAL (G)	GANHO DE MASSA (%)
MR	1527,30	1685,40	10,35±0,83
5%	1579,47	1605,74	1,66±0,17
10%	1502,62	1542,35	2,64±0,85
15%	1625,42	1661,07	2,19±0,37

Os resultados foram analisados e são significativos, ou seja, as variações não são iguais (F= 128, F crítico=4,06 e p=4,0 x 10⁻⁴). Observa-se um ganho de massa em todas as formulações, o que denota a existência de formação de produtos expansivos e uma possível densificação inicial da microestrutura. De

acordo com ANGELIN *et al.* [31], o sulfato reage com o C3A formando cristais aciculares, denominados de trissulfoaluminato de cálcio ou etringita, cujo crescimento irá promover um aumento nas tensões internas do corpo, assim provocando a expansão da pasta e ganho de massa, tendo como consequência o aparecimento de fissuras na mesma. Logo, o acréscimo de resíduo diminui a expansão, pois reduz a disponibilidade do C3A.

Ainda, constatou-se que a incorporação do resíduo no ganho de massa, quando comparada com o concreto de referência, é menor, evidenciando que todas as formulações com o resíduo de granito mostraram-se mais resistentes ao sulfato de sódio após o processo de imersão. Portanto, indicando que a substituição aumentou a durabilidade do concreto leve.

ARIVUMANGAI *et al.* [45] substituíram a areia de rio por areia de granito e descobriram que um concreto resistente ao sulfato pode ser obtido com uma mistura ideal consistindo de 25% de areia de granito e 75% de areia de rio. A razão para maior resistência ao sulfato para essa formulação foi atribuída à presença de maior composição de Al_2O_3 na areia de granito e maior composição de SiO_2 presente na areia de rio que, quando reagem com cimento, transformam-se em silicato tricálcico (C3S) e silicato dicálcico (C2S) durante o processo de hidratação. Também, a areia de granito possuía uma densidade relativamente maior, o que levou a uma microestrutura mais densa.

É bem conhecido que, para um determinado nível de substituição com adições minerais, a durabilidade do concreto é influenciada pela reatividade destes. BINICI e AKSOGAN [25] constataram que, à medida que a proporção de substituição de areia natural por granito granular aumentava, ocorria a redução da resistência à compressão após o efeito do sulfato. A perda de resistência foi de 10%, enquanto que, para a amostra de controle, foi de 28%. Assim, os autores afirmam que o uso de granito granular natural em concretos melhora a durabilidade desse material, pois apresentam maior resistência química em relação às misturas convencionais de concreto.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, concluiu-se que a proposta de dosagem atendeu às expectativas de produção de um concreto leve estrutural utilizando-se dois tipos de granulometrias de argila expandida, a C0500 e a C1506, com reaproveitando do resíduo de corte de granito.

Conforme se aumentou a porcentagem de substituição do resíduo, ocorreu um aumento no índice de consistência do concreto, resultando na melhoria da trabalhabilidade. Foi verificado que, com a incorporação do resíduo, a absorção de água aumentou e a massa específica não sofreu influência significativa em relação ao concreto de referência.

Com base nos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, a adição do resíduo não influenciou de forma significativa essa propriedade em relação ao concreto de referência. Os resultados do Fator de Eficiência mostraram que a substituição de 15% do agregado miúdo pelo resíduo do corte do granito foi a mais eficiente, sendo que todos os concretos possuem o FE dentro da faixa aceitável.

O ensaio de durabilidade mostrou que o concreto com o resíduo é menos suscetível ao ataque por sulfatos quando comparado ao concreto leve de referência. Porém, para se obter resultados mais significativos, sugere-se a realização do ensaio de resistência à compressão, após todos os ciclos de desgaste químico.

Portanto, foi possível, nesta pesquisa, por meio do estudo das propriedades do concreto leve com argila expandida e resíduo do corte de granito, em substituição parcial do agregado miúdo natural, produzir um concreto leve, estrutural, sustentável e com maior resistência ao ataque químico por sulfatos. Vale salientar que o uso do resíduo em materiais de construção contribui com a redução dos impactos ambientais ocasionados pela construção civil, diminuindo a quantidade do consumo de agregados naturais, que possuem jazidas limitadas, além de evitar técnicas de extração danosas e economicamente dispendiosas.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Sergipe (IFS), por meio dos projetos PIBIC e da PROPEX, pela estrutura disponibilizada ao Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Sergipe (UFS), pelo consentimento do uso dos equipamentos de ensaios químicos e pelo suporte técnico para a realização desta pesquisa, bem como às empresas CINEXPAN S.A e A MÁRMORES E GRANITOS SANTANA, pela doação dos materiais utilizados.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] BOGAS, J.A., BRITO, J., FIGUEIREDO, J. “M. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete”. *Journal of Cleaner Production*, v. 89, pp. 187-195, 2015.
- [3] WONGSA, A., SATA, V., NAKULONG, P., *et al.* “Use of crushed clay brick and pum- ice aggregates in lightweight geopolymer concrete”. *Construction and Building Materials*, v. 188, pp. 1025- 1034, 2018.
- [4] BORJA, E.V. “Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves auto adensáveis”. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- [6] ANGELINA. F., “Concreto leve estrutural – Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais”. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira-SP, 2014.
- [7] CATÓIA, T. “Concreto ultraleve Estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material de estudo de sua aplicação em lajes”. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [8] CINEXPAN - Argila Expandida. “Sustentabilidade”, www.cinexpan.com.br, acessado em 26 de agosto de 2021.
- [9] VAZZOLER, J.S. “Investigação de potencialidade pozolânica do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico para produção de pasta cimentícia”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2015.
- [10] ALMEIDA, K.S.; SOARES, R.A.L., MATOS, J.M.E. “Efeitos de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria da cerâmica vermelha: revisão bibliográfica”. *Revista matéria*, v. 25, pp. 27-42, 2020.
- [11] MOURA, W.A., LEITE, M.B. “Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação”. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 64, n. 2, pp. 147-154, 2011.
- [12] DEGEN, M.K., *et al.* “Concretos produzidos com resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais como substituto parcial de cimento”, In: *Anais do 55º Congresso brasileiro de concreto*. IBRACON. 2013. pp. 1-12.
- [13] D'AGOSTIN, L., VIDAL, F.W.H., CASTRO, N.F. “Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de concreto”. In: *Jornada de Iniciação Científica, 24. Anais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016. 5p.
- [14] GUPTA, L.K., VYAS, A.K. “Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder”. *Construction and Building Materials*. v. 191, pp. 155-164, 2018.
- [15] OLIVEIRA, D.M., OLIVEIRA, T.N., BEZERRA, A.C.S., *et al.* “Utilização de resíduo de granito como substituição ao cimento Portland em matrizes cimentícias”, In: *Congresso brasileiro do concreto, 53., 2011, Florianópolis. Anais...* Florianópolis: IBRACON, pp. 1–13, 2011.
- [16] VIJAYALAKSHMI, M., SEKAR, A.S.S., PRABHU, G.G. “Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste”. ISSN 0950-0618. *Construction and Building Materials*, v. 46, pp. 1-7, 2013.
- [17] SOARES, R.B. “Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- [18] SINGH, S., NAGAR, R., AGRAWAL, V. “A Review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand”. *Journal of Cleaner Production*, v. 126, pp. 74-87, 2016.
- [19] MEDINA, G., SÁEZ DEL BOSQUE, I.F., FRÍAS, M., *et al.* “Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations”. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, pp. 467-476, 2017.
- [20] MASHALY, A.O., BASEL N., SHALABY, B.N., *et al.* “A Performance of mortar and concrete incorporating granite sludges cement replacement”. *Construction and Building Materials*. v. 169, pp. 800-818, 30,2018.
- [21] GHORBANI, S., TAJI, I., BRITO, J., *et al.* “Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions”. *Construction and Building Materials*. v. 194, pp. 143–152, 2019.

- [22] GHANNAM, S. “Comparison between concrete with granite powder and concrete with iron powder”. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*. v.11, n. 21, pp. 10501-10515, 2016.
- [23] CHEN, J.J., LI, B.H., NG, P.L., *et al.* “Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar”. *Powder Technology*, v. 364, pp. 404-415, 2020.
- [24] JAIN, A., GUPTA, R., CHAUDHARY, S., “Sustainable development of self-compacting concrete by using granite waste and fly ash”, *Construction and Building Materials*, v. 262, pp. 120516, 2020.
- [25] BINICI, H., AKSOGAN, O. “Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate”. *Journal of Building Engineering*, v. 19, pp. 109-121, 2018.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [30] SANTOS, J.N.S. *Desenvolvimento de concreto leve de argila expandida modificado com resíduo de borracha de pneu*. Dissertação (Monografia) – Instituto Federal de Sergipe, Estância, 2019.
- [31] ANGELIN, A.F., LINTZ, R.C.C., BARBOSA, L.A.G. “Uso da argila expandida e sílica ativa no melhoramento dos desempenhos mecânicos, físicos e térmicos de concretos leves estruturais”. *Revista matéria*, v. 22, pp. 57-66, 2017.
- [32] ROSSIGNOLO, J.A. “Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – Dosagem, produção, propriedades e microestrutura”. Tese (Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Concreto – procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67: Cimento Portland: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- [37] DNER-EM-Agregado: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio, 089/1994.
- [38] MOREIRA, J., HOLANDA, J. “Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha”. *Cerâmica*, v. 49, pp. 262-267, 2003.
- [39] FREIRE SAYEG, A., MOTTA, J., FRANCISCO, J. “Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito”. *Revista Rochas de Qualidade*, Ano XXV, Edição 123, pp.98-108, jul/ago. 1995.
- [40] GAMEIRO, F., DE BRITO, J., DA SILVA, D.C.. “Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry”. *Engineering Structures*, v. 59, pp. 654-662, 2014.
- [41] NASCIMENTO, E.S.S., SOUZA, P.C., OLIVEIRA, H.A., *et al.* “Soil-cement brick with granite cutting residue reuse”, *Journal of Cleaner Production*, v. 321, pp. 129002, 2021.
- [42] GRASSI, R.L., ANTUNES, G.P. “Concreto leve: estudo de dosagens com argila expandida e poliestireno expandido”. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2016.
- [43] ROSSIGNOLO, J.A. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. 1. ed. São Paulo: Pini, 2009, 144p.
- [44] RODRIGUES, A.V. “Aplicação de uma argila expansiva de jazida do rio grande do sul à produção de agregados para concretos leves”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2018.
- [45] ARIVUMANGAI, A., NARAYANAN, R.M., FELIXKALA, T. “Study on sulfate resistance behaviour of granite sand as fine aggregate in concrete through material testing and XRD analysis”, *Materials Today: Proceedings*, v. 43, pp. 1724-1729, 2021

ORCID

Hayala Karoline Santos Rodrigues

<https://orcid.org/0000-0002-3476-2164>

Vanessa Gentil de Oliveira Almeida

<https://orcid.org/0000-0001-9740-1940>

Herbet Alves de Oliveira

<https://orcid.org/0000-0003-4159-6325>

Fernanda Martins Cavalcante de Melo

<https://orcid.org/0000-0002-0122-8336>