

Estudo de Viabilidade da Incorporação de Resíduos Cerâmicos Micronizados em Concreto Estrutural

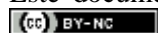
Feasibility Study of the Incorporation of Micronized Ceramic Waste in Structural Concrete

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça¹, Osires de Medeiros Melo Neto^{1,*}, John Kennedy Guedes Rodrigues¹, Robson Kel Batista de Lima¹, Ingridy Minervina Silva¹

¹Universidade Federal de Campina Grande. Departamento de Engenharia Civil. Campina Grande-PB, 58429-900, Brasil.

*Autor de correspondencia: osiresdemedeiros@servidor.uepb.edu.br

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 16 octubre 2021 **Aceptado:** 18 julio 2022 **Publicado:** 1 septiembre 2022

Resumo

A redução do descarte de resíduos da indústria de rochas e a diminuição do consumo de areia no ramo da construção civil são importantes para o desenvolvimento sustentável. Uma estratégia para minimizar estes problemas é utilizar os resíduos como substituintes parciais na produção de concreto estrutural. Desta forma, este estudo tem como objetivo analisar as propriedades físicas e mecânicas de concreto estrutural modificado por adição de resíduos cerâmicos micronizados de mármore e quartzito e avaliar a viabilidade de uso destes materiais na construção civil. Realizou-se a dosagem e moldagem dos corpos de prova nas dimensões de 10 cm x 20 cm, com substituição parcial no teor de 20 % para ambos os resíduos, individualmente. Caracterizações físicas e químicas foram realizadas para os materiais utilizados, em seguida, avaliou-se o desempenho físico e mecânico dos concretos por meio dos ensaios de absorção, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral. A incorporação desses resíduos proporcionou aumento da absorção, e ganho de resistência à tração. O concreto modificado com resíduo de mármore apresentou perda de resistência à compressão e o concreto modificado com resíduo de quartzito ganhou de resistência à compressão. Portanto, a utilização dos resíduos de mármore e quartzito micronizados, como substituinte parcial ao agregado miúdo convencional, apresenta-se uma alternativa viável para inserção de um material em um novo ciclo produtivo.

Palavras-chave: Concreto; Construção Civil; Materiais Alternativos; Resíduos; Reciclagem

Abstract

Reducing waste disposal from the rock industry and reducing sand consumption in the civil construction sector is important for sustainable development. One strategy to minimize these problems is to use waste as partial substitutes in the production of structural concrete. Thus, this study aims to analyze the physical and mechanical properties of structural concrete modified by the addition of micronized ceramic waste of marble and quartzite and evaluate the feasibility of using these materials in civil construction. The dosage and molding of the specimens in the dimensions of 10 cm x 20 cm was carried out, with partial replacement in the 20 % content for both residues, individually. Physical and chemical characterizations were carried out for the materials used, and then the physical and mechanical performance of the concretes was evaluated through tests of absorption, simple compression strength, and tensile strength by diametrical compression. The incorporation of these residues provided an increase in absorption and again in tensile strength.

Concrete modified with marble residue showed loss of compressive strength and concrete modified with quartzite residue gained compressive strength. Therefore, the use of micronized marble and quartzite waste, as a partial substitute for the conventional fine aggregate, is a viable alternative for inserting material in a new production cycle.

Keywords: Concrete; Civil construction; Alternative materials; Residues; Recycling

1. Introdução

O aumento do consumo de materiais devido ao crescimento industrial vem acarretando o esgotamento dos recursos naturais, incluindo energia e matérias-primas [1]. Atualmente é percebido um consumo exagerado de materiais e uma necessidade crescente de agregados no âmbito da construção civil devido ao crescimento da produção industrial, levando a uma redução rápida dos recursos disponíveis [2]. Nos últimos 25 anos uma maior consciência foi desenvolvida para proteger o meio ambiente, a fim de desenvolver práticas sustentáveis [3].

A destinação dos resíduos é uma das grandes preocupações que o mundo enfrenta hoje, independentemente dos motivos, sejam políticos, econômicos ou ecológicos. Recentemente, a reciclagem de resíduos em todos os segmentos da cadeia produtiva tem sido incentivada [4-6]. Estudos apontam efetividade no uso de resíduos provenientes do corte de rochas ornamentais para fabricação de concretos estruturais. [2] apontam em seu estudo que a incorporação de resíduo de mármore em substituição parcial ao agregado graúdo, ao agregado miúdo e ambos os agregados é benéfico para o desempenho do concreto estrutural. A incorporação de até 75 % desse resíduo gerou ganho de resistência mecânica e resultados dentro das especificações dadas em normas. Contudo, os valores de parâmetros de durabilidade e a resistência ao desgaste abrasivo foram maiores quando comparados ao concreto convencional. [7, 8] avaliaram as propriedades mecânicas e a microestrutura da zona de transição interfacial do concreto com substituição parcial de areia por pó de basalto residual e verificaram melhora na resistência à compressão e flexão do concreto, devido ao efeito de enchimento do pó de basalto, deixando o concreto mais denso. A pesquisa realizada por [1] afirma que o resíduo de mármore incorporado ao concreto é benéfico, seja em substituição ao agregado grosso, fino ou até mesmo ao cimento. Esse aditivo acarreta ganho de resistência à compressão e à tração. [9] investigaram o uso do pó de mármore como modificador da pasta de cimento e afirmam bom desempenho do material, indicando o uso deste resíduo em substituição de até 60 %. [10] investigaram a influência da heterogeneidade de resíduos do processamento úmido de pedras ornamentais (mármore, granito, ardósia) no desempenho de cimento Portland e verificaram que a heterogeneidade apresenta pouca influência nas propriedades físico-químicas. [11] investigaram a adição de cinzas volantes em substituição parcial ao cimento e pó de mármore em substituição parcial à areia. Os estudiosos apontam que o pó de mármore até o teor de 20 % proporciona ganho de resistência ao concreto e que a incorporação desses aditivos gerou melhoria de durabilidade do concreto em todos os teores testados. [12] desenvolveram um estudo com incorporação de resíduo de granito em substituição parcial ao agregado fino e observaram que essa adição apresentou ganho de resistência às argamassas, principalmente no teor de 20 %. Estes resultados também foram comprovados por [13] quando substituíram o agregado fino em teores de 15 e 20 %, melhorando também a impermeabilidade das argamassas.

O quartzito é uma rocha metamórfica cujo componente principal é o quartzo (mais de 75 % como ordem de grandeza). É utilizado na produção de tijolos e refratários de sílica, usada na siderurgia e para o preparo do leito de fusão dos altos-fornos, rocha ornamental utilizada de diferentes maneiras (rústica, talhada, polida, outras). A indústria de corte de pedras finas gera um grande volume de resíduos. Nos últimos anos, o uso de materiais cerâmicos nas edificações tem crescido. Assim, com o aumento da produção nas marmorarias, a quantidade de resíduos não pode ser armazenada e ao

utilizar esses subprodutos que não podem ser armazenados em outros setores, o ganho econômico pode ser alcançado e a poluição ambiental pode ser evitada [14].

Desta forma, este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de concreto estrutural modificado por adição de resíduos cerâmicos de mármore e quartzito, ambos micronizados e no teor de 20 %, e analisar a viabilidade de uso destes materiais no ramo da construção civil.

2. Materiais e Métodos

Nesta seção são descritos os materiais e procedimentos realizados durante a fase experimental da pesquisa, de acordo com normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Materiais

Na produção do concreto deste estudo foi utilizado o Cimento Portland CP II Z 32, composto com adição de pozolana, adquirido no comércio local do município de Campina Grande-PB. O agregado miúdo utilizado foi Areia Quartzosa, extraída do Rio Paraíba-PB.

Os agregados graúdos, brita 25 mm e brita 9,5 mm, foram cedidos pela empresa Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande. Os resíduos do corte de mármore foram cedidos pela empresa GRANFUJI, situada no distrito industrial da cidade de Campina Grande-PB. O resíduo de quartzito micronizado é proveniente de jazida do Junco do Seridó-PB. A água utilizada foi a água fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), potável e destinada ao consumo humano. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados, ensaiados segundo a norma NBR NM 248:2003, e a Tabela 1 apresenta os resultados de caracterização física dos materiais.

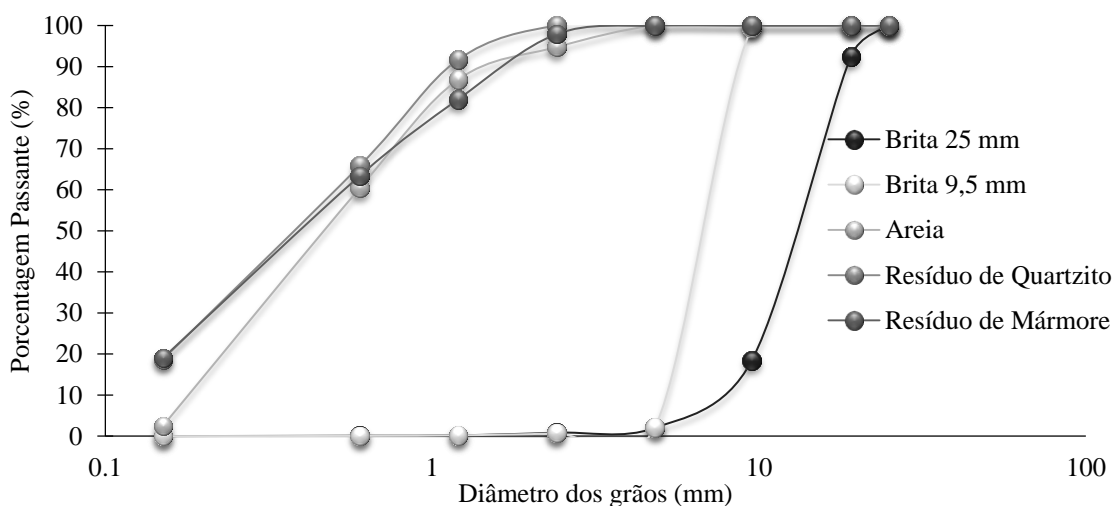


Fig.1 Distribuição granulométrica dos agregados

Tabela 1. Caracterização física dos materiais

Ensaio	Resultados						Norma
	Brita 25 mm	Brita 9,5 mm	Resíduo de Mármore	Resíduo de Quartzito	Areia	Cimento	
Massa específica real (g/cm ³)	2,69	2,68	2,65	2,64	2,59	2,91	NBR 16917:2021 / NBR 16916:2021
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	-	-	1,46	1,44	1,5	-	NBR NM 45:2006
Índice de finura (%)	6,87	5,98	1,96	1,83	2,37	2,84	NBR NM 248:2003
Diâmetro máximo nominal (mm)	25	9,5	2,36	1,18	2,36	-	NBR NM 248:2003

A maioria dos agregados naturais possui massa específica entre 2,6 e 2,7 g/cm³ [15], valores próximos aos obtidos neste estudo. Observa-se que os agregados graníticos se encontram dentro dos parâmetros estabelecidos para a utilização em concreto, segundo as normas da ABNT e [16]. O índice de finura do cimento Portland se enquadra dentro do limite máximo de 12% especificado pela norma NBR NM 248:2003. De acordo com os resultados obtidos para a caracterização física dos resíduos de mármore e quartzito, observa-se que os valores encontrados para as massas unitárias e massas específicas são próximos aos obtidos para o agregado miúdo convencional utilizado nesta pesquisa. Assim como demonstraram uma granulometria que se enquadra na zona utilizável como agregado miúdo. As curvas granulométricas ilustram que as britas utilizadas na pesquisa, se enquadram nos limites propostos pela NBR 7211:2009, tendo a brita de granulometria inferior mais de 95% de material retido na malha 4,8 mm, podendo ser caracterizada então como brita 0. A composição química das matérias-primas foi determinada em equipamento EDX-900 da marca Shimadzu, pelo método de Espectrofotometria Fluorescente de Raios-X e a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos neste ensaio para os resíduos de mármore e quartzito micronizados.

Tabela 2. Caracterização química por fluorescência de raios-X dos resíduos de mármore e quartzito micronizados

Resíduo de Mármore Micronizado							
Composição (%)	Perda ao Fogo	CaO	MgO	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	Outros
	34,13	51,02	10,03	2,06	1,22	0,52	1,02
Resíduo de Quartzito Micronizado							
Composições (%)	Perda ao Fogo	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
	2,05	0,45	12,19	70,73	9,79	4,39	0,4

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, verifica-se que o resíduo de mármore micronizado apresenta em sua composição majoritária CaO (51 %), MgO (10 %) e SiO₂ (2 %). Observa-se, que este resíduo apresenta composição característica de um material calcário dolomítico, exibindo teor de 10,03 % de MgO, e relação MgO/CaO em torno de 0,19. Calcários dolomíticos apresentam teores de MgO entre 4,3 % e 10,5 % e relação MgO/CaO entre 0,08 e 0,25 [17]. O resíduo apresenta também menores quantidades de dióxido de silício e óxido sulfúrico. Apresentando, ainda, uma alta perda de massa na calcinação do resíduo de mármore de 34 %

correspondente à liberação do CO₂ dos carbonatos durante o aquecimento. [18] realizou a caracterização de resíduo de mármore visando sua utilização na produção de materiais vítreos e obteve como principais componentes os óxidos CaO (58 %) e MgO (31 %).

Observando os valores da composição química, verifica-se que o resíduo de quartzito é constituído basicamente de dióxido de silício SiO₂ (70,73 %), óxido de alumínio Al₂O₃ (12,19 %), óxido de potássio K₂O (9,79 %) e teor de óxido de ferro Fe₂O₃ (4,39 %) [19], ao estudar o quartzito proveniente do mesmo local que o utilizado no presente estudo, obtiveram resultados similares, associa-se a grande quantidade de SiO₂ à presença do argilomineral caulinita e dos minerais acessórios mica, feldspato, bem como o quartzo livre na amostra. O Al₂O₃ também está relacionado à presença destes minerais. Os componentes detectados presentes nos dois resíduos foi o óxido de cálcio, o dióxido de silício e o óxido de potássio, prevalecendo o dióxido de silício (quartzo) no resíduo de quartzito e óxido de cálcio no resíduo de mármore. A Figura 2 apresenta o difratograma de raios-X dos resíduos de mármore e quartzito micronizados.

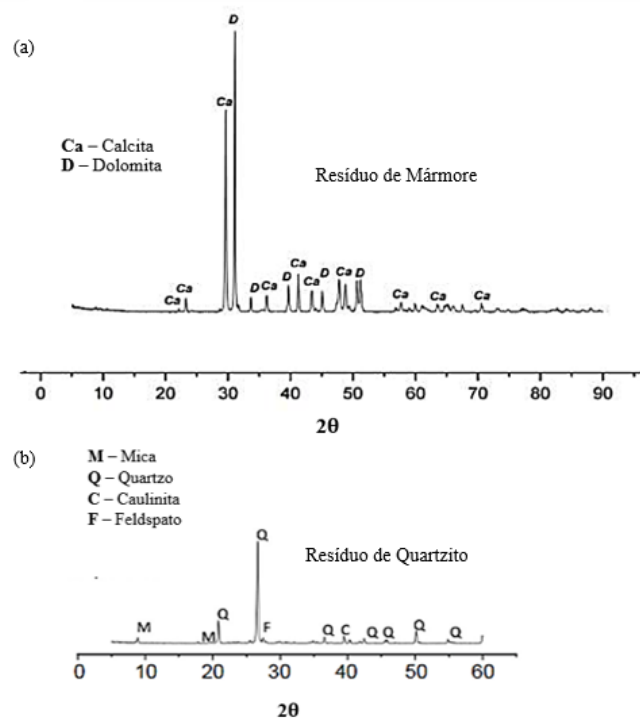


Fig.2 Difratograma de raios-X: (a) resíduo de mármore micronizado, (b) resíduo de quartzito micronizado

A partir dos resultados obtidos para o difratograma de raios-X do resíduo do mármore micronizado, verifica-se a presença das fases mineralógicas: Calcita e Dolomita, principais constituintes das rochas carbonáticas. Os valores obtidos corroboram com valores alcançados por [20], ao caracterizar um resíduo de mármore em pó visando aplicação em materiais cerâmicos. O difratograma do resíduo de quartzito micronizado permite verificar a presença de mica, caracterizada pelas distâncias interplanares de 9,47Å; de caulinita caracterizada pela distância interplanar de 7,32Å; e de quartzo, caracterizada pela distância interplanar de 3,34Å.

Métodos

O programa experimental da pesquisa foi realizado em duas etapas: a primeira na moldagem de blocos de concreto com os teores pré-estabelecidos de resíduos de mármore e quartzito micronizados e a segunda etapa corresponde à análise das propriedades dos concretos modificados. Os ensaios de caracterização do concreto em estudo foram realizados no Laboratório de Solos II e

de Engenharia de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande.

Estudo da dosagem

Para dosagem do concreto, o método utilizado foi o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), e, após a caracterização dos materiais, foi obtido o traço 1:2,44:1,87, com fator água/cimento (a/c) de 0,54 para o concreto com resíduo de mármore micronizado. O traço para o concreto com resíduo de quartzito micronizado foi 1:2:3,14, com fator água/cimento (a/c) de 0,54, sendo que foram necessários ajustes na quantidade de água para obter-se um resultado positivo no ensaio de consistência, ficando o fator a/c final estabelecido em 0,58.

A escolha dos percentuais de substituição do agregado miúdo, areia quartzosa, por resíduos mármore e quartzito foi de 20 %, determinado a partir de informações extraídas de pesquisas anteriores [11,12, 13] acerca do tema e do conhecimento das propriedades do material. O traço adotado como referência possui como resistência característica (fck) de 20 MPa, e um consumo de cimento de 4,5 kg/m³. O valor do abatimento de tronco cone (*slump test*) foi fixado entre (40 – 60 mm).

Sequencialmente foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm. O concreto de referência para o concreto com adição de resíduo de quartzito (CREFQ) foi dosado com a brita 25,0 mm e brita 9,5 mm, já o concreto de referência para o concreto com adição de mármore (CREFM) foi dosado utilizando apenas a brita 9,5 mm, pois foram duas dosagens diferentes e houve a necessidade de dois concretos de referência visto que a dosagem do concreto com incorporação de mármore foi realizada apenas com a brita 9,5 mm.

A Tabela 3 apresenta as nomenclaturas utilizadas neste estudo e a Tabela 4 apresenta o consumo de materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova, no total de 18 corpos de prova para cada composição, sendo dois corpos de prova em cada ensaio realizado para cada idade de cura, os quais tiveram idades de cura de 7, 14 e 21 dias.

Tabela 3. Nomenclatura das amostras utilizadas na pesquisa

Amostras	Nomenclatura
Concreto de Referência para a amostra de concreto com resíduo de mármore micronizado	CREFM
Concreto com incorporação de 20% de resíduo de mármore micronizado	C20%RMM
Concreto de Referência para a amostra de concreto com resíduo de quartzito micronizado	CREFQ
Concreto com incorporação de 20% de resíduo de quartzito micronizado	C20%RQM

Tabela 4. Consumo de materiais para confecção dos corpos de prova

Material	CREFM	C20%RMM	CREFQ	C20%RQM
Cimento (kg)	11,205	11,205	11,030	11,030
Agregado Miúdo (kg)	27,340	21,872	22,060	17,648
Agregado Graúdo-Brita 9,5mm (kg)	20,950	20,950	13,852	13,852
Agregado Graúdo-Brita 25,0 mm (kg)	0	0	20,778	20,778
Água (L)	6,050	6,050	6,400	6,400
Resíduo de Mármore (kg)	0	5,468	0	0
Resíduo de Quartzito (kg)	0	0	0	4,412

A proporção entre os agregados graúdos para o CREFM e C20%RMM foi estabelecida de acordo com a norma NBR NM 45:2006, conforme as proporções 70/30, 60/40 e 50/50. A proporção de 60% para brita 25 e 40% para brita 9,5, foi a escolhida por apresentar a maior massa unitária compactada. A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a NBR 5738:2016. Após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em local protegido, em uma superfície horizontal e livre de vibrações, por um período inicial de 24 horas. A cura imersa foi realizada em um tanque de cura específico para concreto, onde os corpos de prova permaneceram até o dia previsto para a realização dos ensaios, conforme apresenta a Figura 3.

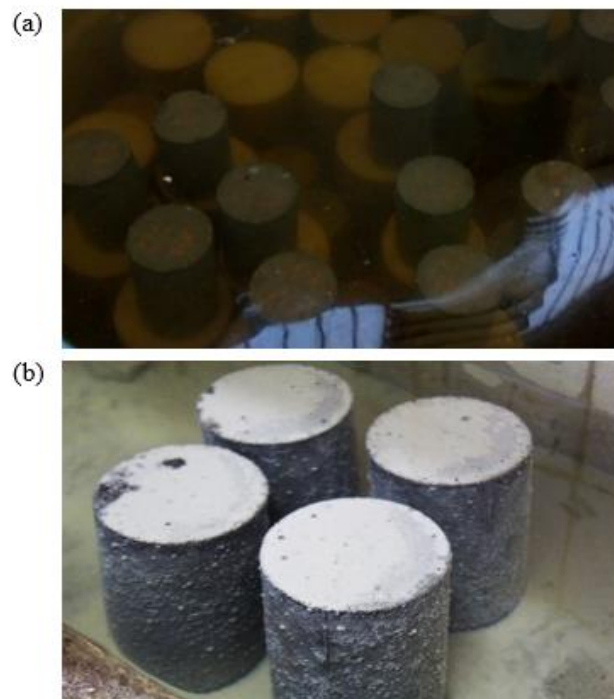


Fig. 3 Corpos de prova imersos em água: (a) concreto com resíduo de mármore, (b) concreto com resíduo de quartzito

Determinação das propriedades do concreto em estudo

O ensaio de absorção foi realizado conforme a norma NBR 9778:2005. Este ensaio expressa em porcentagem o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis. A resistência à compressão simples foi determinada por meio do ensaio realizado segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018) para a caracterização mecânica do concreto, indicando a que tensão ela sofreu a ruptura. Os corpos de prova foram previamente retificados, para promover uma superfície plana e livre de ondulações para os mesmos, conforme estabelecido na NBR 5738:2016. Foram utilizados 2 corpos de prova de cada mistura de concreto (CREFM, C20%RMM, CREFQ e C20%RQM) para cada tempo de cura determinado no estudo (7, 14, e 21 dias).

A determinação da resistência à tração indireta foi realizada a fim de obter o $f_{ct,sp}$, e o ensaio seguiu a norma NBR 7222:2011. O número de corpos de prova manteve o mesmo quantitativo para o ensaio de resistência à compressão simples. Para realização do ensaio foram utilizadas taliscas de madeira nas dimensões de 2 cm de largura, 2 cm de espessura e 20 cm de comprimento, objetivando fazer com que o contato entre o corpo de prova e os pratos ocorra em duas geratrizes através das mesmas, a força é aplicada até que a ruptura do corpo de prova ocorra por fendilhamento.

3. Resultados e Discussão

Neste tópico estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental dos corpos de prova do concreto com resíduos de mármore e quartzito micronizados.

Determinação das propriedades físicas e mecânicas do concreto

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água do concreto em estudo estão apresentados na Figura 4.

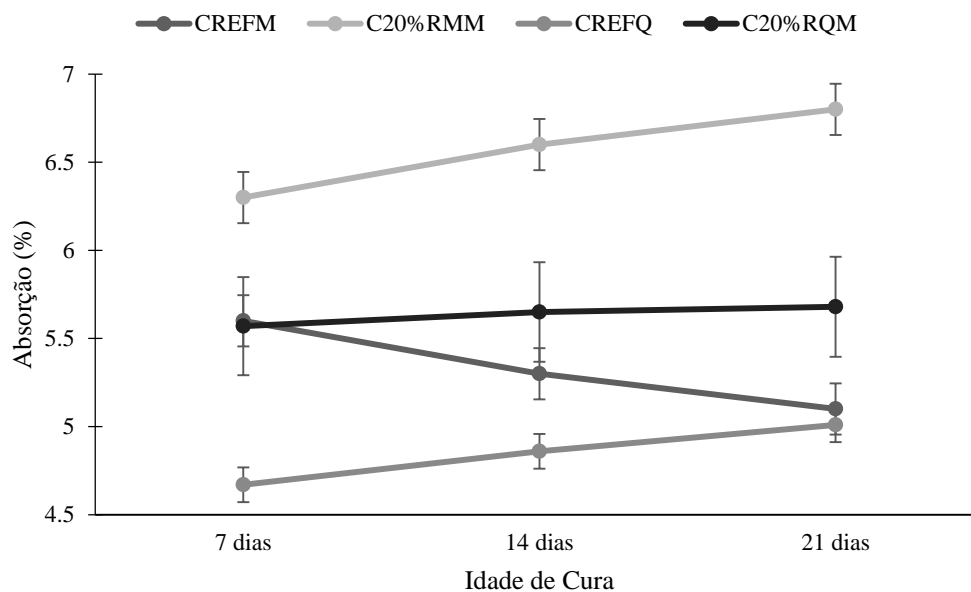


Fig.4 Resultados do ensaio de absorção dos concretos

De acordo com a Figura 4, observa-se que os resíduos de mármore e quartzito quando em substituição ao agregado miúdo promoveram um aumento da absorção de água do concreto. Observa-se que aumento de absorção para a substituição do agregado miúdo pelos resíduos de mármore e quartzito na ordem de 33,33 % e 13,37 % respectivamente quando comparados aos concretos de referência. Concretos com maior índice de vazios estão mais propensos ao surgimento de trincas, defeitos e conseqüentemente a uma menor resistência à compressão simples.

Por meio da aplicação de testes-t, com significância de 5 %, pode-se confirmar esse resultado. As amostras com substituição do agregado miúdo pelos resíduos de mármore apresentaram p valor de 0,001017, 0,00009 e 0,00003, respectivamente para 7, 14 e 21 dias. Resultado semelhante foi obtido para as amostras com substituição do agregado miúdo pelos resíduos de quartzito o p valor foi de 0,00000004, 0,00000006 e 0,0000001, respectivamente para 7, 14 e 21 dias. Com isso, a hipótese nula de que não existem diferenças estatisticamente significantes entre as amostras não é aceita para todas as amostras, pois, apresentam p valor inferior a significância de 0,05, o que verifica o aumento significativo na absorção com a utilização dos resíduos. [21] utilizou resíduos de mármore e granito em pó como substituinte ao cimento, e observou que o aumento da quantidade de material substituinte acarretava em um aumento na absorção do concreto, entretanto, o valor acrescido era inferior em comparação com a quantidade de material adicionada. O pesquisador aponta que valores de absorção situados entre 4 % e 5 % servem de indicação de concretos com permeabilidades mínimas, sendo materiais que se utilizados em estruturas dificilmente apresentarão falhas devido adensamento incompleto e exsudação. [22] utilizou resíduo de corte de granito como substituinte ao cimento, e notou que para o teor de 10 % de adição houve uma redução na absorção em 10,2 %, entretanto, para o teor de 20 %, foi observado um incremento de 2,5 % da absorção por imersão. [23] afirmam que embora a absorção de água não possa ser usada como uma medida de qualidade do concreto, é um indicativo de maior qualidade devido ao fato de que a maioria dos concretos bons têm absorção abaixo de 10 % em massa. Assim, baseado nos valores encontrados para concretos analisados, o concreto com quartzito pode ser considerado um bom concreto. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão simples das amostras de concreto analisadas.

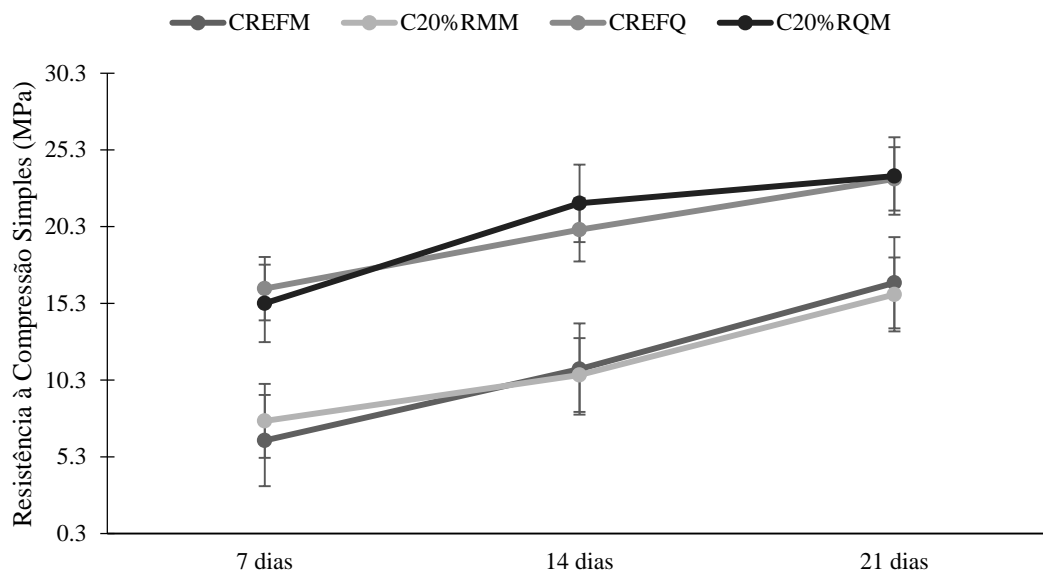


Fig.5 Resultados do ensaio de resistência à compressão simples dos concretos

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5, verifica-se que a substituição do agregado miúdo convencional por resíduo de mármore, promoveu a redução da resistência a compressão

simples para as idades de 14 e 21 dias. Observou-se aos 21 dias de cura, que a substituição do agregado miúdo convencional (área quartzosa) por resíduo de mármore ocasionou uma redução de resistência da ordem de 4,57 % quando comparado ao concreto de referência CREFM, não sendo tão significativa. Estes resultados não corroboram com os encontrados por [1, 8, 11] em que apontam ganho de resistência ao incorporar pó de mármore ao concreto.

Sabendo que a dosagem foi realizada com intuito de obter um concreto simples com 20 MPa de resistência a compressão. De acordo com NBR 8953:2015, o concreto com valor mínimo de resistência igual a 20 MPa após 28 dias é classificado com C20 pertencente ao grupo I de resistência. Diante do exposto e conforme resultados apresentados na Figura 5, pode-se observar que o ganho de resistência com a adição do resíduo de em pó de quartzito foi benéfico e todos os valores estiveram dentro do previsto para o concreto C20, e dentre elas o melhor desempenho foi para o concreto com 20 % de resíduo de quartzito micronizado.

De acordo com a norma da NBR 6118:2014, aos 21 dias de cura o concreto deve apresentar resistência de 96 % em relação à resistência requerida no projeto, assim os resultados obtidos para o concreto com adição de mármore micronizado (C20 %RMM) e o CREFM não satisfizeram a especificação da norma. Estes resultados podem ser devido ao traço determinado e a ausência da brita 25 mm na dosagem do concreto, já que o concreto de referência sem o aditivo também apresentou resistência abaixo da esperada. Com isso, os resultados para os concretos relacionados ao resíduo de mármore não foram muito representativos, mas conseguiram mostrar a influência do aditivo no desempenho do concreto. A Figura 6 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral para as amostras de concreto avaliadas.

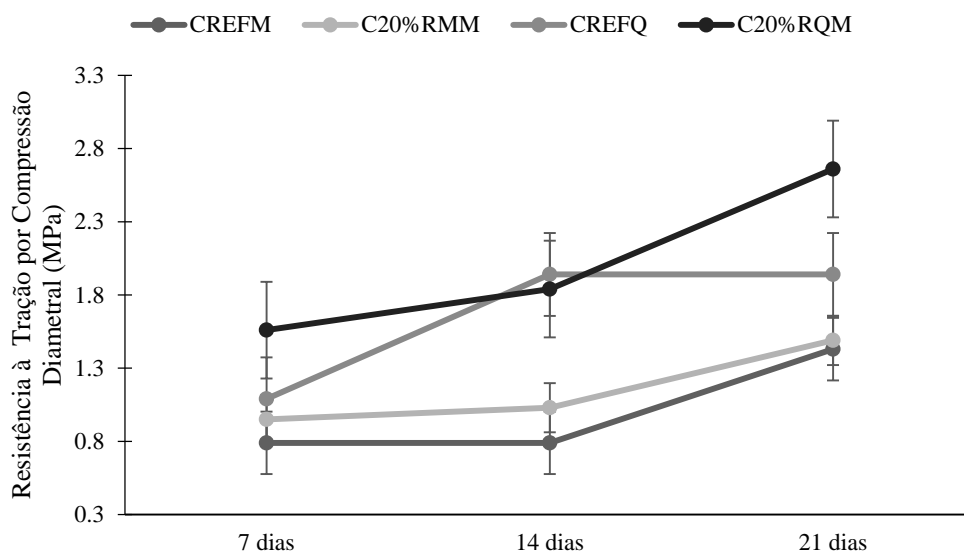


Fig.6 Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos

De acordo com os resultados apresentados na Figura 6 observa-se que a adição de resíduos de mármore e quartzito contribuíram com o aumento da resistência à tração do concreto para todas as idades quando comparados aos concretos de referência, obtendo-se aos 21 dias de cura um ganho de resistência de 4,20 % para o C20 %RMM e 37,12 % para o C20 %RQM.

Esse resultado foi confirmado com os resultados obtidos por meio de testes-t, com significância de 5 %. As amostras com substituição do agregado miúdo pelos resíduos de mármore apresentaram p valor de 0,0004, 0,000007 e 0,001826, respectivamente para 7, 14 e 21 dias. Resultado semelhante foi obtido para as amostras com substituição do agregado miúdo pelos resíduos de quartzito o p

valor foi de 0,000005, 0,000255 e 0,00000009, respectivamente para 7, 14 e 21 dias. Com isso, a hipótese nula de que não existem diferenças estatisticamente significantes entre as amostras não é aceita para todas as amostras, pois, apresentam p valor inferior a significância de 0,05, o que verifica o aumento significativo de resistência com a utilização dos resíduos. [24] estudou materiais depositados como resíduo nos bota-foras de minerações de quartzito para uso em concretos, verificando a possibilidade deste material ser aproveitado na indústria da construção civil. Os resultados de caracterização tecnológica nas amostras de quartzitos e da análise de concreto produzido com o agregado foram satisfatórios, com ressalvas às formas lamelares das partículas britadas em britador de mandíbula e da potencialidade deletéria dos concretos com quartzito, identificada nos ensaios para verificação de reação álcali-agregados. Segundo [15], os agregados de textura rugosa ou britado apresentam maior resistência, principalmente à tração, nas primeiras idades, que um concreto correspondente contendo agregado liso. Observa-se que os agregados provenientes da britagem do quartzito são mais rugosos do que os agregados convencionais. Esse fato pode justificar as melhores resistências obtidas para concretos fabricados com resíduo de quartzito.

4. Conclusão

Este estudo referente ao uso de resíduos de mármore e quartzito micronizados em substituição parcial ao agregado miúdo (areia quartzosa) no concreto permite concluir que a substituição do agregado miúdo convencional por esses resíduos proporcionou ao concreto desempenho diferente em cada substituição. O concreto com incorporação de quartzito micronizado apresentou comportamento superior quanto à resistência à compressão simples ao obtido para o concreto de referência, ganho de 0,82 %, já o concreto com adição de mármore micronizado apresentou desempenho inferior ao de referência, redução de 4,57 %. Contudo, a perda apresentada pelo concreto com incorporação de resíduo de mármore não foi significativa.

Aos 21 dias de cura o concreto deve apresentar resistência de 96 % em relação à resistência requerida no projeto, assim os resultados obtidos para o concreto com adição de mármore micronizado (C20 %RMM) e o CREFM não satisfizeram a especificação da norma. Estes resultados podem ser devido ao traço determinado e a ausência da brita 25 mm na dosagem do concreto, já que o concreto de referência sem o aditivo também apresentou resistência abaixo da esperada. No tocante à resistência à tração por compressão diametral, a adição dos resíduos proporcionou um aumento de desempenho em relação ao concreto de referência para todas as idades e resíduos utilizados. Para absorção de água do concreto modificado com ambos os resíduos, os resultados apresentaram aumento na absorção. No entanto, satisfazem os parâmetros normativos.

A utilização dos resíduos de mármore e quartzito micronizados, como substituinte parcial ao agregado miúdo convencional, apresenta-se como uma alternativa viável para inserção de um material em um novo ciclo produtivo. O concreto com adição de quartzito apresentou ganho de resistência. Dentre as formas existentes que visam à redução do impacto ambiental causado pela geração de resíduos industriais, uma das que apresenta maiores vantagens é a reciclagem. Os setores da construção civil demonstram-se com grande potencial para utilizar os resíduos devido a vários processos que envolvem materiais distintos.

É interessante ser realizado um estudo aprofundado sobre a microestrutura do concreto modificado por resíduos a fim de identificar as reações físicas e químicas que ocorrem entre os materiais. Uma pesquisa utilizando o mesmo traço e com outros resíduos micronizados também é encorajada para uma melhor comparação de desempenho entre os materiais.

Referências

1. Tunc, E.T., *Recycling of marble waste: A review based on strength of concrete containing marble waste*. Journal of Environmental Management, 2019. **231**: p. 86-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.034>
2. Hebhoub, H., Aon, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E., *Use of waste marble aggregates in concrete*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(3): p. 1167-1171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.037>
3. Velay-Lizancos, M., Martinez-Lage, I., Vazquez-Burgo, P., *The effect of recycled aggregates on the accuracy of the maturity method on vibrated and self-compacting concretes*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019. **19**(2): p. 311-321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.11.004>
4. Mashaly, A.O., Shalaby, B.N., Rashwan, M.A., *Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement*. Construction and Building Materials, 2018. **169**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046>
5. Silva, R.V., Brito, J., Dhir, R.K., *Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications*. Journal of Cleaner Production, 2019. **236**: p. 117629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>
6. Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., Barroso, L. S., Zanelato, E. B., Alexandre, J., Xavier, G. C., & Monteiro, S. N. *Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars*. Materials, 2019. **12**(9): p. 1449. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091449>
7. Gencil, O., Ozel, C., Koksall, F., Erdogmus, E., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., *Properties of concrete paving blocks made with waste marble*. Journal of Cleaner Production, 2012. **21**(1): p. 62-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.023>
8. Dobiszewska, M., Schindler, A. K., Pichór, W. *Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition*. Construction and Building Materials, 2018. **177**: p. 222-229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.133>
9. Aydin, E., Arel, H.S., *High-volume marble substitution in cement-paste: Towards a better sustainability*. Journal of Cleaner Production, 2019. **237**: p. 117801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117801>
10. Almada, B.S., Melo, L.S., Dutra, J.B., Burbani, L.C., Silva, G.J.B., Santos, W.J., Aguilar, M.T.P., *Influence of the heterogeneity of waste from wet processing of ornamental stones on the performance of Portland cement composites*. Construction and Building Materials, 2020. **262**: p. 120036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120036>
11. Almeida, R. R., *Reaproveitamento de resíduo de pó de mármore e chamo-te na produção de material cerâmico para isolamento térmico*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Brasil, 2015.
12. Singhal, V., Nagar, R., Agrawal, V., *Sustainable use of fly ash and waste marble slurry powder in concrete*. Materials Today: Proceedings, 2020. **32**(4): p. 975-981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.650>
13. Nascimento, A.S., Santos, C.P., Melo, F.M.C., Oliveira, V.G.A., Oliveira, R.M.P.B., Macedo, Z.S., Oliveira, H.A., *Production of plaster mortar with incorporation of granite cutting wastes*. Journal of Cleaner Production, 2020. **265**: p. 121808. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121808>
14. Chen, J.J., Li, B.H., Kwan, A.K.H., *Adding granite polishing waste as sand replacement to improve packing density, rheology, strength and impermeability of mortar*. Powder Technology, 2020. **364**: p. 404-415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.012>
15. Demirel, B., Alyamaç, K.E., *Waste marble powder/dust*. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, 2018. p. 181-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00006-7>

16. Metha, P.K., Monteiro, P.J.M., *Concreto: Estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994.
17. Neville, A.M., *Propriedades do Concreto* (5^a ed.). Porto Alegre, 2016.
18. Santos, P.S., *Ciência e Tecnologia de Argilas*. Edgard Blucher Ltda: São Paulo, 1989.
19. Rodrigues, G.F., Alves, J.O., Tenório, J.A.S., Espinosa, D.C.R., *Estudo de resíduos de rochas ornamentais para a produção de materiais vítreos*. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011. **8**(3): p. 203-207. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2011.032>
20. Medeiros, R.R., Gonçalves, W.P., Cartaxo, J.M., Ferreira, H.S., Neves, G.A., Ferreira, H.C., *Influência do uso de resíduo de quartzito na expansão por umidade de massas de revestimentos cerâmicos planos*. Cerâmica, 2017. **63**(366): p. 134-142. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662105>
21. Rodrigues, M.A., *Utilização dos resíduos de cortes de placas de mármore e granitos como adição na fabricação de concreto autoadensável*. Dissertação de mestrado, Universidade do Amazonas, Manaus, Brasil, 2015.
22. Gonçalves, J.P., *Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Dissertação de mestrado, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2000.
23. Bookman, M., Tabassi, A.A., *Effects of polymer modification on the permeability of cement mortars under different curing conditions: a correlational study that includes pore distributions, water absorption and compressive strength*. Construction and Building Materials, 2012. **28**(1): p. 561-570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.004>
24. Franklin, I., *Estudo tecnológico em rejeitos de quartzito do Sudoeste de Minas Gerais para utilização como agregado graúdo no concreto*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2009.

Conflito de Interesses

Nenhum potencial de interesse competitivo foi relatado pelos autores.

Contribuição dos autores

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4595-2959>

Elaboração da conceituação, metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

Osires de Medeiros Melo Neto. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2535-0969>

Metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

John Kennedy Guedes Rodrigues. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0340-5567>

Elaboração da conceituação, metodologia, supervisão, validação, redação, edição e revisão do manuscrito.

Robson Kel Batista de Lima. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6917-9895>

Redação, edição e revisão do manuscrito.

Ingridy Minervina Silva. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2538-9166>

Redação, edição e revisão do manuscrito.