

Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos

Evaluating the use of marble waste in the production of concrete

*Natália dos Santos Petry(1); Lucas Delongui(2); Álvaro Luiz Muller(3);
Angela Borges Masuero(4); Denise Carpena Coitinho Dal Molin(5)*

1 Centro Universitário Ritter dos Reis e Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Brasil.

E-mail: arq.nataliapetry@gmail.com

2 Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Brasil.

E-mail: engdelongui@gmail.com

3 Engenheiro Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil.

E-mail: alvaro.muller@ufrgs.br

4 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil.

E-mail: angela.masuero@ufrgs.br

5 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: dmolin@ufrgs.br

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 6, n. 2, p. 71-92, Jul.-Dez., 2017 - ISSN 2318-1109

[Recebido: 30 maio 2017; Aceito: 11 novembro 2017]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2017.v6i2.1946>

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui! / click here!](#)

Resumo

A indústria da construção civil é caracterizada como a principal consumidora dos recursos naturais, isso é propiciado pelo grande número de obras que são necessárias para o crescimento do país. No entanto, o alto consumo dos materiais torna-se um fator que limita a execução das mesmas. Por isso, a adição de diferentes materiais na produção de componentes, assim como a utilização de resíduos, que geralmente possuem um custo de descarte e/ou necessitam de tratamento específico, se torna um atrativo técnico-econômico a pesquisadores e, principalmente, ao mercado consumidor. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de concretos convencionais com adição de resíduos de marmoraria frente às propriedades mecânicas e de durabilidade. Para tanto, realizou-se um estudo experimental onde foram testados teores de 10 e 20% de adição dos resíduos (em massa) com relação a quantidade de cimento. Com relação à resistência à compressão, a incorporação do resíduo não apresentou influência significativa quando comparado com um concreto sem adição. Entretanto, considerando a absorção de água por capilaridade, como um indicativo de durabilidade verificou-se que, a adição de um teor de 10% de resíduos se apresentou como uma boa opção de melhoria dessa propriedade.

Palavras-chave: Resíduo de Marmoraria. Propriedades Mecânicas. Durabilidade do Concreto.

Abstract

The construction industry is considered the main consumer of natural resources due to the large number of constructions necessary for the country's growth, but the high cost of the materials becomes a limiting factor for accomplishing these constructions. Therefore, the addition of different materials in the production of components and the use of waste, which generally have a considerable cost of disposal and / or require specific treatment, becomes a technical and economic attractiveness to researchers and especially to the market consumer. This study aims to evaluate the behavior of concrete with marble waste addition in relation to the mechanical properties and durability. To do so, we performed an experimental study using the contents of 10 % and 20 % addition of this residue. With respect to compressive strength, the incorporation of the waste did not present significant influence when compared with plain concrete. However, considering the water absorption by capillarity as an indication of durability it was found that the addition of a 10% of wastes is a good option for improving this property.

Keywords: Marble waste. Mechanical Properties. Concrete Durability.

1 Introdução

Ao longo dos últimos anos é crescente o número de pesquisadores que se dedicam a estudar métodos de reciclagem para diferentes tipos de resíduos. Tal fato é proporcionado pelo constante aumento no custo dos materiais, causado pela escassez de matéria-prima e pela instabilidade econômica que, aliada com a elaboração de leis específicas acerca da disposição final de resíduos e de proteção ao meio ambiente, impulsionaram novos nichos na engenharia, entre eles destacam-se a caracterização dos resíduos e o enquadramento dos mesmos para as mais diversas finalidades.

Dentre essas aplicações, ressalta-se a utilização desses resíduos para a produção de concretos, seja como adição e/ou substituição, contribuindo com a sustentabilidade, uma vez que parte dos resíduos poderiam ser acondicionados em locais não adequados para esta finalidade. Entretanto, é necessário que esse composto se torne uma nova matéria-prima, sustentável e tecnicamente satisfatória, sendo necessária uma análise de desempenho severa, prolongada e repetitiva, de modo a delinear os limiares desses materiais e não proporcionar respostas insatisfatórias ao longo de sua vida útil.

De acordo com Mello (2004), cerca de 75% da produção brasileira de rochas ornamentais é destinada ao mercado interno, e mais de 70% dela tem origem nos Estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia. No entanto, mesmo não sendo os principais fornecedores de rochas ornamentais, os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro abrigam pelo menos 75% das marmorarias brasileiras.

Contudo, Gonçalves (2000), relata que existem mais de 450 tipos de rochas ornamentais sendo produzidas no país e que no processo de beneficiamento, especificamente na serragem, entre 25 a 30% do bloco é transformado em pó, o qual na maioria dos casos, é depositado nos pátios das empresas. Esse resíduo se transforma no principal agravo à empresa, visto que a mesma arca com os custos de estocagem e correta disposição final, e para algumas empresas esse último procedimento se torna hipotético.

O beneficiamento de pedras ornamentais e de revestimento no Brasil tem apresentado crescimento nos últimos anos, fortalecendo o presente setor. Este é fomentado principalmente pela extração e beneficiamento de rochas, tais como granito e mármore, sendo utilizados nas construções. De acordo com Abirochas (2012), atualmente o Brasil destaca-se por ser um dos maiores produtores e exportadores de rochas ornamentais do mundo.

Conforme Metha e Monteiro (2014), as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que varia de 20 a 70% do material cimentício total.

De acordo com Gonçalves (2000), dentre as adições utilizadas atualmente, encontram-se as que possuem atividade pozolânica (sílica ativa, cinza de casca de

arroz, cinza volante), as que possuem atividade cimentante (escória de alto forno, cinza volante) e as que não possuem atividade, que são os filers (material carbonático, pó de quartzo, pó de pedra, entre outros).

A utilização das adições minerais no concreto interfere tanto ao estado fresco quanto endurecido, espera-se que a utilização de materiais com características de filer preencham os vazios existentes, essencialmente, na zona de transição, a qual é responsável pela fratura, aumentando ou diminuindo a resistência dos concretos.

Desta maneira, vários pesquisadores, Gonçalves (2000), Moura et al. (2002), Silva et al. (2005), Binici (2008), Gameiro et al. (2014), Rodrigues et al. (2015), Vardhan et al. (2015), têm se detido a avaliar propriedades mecânicas e de durabilidade de matrizes cimentícias quando incorporado resíduo de marmoraria de diferentes formas.

Rodrigues et al. (2015) avaliaram as propriedades mecânicas de concretos produzidos com o resíduo de marmoraria com substituição parcial do cimento, os quais concluíram que a resistência mecânica diminuía a medida em que a relação de substituição aumentava, sendo que até a proporção de 10% a redução não foi significativa. Outra propriedade também avaliada foi a resistência à tração dos concretos, na qual observou-se uma maior variabilidade dos resultados e a substituição se mostrou benéfica, aumentando a resistência a tração dos concretos.

Vardhan et al. (2015), avaliaram a substituição do cimento por pó de marmoraria em pastas, em teores que variaram de 0 até 50%, o estudo conclui que o teor de substituição de 10% não comprometeu a resistência à compressão das pastas de cimento, já teores maiores se mostraram prejudiciais de uma forma geral para as propriedades mecânicas.

Gameiro et al. (2014), estudaram a durabilidade de concretos com a substituição do agregado miúdo por pó de marmoraria, nos teores de 0, 20, 50 e 100%. Concluíram que a trabalhabilidade dos concretos reduz conforme se aumenta o teor de substituição. Quanto à durabilidade dos concretos observou-se que a proporção de 20% de substituição se mostrou benéfica quanto à absorção de água por capilaridade. Todos os teores de substituição também foram benéficos quanto à absorção de água por imersão.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de concretos com adição de resíduos de marmoraria frente às propriedades mecânicas e de durabilidade. Para tanto, realizou-se um estudo experimental utilizando-se os teores de 10 e 20% de adição desse resíduo.

2 Materiais e métodos

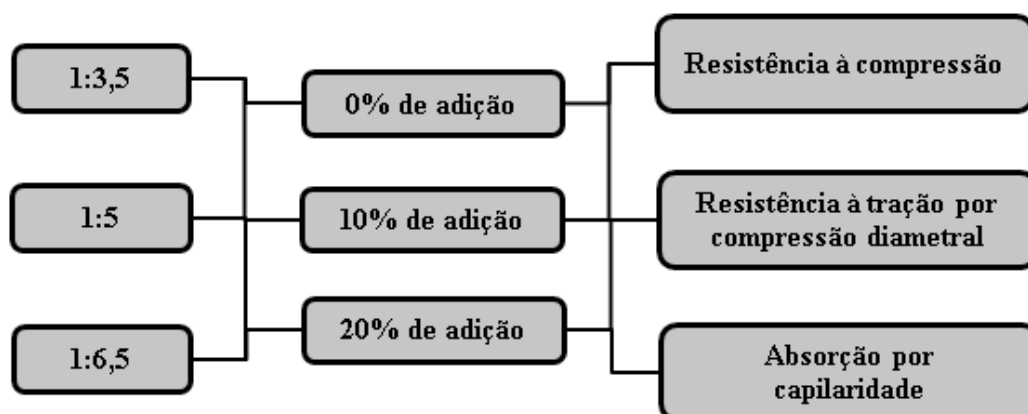
Quando se pretende inserir um novo material no mercado é necessário delinear suas propriedades para estimar seu comportamento frente às solicitações. Primeiramente, o resíduo foi submetido à ensaios de caracterização para conhecer

as propriedades intrínsecas; já a segunda parte consistiu em analisar a resistência e a durabilidade.

2.1 Planejamento do experimento

Para verificar a influência da adição do resíduo de marmoraria em concretos de cimento Portland foi elaborado o programa experimental, conforme Figura 1.

Figura 1. Programa experimental



2.2 Materiais empregados para produção dos concretos

2.2.1 Aglomerante

Utilizou-se o cimento Portland II – Z, que é um cimento composto modificado e apresenta a adição de material pozolânico. Seu uso é indicado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais. O material utilizado apresenta massa específica igual a 2,95g/cm³.

2.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica e possui granulometria que o situa entre os pedregulhos médios (6-20mm) e grosso (20-60mm), a Tabela 1 apresenta a caracterização física.

Tabela 1. Caracterização física do agregado graúdo de origem basáltica

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Zona Granulométrica - d/D ¹			
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50
25	0	0	-	0 - 5	5 - 25 ²	87 -100
19	0	0	-	2 - 15 ²	65 ² - 95	95 - 100
12,5	0	0	0 - 5	40 ² - 65 ²	92 -100	-
9,5	1	1	2 - 15 ²	80 ² - 100	95 - 100	-
4,75	81	82	40 ² - 65 ²	92 -100	-	-
2,36	17	99	80 ² - 100	95 - 100	-	-
1,18	1	100	95 - 100	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-
Fundo	0	100	-	-	-	-
Módulo de Finura		5,82	NBR NM 248:2003			
Dimensão Máxima (mm)		9,5				
Massa Específica (g/cm ³)		2,98	NBR NM 53:2009			

¹ - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo

² - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados

2.2.3 Agregado Miúdo

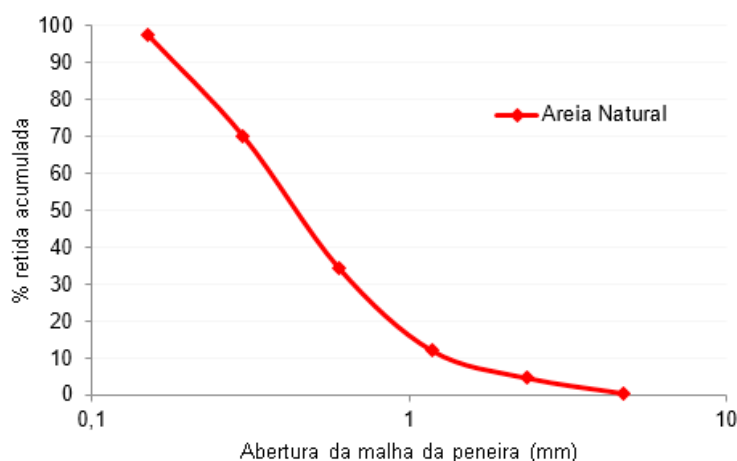
Conforme a granulometria apresentada na Tabela 2 e na Figura 2, as partículas estão situadas entre as frações de areia média (0.2–0.6mm) e grossa (0.6–2mm). A Tabela 2 apresenta a caracterização física do agregado miúdo.

Tabela 2. Caracterização física do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites Superiores	
			Z. utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Z. utilizável
4,75	1	1	0	0	5	10
2,36	4	5	0	10	20	25
1,18	7	12	5	20	30	50
0,6	22	35	15	35	55	70
0,3	36	70	50	65	85	95

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites Superiores	
			Z. utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Z. utilizável
0,15	27	98	85	90	95	100
Fundo	2	100	-	-	-	-
Módulo de Finura		2,20	NBR NM 248:2003			
Dimensão Máxima (mm)		4,75				
Massa Específica (g/cm ³)		2,64	NBR NM 52:2009			
Absorção de Água (%)		1,05%	NBR NM 30:2001			
Massa Unitária (g/cm ³)		1,50	NBR NM 45:2006			

Figura 2. Distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado



2.2.4 Água

Para as reações de hidratação do concreto, assim como para cura dos corpos de prova, utilizou-se a água da rede de abastecimento local proveniente do Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) de Porto Alegre.

2.2.5 Resíduo de marmoraria

O resíduo de marmoraria é composto pelas sobras do processo de corte e polimento de rochas ornamentais e é constituído por resíduos de quartzitos, mármore e granitos, entre outros. Na Figura 3 observa-se o resíduo.

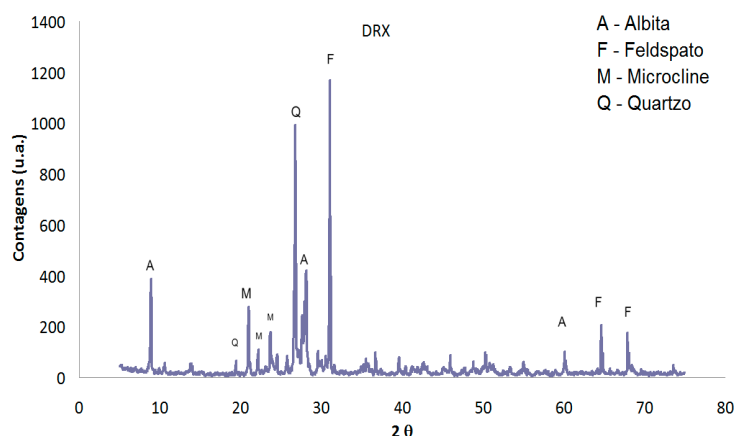
Figura 3. Aspecto visual do resíduo de marmoraria

A composição química do resíduo de marmoraria foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), realizada com aparelho marca Shimadzu, modelo XRF1800, do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos, na qual é possível verificar a predominância de dióxido de silício, óxido de cálcio e óxido de alumínio.

Tabela 3. Caracterização química do resíduo de marmoraria

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	ZrO ₂	MnO	SrO	CuO	CO ₂ CO ₃
58,48	10,48	9,83	1,67	1,01	1,22	0,75	0,61	0,35	0,11	0,11	0,09	0,08	0,05	0,02	0,02

A composição mineralógica do resíduo, determinada por difração de raios-X, realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. O material foi passado na peneira nº200 e após encaminhada ao laboratório. Foi utilizado um difratômetro modelo Philips X'Pert MPD, com tubo cerâmico modelo PW 3373/00 e detector proporcional modelo PW 3011/10, raios X CuKα ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) com passo de $0,05^\circ$. A identificação das fases cristalinas presentes nas amostras foi realizada através do software X'Pert High Score, comparando os resultados obtidos através das análises dos picos principais de cada fase identificada nas fichas PDF (Powder Diffraction Files). Por meio da Figura 4, observa-se a predominância de picos cristalinos de feldspato, quartzo, microcline e albita.

Figura 4. Difratoograma de raio-X do resíduo de marmoraria

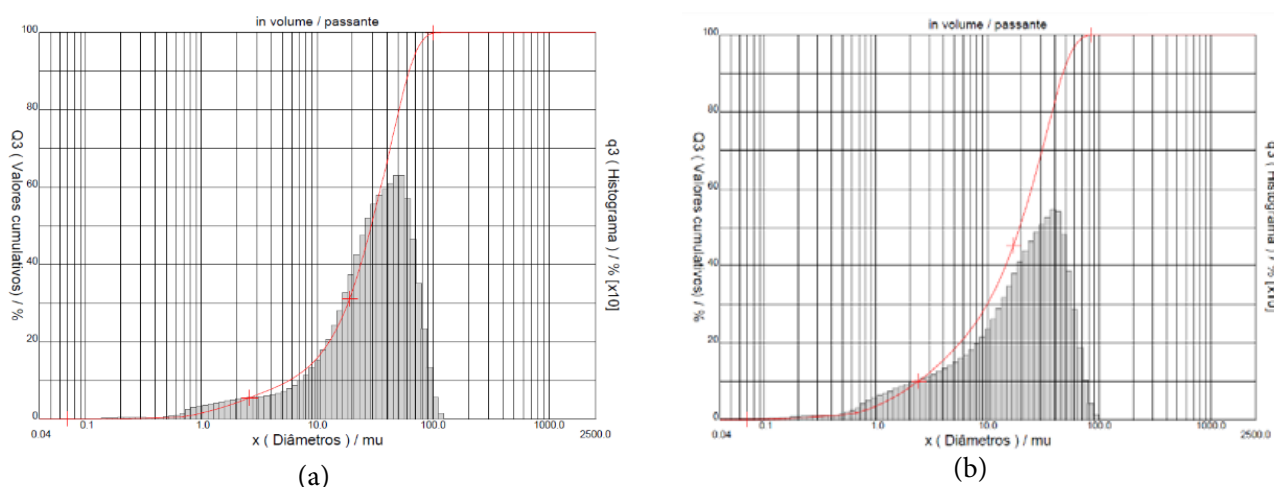
Quanto à granulometria do resíduo, esta foi determinada a partir da análise de distribuição do tamanho de partícula (DTP), realizada por difração a laser em um equipamento CILAS, Particle Size Analyser, modelo CILAS 1180 Liquid (CILAS, Orleans, França), no LACER/UFRGS. A faixa de análise utilizada foi de 0,04 a 2500 μm .

Na Figura 5a, é apresentada a distribuição granulométrica do resíduo provenientes da marmoraria, com diâmetro médio de 32,27 μm .

Com vistas a avaliar a eficiência da adição buscou-se deixar o resíduo com granulometria semelhante a do cimento. Para tanto, moeu-se, em um moinho de bolas, durante 120 minutos; o que resultou na distribuição granulométrica descrita na Figura 5 b, com um diâmetro médio de 22,50 μm . Embora tenha ocorrido este processo de beneficiamento o tempo utilizado não foi suficiente para deixar a partícula com a granulometria similar a do cimento.

Quanto à massa específica, por se tratar de um material pulverulento, esta foi obtida de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001). Utilizaram-se duas amostras de resíduo para verificar a variação entre as mesmas, entretanto esse valor não foi maior que o admissível pela norma (especificado em 5% de variação entre ambos os ensaios), demonstrando a uniformidade do resíduo coletado, resultando em uma massa específica de 2,66 g/cm^3 .

Figura 5. Distribuição granulométrica do resíduo; (a) coletado; (b) beneficiado



2.3 Produção dos concretos

Para a confecção dos concretos adotou-se o método de dosagem preconizado por Helene e Terzian (1992), que se fundamenta em buscar curvas que expressem o comportamento de materiais, e não de um traço isolado para uma determinada resistência característica. Do mesmo modo, e com o propósito de verificar a variação das propriedades que a adição de resíduo de marmoraria proporciona ao concreto, conforme descrito na Tabela 4, foram definidos três traços com três relações água/

aglomerante cada, dessa forma é possível verificar a influência dos teores de adição do resíduo no comportamento das propriedades mecânicas e da durabilidade. Por analogia, pode-se encontrar um teor ótimo de adição de resíduo que, ao final, apresente as melhores características técnico-econômicas.

De maneira a obter um parâmetro de correlação, estipulou-se um abatimento de 100 ± 20 mm para todos os traços.

Tabela 4. Proporcionamento dos materiais

CONCRETO	TRAÇO	TEOR DE ARGAMASSA	TRAÇO (MASSA)	RELAÇÃO A/AGLO	ABATIMENTO (100 ± 20 mm)
Referência	1:3,5	55%	1:0:1,48:2,02	0,40	120
	1:5		1:0:2,3:2,7	0,51	90
	1:6,5		1:0:3,12:3,37	0,64	90
10% de adição	1:3,5		1:0:1,1,48:2,02	0,42	110
	1:5		1:0:1,2,3:2,7	0,51	90
	1:6,5		1:0:1,3,12:3,37	0,64	105
20% de adição	1:3,5		1:0,2:1,48:2,02	0,44	90
	1:5		1:0,2:2,3:2,7	0,55	120
	1:6,5		1:0,2:3,12:3,37	0,64	90

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2003). Após a mistura dos componentes realizou-se o ensaio de abatimento pelo tronco de cone, como determina a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Foram confeccionados dez corpos de prova para cada traço, em moldes cilíndricos com dimensões 10x20cm.

Após a moldagem, os corpos de prova ficaram acondicionados cobertos em temperatura ambiente nas primeiras 24 horas, posteriormente foram desmoldados e armazenados em câmara úmida sob temperatura de $23\pm 2^\circ\text{C}$ e umidade maior que 95%, onde permaneceram até as datas dos ensaios.

2.4 Métodos de ensaio

De modo a determinar a capacidade de suportar esforços, realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples, preconizado pela NBR 5739 (ABNT, 2007), e resistência à tração por compressão diametral, preconizado pela NBR 7222 (ABNT, 2010).

O ensaio de absorção de água por capilaridade, teve como propósito encontrar a quantidade de água absorvida pelo corpo de prova, através de seus vazios capilares, bem como a verificar visualmente a altura da ascensão de água nos mesmos. A realização do ensaio foi baseada na NBR 9779 (ABNT, 2013).

3 Resultados e discussões

A seguir serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho e será realizada a discussão acerca destes.

3.1 Resistência à compressão axial

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos concretos confeccionados com diferentes traços e teores de adição do resíduo de marmoraria

Traço	% de adição de resíduo	a/a	7 dias	28 dias		
			Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)
1:3,5	0%	0,40	33,78	34,27	42,65	39,40
1:5		0,51	22,82	24,77	33,45	30,99
1:6,5		0,64	12,41	19,99	17,73	21,25
1:3,5	10%	0,42	30,49	27,98	38,73	40,40
1:5		0,51	18,67	22,03	27,85	27,24
1:6,5		0,64	13,51	14,42	17,48	19,02
1:3,5	20%	0,44	28,09	28,56	37,61	37,13
1:5		0,55	20,47	20,19	28,24	28,04
1:6,5		0,64	14,10	14,44	20,13	20,92

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço, teor de adição, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6 e 7, tanto para o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias como aos 28 dias. Nos dois casos observa-se que a combinação entre o traço e o teor de adição do resíduo de marmoraria não é considerado significativo. Entretanto as variáveis controláveis, analisadas separadamente são consideradas significativas.

Tabela 6. Análise de variância (ANOVA) – Resistência à compressão aos 7 dias

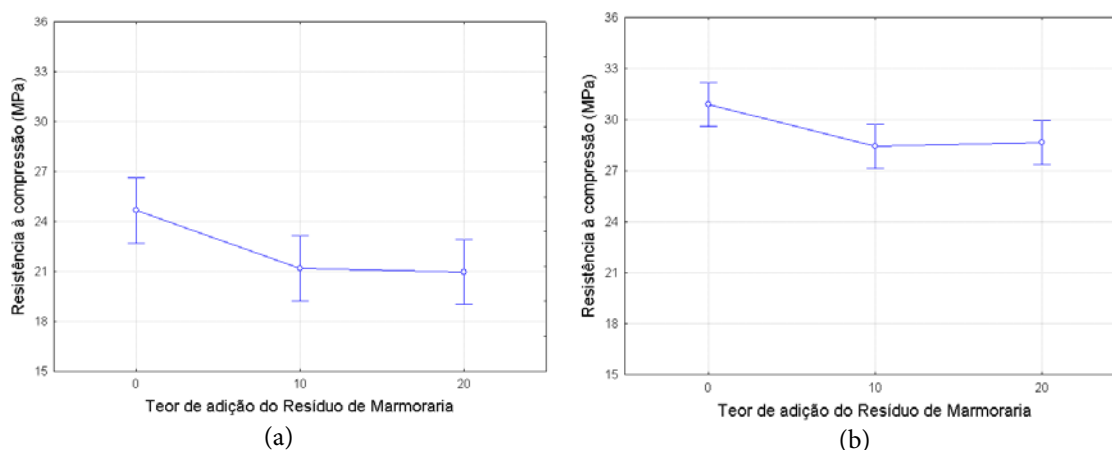
EFEITOS	SQ	GL	SQF	TESTE F	P	SIG.
Traço	746,771	2	373,386	83,571	0,000002	Sim
% de adição	51,848	2	25,924	5,802	0,024057	Sim
Traço*% de adição	7,501	4	1,875	0,420	0,790831	Não
Erro	40,211	9	4,468	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) – Resistência à compressão aos 28 dias

EFEITOS	SQ	GL	SQF	TESTE F	P	SIG.
Traço	1187,63	2	593,82	301,596	0,000000	Sim
% de adição	22,17	2	11,09	5,630	0,025949	Sim
Traço*% de adição	22,48	4	5,62	2,854	0,088160	Não
Erro	17,72	9	1,97			-

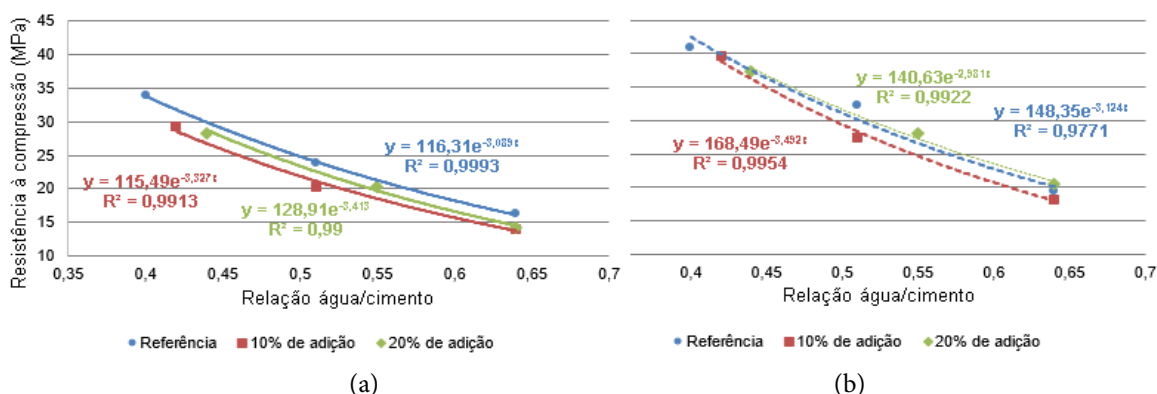
Na Figura 6 é apresentada a influência do teor de adição do resíduo de marmoraria, de forma isolada, frente à resistência à compressão simples, tanto para a idade de 7 dias quanto para a idade de 28 dias. Por esta análise, os concretos produzidos com a adição do resíduo nos dois teores estudados apresentam uma redução na resistência à compressão. Esta redução pode estar ligada ao aumento da relação água/aglomerante, uma vez que esta não foi mantida constante.

Figura 6. Influência do teor de adição do resíduo de marmoraria na resistência à compressão; (a) ruptura aos 7 dias; (b) ruptura aos 28 dias

Analisando a Figura 7, observa-se que há um aumento de resistência à compressão se comparar as rupturas aos 7 e aos 28 dias, fato já esperado. Quanto as resistências obtidas aos 7 dias, observa-se que a adição nos concretos não se mostrou benéfica, uma vez que aparentemente não ocorreu um incremento na variável estudada. Entretanto, nos dados referentes aos 28 dias, pode-se ressaltar que a adição de 20% de resíduos propiciou aumento na resistência para os concretos com maior relação água/aglomerante. Tal fato deve-se ao efeito fíler, fechando os poros e densificando a matriz.

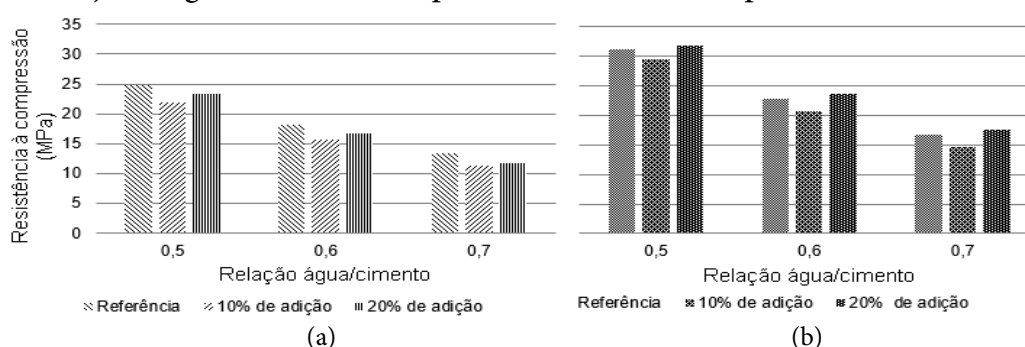
Figura 7. Resistência à compressão simples em diferentes idades;

(a) ruptura aos 7 dias; (b) ruptura aos 28 dias



Os resultados obtidos nesta pesquisa não vão de encontro a pesquisa realizada por Gonçalves (2000), que estudou a incorporação de resíduo de corte de granitos em concretos, o qual concluiu que a utilização do resíduo contribuía para um aumento da resistência à compressão. Essa divergência entre os estudos pode estar atrelada ao tamanho da partícula do resíduo, uma vez que no estudo de Gonçalves (2000) esta tinha diâmetro médio de 6,74µm e neste trabalho utilizou-se uma partícula com diâmetro médio de 22,50µm.

Analisando a Figura 8, ao comparar a resistência à compressão, fixando a relação água/aglomerante, para a idade de 7 dias observa-se uma redução. Para a idade de 28 dias, o teor de 20% de adição apresentou um incremento nas três relações água/aglomerante estabelecidas, sendo que o aumento foi de aproximadamente 5% em relação ao concreto de referência, para uma relação água/aglomerante de 0,7.

Figura 8. Resistência à compressão simples em diferentes idades em função da relação a/aglomerante; (a) ruptura aos 7 dias; (b) ruptura aos 28 dias

Esta redução na resistência à compressão também foi observada na pesquisa de Lopes et al. (2006), que utilizou o resíduo como fíler na produção de concretos, tanto para o teor de 10% quanto para o teor de 20% de substituição. O resultado obtido no presente trabalho não corrobora com os resultados obtidos por Rodrigues et al. (2015), que avaliaram as propriedades mecânicas de concretos produzidos com o resíduo de marmoraria com substituição parcial do cimento, os quais concluíram que a resistência

mecânica diminuiu a medida em que a relação de substituição aumentava, sendo que até a proporção de 10% a redução não foi significativa.

3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão dos corpos de prova são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resistência à tração por compressão aos 7 e 28 dias dos concretos confeccionados com diferentes traços e teores de adição do resíduo de marmoraria

Traço	% de adição de resíduo	a/a	7 dias		28 dias	
			Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)
1:3,5	0%	0,40	2,60	3,36	3,09	4,04
1:5		0,51	2,88	2,45	3,40	2,84
1:6,5		0,64	1,94	1,30	2,10	2,60
1:3,5	10%	0,42	3,05	2,74	2,30	2,94
1:5		0,51	1,74	2,59	2,39	2,53
1:6,5		0,64	1,62	1,75	3,80	2,21
1:3,5	20%	0,44	2,23	3,01	2,24	2,30
1:5		0,55	2,26	2,46	2,89	2,22
1:6,5		0,64	1,87	1,92	3,36	3,02

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço e teor de adição, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados nas Tabelas 9 e 10, tanto para o ensaio aos 7 dias como aos 28 dias. Observa-se que para a idade de 7 dias nenhuma das variáveis e suas interações foram consideradas significadas. Entretanto, para a idade de 28 dias apenas o traço foi considerado significativo. Acredita-se que a variabilidade típica deste ensaio possa ter mascarado os resultados.

Tabela 9. Análise de variância (ANOVA) – Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias

EFEITOS	SQ	GL	SQF	TESTE F	P	SIG.
Traço	0,0620	2	0,0310	0,1121	0,895227	Não
% de adição	0,4404	2	0,2202	0,7958	0,480586	Não
Traço*% de adição	2,6602	4	0,6651	2,4034	0,126344	Não
Erro	2,4905	9	0,2767			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

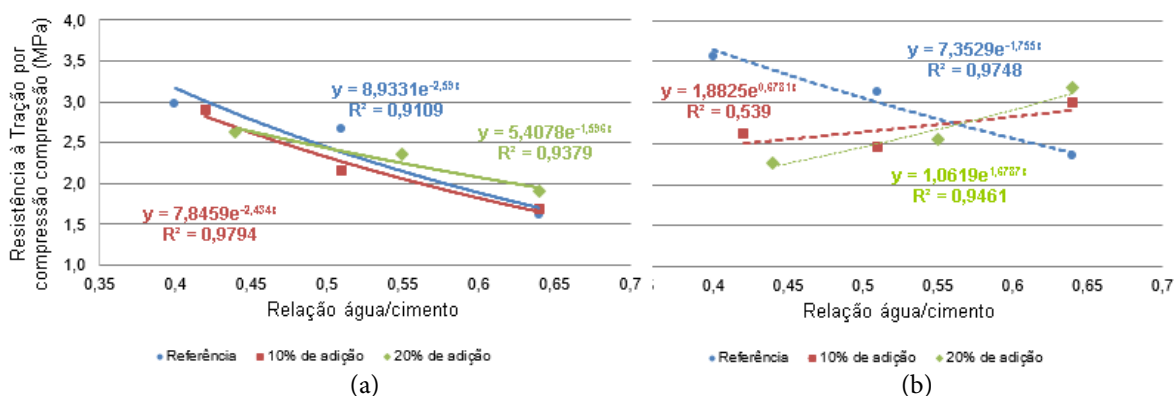
Tabela 10. Análise de variância (ANOVA) – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

EFEITOS	SQ	GL	SQF	TESTE F	P	SIG.
Traço	3,69748	2	1,84874	12,5331	0,002504	Sim
% de adição	0,09652	2	0,04826	0,3272	0,729185	Não
Traço*% de adição	0,38468	4	0,09617	0,6520	0,639906	Não
Erro	1,32757	9	0,14751			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Analisando a Figura 9, nota-se que tanto para o ensaio realizado aos 7 dias quanto para os 28 dias, a incorporação do resíduo reduz a resistência a tração por compressão diametral para relações água/aglomerante menores e aumenta para relações maiores, ficando mais nítida essa melhora no comportamento desta propriedade no ensaio aos 28 dias para relações maiores que 0,55.

Figura 9. Resistência à tração por compressão diametral em diferentes idades; (a) ruptura aos 7 dias; (b) ruptura aos 28 dias

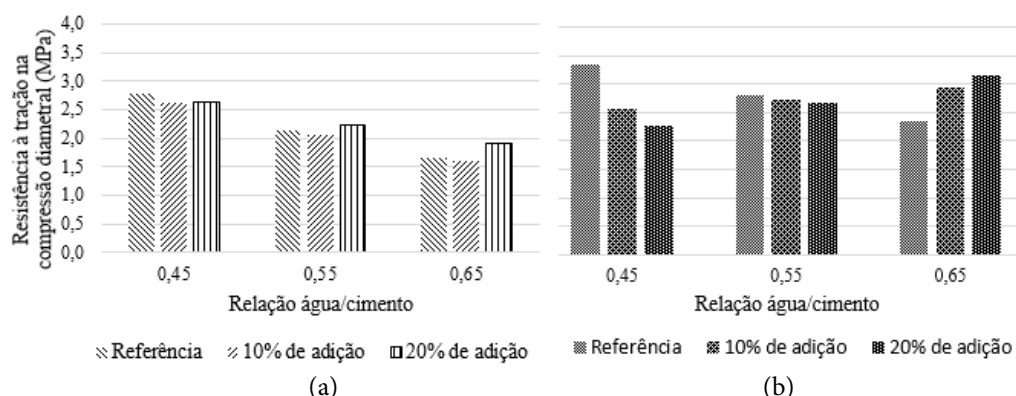


Observou-se que o acréscimo de resistência à tração por compressão diametral não foi proporcional ao incremento ocasionado na resistência à compressão. Esse fato já foi salientado por Gonçalves (2000), quando inserido o fíler de corte de granito na mistura, que por conta de sua finura auxilia na densificação da zona de transição, há ganhos na resistência à compressão, entretanto na resistência à tração este incremento não é proporcional.

Analisando a Figura 10 é possível analisar a resistência à tração por compressão diametral dos concretos, mantendo constante a relação água/aglomerante. Deste modo, nota-se que aos 7 dias de idade para relações a/a mais baixas houve redução na resistência, já para as demais relações observa-se aumento nesta propriedade para o teor de adição de 20% de pó de marmoraria, para uma relação a/a 0,55 o incremento foi de 5% e para a relação a/a de 0,65 o ganho foi de 16%, quando comparado com o concreto de referência. Nesta propriedade em análise, o teor de 10% de adição do pó de

marmoraria não se mostrou benéfico, pois apenas para a idade de 28 dias e para uma relação a/a de 0,65 proporcionou um incremento na resistência.

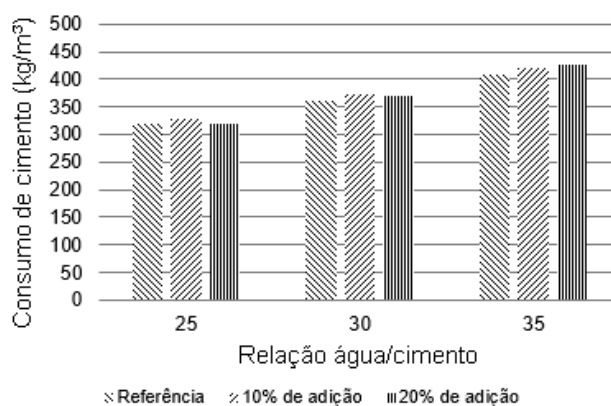
Figura 10. Resistência à tração por compressão diametral em diferentes idades em função da relação a/aglomerante; (a) ruptura aos 7 dias; (b) ruptura aos 28 dias



3.3 Consumo de cimento

Para comprovar os benefícios da adição de resíduos de marmoraria em concretos, procedeu-se com o comparativo entre os resultados obtidos a fim de verificar o consumo de cimento entre ambos, como demonstrado na Figura 11. Comparando em igualdade de resistência, observa-se que para as resistências à compressão de 25 MPa e 30 MPa, a adição do resíduo de marmoraria praticamente não mostra influência no consumo de cimento.

Figura 11. Consumo de cimento (Kg/m^3) estimado em função da resistência à compressão aos 28 dias



3.4 Absorção por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é uma propriedade que está atrelada à durabilidade das matrizes cimentícias e por este motivo este trabalho contempla esta análise.

3.4.1 Absorção de água ao longo do tempo

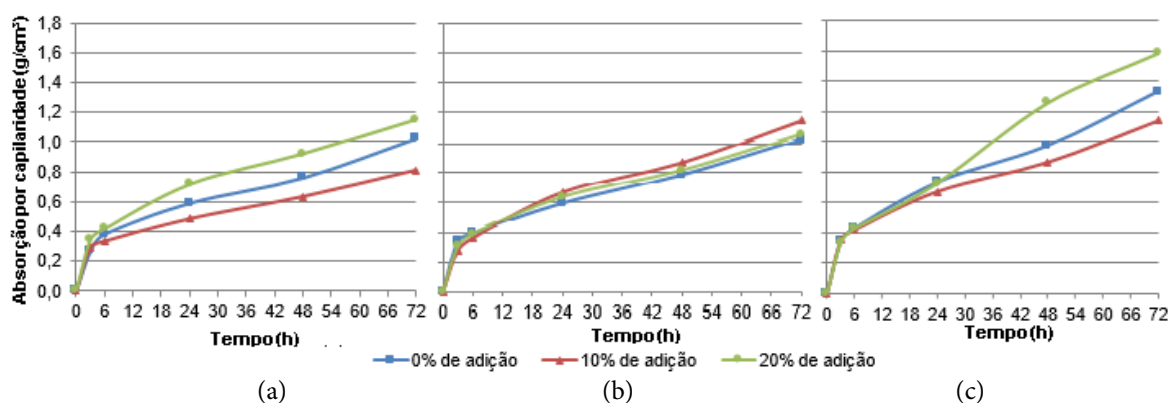
A Figura 11 mostra a evolução da absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, em 0, 3, 6, 24, 48 e 72 horas, para cada mistura.

Na Figura 12 a observa-se o comportamento dos concretos produzidos com o traço 1:3,5, no qual observa-se que a incorporação do resíduo no teor de 10% se mostrou benéfica, uma vez que auxiliou na redução da absorção de água, já o teor de 20% não apresentou o mesmo comportamento, aumentando esta propriedade. Na Figura 12 b demonstra o comportamento dos concretos produzidos com o traço 1:5, a incorporação do resíduos nos dois teores estudados aumentaram a absorção de água por capilaridade, desta forma prejudicando a durabilidade destes concretos. E a Figura 12 c, que trata sobre os concretos com traço 1:6,5, demonstra que assim como no traço 1:3,5, a incorporação do resíduo no teor de 10% se mostrou benéfica, uma vez que reduziu a absorção de água e o teor 20% não apresentou o mesmo comportamento.

Os resultados obtidos demonstram que apenas o teor de 10% de adição do resíduo de marmoraria se mostra benéfico quanto à absorção de água por capilaridade não corrobora com os resultados obtidos por Gameiro et Al. (2014), que estudaram a durabilidade de concretos com a substituição do agregado miúdo por pó de marmoraria, nos teores de 0, 20, 50 e 100%, o qual observou-se que a proporção de 20% de substituição se mostrou benéfica quanto à absorção de água por capilaridade. Esta diferença entre os resultados pode ser atrelada a forma de utilização do resíduo, diferenças químicas e variações no tamanho da partícula.

Figura 12. Absorção de água por capilaridade aos 28 dias:

(a) Traço 1:3,5; (b) Traço 1:5; (c) Traço 1:6,5



3.4.2 Absorção total de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Absorção de água por capilaridade média as 72 horas

Traço	% de adição de resíduo	a/a	72 horas	
			Absorção (g/cm ²)	Absorção (g/cm ²)
1:3,5	0%	0,40	0,910	1,140
1:5		0,51	1,237	0,808
1:6,5		0,64	1,274	1,391
1:3,5	10%	0,42	0,770	0,851
1:5		0,51	1,171	1,122
1:6,5		0,64	1,233	1,050
1:3,5	20%	0,44	1,058	1,244
1:5		0,55	1,256	0,851
1:6,5		0,64	1,550	1,620

Para a análise da significância das variáveis controláveis, traço e teor de adição, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados na Tabela 12. Observa-se que apenas o traço foi considerado um efeito significativo, acredita-se que a variabilidade típica deste ensaio possa ter mascarado os resultados.

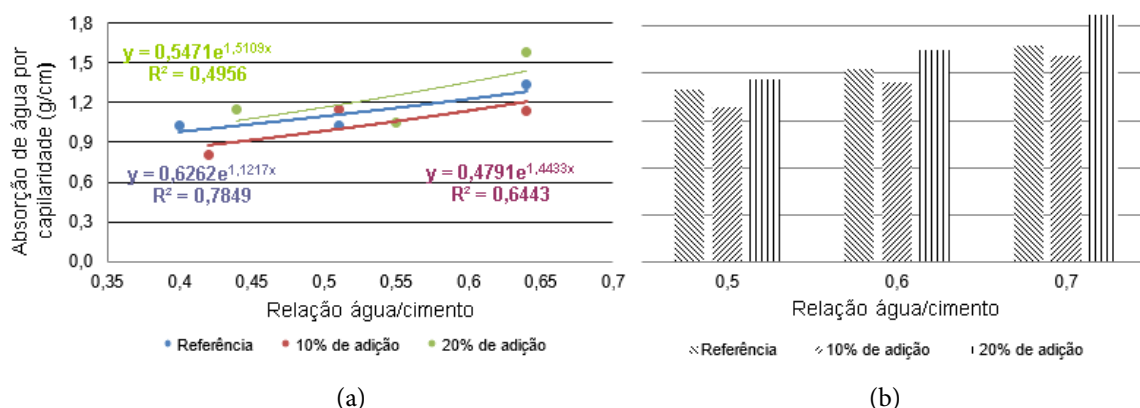
Tabela 12. Análise de variância (ANOVA) – Absorção de água por capilaridade após 72 horas

EFEITOS	SQ	GL	SQF	TESTE F	P	SIG.
Traço	0,42334	2	0,21167	7,6742	0,011349	Sim
% de adição	0,16108	2	0,08054	2,9201	0,105343	Não
Traço*% de adição	0,17226	4	0,04307	1,5614	0,265346	Não
Erro	0,24824	9	0,02758			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F(calc): valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade dos corpos de prova em concreto, que são apresentados na Figura 13, correspondem à média dos valores de absorção de água após 72 horas de contato dos corpos de prova com a água.

Figura 13. (a) Absorção de água por capilaridade; (b) Absorção de água por capilaridade em função da relação a/aglomerante



Esse ensaio teve como objetivo determinar qual a influência de adição nos vazios capilares no concreto. De acordo com a Figura 12, nota-se que os concretos com maior relação água/aglomerante, isto é, concretos mais pobres em cimento possuem maior absorção, fato totalmente esperado. Entretanto, observa-se que a adição de 10% de resíduos propiciou uma melhoria nessa propriedade, uma vez que de um modo geral o emprego do resíduo reduziu a absorção. Já o teor de adição de 20% resultou em uma absorção maior que no concreto de referência.

A redução na absorção de água por capilaridade, para o teor de 10% de adição do resíduo nos concretos, pode estar relacionada à melhora no empacotamento da matriz, efeito fíler proporcionado pelo material, que apresenta elevada quantidade de finos ($< 150\mu\text{m}$).

Comportamento similar a este foi observado no estudo de Arnold (2011), embora a autora tenha utilizado fíler oriundo da britagem da areia basáltica, a adição deste material contribui para a redução na absorção de água.

Vale ressaltar que a durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas sim está relacionada com o desempenho dos mesmos sob determinadas condições de exposição.

4 Conclusões

Com relação à resistência à compressão, a adição de 10% do resíduo provocou uma redução na propriedade, já os concretos com teor de 20% a adição a resistência à compressão se manteve quando comparada ao concreto de referência. Como esperado, os traços mais ricos em cimento apresentam melhor resistência que os demais.

Já para a resistência à tração por compressão diametral, os traços mais pobres, com relação 1:6,5, apresentaram maior elevação da resistência com a adição de resíduos. Ainda se observou que a adição do resíduo auxiliou no incremento desta propriedade para relações água/aglomerante maiores que 0,55.

Com relação à absorção, a adição do teor de 10% contribui para diminuir essa característica, o que era desejável e o teor de 20% provocou um aumento na absorção.

De um modo geral, o resíduo de marmoraria se mostrou pouco eficiente perante as propriedades estudadas, entretanto, deve-se ressaltar que este fato deve estar atrelado ao tamanho médio das partículas utilizadas, uma vez que no presente estudo este apresentava 22,50 μ m e nos estudos relacionados o tamanho médio era de 5 à 10 μ m. Buscou-se nesta pesquisa usar o resíduo de forma a não incorporar muita energia para diminuir o seu diâmetro médio.

Através dessa pesquisa pode-se concluir que o resíduo de marmoraria necessita de análises mais severas e de maior confiabilidade. Entretanto, pelos resultados apresentados, o resíduo pode ser adicionado aos concretos para melhoria de algumas propriedades. Ressalta-se que essa opção contribui para minimização do passivo ambiental causado pela atual disposição desse resíduo no meio ambiente e, se melhor caracterizado e estudado, pode tornar-se uma nova matéria-prima para utilização na construção civil.

Entretanto deve-se atentar para a presença de álcalis, mesmo que em pequena quantidade, a realização de ensaios para verificação da possível reação álcali-agregado.

Referências bibliográficas

- ABIROCHAS. *Associação Brasileira da indústria de rochas ornamentais*. São Paulo, 2012.
Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/>>.
- ARNOLD, D. C. M. *Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, RS, Brasil.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 23:2001 Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2001a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779 Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.
- GAMEIRO, F.; BRITO, J.; SILVA, D. “Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying”. *Eng Struct*, v. 59, n. 2, p. 654–62, 2014.
- GONÇALVES, J. P., I. *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2000.
- LOPES, J.L.M.P.; BACARJI, E.; PAZINI, E.J.; RÊGO, J.H.S.; PEREIRA, A.C. Estudo do potencial de utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG) como filler na produção de concretos. In: Seminário de Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás, 3., Goiânia. *Anais...Goiás: COMPEEX*, 2006.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: Pini, 2014.
- MELLO, I.S.C. *A cadeia produtiva de rochas ornamentais e para revestimento no Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A., p. 27-80, 2004.
- MOURA, W.A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R.S.L. “Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso”. *Sitientibus*, Feira de Santana, n. 26, p. 49-61, 2002.
- POSSAN, E. *Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

RODRIGUES, R.; BRITO, J.; SARDINHA, M. "Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge". *Construction and Building Materials*, v. 77, p. 349-356, 2015.

VARDHAN, K.; GOYAL, S.; SIDDIQUE, R.; SINGH, M. "Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement". *Construction and Building Materials*, v. 96, p. 615-621, 2015.