DURABILIDADE DE CONCRETOS COM RESÍDUO DE MARMORARIA

A.S. NEGREDO
Mestrando de engenharia civil
Universidade de Brasília/PECC
Brasília/DF; Brasil
alexandrenegredo@gmail.com

V. M. S. CAPUZZO
Professora Doutora
Universidade de Brasília/PECC
Brasília/DF; Brasil
valdirenecapuzzo@unb.br

RESUMO

A produção de rochas ornamentais utilizadas na construção civil gera em torno de 25% a 30% de resíduo de marmoraria (RM) que tem como principal destino o descarte na natureza. Porém, este material tem grande potencial para ser reintroduzido na cadeia produtiva da construção civil e reduzir impacto ambiental. Este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos estruturais com a utilização de RM, em substituição em massa ao cimento Portland. Para isso, foram produzidos seis traços de concreto com diferentes teores de substituição em massa de cimento Portland por resíduo de marmoraria (0, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%). Para avaliar as propriedades mecânicas foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral. Para avaliar a durabilidade do concreto foram realizados os ensaios de absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade. Por fim, foi realizada a análise de custo de todos os traços. Os resultados indicam que os concretos com substituição de cimento Portland por resíduo de marmoraria apresentam maior eficiência mecânica e durabilidade competitiva com os concretos referência. Além disso, foram obtidos custos significativamente menores para os concretos feitos com RM.
Palavras-chave: Concreto. Resíduo de marmoraria. Durabilidade. Análise de custo.

ABSTRACT

A production of ornamental rocks in the construction industry generates around 25% to 30% of marble and granite waste (MGW) that has as main destination the disposal in nature. However, this material has great potential to be reintroduced into the productive chain of civil construction and reduce the environmental impact. This work aims to evaluate as mechanical and durable properties of structural concrete with use of MGW, replacing Portland cement by weight. In addition, six concretes with different percentage replacement of Portland cement were produced (0, 5%, 10%, 15%, 20% and 25%). To evaluate how mechanical properties performed with compressive strength, tensile strength. To evaluate the durability of concretes, were performed an immersion water absorption and capillary water absorption. Finally, to evaluate the economic viability of concrete, the cost analysis of all concretes was performed. The results indicate that the concrete with the substitution of Portland cement for marble and granite waste had greater mechanical efficiency and competitive durability with the control concrete. In addition, in the economic feasibility analysis, greatly lower costs were obtained for MGW concretes.
Keywords: Concrete. Marble and granite waste. Durability. Technical feasibility. Economic feasibility.

1. INTRODUÇÃO

O setor de rochas vem crescendo todos os anos. Em 2015 a produção mundial atingiu 140 milhões de toneladas, o que representa 48 milhões de metros cúbicos ou 1,42 bilhões de metros quadrados de chapas (ALDUS, 2016).

As exportações brasileiras já atingem mais de 100 países, sendo o Brasil o terceiro maior exportador de ardósia do mundo, atrás apenas da China e Espanha, o segundo maior exportador de blocos de granito, atrás apenas da Índia, além de ser o maior exportador de rochas para os EUA (ABIROCHAS, 2015). Todo esse mercado acumula um total de aproximadamente 9,3 milhões de toneladas de rochas ornamentais produzidas anualmente (CHIODI FILHO, 2014).

Tendo em vista que a produção de rochas é proporcional à geração de resíduo, é preciso pensar em uma maneira correta de gerir esse material, a fim de minimizar o impacto ambiental causado pela destinação incorreta deste resíduo. Segundo Rodrigues (2015), os resíduos gerados pelas marmorarias, possuem dimensões desde grãos de pó até fragmentos maiores de formatos diversos, que são em muitos casos depositados em locais inadequados ou despejados na natureza sem passar por um tratamento adequado. Muitas dessas empresas não sabem o que fazer com esses resíduos e os deixam acumulados nos terrenos em torno da marmoraria ou os destinam aos depósitos de resíduos do município.

O resíduo de marmoraria em pó, proveniente do corte das rochas, é classificado como adição mineral inerte e tem a função principal de atuar com efeito filer, preenchendo os vazios do concreto. Esse efeito filer tem grande importância na durabilidade dos concretos frente à ação de agentes agressivos. Tem-se um melhor empacotamento dos grãos, o que dificulta a atuação dos mecanismos de transporte e a penetração de agentes agressivos que diminuem a vida útil das estruturas (DEHGHAN et al., 2017; TENNICH, BEN OUEZDOU e KALLEL, 2017).

Singh, Srivastava e Bhunia (2017), por exemplo, estudaram o efeito da substituição parcial de cimento, em massa, por resíduo de mármore e, como resultado, obteve uma diminuição na retração por secagem, aumento de resistência à compressão em argamassas até 15% de substituição. Segundo os autores, o resíduo atuou fundamentalmente como efeito filer, proporcionando uma estrutura mais densificada.

Por outro lado, Sharma et al. (2017), que utilizaram resíduo do corte de granito como substituição parcial dos agregados, obtiveram uma diminuição da resistência à compressão e da tração na flexão. Os autores observaram, também, uma melhora na absorção de água e na permeabilidade de água dos concretos com resíduo de granito. Segundo eles, os concretos com até 20% de substituição podem ser usados para fins estruturais, enquanto que os concretos com 20 a 40% de substituição são recomendados para fins não estruturais como pavimentos.

A motivação desta pesquisa é trazer resultados de durabilidade do concreto com a utilização de resíduo de marmoraria – RM em substituição parcial ao cimento Portland. Esse tema tem a importância social de reduzir custos de descarte do RM e otimiza a utilização do cimento Portland, contribuindo com a sustentabilidade. Logo, este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas dos concretos com substituição parcial de cimento por resíduo de marmoraria (RM) e a tendência de comportamento para os diferentes teores de substituição, além de verificar a durabilidade através dos ensaios de absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade. Para avaliar a viabilidade econômica dos concretos, foi realizada a análise de custo de todos os traços.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No programa experimental foram realizadas as seguintes etapas: A caracterização dos materiais; a dosagem dos concretos e a determinação das propriedades mecânicas; os ensaios de durabilidade e a análise da viabilidade econômica dos concretos.

2.1 Caracterização dos materiais

2.1.1 Cimento Portland

A fim de estudar o efeito do resíduo de marmoraria ao concreto, foi utilizado o cimento CP V – ARI (cimento Portland de alta resistência inicial), por possuir o menor teor de adições em sua composição. As propriedades físicas e químicas do cimento utilizado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades químicas e físicas do cimento Portland utilizado.

Propriedades		Resultados	Limites*	Método de ensaio
Massa específica (g/cm³)		3,06	N.E.	ABNT NBR NM 23:2001
Finura Blaine (m²/kg)		5144,2	N.E.	ABNT NBR NM 76:1998
Tempos de pega	Início de pega (min)	130	≥ 60	ABNT NBR NM 65:2003
	Fim de pega (min)	210	≤ 600	
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	15,9	≥ 14	ABNT NBR 7215:1997
	3 dias (MPa)	28,2	≥ 24	
	7 dias (MPa)	37,7	≥ 34	
Composição química	SiO_2 (%)	19,87	N.E.	ABNT NBR 14656:2001
	CaO (%)	65,83	N.E.	
	MgO (%)	1,98	N.E.	
	Al_2O_3 (%)	3,68	N.E.	
	Fe_2O_3 (%)	3,21	N.E.	
	K_2O (%)	1,25	N.E.	
	SO_3 (%)	4,11	≤ 4,5	
	C_3A teórico (%)	4,31	N.E.	

Obs.: *Limites estabelecidos com base na ABNT NBR 5733:1991; N.E. = Não estabelecido.

2.1.2 Resíduo de marmoraria – RM

Inicialmente, o resíduo de marmoraria coletado de tanques de decantação em uma marmoraria na cidade de Brasília possuía a consistência de uma lama devido à mistura do resíduo em pó com a água de resfriamento das serras de corte (Figura 1a). Para a utilização do resíduo, a lama foi secada em estufa para extrair a água e posteriormente o resíduo foi destorroado para eliminar os possíveis grumos existentes, obtendo o aspecto final mostrado na Figura 1b.

Figura 1 – Lama e aspecto final do RM utilizado na mistura dos concretos.





A análise mineralógica foi realizada com a técnica de difração de raio X (DRX), em equipamento da marca Rigaku Ultima IV, com velocidade 5°/min, passo 0,05° e 2θ variando de 2 a 60º, no Laboratório de Geociências da Universidade de Brasília. A análise química foi realizada por meio da técnica de espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), por equipamento da marca Shimadzu, modelo EDX-720HS, na Central Analítica do Instituto de Química (CAIQ) da Universidade de Brasília.

Os resultados da caracterização mineralógica estão apresentados na Figura 2. Observa-se picos bem definidos ou compostos cristalinos estáveis de quartzo, muscovita, albita, calcita e outros, com baixa possibilidade de atividade reativa. Em seguida, a caracterização física e química do resíduo é apresentada na Tabela 2, onde é mostrada a predominância de quartzo sílica (SiO_2) e calcário (CaO), sendo, portanto, um material sílico-calcário.

Figura 2 – Difratograma do resíduo de marmoraria

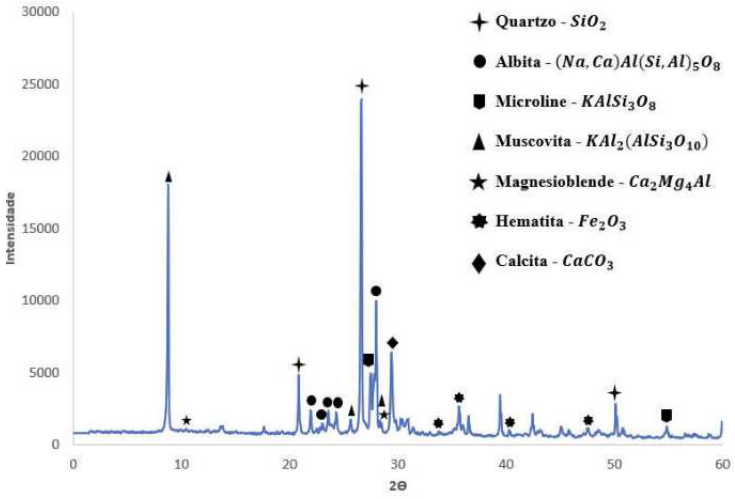

Tabela 2 – Dados de caracterização do RM

Propriedades		Resultados	Limites	Método de ensaio
Massa específica (g/cm³)		2,53	N.E.	ABNT NBR NM 23:2001
Finura Blaine (m²/kg)		7321,4	N.E.	ABNT NBR NM 76:1998
Material retido na peneira nº 200 (%)		1,96	N.E.	ABNT NBR 11579:2012
Material retido na peneira nº 325 (%)		4,87	≤ 34	ABNT NBR 9202:1985
Composição química	SiO_2 (%)	53,63	N.E.	-
	CaO (%)	19,34	N.E.	-
	Al_2O_3 (%)	11,76	N.E.	-
	Fe_2O_3 (%)	6,36	N.E.	-
	MgO (%)	2,59	N.E.	-
	K_2O (%)	3,04	N.E.	-
	TiO_2 (%)	1,63	N.E.	-
	SO_3 (%)	0,21	N.E.	-
	P_2O_5 (%)	0,74	N.E.	-
	Outros (%)	0,70	N.E.	-
Obs.: N.E. = Não estabelecido.				

2.1.3 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi a areia quartzosa natural de rio. Os agregados graúdos utilizadas são provenientes da britagem de rocha calcária, com dimensões máximas características de 12,5mm e 19mm, na proporção de 30/70%, respectivamente. Os demais dados de caracterização e as porcentagens retidas acumuladas estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Dados de caracterização dos agregados.

Propriedades	Resultados			Método de ensaio
	Areia 4,8mm	Brita 12,5mm	Brita 19mm	
Dimensão máxima característica (mm)	4,80	12,50	19,00	ABNT NBR NM 248:2009
Módulo de finura	2,49	6,00	6,69	ABNT NBR NM 248:2009
Massa específica (g/cm³)	2,65	2,71	2,75	ABNT NBR NM 52:2009

Tabela 4 – Porcentagem retida acumulada dos agregados nas peneiras

Peneiras (mm)	0,075	0,149	0,297	0,595	1,19	2,38	4,76	6,30	9,51	12,70	19,00
% (Areia 4,8mm)	97	88	70	50	33	7	0	0	0	0	0
% (Brita 12,5mm)	99,96	99,89	99,89	99,88	99,88	99,66	90,49	71,29	10,05	0,22	0
% (Brita 19,0mm)	98	98	98	98	98	98	98	96	80	51	1
Obs.: % (Areia 4,8mm), % (Brita 12,5mm) e % (Brita 19mm) = % retida acumulada dos agregados.											

2.1.4 Aditivo

Em todos os concretos, foi utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilatos fornecido pela *Grace Construction* do Brasil, a fim de manter mesma consistência para uma relação água/cimento fixa. Na Tabela 5, é apresentada a caracterização do aditivo fornecida pelo fabricante.

Tabela 5 – Características do aditivo superplastificante

Características	Valor
Aspecto/cor	Líquido/alaranjado
Massa específica (g/cm³)	1,11 ± 0,2
pH	6,0 ± 1,0

2.2 Dosagem dos concretos

A dosagem dos concretos foi realizada conforme as recomendações do método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). Foram produzidos seis traços de concreto, sendo o traço referência – CREF (sem RM) e outros cinco traços com teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de RM em substituição, em massa, ao cimento Portland. Foi fixada uma relação água/cimento de 0,5 e abatimento do tronco de cone igual a 100 ± 10mm, com o uso de aditivo superplastificante. Na Tabela 6 estão apresentados os traços da pesquisa.

Tabela 6 – Composição dos traços unitários dos concretos, em massa (kg).

Concreto	C	RM	Areia	Brita (19mm)	Brita (12,5mm)	Relação água/ finos	Relação aditivo/ finos (%)	Consumo de cimento (kg/m³)
CREF	1,00	0,00	2,12	2,02	0,86	0,50	0,22	374,49
CRM 5	0,95	0,05	2,12	2,02	0,86		0,22	355,77
CRM 10	0,90	0,10	2,12	2,02	0,86		0,22	337,04
CRM 15	0,85	0,15	2,12	2,02	0,86		0,22	318,32
CRM 20	0,80	0,20	2,12	2,02	0,86		0,22	299,59
CRM 25	0,75	0,25	2,12	2,02	0,86		0,29	280,87

2.3 Propriedades mecânicas dos concretos

Após a etapa de dosagem e moldagem dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples aos 7, 14, 28 e 63 dias, conforme ABNT NBR 5739:2007 e resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, conforme ABNT NBR 7222:2011. Após a análise dos resultados de propriedades mecânicas, foram escolhidos os três melhores traços com RM, baseado nos resultados de resistência à compressão simples, para se estudar a durabilidade desses concretos.

2.4 Estudo da durabilidade dos concretos

A avaliação da durabilidade dos concretos foi realizada através dos ensaios de absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade. Os ensaios de absorção de água possuem boa correlação com os mecanismos de transporte de agentes agressivos. Enquanto a absorção de água por imersão fornece uma boa noção de porosidade, a absorção de água por capilaridade fornece bons resultados em relação á permeabilidade dos concretos. São, portanto, ensaios que fornecem bons indicadores de durabilidade (TEODORO, 2016). Nos dois métodos, as amostras foram ensaiadas após 28 dias de cura em câmara úmida utilizando corpos de prova cilíndricos 100mm x 200mm.

2.4.1 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme a ABNT NBR 9778:2005. Na Figura 3 são apresentados corpos de prova imersos em água com altura de um terço, dois terços e três terços de água, respectivamente. A pesagem dos corpos de prova foi realizada ao final de cada etapa a fim de determinar a absorção de água e, posteriormente, os corpos de prova foram imersos em água fervente para avaliar outra etapa de imersão, de acordo com a norma.

Figura 3 – Ensaio de absorção de água por imersão (a) Corpos de prova imersos em água a 1/3 de altura; (b)corpos de prova imersos em água a 2/3 de altura e (c) corpos de prova completamente imersos em água.



2.4.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com a ABNT NBR 9779:2012. Para realizar o ensaio de absorção por capilaridade os corpos de prova foram inseridos em uma lâmina de água de 5 ± 0,5mm para que fossem feitas as pesagens dos mesmos nos tempos estabelecidos por norma. Na Figura 4 é apresentada a ascensão capilar da água no interior dos poros do concreto, após rompimento à tração por compressão diametral, ao final do ensaio.

Figura 4 – Ensaio de absorção de água por capilaridade (a) Corpos de prova parcialmente imersos em lâmina de água de 5 ±0,5mm; (b) Ascensão capilar de água no interior dos poros do concreto após rompimento à tração por compressão diametral.



2.5 Viabilidade econômica

O estudo da viabilidade econômica levou em consideração o custo de produção de um metro cúbico de concreto de cada traço, a resistência à compressão dos concretos e o consumo de cimento, a fim de comparar os traços entre si avaliando a variação de cada quesito.

O custo unitário de cada insumo foi coletado do banco de dados do SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, e os valores são referentes ao ano de 2017 para a cidade de Brasília.

Para o cálculo do metro cúbico dos traços, utilizou-se a equação de Tutikian (2004), adaptada ao concreto convencional, Equação 1. Os valores de consumo de cimento e demais dados foram extraídos da Tabela 6.

$$Cu = C * \$c + C * RM * \$RM + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * ag/finos * \$ag \quad (1)$$

Em que:
Cu: Custo do concreto por metro cúbico; C: Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³); $c: custo do kg de cimento; RM: relação RM/cimento; $RM: custo do kg de RM; a: relação agregado miúdo/cimento; $a: custo do kg de agregado miúdo; p: relação agregado graúdo/cimento; $p: custo do kg de agregado graúdo; SP%: dosagem de aditivo superplastificante por metro cúbico de concreto em l/m³; $sp: custo do litro de aditivo superplastificante; ag/finos: relação água/finos; $ag: custo do litro de água.

Para a simplificação da análise econômica, não foi considerado o custo do RM pois o resíduo ainda não é comercializado. Além disso, foi desconsiderado o custo do transporte do mesmo haja vista que, atualmente, as marmorarias entregam o resíduo gratuitamente em localidades próximas para uso em pesquisas, pois o deslocamento para universidades ou localidades urbanas, em geral, é menor do que o deslocamento para os lixões e aterros, locais afastados da cidade em que ocorre o descarte do resíduo. Logo, a doação do resíduo se torna mais econômica do que o descarte nestes locais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Propriedades mecânicas

Na Figura 5 e Tabela 7 são apresentados os resultados de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral aos 28 dias e o consumo de cimento dos traços. Ao substituir cimento por resíduo de marmoraria houve uma sensível queda de resistência. Porém, para uma análise mais aprofundada da resistência à compressão em relação ao teor de RM, utilizou-se a relação resistência à compressão simples dividida pelo consumo de cimento, sendo que, quanto maior essa relação, maior a eficiência mecânica do traço. A tabela 7 também nos mostra a eficiência mecânica de cada traço.

Figura 5 – Resistência à compressão aos 28 dias

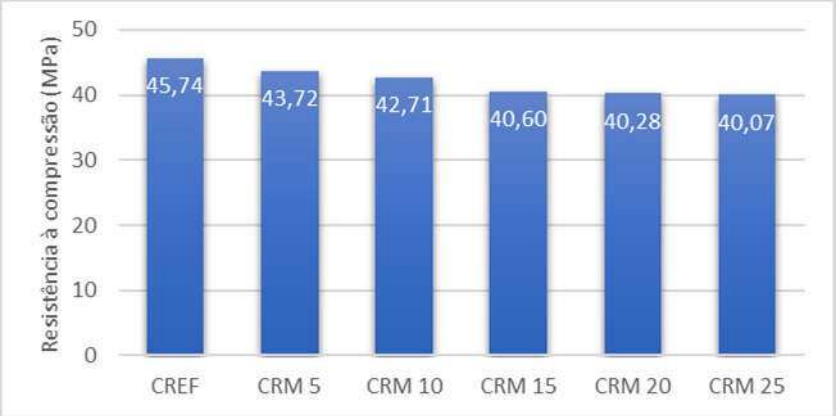

Tabela 7 – Eficiência mecânica dos traços estudados.

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Consumo de cimento (kg/m³)	Eficiência mecânica (MPa/kg/m³)	Variação (%)
CREF	45,74	4,9	374,49	0,122	-
CRM 5	43,72	4,5	355,77	0,123	0,6%
CRM 10	42,71	4,2	337,04	0,127	3,8%
CRM 15	40,60	4,1	318,32	0,128	4,4%
CRM 20	40,28	4,6	299,59	0,134	10,1%
CRM 25	40,07	4,7	280,87	0,143	16,8%

De acordo com a Tabela 9, o traço de maior eficiência foi o CRM 25, apresentando uma eficiência 16,8% superior ao traço referência, seguido pelo CRM 20 (10,1%), CRM 10 (4,4%), CRM 15 (3,8%) e CRM 5 (0,6%), respectivamente.

Rodrigues, Brito & Sardinha (2015) avaliaram o desempenho mecânico dos concretos com incorporação de pó de mármore em substituição parcial ao cimento nos teores de 0, 5, 10 e 20%, em volume e também notaram que a resistência mecânica desses concretos tende a diminuir sensivelmente com a substituição de cimento Portland. Porém, os resultados são satisfatórios ao setor da construção civil mesmo para os teores de substituição mais altos.

Abd Elmoaty (2013) também estudou a substituição parcial de cimento por resíduo de marmoraria e conseguiu um aumento da resistência à compressão para o teor de 5% de substituição. Vieira (2017) obteve um ganho de resistência para teores de substituição de até 30% em concreto autoadensável com substituição parcial de cimento Portland por RM.

Ao substituir cimento por RM, o esperado é que haja uma queda de resistência à compressão, porém essa queda não é proporcional à porcentagem de cimento subtraída da mistura haja vista que a incorporação de RM ajuda a preencher os vazios capilares e produz um concreto menos poroso que minimiza a queda de resistência à compressão simples. É importante ressaltar que o teor de 25% de substituição atende aos requisitos de consumo mínimo de cimento da norma ABNT NBR 6118:2004, para a produção de concretos estruturais.

Em relação aos resultados de tração por compressão diametral aos 28 dias, todos os traços apresentam-se dentro de uma pequena faixa de 4,1 a 4,9 MPa, onde os concretos com RM possuem uma sensível redução de resistência em relação ao concreto referência. Essa redução insignificante também foi observada por Vieira (2017) em seus estudos. Observou-se, também, que não houve uma correlação com os resultados de resistência à compressão, tendo em conta que houve uma redução gradativa dos valores do CRM 5 ao CRM 15 e um aumento gradativo do CRM 15 ao CRM 25. Essa falta de correlação pode ter ocorrido devido às dispersões normais dos ensaios em laboratório.

Como parte da metodologia, o objetivo de estudar as propriedades mecânicas foi definir os três melhores traços para estudar a durabilidade dos concretos. Como os resultados de resistência à compressão se mostraram bem parecidos, optou-se por escolher os traços com teores mais distintos entre si para conseguir distinguir melhor os resultados de durabilidade. Portanto, optou-se pelos traços de CRM 5, CRM 15 e CRM 25, além do concreto referência (CREF).

3.2 Absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade

Na Figura 6 e Tabela 8 estão apresentados os dados de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, índice de vazios e massa específica. Os concretos com RM obtiveram resultados de absorção por imersão e capilaridade próximos ao concreto referência, com absorções sensivelmente maiores e menores, como pode ser visto na tabela abaixo.

Figura 6 – Absorção de água por imersão e por capilaridade.

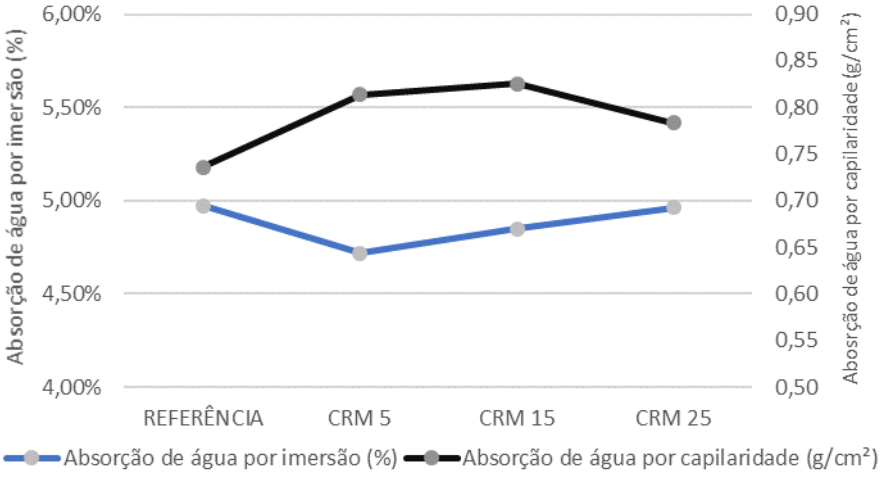

Tabela 8 – Absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade, índice de vazios e massa específica.

Concreto	Absorção por capilaridade (g/cm²)	Absorção por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm³)
CREF	0,736	4,97	9,86	2,20
CRM 5	0,813	4,72	9,85	2,16
CRM 15	0,826	4,85	9,80	2,11
CRM 25	0,784	4,96	9,91	2,06

Helene (1983) propôs a seguinte classificação para os resultados de absorção de água por imersão: Impermeável para concretos com absorção menor que 4,3%, normal para concretos com absorção de 4,3 a 5% e deficiente para absorções maiores que 5%.

Com base na classificação de (HELENE, 1983), todos os concretos se encontraram na faixa de concretos normais, haja vista que obtiveram absorções de 4,72 a 4,97%, sendo o CRM 5 o traço de menor absorção por imersão e o CREF o traço de maior absorção. A diminuição de absorção de água dos concretos com RM em relação ao concreto referência se deve, possivelmente, ao efeito filer do resíduo que foi capaz de preencher os vazios intergranulares, contribuindo para diminuir a porosidade. Segundo os dados de caracterização obtidos pelo ensaio de finura pelo método Blaine, o cimento possui finura igual a 5144,2m²/kg enquanto que o RM possui finura igual a 7321,4m²/kg, indicando que o RM possui partículas mais finas que o cimento e, consequentemente, pode atuar como efeito filer.

Em teoria, quanto menor o tamanho dos poros, maior tende a ser a ascensão capilar. Portanto, nos traços CRM 5 e CRM 15 observa-se uma maior ascensão capilar, devido a uma provável redução na porosidade. Partindo dessa ideia, os resultados de absorção de água possuem correlação com o ensaio de absorção por capilaridade, haja vista que os traços CRM 5 e CRM 15 possuem os menores resultados de absorção por imersão e índice de vazios. Porém, vale ressaltar que um ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio seria importante para confirmar essa análise.

Por outro lado, essa análise parece não ter uma correlação com os resultados de massa específica visto que eles decrescem quanto maior o teor de substituição. Possivelmente isso ocorre porque quanto maior o teor de substituição de cimento, menor a quantidade de produtos de hidratação formados e, consequentemente, menor a massa específica.

Segundo os resultados apresentados, a pequena variação nos resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e capilaridade, índice de vazios e massa específica indicam que os concretos com resíduo de marmoraria são duráveis e têm grande potencial de utilização na construção civil.

3.4 Viabilidade econômica

Para fazer uma análise global da viabilidade econômica dos concretos com RM, são apresentados, na Tabela 9, os dados de custo do metro cúbico de cada traço, consumo de cimento e resistência à compressão.

Ao analisar os extremos, ou seja, o concreto referência e o CRM 25, nota-se que uma redução de custo de 8,15%, proveniente de um consumo de cimento 25% menor, resulta em uma queda de resistência à compressão simples de apenas 12,4%. Ou seja, é possível produzir um concreto estrutural acima de 40 MPa utilizando o consumo mínimo de cimento exigido pela norma ABNT NBR 6118:2014 (280 kg/m³), com durabilidade equivalente aos concretos convencionais vendidos no mercado e custo significativamente menor.

Tabela 9 – Custo total do metro cúbico dos traços, consumo de cimento e resistência à compressão.

Concreto	Custo/m³ (R$)	Variação (%)	Consumo de cimento (kg/m³)	Variação (%)	Resistência à compressão (MPa)	Variação (%)
CREF	368,08	-	374,49	-	45,74	-
CRM 5	360,59	-2,03%	355,77	-5%	43,72	-4,42%
CRM 10	353,10	-4,07%	337,04	-10%	42,71	-6,62%
CRM 15	345,61	-6,10%	318,32	-15%	40,60	-11,24%
CRM 20	338,12	-8,14%	299,59	-20%	40,28	-11,94%
CRM 25	338,08	-8,15%	280,87	-25%	40,07	-12,40%

4. CONCLUSÕES

Observou-se que os concretos com substituição parcial de cimento Portland por RM obtiveram uma sensível diminuição das propriedades mecânicas e uma sensível melhora em relação à durabilidade, quando comparados com o concreto referência. Os resultados sugerem, portanto, que os concretos com RM tendem a apresentar desempenhos satisfatórios.

Dentre os concretos com resíduo de marmoraria, o CRM 5 apresentou os melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por imersão. Já o CRM 25 apresentou melhores resultados em relação à tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade, consumo de cimento, índice de desempenho e viabilidade econômica.

Embora o CRM 25 não tenha obtido os melhores resultados de propriedades mecânicas, este traço manteve, ainda, altos índices de desempenho que, aliado ao fato de ter sido produzido com o consumo mínimo de cimento permitido por norma, possui maior eficiência mecânica quando comparado com o concreto convencional e os outros traços estudados nesta pesquisa.

A análise de viabilidade econômica indica que o CRM 25 possui uma diminuição de custo de 8,15% em relação aos concretos de mesma faixa de resistência à compressão (40 MPa) que são vendidos no mercado atual. Segundo o SINAPI (2018), o custo do CRM 25 (R$ 338,08) equivale ao custo dos concretos de classe de resistência à compressão de 30 MPa (R$ 336,37). Ou seja, ao comparar estes dois concretos de mesmo custo, infere-se que é possível obter maiores propriedades mecânicas e de durabilidade ao utilizar concreto com resíduo de marmoraria.

Por fim, segundo os resultados apresentados, a pequena variação nos resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por imersão e capilaridade, índice de vazios e massa específica indicam que os concretos com resíduo de marmoraria possuem durabilidade equivalente aos concretos convencionais e têm grande potencial de utilização na construção civil.

5. REFERÊNCIAS

ABD ELMOATY, A. E. M. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 743–752, 2013.

ABIROCHAS. **Brasil é destaque no mercado internacional de rochas ornamentais.**Brasília, 2015.

ABNT. **NBR 5733:1991 - Cimento Portland de alta resistência inicial.**Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. **NBR 7215:1997 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.**Rio de Janeiro, 1997.

ABNT. **NBR NM 76:1998 - Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).**Rio de Janeiro, 1998.

ABNT. **NBR NM 23:2001 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**Rio de Janeiro, 2001a.

ABNT. **NBR 14656:2001 - Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio.**Rio de Janeiro, 2001b.

ABNT. **NBR NM 65:2003 Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.**Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 6118:20Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, 2004.

ABNT. **NBR 9778:2005 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.**Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 5739:2007 - Concreto - Ensaio de compressao de corpos-de-prova cilindricos.**Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. **NBR NM 248:2009 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.**Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT. **NBR NM 52:2009 - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.**Rio de Janeiro, 2009b.

ABNT. **NBR 7222:2011 - Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.**Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. **NBR 9779:2012 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.**Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.**Rio de Janeiro, 2014.

ALDUS. **XXVII Report 2016 - Marble and stones in the world.**Verona, Italy, 2016.

CHIODI FILHO, C. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período Janeiro-Setembro de 2014.**São Paulo, 2014.

DEHGHAN, A. et al. Application of X-ray microfluorescence for the determination of chloride diffusion coefficients in concrete chloride penetration experiments. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 85–95, 2017.

HELENE, P. R. L. La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón. **Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón**, n. 10, p. 25–35, 1983.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: PINI. SENAI., 1992.

RODRIGUES, M. A. **Utilização dos resíduos de cortes de placas de mármores e granitos como adição na fabricação de concreto autoadensável**. Manaus: Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas, 2015.

RODRIGUES, R.; DE 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.

SHARMA, N. K. et al. Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 158–163, 2017.

SINAPI. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. **CAIXA ECONÔMICA FEDERAL**, 2018.

SINGH, M.; SRIVASTAVA, A.; BHUNIA, D. An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 471–488, 2017.

TENNICH, M.; BEN OUEZDOU, M.; KALLEL, A. Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 335–342, 2017.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade**. Goiânia: Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiânia, 2016.

TUTIKIAN, B. F. **Método Para Dosagem De Concretos Autoadensáveis**. Porto Alegre: Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

VIEIRA, S. P. **Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições**. Brasília: Programa de pós graduação em estruturas e construção civil - PECC. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2017.