UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO ADIÇÃO MINERAL EM ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS

JOÃO LUIZ GUERINI ARPINI FILHO

VITÓRIA – ES 2021

JOÃO LUIZ GUERINI ARPINI FILHO

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO ADIÇÃO MINERAL EM ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Rudiele Aparecida Schankoski

JOÃO LUIZ GUERINI ARPINI FILHO

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS COMO ADIÇÃO MINERAL EM ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 13 de maio de 2021

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Rudiele Aparecida Schankoski Universidade Federal do Espírito Santo Orientadora

> Prof. Dr. Ronaldo Pilar Universidade Federal do Espírito Santo Examinador

Prof^a. Dr.^a Geilma Lima Vieira

Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde e por me dar forças e sabedoria para superar todos os momentos difíceis.

Aos meus familiares e amigos pelo suporte emocional e pela compreensão.

Agradeço a minha orientadora Prof^a. Dr^a. Rudiele Aparecida Schankoski pelo empenho, dedicação e atenção durante a realização deste projeto de graduação e ao Prof. Dr. Ronaldo Pilar por todo apoio e atenção.

Agradeço os técnicos do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC), em especial ao Henrique, que auxiliou a realização dos ensaios presentes neste trabalho, sempre cuidando para que tudo fosse executado com excelência. Agradeço também à coordenadora do laboratório e membro da banca, professora Dr^a. Geilma Vieira Lima.

Agradeço aos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Eng. Dr. Paulo Ricardo de Matos, por terem realizado os ensaios do SEM-EDS do RBRO e do fíler estudado.

À Universidade Federal do Espírito Santo, por conceder o privilégio de ter um ensino superior gratuito e de qualidade.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para elaboração deste trabalho.

ARPINI, J. L. G. F. **Utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais como adição mineral em argamassas autoadensáveis.** 2021. 62 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Espirito Santo. Vitória — 2021.

RESUMO

A produção de misturas autoadensáveis demanda grande uso de finos em sua composição para que sejam atingidas suas propriedades no estado fresco. Atualmente o cimento é o segundo material mais consumido no mundo e os finos comumente utilizados nas misturas são o próprio cimento ou fílers de origem mineral, ou seja, exigem a extração de materiais da natureza para sua aplicação. Deste modo existe a necessidade de se buscar alternativas a extração de materiais, sendo a utilização de resíduos de outras atividades industriais, uma possibilidade com vantagens econômicas e ambientais. O presente trabalho teve como principal objetivo analisar a utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) em argamassas autoadensáveis, como substituição aos produtos atualmente extraídos da natureza. Para a análise dos efeitos dessa substituição, foram realizados ensaios de caracterização (massa específica e módulo de finura) do fíler utilizado como referência (fíler calcário) e do RBRO utilizado como adição. No estado fresco foram analisadas: a massa específica e ar incorporado, o espalhamento/fluidez, o tempo de escoamento e a calorimetria, por fim, no estado endurecido foi verificada a resistência à compressão das misturas. Para realização do trabalho e comparação da influência da adição de RBRO em substituição ao agregado miúdo, foram dosados cinco traços, um contendo apenas cimento (Ref. CP V), um com a adição de fíler calcário (Ref. Fíler) e três com a adição do RBRO em 10%, 15% e 20% (RBRO 10%, RBRO 15% e RBRO 20%). Como resultados, no estado fresco, verificou-se que a adição de resíduo tem relação direta com a aumento da massa específica das misturas, diminuição do teor de ar incorporado, diminuição do espalhamento no flow table, diminuição no tempo de escoamento do funil V e nos ensaios de calorimetria a mistura RBRO 10% apresentou retardo significativo no pico de calor, podendo representar retardo no tempo de pega. Já no estado endurecido verificou-se ganho de resistência nas idades iniciais sem prejuízo em idades futuras. Conclui-se que a utilização do RBRO apresentou bons resultados sendo viável seu uso em misturas autoadensáveis.

Palavras chave: misturas autoadensáveis; argamassa autoadensável; resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais; fíler calcário.

ARPINI, J. L. G. F. **Utilização do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais como adição mineral em argamassas autoadensáveis.** 2021. 62 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Espirito Santo, Vitória – 2021.

ABSTRACT

The production of self-compacting mixtures requires great use of fines in its composition in order to achieve its properties in the fresh state. Currently cement is the second most consumed material in the world and the fines commonly used in the mixtures are the cement itself or fillers of mineral origin, that is, they require the extraction of materials from nature for their application. Thus, there is a need to seek alternatives to the extraction of materials, being the use of waste from other industrial activities a possibility with economic and environmental advantages. The present work had as main objective to analyze the use of the ornamental rock beneficiation residue (ORBR) in self-compacting mortars, as a substitute for products currently extracted from nature. For the analysis of the effects of this substitution, characterization tests were carried out (specific mass and fineness module) of the filler used as a reference and the RBRO used with addition. In the fresh state, the specific mass and incorporated air, the spreading / fluidity, the flow time and the calorimetry were analyzed. Finally, in the hardened state, the compressive strength of the mixtures was verified. To carry out the work and compare the influence of adding ORBR to replace the fine aggregate, five strokes were measured, one containing only cement (Ref. CP V), one with the addition of limestone filler (Ref. Filer) and three with addition of ORBR by 10%, 15% and 20% (RBRO 10%, RBRO 15% and RBRO 20%). As a result, in the fresh state, it was found that the addition of residue has a direct relationship with the increase in the specific mass of the mixtures, decrease in the content of incorporated air, decrease in the spread on the flow table, decrease in the flow time of the funnel V and in the calorimetry tests, the RBRO 10% mixture showed significant delay in the heat peak, which may represent a delay in the setting time. In the hardened state, there was resistance gain in the initial ages without prejudice in future ages. It is concluded that the use of ORBR presented good results and its use in self-compacting mixtures is feasible.

Key words: self-compacting mixtures; self-compacting mortar; ornamental rock beneficiation residue: limestone filler.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Receita dos principais estados exportadores de rochas ornamentais	16
Figura 2 - Aditivo Superplastificante.	30
Figura 3 - Agregado miúdo utilizado nas misturas.	31
Figura 4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo	31
Figura 5 - Destorroamento e peneiramento do RBRO	32
Figura 6 - Ensaio de massa específica com RBRO.	33
Figura 7 - Aparelho utilizado no ensaio de superfície específica (finura)	34
Figura 8 - Morfologia das partículas de RBRO	36
Figura 9 - MEV-EDS do RBRO	37
Figura 10 - Morfologia das partículas de Fíler calcário	38
Figura 11- Ensaio do índice de consistência	41
Figura 12 - Ensaio de fluidez da argamassa.	42
Figura 13 - Molde para ensaio de massa específica	43
Figura 14 – Ensaio de calorimetria.	44
Figura 15 - Moldagem dos corpos de prova	45
Figura 16 - Desmoldagem dos corpos de prova	46
Figura 17 - Relação entre massa específica e teor de ar incorporado	48
Figura 18 - Espalhamento (flow table) das misturas	49
Figura 19 - Flow Table das misturas (Ref. CP V, Ref. Fíler, RBRO 10%, RBRO	15%,
RBRO 20%)	50
Figura 20 - Relação da leitura do funil V entre as misturas	51
Figura 21 - Resultados do ensaio do calorímetro	52
Figura 22 - Picos de calor das misturas	53
Figura 23 – Resultados gráficos da resistência à compressão	55

ÍNDICE DE TABELAS

Fabela 1 - Propriedades do cimento	29
Tabela 2 - Quantidade de materiais para produção de 1 dm³ de argamassa, e	em
gramas	40
Tabela 3 - Resultados no estado fresco	47
Tabela 4 - Resultados da resistência à compressão axial	54
Tabela 5 - Testes multivariados de significância - Parametrização restrita a Sigm	a -
Decomposição de hipótese efetiva	56
Tabela 6 - Teste Tukey com resultados de resistência à compressão, com 95%	de
confiabilidade	56

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFC – Areia de Fundição Calcinada

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CAA - Concreto Autoadensável

CCV - Concreto Convencional

CP - Cimento Portland

DMC - Dimensão Máxima Característica

EDS - Energy Dispersive Spectroscopy

EFNARC – European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems

IEMA – Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

LEMAC – Laboratório de Materiais de Construção

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MF – Módulo de Finura

Mt - Milhões de Toneladas

NBR - Norma Brasileira

NM - Norma Mercosul

RBMG – Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito

RMG - Resíduo de Mármore e Granito

RBRO - Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais

RBROTT – Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais Após Tratamento Térmico

RPP – Resíduo do Polimento de Porcelana

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1.	INTRO	DUÇAO	12
	1.1. Ob	jetivos	14
	1.2. Jus	stificativa	14
2.	REFE	RENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL	15
	2.1. Ro	chas ornamentais	15
	2.1.1. F	Panoramas no Brasil e no mundo	15
	2.1.2.	Formas de exploração/extração	16
	2.1.3.	Economia circular	17
	2.2. Mis	sturas autoadensáveis	20
	2.2.1.	Definição	20
	2.2.2.	Propriedades	20
	2.2.3.	Materiais constituintes	21
	2.2.4.	Utilização de resíduos como finos em misturas autoadensáveis	23
	2.3. Us	o de RBRO em misturas cimentícias	26
3.	MATE	RIAIS E MÉTODOS	28
	3.1. Ma	iteriais	28
	3.1.1.	Aglomerante	28
	3.1.2.	Aditivo	29
	3.1.3.	Agregado	30
	3.1.4.	Resíduo de beneficiamento de rocha ornamental (RBRO)	32
	3.1.5.	Fíler calcário	38
	3.2. Mé	todos	39
	3.2.1.	Definição dos traços utilizados	39
	3.2.2.	Produção das argamassas	39
	323	Propriedades no estado fresco	41

	3.2	.4.	Propriedades no estado endurecido	45
4.	RE	SUL	TADOS E DISCUSSÕES	47
4	.1.	Esta	ado fresco	47
	4.1	.1.	Massa específica e ar incorporado	47
	4.1	.2.	Espalhamento/Fluidez	48
	4.1	.3.	Tempo de escoamento	50
	4.1	.4.	Calorimetria	52
4	.2.	Esta	ado endurecido	54
5.	CC	NSI	DERAÇÕES FINAIS	57
5	5.1.	Cor	nclusões	57
5	5.2.	Sug	gestões para trabalhos futuros	58
6.	RE	FER	ÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente e a finidade dos recursos naturais vem crescendo diariamente no cotidiano das pessoas, mudando sua mentalidade e maneira de enxergar o mundo. A indústria da construção civil, desde seu início, sempre teve como umas das principais características ser grande consumidora de recursos naturais e, por consequência, uma grande geradora de resíduos, porém isso é algo que tem sido colocado em pauta nos últimos anos, gerando uma maior preocupação em aprimorar suas tecnologias para diminuir o consumo de recursos não renováveis. Por se tratar de uma indústria muito tradicional, as mudanças ocorrem de maneira muito lenta. Desse modo, a legislação e o governo também vêm fazendo seu papel nesta mudança, com o objetivo de trazer essa preocupação para as indústrias de uma maneira obrigatória e não mais facultativa, atuando tanto em âmbito nacional com a Resolução 307 do CONAMA e Lei 12305/2010 com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, quanto em âmbito estadual com a IN 19/2005 do IEMA, introduzindo regras e limitações para fomentar as mudanças.

No que tange a indústria das rochas ornamentais, o estado do Espírito Santo ocupa lugar de destaque, sendo líder nacional na extração, produção e beneficiamento de mármore e granito (IEL, 2013). No entanto, junto a esse destaque, tem-se um problema. O setor de produção de rochas ornamentais, apresenta, no processo de extração da rocha até a sua transformação em chapas, em média apenas 17% de aproveitamento, se tornando uma grande contribuidora para a geração de resíduos sólidos (CAMPOS et al., 2014).

Embora grande parte desses resíduos sejam blocos não aproveitados por diversas razões gerados nas próprias pedreiras, esses não causam grande impacto ambiental. No entanto, os resíduos gerados no restante da cadeia de produção e beneficiamento das rochas ornamentais é responsável por um grande volume, sendo considerado um passivo ambiental, que precisa de soluções técnicas e gerenciamento para sua destinação final ambientalmente adequada (CETEM, 2014).

Atualmente, a lama abrasiva, resultado do beneficiamento das rochas, é descartada em grandes tanques de disposição final existentes em grande parte das serrarias distribuídas no estado. Apesar do esforço e da preocupação dos setores envolvidos e das próprias empresas, os resíduos e rejeitos gerados muitas vezes são

lançados diretamente no ambiente natural, sem serem submetidos a qualquer processo de tratamento para eliminar ou reduzir constituintes presentes nos despejos. Em resumo, muitas empresas que trabalham com desdobramento de blocos lançam as águas residuárias de seus teares em tanques de acúmulo diretamente no solo sem a devida impermeabilização (CALMON e SILVA, 2006).

O resíduo gerado durante o beneficiamento das rochas ornamentais é inerente a sua produção, pois ao transformar um bloco de rocha maciço nos produtos finais como bancadas, pias, mesas, pisos entre outros, são necessárias várias etapas de cortes e acabamentos e em cada uma delas existe a geração de resíduos, sendo um deles o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais – RBRO.

Portanto, sabe-se que é necessária uma destinação correta para tais resíduos e quando possível a sua reutilização reforçando a aplicação da economia circular, de modo que já existem vários estudos com resultados satisfatórios do seu emprego em misturas cimentícias (CALMON, et al., 1997; CALMON, et al., 2007; BACARJI et al., 2013; AREL, 2016; VAZZOLER et al., 2018; ZULCÃO et al., 2020).

Esses estudos servem de base científica para trazer o resíduo de um patamar de passivo ambiental a elemento com função comercial dentro da cadeia produtiva da construção civil. A viabilização de sua utilização faz com que o RBRO deixe de ser considerado, no processo de beneficiamento das rochas, como um rejeito com custo de destinação, para se tornar mais uma fonte de renda para as empresas beneficiadoras das rochas.

Portanto, entende-se que quanto mais aplicações técnico/científicas comprovadas forem alcançadas, maior será o poder de transformação de um passivo ambiental em uma matéria-prima com valor agregado para produção de misturas cimentícias cada vez mais eficientes, tanto do ponto de vista tecnológico, como ambiental.

Diante do exposto, o presente trabalho objetiva estudar a aplicação do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) como adição mineral em argamassas autoadensáveis e contribuir para o desenvolvimento do conceito de economia circular por meio do gerenciamento de resíduos e redução do consumo de matérias-primas no setor da construção civil.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar o efeito da incorporação de RBRO em argamassas autoadensáveis, com vistas à economia circular na construção civil.

Os objetivos específicos consistem em:

- Avaliar as características físico-químicas do RBRO a ser incorporado nas argamassas autoadensáveis;
- Analisar as propriedades do estado fresco e a cinética de hidratação de cimento em argamassas autoadensáveis contendo RBRO;
- Analisar as propriedades do estado endurecido (resistência mecânica) de argamassas autoadensáveis contendo RBRO.

1.2. Justificativa

A realização do presente trabalho se justifica na possibilidade de utilizar o RBRO, que hoje é um passivo ambiental, como componente na produção de argamassas autoadensáveis, substituindo materiais que hoje são extraídos da natureza para essa finalidade. Deste modo, a ideia aqui proposta é diminuir a extração de materiais *in natura* e, em seu lugar, utilizar o RBRO, que caso não fosse utilizado, teria uma destinação à aterros sanitários.

2. REFERENCIAL TEÓRICO-CONCEITUAL

2.1. Rochas ornamentais

2.1.1. Panoramas no Brasil e no mundo

As rochas ornamentais, utilizadas inicialmente na arquitetura e na construção como elemento estrutural, atingiram um grande uso como elemento de revestimento em pisos, paredes e fachadas. Do tocante às estruturas, a pedra foi gradualmente sendo substituída por outros materiais, como o aço e o concreto armado, que aliam vantagens de resistência e facilidade construtiva na maior escala. Desde que se desenvolveram técnicas de beneficiamento para o acabamento das peças de mármores e granitos, tais materiais passaram a ser amplamente utilizados nos revestimentos de construções mais sofisticadas, devido as suas características de beleza, funcionalidade, facilidade de aplicação e durabilidade, além do forte apelo de exclusividade. As utilizações das rochas ornamentais são praticamente ilimitadas, pela infinidade de usos que se pode obter com a exploração e a combinação de suas qualidades estruturais e estéticas (IEL, 2013).

A produção mundial noticiada de rochas ornamentais e de revestimento evoluiu de 1,8 Mt/ano, na década de 1920, para um patamar atual de 152 Mt/ano. Até meados dessa década, as projeções de consumo, produção e intercâmbio mundial das matérias-primas da construção civil não apontavam mudanças de paradigmas, sugerindo a manutenção da tendência de crescimento da demanda dos materiais rochosos naturais para revestimento. Estimava-se que no ano 2020, a produção mundial de rochas ornamentais ultrapassaria a casa das 150 Mt, correspondentes a quase 1,8 bilhão m² equivalentes por ano, números que se atingiram já em 2017 (ABIROCHAS, 2018).

A partir da década de 1990, o Brasil experimentou um notável adensamento de atividades em todos os segmentos da cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais e de revestimento. Os principais avanços foram decorrentes do aumento das exportações, que evidenciaram uma forte evolução qualitativa e quantitativa. Qualitativamente, foi modificado o perfil das exportações com o incremento da venda de rochas processadas semiacabadas, principalmente chapas polidas de granito, bem como de produtos acabados de ardósias e quartzitos foliados. O atendimento da

demanda do mercado externo exigiu que novos materiais fossem continuamente colocados em produção, destacando-se as denominadas rochas exóticas, de alto valor agregado, que hoje constituem um importante grupo de produtos brasileiros de exportação. Como resultado desse processo, o Brasil tornou-se conhecido pela sua excepcional "geodiversidade", tendo comercializado no mercado internacional, ao longo dos últimos 30 anos, uma variedade de materiais maior do que toda a Europa nos últimos 500 anos (ABIROCHAS, 2018). Com uma produção de 8 milhões de toneladas em 2018, o Brasil ocupa o quinto lugar mundial na produção de lavra e exportação de rochas processadas. Embora mais concentrada em algumas regiões tradicionais, como no Espírito Santo e Minas Gerais (Figura 1), essa produção avança para outros estados (MONTANI, 2019).

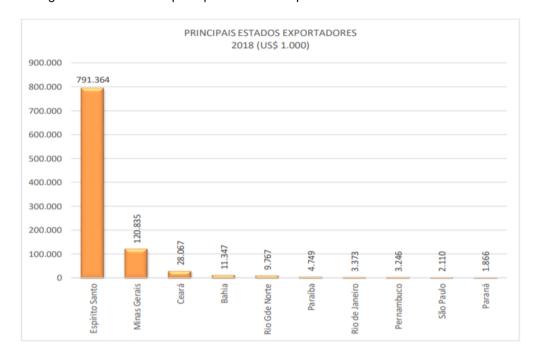


Figura 1 - Receita dos principais estados exportadores de rochas ornamentais.

Fonte: ABIROCHAS (2018)

2.1.2. Formas de exploração/extração

As jazidas de rochas ornamentais em quase sua totalidade são operadas através de lavras a céu aberto, através de métodos e técnicas que possibilitem resultados satisfatórios em termos da relação custo/benefício. Os métodos de lavra

consistem em um conjunto específico de trabalhos de planejamento, dimensionamento e execução de tarefas, podendo ser bancadas altas, bancadas baixas, por desabamento e em matacões. Cada método é escolhido em função das condições geológicas do jazimento de rochas ornamentais (SARDOU et al., 2013).

Basicamente, a metodologia de lavra utilizada para desenvolvimento dos depósitos nos maciços rochosos no estado do Espírito Santo consiste no sistema de bancadas, cuja quantidade de degraus e sua altura são determinadas de acordo com a morfologia, dimensões dos depósitos e espaçamento das fraturas horizontais de alívio, paralelas ao relevo da jazida, bem como das exigências produtivas (SARDOU et al., 2013).

De maneira geral, o beneficiamento de rochas ornamentais refere-se ao desdobramento de materiais brutos, extraídos nas pedreiras em forma de blocos, normalmente com dimensões variáveis de 5 a 10 m³, que são transportados às serrarias para serem transformados em chapas ou placas semiacabadas, com espessuras que variam de 1 a 3 cm, com o uso de equipamentos como teares multilâmina ou monolâmina, talha-blocos de disco diamantado, teares multifio diamantados ou monofio diamantado (SILVEIRA; VIDAL; SOUZA, 2014). Durante essa fase do processamento das rochas tem-se a geração do resíduo da serragem (ou corte) de blocos de granito. Os processos posteriores são polimento, acabamento, esquadrejamento até sua dimensão final, para aplicação tanto em projetos de arquitetura, quanto na condição de revestimento pela indústria da construção civil (CALMON e SILVA, 2006).

2.1.3. Economia circular

Dentro da indústria das rochas ornamentais, apenas na fase do processamento dos blocos nas serrarias, o resíduo gerado é cerca de 40% do volume do bloco processado, sendo 26% de resíduo muito fino misturado com os insumos da serragem e 14% de resíduo grosso, na forma de casqueiro (restos do aparelhamento dos blocos). Estima-se, então, que no beneficiamento sejam geradas em torno de 1,5 Mt dos resíduos finos (pó de rocha) e quase 1 Mt de resíduos grossos (casqueiros e aparas) anualmente no país (CAMPOS et al., 2014).

No Estado do Espírito Santo, os resíduos industriais gerados nas serrarias com teares de lâminas ou diamantados são, geralmente, depositados em barragens de rejeito improvisadas, ou vão sendo acumulados ao redor dessas serrarias ao longo do tempo. Em seguida, os resíduos são costumeiramente lançados ao meio ambiente, em locais inadequados, principalmente em áreas ainda próximas às serrarias. Em alguns casos, esses resíduos são jogados diretamente nos rios, causando assoreamento dos mesmos, poluindo sua água, e gerando assim grande impacto ambiental, acarretando conflitos com órgãos ambientais e populações vizinhas. Os empresários alegam falta de áreas para disposição desses resíduos. As comunidades vizinhas são prejudicadas pela poluição dos cursos d'água. Os órgãos de fiscalização agem, aplicando multas e restringindo, ou paralisando as atividades das serrarias, atividades estas muito importantes para a economia da região (PONTES, 2001).

Um grande desafio na atualidade é o aproveitamento de forma racional de resíduos provenientes de processos industriais, operações de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. Ao transformar matérias-primas, de modo a torná-las úteis para a sociedade, o homem produz quantidades apreciáveis de resíduos que no momento, em que são produzidos, são inúteis e que, ao longo do tempo, acabam por comprometer o meio ambiente (FELLENBERG, 1980).

Nas pedreiras de mármores e de granitos, embora a lavra seja feita em alguns casos com fio diamantado, e o beneficiamento, em sua maioria, com teares, observase também desde a extração até o acabamento final, uma produção significativa de rejeitos que, em média, atinge valores de 40 a 50% (PONTES; ALMEIDA, 2001).

O modelo de produção predominante das rochas ornamentais é linear, ou seja, extrai-se a matéria prima (rocha), produz-se um bem (placas de mármore e granito), e, por fim, tal bem é consumido, sendo descartado ao final de sua vida útil. Com isso, há a geração de resíduos e rejeitos e a dissipação de energia ao longo do processo produtivo. Tal modelo de produção pressupõe a depleção contínua de recursos naturais e também se caracteriza pelo descarte acelerado e precoce dos bens consumidos. Assim, com o aumento da produção e do consumo, ocorre o aumento da extração de recursos naturais e da deposição de resíduos, provenientes do processo produtivo e também do pós-consumo (FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016).

A gestão de resíduos sólidos encontra desafios que se intensificam na medida que o modelo linear de produção e o consumo de bens e serviços acelera o ritmo de descarte de materiais. Dessa forma, há a necessidade de encontrar não apenas alternativas de disposição final dos resíduos, mas opções que considerem o problema dos resíduos de forma sistêmica e que abranjam o modelo produtivo como um todo.

Uma das soluções que visa a reestruturação do modelo produtivo é a economia circular. A economia circular é um modelo de gestão ambiental que propõe a reinserção dos materiais no ciclo produtivo, visando minimizar a deposição no ambiente e, consequentemente, evitando a geração de impactos ambientais negativos (BONCIU, 2014).

A economia circular permeia todas as atividades produtivas. Os processos, serviços e produtos devem ser desenhados de forma que sejam mais duráveis, reparáveis e atualizáveis, para permitir a remanufatura e a reciclagem pela mesma indústria ou por outras. Assim, a diferença fundamental entre a economia circular e a linear consiste no fato que na economia circular, produtos, serviços e processos industriais são projetados e concebidos de forma que permitam um ciclo de vida mais longo e a possibilidade de serem reparados, atualizados ou restaurados. O fechamento das cadeias produtivas traz ganhos na ecoeficiência e na disponibilidade de diversos recursos para a reutilização (BONCIU, 2014).

Segundo Alencar (2013), o principal campo de utilização dos produtos de rochas ornamentais historicamente é atribuído às obras civis (75%). Sendo assim, cabe ao setor da construção civil a principal responsabilidade de escoar esses resíduos gerados.

Segundo Silva (1998), a necessidade de cumprir às exigências de manejo e disposição de resíduos sólidos gerados nas atividades industriais, vem sendo imposta, nas duas últimas décadas, seja pelas leis ambientais ou movimentos ecológicos em todo o mundo, tornando-se um grande desafio para os sistemas produtivos. Neste contexto, a indústria de rochas ornamentais necessita se conscientizar da responsabilidade de fazer mineração autossustentável, ou seja, com respeito ao meio ambiente e à comunidade. O Brasil, grande detentor de reservas de mármores e granitos, necessita definir inovações e novas tecnologias para o aproveitamento dos resíduos produzidos.

Uma das formas de aplicar a economia circular nesse contexto, é a utilização desse resíduo em matrizes cimentícias autoadensáveis (pastas, argamassas e concretos de cimento Portland).

2.2. Misturas autoadensáveis

2.2.1. Definição

Desde a sua primeira utilização, divulgada no Japão em 1993, até suas mais diversas aplicações nos dias atuais, o concreto autoadensável vem revolucionando a indústria da construção civil pelo mundo, mesmo que de maneira mais lenta no Brasil (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Apesar de o concreto ser o material mais utilizado como mistura autoadensável, argamassas e pastas também possuem aplicações em que a propriedade de se auto adensar é importante, como a aplicação de argamassas projetadas, contrapisos, grautes, reforços estruturais, caldas de injeção, etc.

As misturas autoadensáveis (concretos, argamassas e pastas) são caracterizadas por possuírem no mínimo três propriedades: fluidez, que consiste na capacidade da mistura fluir e preencher todos os espaços; habilidade passante, que é a capacidade da mistura escoar pela forma, passando pelos obstáculos sem obstrução do fluxo ou segregação; e resistência à segregação, que consiste na mistura se manter coesa durante sua aplicação. Desse modo, são produzidas misturas que não precisam de adensamento e nem de compactação, ou seja, apenas seu peso próprio é capaz de preencher espaços com manutenção da sua homogeneidade (EFNARC, 2002).

2.2.2. Propriedades

A principal propriedade do estado fresco das misturas cimentícias é a trabalhabilidade. Porém, misturas autoadensáveis apresentam peculiaridades em relação às misturas tradicionais, como o fato de serem extremamente fluidas, mas ao mesmo tempo devem ser capazes de carregar grandes partículas de agregado em todo trajeto, ou seja, devem ser fluidas e viscosas simultaneamente. Desta forma, foram desenvolvidos equipamentos para avaliar, mesmo que indiretamente, a trabalhabilidade no estado fresco e confirmar as propriedades reológicas definidas no estudo de dosagem (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Para avaliar a trabalhabilidade de concretos é utilizado o método do cone de Abrams, determinando os parâmetros de espalhamento, tempo de escoamento e índice de estabilidade visual (ABNT NBR 15823-2, 2017). Também é utilizado o método do funil V para determinação indireta da viscosidade (ABNT NBR 15823-3, 2017). Além desses dois testes principais para concretos, existem outros, como: caixa L, caixa U, anel J e coluna de segregação. Para pastas e/ou argamassas autoadensáveis, alguns desses ensaios são adaptados e utilizados com os mesmos propósitos.

Já no estado endurecido a principal propriedade a ser avaliada é a resistência mecânica da mistura, que possui grandes similaridades com misturas tradicionais, de modo que, ao tentar modificar sua resistência mecânica, outras características podem ser desencadeadas, como: fissuração de secagem, alto calor de hidratação, pega inicial retardada, menor módulo de elasticidade, maior probabilidade de retração plástica, sendo então necessário o estudo de dosagem para chegar as características desejadas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.2.3. Materiais constituintes

Cimento

Os cimentos utilizados para a produção de misturas autoadensáveis são os mesmos já adotados na produção de concretos estruturais convencionais, argamassas e pastas. Cimentos de maior finura são mais adequados para a produção de misturas autoadensáveis, sendo que variações no tipo de cimento, até mesmo de seus fabricantes, afetam diretamente as propriedades da mistura no estado fresco, tais como viscosidade e tensão de escoamento (REPETTE, 2011).

Agregados

De uma forma geral, todas as areias são adequadas para a produção de concreto autoadensável. Agregados miúdos com partículas arredondadas e lisas são preferíveis, pois aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água. Agregados que passam na peneira 0,125 mm já são considerados com um aporte adicional de fíler para efeitos de dosagem. Neste ponto, é importante que se tenha um controle rigoroso na umidade do agregado miúdo, que consiste em uma das

principais causas de variação da fluidez da mistura (OTAVIANO, 2007 apud TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Em relação a agregados graúdos, usados em concretos, os tamanhos mais habituais são aqueles compreendidos entre 12,5 e 19 mm, sendo indicados agregados que possuam coeficiente de forma o mais próximo possível de 1, pois a elevada angulosidade dos agregados pode trazer consequências, como o aumento no consumo de áqua e redução da trabalhabilidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Em relação aos testes de controle, para os agregados miúdos deve-se verificar a granulometria, a massa específica, massa unitária, material pulverulento, com teor de argila em torrões, umidade superficial e impurezas orgânicas. Para os agregados graúdos, deve-se também controlar a granulometria, a massa específica e a massa unitária, bem como abrasão Los Angeles e coeficiente de forma (CALADO et al, 2015).

Aditivos

São aqueles que possuem a capacidade de modificar propriedades físicas e químicas da mistura, auxiliando na obtenção de um produto adequado para cada aplicação. Os dois principais aditivos utilizados na produção de misturas autoadensáveis são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. Os aditivos superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, enquanto os aditivos modificadores de viscosidade oferecem um aumento da coesão, prevenindo a exsudação e segregação do concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Finos

Uma das principais diferenças entre composições convencionais e autoadensáveis é a necessidade, nessa última, de uma grande parcela de finos dentre os materiais constituintes, para garantir a coesão e dificultar a segregação da mistura. Para isso, geralmente são incorporadas à mistura adições com o objetivo de aumentar a quantidade destes finos em oposição ao aumento do teor de cimento Portland (SCHANKOSKI, 2017).

De acordo com EFNARC (2005), considera-se finos os materiais com partículas menores que 0,125 mm, sendo indicado que mais de 70% tenham

dimensões menores que 0,063 mm. Repette (2011) recomenda que sejam considerados finos as partículas menores que 0,150 mm e que 75% delas passem na peneira 0,075mm.

Dentro dos finos quimicamente ativos tem-se o material pozolânico e o material cimentante. O material pozolânico é aquele que reage quimicamente com o Ca(OH)₂, produto de hidratação do cimento Portland à temperatura ambiente para formar compostos resistentes, ou seja, depende da presença do cimento Portland para atuar; sendo os principais exemplos: cinza volante, pozolana natural, sílica ativa, cinza de casca de arroz e o metacaulim. Por outro lado, o material cimentante, não reage com o Ca(OH)₂ formado durante a hidratação do cimento Portland, no entanto sua auto hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados de forma isolada, geralmente é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Como principal exemplo tem-se a escória de alto forno (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Já em relação aos finos sem atividade química pode-se citar os fílers, que são materiais naturais ou inorgânicos processados que possuam uniformidade e apresentem-se como finos, sendo assim, sua ação se resume ao efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. Os fílers mais tradicionais são o calcário e a areia fina (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.2.4. Utilização de resíduos como finos em misturas autoadensáveis

A produção de misturas autoadensáveis com utilização de materiais suplementares ao cimento apresenta várias vantagens, entre elas a redução do consumo de cimento e consequente economia do produto final. O fíler calcário é o principal material fino adicionado em concretos autoadensáveis para promover estabilidade, sem aumentar o consumo de cimento. No entanto, finos de outras fontes também podem ser utilizados.

Fíler de origem gnáissica e diabásica foram estudados em comparação com fíler calcário na produção de pastas e concretos autoadensáveis, e percebeu-se que podem ser obtidos resultados reológicos semelhantes, porém é necessária maior quantidade de superplastificantes. Foi verificado também que a mineralogia do fíler

não afeta significativamente a tensão de escoamento, mas influencia fortemente a viscosidade; e por fim que, o processo de floculação e defloculação das misturas que contêm apenas cimento ou com adições minerais apresentam o mesmo comportamento (SCHANKOSKI et al., 2017).

Ensaios utilizando os mesmos finos de diabasio e gnaisse, em comparação com fíler calcário, verificaram que as propriedades no estado fresco foram similares (tempo em Funil V, tensão de escoamento estática e dinâmica), além de melhora na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade aos 28 dias quando os fílers alternativos eram utilizados (SCHANKOSKI et al., 2019).

Em mais uma análise usando a comparação de concretos autoadensáveis com slump flow fixo (ajuste no teor de superplastificante) contendo apenas cimento, com concretos contendo adição de fíler calcário, diabasio e gnaisse, foi possível concluir que o uso de adições minerais facilitou a produção de concreto autoadensável, além de reduzir o tempo do ensaio em Funil V, indicando uma diminuição na viscosidade. Além disso, também foi comprovado que o uso de fíler diabásico levou a uma menor segregação estática em comparação com o fíler calcário. Em relação ao acabamento superficial, a utilização das adições demonstrou resultados adequados, melhorando o acabamento da superfície em relação a mistura contendo somente cimento (SCHANKOSKI et al., 2020).

Além da utilização de fílers de rochas naturais, também existem estudos da viabilidade do uso de resíduos, como o resíduo do polimento de porcelana (RPP), cujo resultados constatados pelo ensaio de calorimetria isotérmica concluíram que a adição de RPP melhorou a hidratação do cimento Portland e confirmaram a atividade pozolânica do resíduo. Já no estado endurecido, na análise do ensaio de resistência à compressão, as misturas contendo RPP atingiram 95% e 98% da resistência da mistura de referência (contendo apenas cimento), aos 91 dias e 365 dias, respectivamente. Além disso as substituições de 30%, por exemplo, reduziram a emissão de CO₂ equivalente em 86 kg/m³ de concreto. Portanto, seu uso traz benefícios do ponto de vista estrutural e ambiental (MATOS et al., 2018).

Matos et al. (2020) produziram argamassas autoadensáveis substituindo cimento por fíler calcário e por areia de fundição calcinada (AFC) com fração menor que 150 µm. As argamassas contendo AFC apresentaram valores de resistência à compressão cerca de 14% superiores às que continham fíler calcário, mas exigiram maior quantidade de superplastificante para uma mesma faixa de fluxo.

Lozano-Lunar et al. (2019) incorporaram poeira de forno de arco elétrico (resíduo da produção de aço) em argamassas autoadensáveis em substituição ao fíler silicoso e, embora relataram uma perda de resistência mecânica, puderam concluir que o uso de até 25% do resíduo é viável, uma vez que apresenta resultados semelhantes ao da argamassa referência.

Nasr et al. (2019) estudaram argamassas autoadensáveis contendo zeólito natural e nano-sílica, ambos materiais pozolânicos. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas das misturas melhoraram na presença desses materiais, e que eles influenciam positivamente na microestrutura e no processo de hidratação das argamassas autoadensáveis.

Em ensaios utilizando o resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), para produção de concretos autoadensáveis, Xavier (2019) concluiu que o resíduo apresenta as características necessárias para ser utilizado com fíler. Na análise das propriedades do estado fresco, os concretos produzidos apresentaramse adequados às prescrições da ABNT NBR 15823:2017, atendendo plenamente os requisitos para concreto autoadensável; e ainda quando comparados a mistura de referência (concreto autoadensável convencional), os concretos com RBMG tiveram resultado superior. Já na análise das propriedades mecânicas, as misturas com RBMG apresentaram pequenas variações na resistência à compressão e resistência à tração em relação à mistura sem adição, porém todos os traços atingiram valores acima de 55 MPa, sendo considerados concretos de alta resistência de acordo com a ABNT NBR 8953:2015. Além disso os resultados de módulo de elasticidade, das propriedades físicas e de análises microscópicas também foram satisfatórios, sendo assim, a incorporação do RBMG em altas quantidades na produção de concreto autoadensável se mostrou uma alternativa eficaz, tanto no que diz respeito à tecnologia do concreto quanto às questões ambientais (XAVIER, 2019).

Esses estudos servem para exemplificar a utilização de resíduos, de diversos processos, como finos em misturas autoadensáveis. Percebe-se a influência desses finos nas propriedades dos materiais produzidos e o potencial de emprego da economia circular na produção de produtos à base de cimento Portland.

2.3. Uso de RBRO em misturas cimentícias

Existem vários estudos para verificar a viabilidade do uso de RBRO e seus derivados em misturas cimentícias e muitos desses vem apresentando resultados satisfatórios.

Analisando o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico (RBROTT) a 1200 °C, como adição nas taxas de 5% e 10% em massa de cimento Portland na preparação da pasta de cimento, foi possível concluir que o RBROTT possui baixa atividade pozolânica quando utilizado para produção de pasta de cimento, podendo fornecer uma microestrutura mais densa no estado endurecido. Assim, além de contribuir para redução da área ocupada por aterros sanitários, essa adição é benéfica para o resultado final da pasta de cimento (VAZZOLER et al., 2018).

Bacarji et al. (2013), por outro lado, em estudos utilizando o resíduo de mármore e granito (RMG), verificaram sua natureza inerte. Isso somado a sua granulometria fina possibilita a utilização do resíduo como fíler em substituição de parte do cimento nas misturas, porém como consequência da sua natureza inerte, ao substituir parte do cimento por RMG foi possível identificar uma redução relativa de resistência à compressão no estado endurecido, concluindo-se que uma substituição em até 5% mostrou menor impacto nas propriedades mecânicas e reológicas da mistura, sendo considerada uma alternativa promissora.

Arel (2016) produziram misturas utilizando pó de mármore como substituição a parte do cimento e também como parte do agregado na produção de concretos. Foi possível concluir que substituindo cerca de 5-10% de cimento por pó de mármore o concreto apresentou melhores propriedades mecânicas. Utilizando o pó de mármore como substituição ao agregado os melhores resultados ocorreram quando os teores de substituição foram 50-75%, provocando aumentos na resistência à compressão e ao cisalhamento em torno de 20-26% e 10-15%, respectivamente, em relação às misturas sem substituição.

Zulcão et al. (2020) realizam estudos para analisar o ciclo de vida do RBRO na produção de misturas cimentícias com o objetivo de analisar a influência nos indicadores de impacto ambiental. Ao analisar 127 misturas, os autores concluíram que o uso do RBRO pode ser economicamente viável para produção de misturas cimentícias, sendo competitivo com fíler calcário, areia e pó de pedra. O uso do RBRO

apresentou os melhores resultados quando utilizado como substituição parcial nas misturas cimentícias de argamassas e concreto autoadensável, enquanto que para concretos convencionais foi observado pouco benefício na substituição. Já em misturas que utilizam o RBROTT a redução na resistência não viabiliza a redução dos indicadores do impacto ambiental, porém técnicas futuras podem viabilizar sua utilização.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são abordados os materiais e os métodos de análise empregados neste estudo, objetivando o avanço do conhecimento no tema proposto, assim como a promoção da reprodutibilidade desta pesquisa. Na seção "Materiais", é apresentada a caracterização dos materiais empregados neste trabalho; já na seção "Métodos" serão apresentados os ensaios em argamassas autoadensáveis.

Embora o presente estudo possa ser extrapolado para concretos autoadensáveis, os ensaios desse trabalho foram realizados em argamassa. Segundo Domone e Jin (1999), testes em argamassas podem ser justificados pelos seguintes aspectos: (i) o CAA possui menor quantidade de agregados graúdos do que o concreto convencional e, portanto, as propriedades da argamassa constituinte são dominantes; (ii) as propriedades da argamassa são parte integrante de muitos métodos de dosagem de misturas de CAA e, portanto, o conhecimento de suas propriedades é útil; (iii) a combinação de materiais em pó também é usada para controlar as propriedades endurecidas, como resistência; (iv) ensaios em argamassas são mais convenientes (rápidos e práticos) do que em concreto.

Além disso, segundo Kadhim et al. (2020), argamassas autoadensáveis são consideradas como produtos de nova tecnologia, especialmente preferidas para execução de pisos, reabilitação e reparo de estrutura de concreto. As argamassas autoadensáveis ou autonivelantes estão se tornando mais populares devido a suas propriedades particulares do estado fresco (excelente fluidez, capacidade de bombeamento e homogeneidade) e do estado endurecido (resistência mecânica, superfície lisa) (YANG, et al., 2019). Essas vantagens são consideradas importantes para reduzir a margem de trabalho, tempo de processamento da construção e melhor capacidade de preenchimento (KADHIM, et al., 2020).

3.1. Materiais

3.1.1. Aglomerante

O aglomerante utilizado neste trabalho foi o CP V – ARI Plus por se tratar de um cimento com baixo teor de adições, facilitando assim a verificação da influência

causada pelas adições de fíler e de RBRO. O cimento utilizado é fabricado pela LafargeHolcim e sua origem é da fábrica localizada em Pedro Leopoldo / MG. A massa específica do cimento é de 3,1 g/cm³, as demais características do cimento foram fornecidas em um laudo da fabricante válido de 26/12/2020 até 26/02/2021, expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do cimento

		ENSAIOS	QUÍMICOS		
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	MÉDIA		ESPECIFICAÇÃO NBR 16697/18
PF 950C	NM 18/12	%	5.86		<= 6.50
SO3	NBR 14656/01	%	2.74		<= 4.50
RI	NM 15/12	%	0.81		<= 3.50
MgO	MgO NBR % 0.78		0.78		<= 6.50
		ENSAIO	S FÍSICOS		
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	MÉDIA		ESPECIFICAÇÃO NBR 16697/18
Blaine	NBR 16372/15	cm²/g	4826		Não aplicável
Ret. 38mic	NBR 12826/14	%	2.4		Não aplicável
IP	NBR 16607/18	min	125		>=60
FP	NBR 16607/18	min	173		Não aplicável
		RESISTÊNCIA	À COMPRES	SÃO	
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	DESVIO	MÉDIA	ESPECIFICAÇÃO NBR 16697/18
RC 1 DIA (NBR)	NBR 7215/19	MPa	0.73	26.7	>=14.0
RC 3 DIAS (NBR)	NBR 7215/19	MPa	1.05	38.6	>=24.0
RC 7 DIAS (NBR)	NBR 7215/19	MPa	1.06	42.5	>=34.0
RC 28 DIAS (NBR)	NBR 7215/19	MPa	0.71	50.4	Não aplicável

Fonte: LafargeHolcim Cimentos

3.1.2. Aditivo

O aditivo utilizado foi o TEC FLOW 8000 superplastificante, a base de policarboxilato, produzido pela GCP Applied Technologies. Segundo a fabricante seu

aspecto é líquido/alaranjado e possui massa específica entre 1,080 e 1,120 g/cm³ (NBR 11768-3, 2019), a dosagem recomendada é entre 0,3 e 2,0%. A Figura 2 apresente o aspecto visual do aditivo empregado.

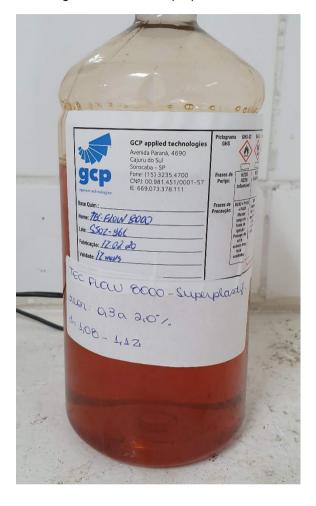


Figura 2 - Aditivo Superplastificante.

Fonte: Autor

3.1.3. Agregado

O agregado utilizado é proveniente de cavas localizadas na região de Linhares – ES, se trata de uma areia quartzosa. Uma imagem da areia é apresentada na Figura 3.



Figura 3 - Agregado miúdo utilizado nas misturas.

Fonte: OLIVEIRA, MEDINA (2019)

As propriedades do agregado são as seguintes: dimensão mínima característica, $d_{min}=0.15$ mm; dimensão máxima característica $d_{máx}=2.36$ mm; módulo de finura, MF = 1,64 e massa específica = 2,65 g/cm³. A curva granulométrica do agregado, assim como os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2019) são apresentados na Figura 4.

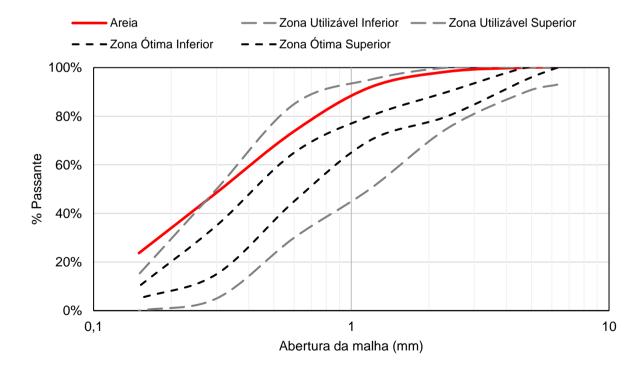


Figura 4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Fonte: OLIVEIRA, MEDINA (2019)

3.1.4. Resíduo de beneficiamento de rocha ornamental (RBRO)

O resíduo utilizado foi obtido de empresas extratoras e beneficiadoras da região de Cachoeiro do Itapemirim – ES, sendo originado na etapa de corte e beneficiamento dos blocos de rocha carbonática - mármore.

Antes da utilização do RBRO foi necessário realizar o destorroamento e peneiramento da amostra (Figura 5), pois em estado bruto o resíduo possui diversos torrões e pequenos pedaços de rocha que necessitam de remoção manual. Nessa pesquisa foi utilizado somente o material passante na peneira 0,6 mm destorroado. Após esse processo o RBRO pode ser devidamente utilizado.



Figura 5 - Destorroamento e peneiramento do RBRO.

Fonte: Autor

Devido a pandemia do novo Coronavírus a utilização do Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) ficou comprometida, deste modo, para a parte de caracterização dos materiais, utilizou-se o laboratório somente para os ensaios de massa específica e superfície específica (finura). Ambos os ensaios foram realizados para o fíler calcário e RBRO.

O ensaio de massa específica foi realizado segundo AMN NM 23 (2000) com a utilização de um frasco de Le Chatelier (Figura 6). O princípio do ensaio é encontrar

o volume deslocado de líquido após a inserção de uma quantidade conhecida de material dentro do frasco.



Figura 6 - Ensaio de massa específica com RBRO.

Fonte: Autor

Por se tratarem de materiais não reagentes, tanto para o fíler, quanto para o RBRO foi utilizado água como o líquido do experimento. Com o ambiente e os materiais dentro da sala com temperatura controlada de 20°C, o frasco é preenchido com água até a marca determinada e depois com o auxílio de um funil é inserida uma quantidade de massa conhecida (m) dentro do frasco, após o despejo de toda massa é realizado um processo para retirada de eventuais bolhas de ar no interior do frasco através de leve agitação. Ao final, é realizada a leitura do volume deslocado (v), podendo então ser calculada a massa específica (ρ), por meio da equação 1.

Equação 1

 $\rho = m/v$

O ensaio de determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine, Figura 7) foi realizado segundo a ABNR NBR 16372 (2015). O princípio do ensaio consiste em determinar o tempo necessário para uma quantidade de ar fluir através de uma camada compactada do material, sendo a superfície específica (finura) proporcional ao tempo.

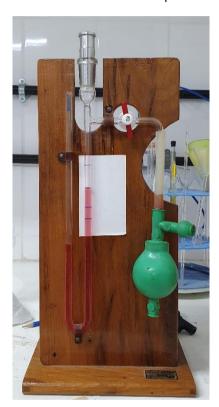


Figura 7 - Aparelho utilizado no ensaio de superfície específica (finura).

Fonte: Autor

O primeiro passo é a determinação da massa que será utilizada no ensaio, esta é feita através da equação 2:

$$m_1 = (1 - \varepsilon) \times \rho \times v$$

Onde:

 m_1 é a massa do material em gramas;

 ε é a porosidade da camada, inicia-se em 0,5;

 ρ é a massa específica do material em g/cm³;

v é o volume da camada em cm³, já estabelecido.

A massa m_1 é calculada e deve ser inserida na célula cilíndrica e compactada com um êmbolo, observando-se a facilidade ou dificuldade da compactação, de modo a encontrar a massa necessária para uma perfeita compactação, variando-se assim a valor de ε na equação.

Após encontrar a massa necessária o êmbolo é colocado no aparelho para que possa ser liberada a passagem de ar pela amostra, empurrando o líquido no interior do aparelho, neste momento é registrado o tempo necessário para o ar empurrar uma quantidade pré-determinada do líquido. De posse destes dados, calcula-se a superfície específica (finura) do material utilizando a equação 3.

$$S = \frac{K \times \sqrt{\varepsilon^3} \times \sqrt{t}}{\rho \times (1 - \varepsilon) \times \sqrt{0.1\eta}}$$

Onde:

S é a superfície específica (finura) em cm²/g;

K é a constante do equipamento;

 ε é a porosidade da camada;

t é tempo em segundos;

 ρ é a massa específica do material em g/cm³;

 η é a viscosidade do ar em função da temperatura.

Os resultados para o RBRO foram:

- Ensaio de determinação da massa específica segundo a NM 23 (2000), utilizando o frasco de Le Chatelier, o resultado obtido foi de 2,74 g/cm³.
- A finura foi determinada pelo método de Blaine, seguindo a ABNT NBR 16372 (2015), o resultado obtido foi de 1416,20 cm²/g.

O valor da massa específica do resíduo está de acordo com outros autores que estudaram resíduos de mármore, como Gesoglu et al. (2012), Aliabdo el al. (2014), Vardhan et al. (2015), Munir et al. (2017) e Benjeddou et al. (2020). Porém para a finura Blaine, os valores encontrados nas literaturas são maiores que o apresentado, variando de cerca de 3000 cm²/g até 9000 cm²/g, indicando que são resíduos mais finos que o utilizado neste trabalho.

Para avaliar a morfologia das partículas, imagem de MEV obtida em microscópio JSM-6390LV (JEOL) operando a 10 kV, revestindo a amostra com ouro, é apresentada na Figura 5. Pode-se dizer que, em geral, o RBRO possui partículas irregulares e de formato angular. Essa morfologia das partículas advém do processo de beneficiamento no qual as rochas são desbastadas pelas serras, água e / ou areia metálica, promovendo o corte ou polimento das peças.

Os principais elementos encontrados na análise de EDS são mostrados na Figura 9. Vale ressaltar que várias medições de EDS são necessárias para uma análise quantitativa confiável. Portanto, os espectros de EDS mostrados na Figura 9 são apenas para análise qualitativa.

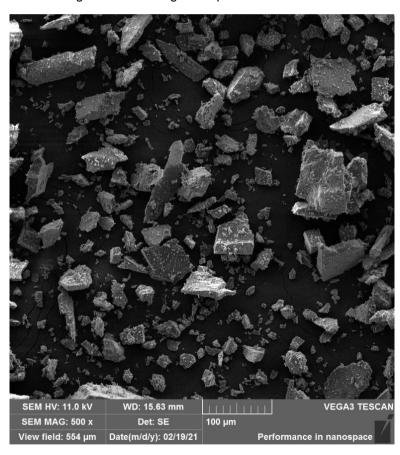
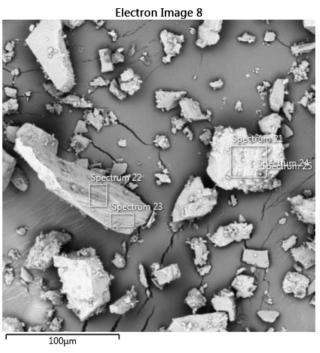
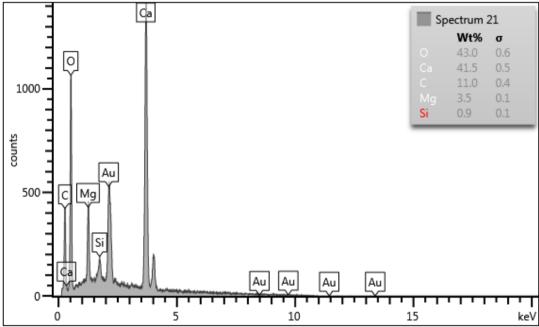


Figura 8 - Morfologia das partículas de RBRO.

Fonte: Autor

Figura 9 - MEV-EDS do RBRO.





Fonte: Autor

Wang et al. (2021) em estudos com argamassas contendo resíduo de pó de mármore, apresentou imagens semelhantes de morfologia com partículas predominantemente prismáticas acompanhadas de outras consideravelmente menores próximas a sua superfície.

3.1.5. Fíler calcário

O fíler calcário utilizado foi caracterizado por meio do ensaio de massa específica, utilizando o frasco de Le Chatelier segundo a NM 23 (2000) e finura, por meio do método Blaine, seguindo a ANBT NBR 16372 (2015). Os resultados foram os seguintes: massa específica = 2,82 g/cm³ e finura Blaine = 2112,64 cm²/g. Imagem de microscopia eletrônica de varredura do fíler calcário é apresentada na Figura 10.

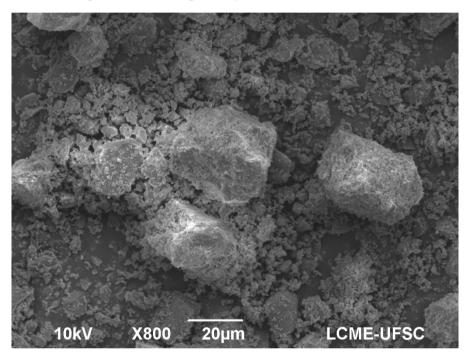


Figura 10 - Morfologia das partículas de Fíler calcário.

Fonte: Autor

Os resultados encontrados na caracterização do fíler calcário (massa específica, área superficial e forma das partículas) são similares aos encontrados por Schankoski et al. (2019), que utilizaram fíler calcário na produção de concreto autoadensável. Percebe-se que o fíler calcário apresenta formato de partículas mais equidimensional do que o RBRO.

3.2. Métodos

3.2.1. Definição dos traços utilizados

A composição das misturas foi determinada com base em trabalhos publicados por Matos et al. (2018) que realizaram ensaios com concretos autoadensáveis. O traço utilizado como referência foi 1 : 1,63 : 0,387 (cimento : agregado miúdo : água), em massa. Essa adoção de traço foi feita para que as argamassas de referência possuam proporções similares as empregas nos concretos utilizados por Matos et al. (2018).

Após a determinação do traço de referência, foram realizadas as seguintes considerações: cálculo do teor de fíler presente (RBRO ou fíler calcário), considerando 10, 15 e 20% da massa de cimento. O cálculo foi realizado em relação à quantidade de aglomerante na mistura. No entanto, a substituição ocorreu nos agregados, em volume. A quantidade de cimento, aditivo e água manteve-se constante.

A quantidade de aditivo foi definida experimentalmente para produção de misturas autoadensáveis, sendo fixado em 0,2% da massa de cimento.

3.2.2. Produção das argamassas

Foram produzidas cinco argamassas autoadensáveis, sendo três delas contendo RBRO, e duas consideradas misturas referência, conforme descrição:

- Ref. CP V: somente com cimento Portland como finos na mistura:
- Ref. Fíler: com presença de 15% de fíler calcário na mistura.

Como o fíler calcário é o material fino mais utilizado em CAA para aporte de finos presentes nas misturas, no presente trabalho ele é utilizado como material balizador dos resultados.

Para a produção das argamassas foi fixado um volume aproximado de 2 litros, sendo quantidade suficiente à capacidade de argamassadeira e suficiente para realização dos ensaios e moldagem dos corpos de provas. A Tabela 2 apresenta a

proporção dos constituintes de cada mistura produzida, para produção de 1 dm³ de mistura.

Tabela 2 - Quantidade de materiais para produção de 1 dm³ de argamassa, em gramas.

Traço	Teor	Cimento	Fíler	RBRO	Areia	Água	Aditivo
Ref. CP V	1	750	1	-	1222,5	290,25	1,5
Ref. Fíler	15%	750	112,5	-	1116,8	290,25	1,5
RBRO 10%	10%	750	-	75	1149,95	290,25	1,5
RBRO 15%	15%	750	-	112,5	1113,7	290,25	1,5
RBRO 20%	20%	750	-	150	1077,45	290,25	1,5

Fonte: Autor

As argamassas foram produzidas no LEMAC/UFES, onde foi utilizada uma argamassadeira como misturador mecânico, com dois níveis de velocidade (baixa e alta) e capacidade de 3,5 litros.

Todas as misturas foram realizadas seguindo as recomendações da ABNT NBR 7215 (2019) com os seguintes procedimentos:

- 1) Com o equipamento desligado, durante o primeiro minuto são misturados o cimento, parte da água (70%), o aditivo e o RBRO ou fíler;
- 2) Liga-se o equipamento na velocidade baixa por 30 segundos;
- 3) Ainda com o equipamento ligado na velocidade baixa são acrescentados o agregado miúdo e o restante da água (30%), durante um minuto;
- 4) Desliga-se o equipamento por um minuto, enquanto realiza-se a raspagem das laterais e do fundo da cuba;
- 5) Por fim, liga-se o equipamento na velocidade alta por mais um minuto.

Imediatamente após a mistura, foram realizados os ensaios no estado fresco e moldados os corpos de prova para ensaios no estado endurecido.

3.2.3. Propriedades no estado fresco

• Índice de consistência (flow table)

A consistência da argamassa foi determinada por meio do ensaio de espalhamento, tendo como referência a ABNT NBR 13276 (2016).

O ensaio consiste em preencher um molde em formado de tronco de cone sobre uma mesa (Figura 11). Como a argamassa ensaiada é autoadensável, não foram realizadas quedas da mesa.

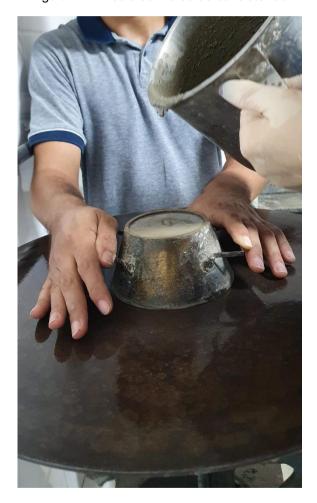


Figura 11- Ensaio do índice de consistência

Fonte: Autor

Após o preparo da argamassa o tronco de cone foi preenchido completamente, depois foi realizado o arrasamento da superfície, removendo o excesso de argamassa e, por fim, o tronco de cone é removido em um movimento único e vertical para cima.

Para conclusão do ensaio foram feitas duas medidas perpendiculares dos diâmetros do espalhamento e assim é determinada a média.

Tempo de escoamento no funil

O ensaio para determinação da viscosidade da argamassa (tempo de escoamento no funil) foi realizado de maneira adaptada da ABNT NBR 15823-5 (2017), que é a norma utilizada para concretos. Sendo assim utilizado um mini funil V (Figura 12) com as seguintes dimensões: 300 mm de altura, 265 mm de largura e 35 mm de profundidade, a parte inclinada possui 260 mm e a parte final reta 65 mm, totalizando um volume de 1,152 dm³.

Com a comporta localizada na parte inferior do funil fechada, a argamassa é inserida em seu interior, preenchendo-o completamente. Para receber a argamassa escoada, é colocado um recipiente logo após a comporta.



Figura 12 - Ensaio de fluidez da argamassa.

Fonte: Autor

A realização do ensaio consiste em determinar o tempo após a abertura da comporta até quando se for possível visualizar verticalmente o recipiente inferior através da comporta. Sendo assim, quanto mais fluida for a argamassa, menor será o tempo. Com esse ensaio, determina-se indiretamente a viscosidade da mistura.

Massa específica

A determinação da massa específica é feita seguindo a metodologia da ABNT NBR 13278 (2005). Utilizando um recipiente cilíndrico plástico de volume conhecido. O recipiente utilizado (Figura 13) possui volume igual a 0,429 dm³.



Figura 13 - Molde para ensaio de massa específica.

Fonte: Autor

O ensaio consiste em preencher completamente o molde com a argamassa e depois pesa-lo, registrando a massa de argamassa que foi colocada. Como o ensaio foi realizado com argamassas autoadensáveis, não foi necessária a divisão em duas camadas durante o preenchimento do molde, tampouco o adensamento com golpes de soquete. Por fim, de posse do volume do recipiente previamente conhecido e da massa de argamassa inserida é possível calcular a massa específica da argamassa, por meio da equação 4.

Equação 4
$$d=rac{m_c-m_v}{v_r} imes 1000$$

Onde:

d é a densidade (massa específica) em kg/m³; m_c é a massa do recipiente cilíndrico com a argamassa do ensaio, em gramas; m_v é a massa do recipiente vazio, em gramas; v_r é o volume do recipiente cilíndrico, em cm³;

Calorimetria

Foi utilizado calorímetro semiadiabático com aquisitor de dados com termopar tipo K, para medição da temperatura das misturas, apresentado na Figura 14. As argamassas (aproximadamente 1100 gramas de cada) foram colocadas dentro de sacos plásticos que estavam em recipientes térmicos. Os termopares foram inseridos no centro das amostras, que permaneceram em câmara climatizada com temperatura de 23°C e 95% de umidade, por aproximadamente 3 dias.



Figura 14 – Ensaio de calorimetria.

Fonte: Autor

3.2.4. Propriedades no estado endurecido

A moldagem dos corpos de prova foi feita conforme a ABNT NBR 7215 (2019), com adaptações para argamassas autoadensáveis. Foram preenchidos corpos de prova metálicos cilíndricos de 5x10 cm (Figura 15) previamente untados com desmoldante em sua superfície interna.



Figura 15 - Moldagem dos corpos de prova.

Fonte: Autor

Para cada traço de argamassa foram moldados oito corpos de prova sendo utilizados três para serem rompidos com idade de 7 dias e mais três para serem rompidos com idade de 28 dias. Dois corpos de prova eram destinados à ensaios de capilaridade, que não puderam ser executados, devido às limitações de acesso ao laboratório em razão da pandemia.

Por se tratar de argamassa autoadensável, o preenchimento dos corpos de prova foi feito em duas camadas, com leve adensamento ao final de cada camada, para remoção de eventuais bolhas de ar incorporadas a mistura.

Nas primeiras 24 horas os moldes ficaram em temperatura ambiente, com a superfície protegida. Após esse tempo foram desmoldados (Figura 16), identificados e levados para câmara úmida, onde ficaram até o momento de serem rompidos.



Figura 16 - Desmoldagem dos corpos de prova

Fonte: Autor

O rompimento dos corpos de prova no ensaio de resistência à compressão axial também foi realizado seguindo a ABNT NBR 7215 (2019).

Chegada à idade para rompimento, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, retificados e levados para a prensa hidráulica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são expostos e analisados os resultados obtidos com as misturas de argamassas autoadensáveis, comparando os traços contendo RBRO em três porcentagens distintas, com os traços de referência, contendo apenas cimento e outro com adição de fíler calcário. As análises foram realizadas tanto para o estado fresco, quanto para o estado endurecido das argamassas.

4.1. Estado fresco

No estado fresco foram analisadas as seguintes propriedades: massa específica, ar incorporado, fluidez (abertura no *flow table*) e tempo de escoamento (funil). Os resultados gerais são apresentados na Tabela 3. Além desses ensaios, também foi realizado o ensaio em calorímetro semiadiabático. Discussões de cada propriedade são apresentadas nos próximos tópicos.

Tabela 3 - Resultados no estado fresco.

Traço	Massa específica (kg/dm³)	Teor de ar incorporado (%)	Leitura média do <i>flow tabl</i> e (cm)	Tempo de escoamento no funil (segundos)	
Ref. CP V	2,19	3,57	36,5	4,11	
Ref. Fíler	2,18	4,52	33,8	6,20	
RBRO 10%	2,23	2,09	34,8	10,77	
RBRO 15%	2,24	1,60	28,8	7,89	
RBRO 20%	2,26	0,94	26,5	4,57	

Fonte: Autor

4.1.1. Massa específica e ar incorporado

Com os resultados encontrados expostos na Figura 17 é possível notar que as misturas de referência apresentaram massa específica similares, porém a mistura com fíler calcário teve um aumento no teor de ar incorporado, cerca de 27% a mais do que a mistura contendo apenas cimento.

Já as misturas contendo RBRO apresentaram grande correlação em suas massas específicas, porém o teor de ar incorporado teve grande variação, tendo a mistura com 20% de RBRO, um teor de ar incorporado 55% menor, quando comparada a mistura com apenas 10% de RBRO.

Como o RBRO é um material mais fino do que a areia utilizada como agregado miúdo, é esperado que o resíduo preencha mais vazios na mistura do que a areia preencheria, resultando assim no teor de ar incorporado abaixo de 1%. Além disso, o RBRO apresenta massa específica maior que a areia, como as misturas com mais RBRO tem menos areia, acabam, portanto, tendo maior peso específico.

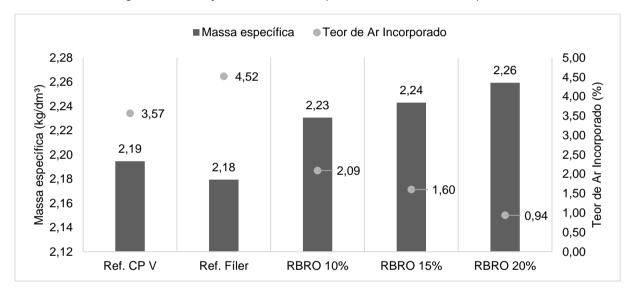


Figura 17 - Relação entre massa específica e teor de ar incorporado

Fonte: Autor

4.1.2. Espalhamento/Fluidez

Como o objetivo da análise foi verificar a influência da presença de RBRO nas misturas autoadensáveis, as quantidades de cimento, água e aditivo foram fixadas. Sendo assim é possível verificar na Figura 18 que apenas a mistura com 10% de RBRO apresenta resultado intermediário em relação à fluidez das misturas de referência.

A Figura 19 mostra a abertura do *flow table* de todas as misturas autoadensáveis produzidas.

Verifica-se também que quanto mais RBRO é acrescentado as misturas, as argamassas vão ganhando mais consistência e espalhando menos sobre a mesa, gerando assim uma menor leitura. Isso também foi observado por Topçu et al. (2019) que utilizaram resíduo de mármore como adição mineral em CAAs, relatando que o aumento na consistência das misturas ocorre pois, como o RBRO é um material mais fino que a areia, ele preenche mais os vazios da mistura utilizando a água livre do sistema. Porém como a relação a/c se mantém fixa a mistura perde fluidez, apresentando valores menores na medida que se aumenta a quantidade de RBRO.

40,0 36,5 34.8 33,8 35,0 28,8 30,0 Leitura média do flow table (cm) 26,5 25,0 20,0 15,0 10,0 5,0 0,0 Ref. CP V Ref. Fíler **RBRO 10% RBRO 15% RBRO 20%**

Figura 18 - Espalhamento (flow table) das misturas

Fonte: Autor

De Ro

Figura 19 - Flow Table das misturas (Ref. CP V, Ref. Fíler, RBRO 10%, RBRO 15%, RBRO 20%)



Fonte: Autor

4.1.3. Tempo de escoamento

A viscosidade medida indiretamente pela leitura do tempo de escoamento no funil V sofreu impacto significativo nas argamassas contendo RBRO. Pelos resultados expostos na Figura 20 percebe-se que, conforme o teor de RBRO aumenta, o tempo de escoamento no funil V diminui. A mistura com 10% de RBRO teve leitura de tempo 262% maior quando compara com a mistura de referência contendo apenas cimento. Já a mistura com 20% de RBRO apresentou comportamento similar a mistura de referência apenas com cimento, tendo tempo apenas 11% superior à mesma.

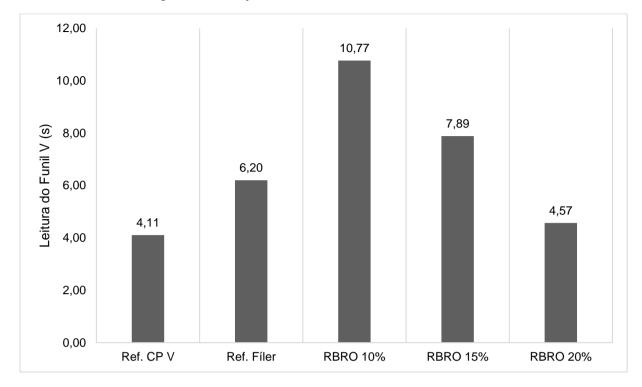


Figura 20 - Relação da leitura do funil V entre as misturas.

Fonte: Autor

Em geral, quanto mais fluida é a mistura, maior o espalhamento no *flow table* e menor o tempo de escoamento do funil. No entanto, percebe-se que, embora a abertura do *flow table* tenha diminuído conforme o aumento do RBRO presente, o tempo de escoamento no funil V também apresentou reduções.

Em termos reológicos, a abertura no *flow table* é correlacionada à tensão de escoamento, enquanto o tempo de escoamento no funil é correlacionado à viscosidade da mistura (DE LARRARD, 1999; WALLEVIK, 2006).

Isso pode ter ocorrido pelo melhor empacotamento das partículas com o uso de RBRO. Conforme aumentou-se o teor de RBRO na mistura, o preenchimento dos vazios entre os grãos sólidos pode ter sido otimizado, resultando em mais água livre e maior distância entre as partículas, diminuindo a viscosidade e, consequentemente, o tempo de escoamento. Esse fato pode não refletir diretamente na tensão de escoamento, que é consequência da estruturação do material (OVARLEZ, 2012), uma vez que, efetivamente, havia maior número de partículas na mistura, conforme o aumento de RBRO presente.

Estudos em pastas conduzidos por Schankoski (2017) concluíram que pastas que apresentaram aberturas menores no minislump conduziram aos maiores valores de tensões de escoamento, mas não necessariamente às maiores viscosidades.

Aliado a isso, os resultados podem ser um indicativo de bom desempenho à segregação dessas misturas, pois segundo Níelsson e Wallevik (2003), a tensão de escoamento e a viscosidade atuam juntas na garantia da estabilidade, de forma que quando a viscosidade é baixa a tensão de escoamento deve ser alta, sendo o contrário válido.

4.1.4. Calorimetria

Na Figura 21 são apresentados os resultados do ensaio no calorímetro semiadiabático para as misturas no intervalo das primeiras 24 horas. Os resultados foram normalizados em relação a massa de cimento presente na amostra. É possível perceber quer as misturas se comportam de maneira semelhante, apresentado picos de temperatura entre 7 e 9 horas após o início da mistura, com temperaturas próximas a 0,135 °C/grama de cimento.

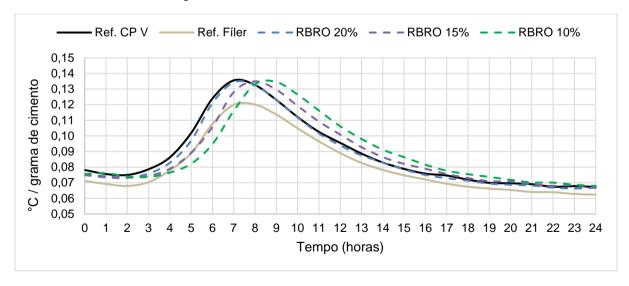


Figura 21 - Resultados do ensaio do calorímetro.

Fonte: Autor

Resultados semelhantes foram encontrados por Matos et al. (2018) em estudos com argamassas de autoadensáveis para concretos de alta performance com

várias misturas contendo fíler calcário e metacaulim, apresentando picos de temperatura entre 7 e 9 horas após o início das misturas como é visto na Figura 22 e estabilização das temperaturas 24 horas depois de iniciada a mistura.

Percebeu-se também que a mistura contendo 10% de RBRO apresentou uma liberação de calor mais lenta, apresentando pico com 9 horas. Concluindo-se que apesar de ser inerte o RBRO influencia na liberação de calor das misturas, tendo com 20% de aplicação, uma curva semelhante ao traço de referência contendo apenas cimento. A Figura 21 mostra, com maior destaque, a elevação da temperatura das amostras até o pico.

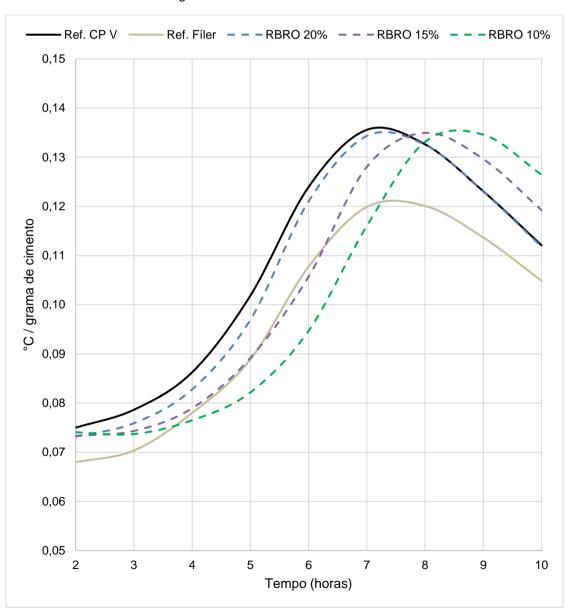


Figura 22 - Picos de calor das misturas.

Fonte: Autor

Percebe-se que a mistura contendo fíler calcário apresentou um pequeno retardo na taxa de elevação de temperatura em relação a mistura Ref. CP V.

Avaliando o efeito da incorporação do RBRO observa-se que existe uma correlação direta entre a taxa de elevação de temperatura com o teor presente. Quanto maior o teor de substituição de areia pelo resíduo, menor foi o efeito no perfil de elevação de temperatura quando comparado com a Ref. CP V.

A mistura com 10% foi a que apresentou a maior latência no ganho de temperatura, podendo ser um indício de aumento de tempo pega.

A mistura Ref. CP V apresentou pico de temperatura em torno de 7 horas, enquanto a RBRO 10% foi de 8,5h; a RBRO 15% de 8 h, e a RBRO 10% 7,3h.

4.2. Estado endurecido

No estado endurecido foi analisada a resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias. Os resultados estão apresentados na Tabela 4 e foram representados de maneira gráfica na Figura 232.

Tabela 4 - Resultados da resistência à compressão axial.

	7 di	as	28 dias			
Traço	Resistência Desvio média (MPa) padrão		Resistência média (MPa)	Desvio padrão		
Ref. CP V	54,44	1,81	72,07	2,10		
Ref. Fíler	55,05	1,06	58,44	0,93		
RBRO 10%	55,44	1,45	69,29	3,34		
RBRO 15%	58,55	0,75	68,92	0,62		
RBRO 20%	59,32	0,50	68,92	1,07		

Fonte: Autor

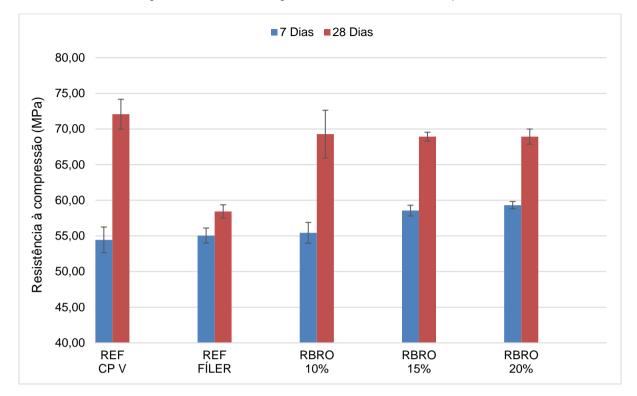


Figura 23 – Resultados gráficos da resistência à compressão.

Fonte: Autor

Comparando a mistura referência, com fíler calcário e com as misturas contendo RBRO, percebe-se que essas últimas apresentaram desempenho satisfatório.

Considerando o teor de RBRO adicionado, conforme aumentou-se a quantidade, percebeu-se um aumento de resistência à compressão aos 7 dias. No entanto, aos 28 dias, não foi observada diferença significativa.

Utilizando o software Statistica e realizando uma análise de variância e teste Tukey com 95% de confiabilidade, obteve-se os resultados apresentados nas Tabela 6 e 6. Na Tabela 5 observa-se os dados de decomposição de hipótese efetiva, em que se percebe que a composição das misturas afeta o resultado de resistência à compressão com 100% de confiabilidade. Na Tabela 6, os asteriscos em cada coluna classificam grupos considerados homogêneos e, portanto, não apresentam diferença significativas em seus resultados. Percebe-se que, com 7 dias de idade, não há diferença significativa entre os resultados das duas misturas Ref. CP V e da mistura contendo 10% de RBRO. No entanto, as misturas contendo 15% e 20% de RBRO,

resultaram em maiores resistências à compressão que as demais, com 95% de confiabilidade.

Aos 28 dias, percebe-se que não há diferença significativa entre os resultados da mistura Ref. CP V (somente cimento) e das misturas contendo RBRO. A mistura contendo fíler calcário (Ref. Fíler) apresentou resultados significativamente menores que as demais. A mistura Ref. Fíler também foi aquela que apresentou a maior incorporação de ar, podendo, esse fato, ter refletido na diminuição da resistência observada.

Tabela 5 - Testes multivariados de significância - Parametrização restrita a Sigma - Decomposição de hipótese efetiva.

	Valor	F	Efeito	Error	р	Probabilidade
Intercept	0,000096	47062,58	2	9	0,000000	
Variáveis	0,012907	17,56	8	18	0,000001	100%

Fonte: Autor

Tabela 6 - Teste Tukey com resultados de resistência à compressão, com 95% de confiabilidade.

7 dias					28 dias			
Ref. CP V	54,31000	****			Ref. Fíler	57,90000		****
Ref. Fíler	54,64333	****			15% RBRO	68,63667	****	
10% RBRO	55,72667	****	****		20% RBRO	68,87667	****	
15% RBRO	58,64000		****	****	10% RBRO	70,21333	****	
20% RBRO	59,39667			****	Ref. CP V	71,30333	****	

Fonte: Autor

Diante da análise estatística apresentada, percebe-se que a incorporação de RBRO não prejudica o desempenho das misturas, quando comparada com a argamassa contendo somente cimento, e pode gerar acréscimos de resistência nas primeiras idades.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudos realizados por Aliadbo et al. (2014), nos casos em que houve a substituição do agregado miúdo por resíduo, mantendo fixa a quantidade de cimento das misturas, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, as misturas com adição de resíduos de mármore apresentaram resistência à compressão superiores a mistura de referência contendo apenas cimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

De acordo com os estudos e ensaios tecnológicos realizados é possível concluir que existe possibilidade da utilização dos resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais como adição mineral para argamassas autoadensáveis.

No estado fresco, com base nos resultados é notável que a adição faz com que a argamassa tenha menor teor de ar incorporado e maior peso específico, o que pode ser uma característica mais desejada para determinados casos. Além disso também é considerável a correlação entre menor espalhamento (*flow table*) e menor tempo de escoamento no mini funil V, o que em concretos autoadensáveis pode representar um bombeamento mais "fácil" e menor tensão nas formas durante a concretagem.

A análise dos resultados para o ensaio no calorímetro indica correlação entre o uso do resíduo e o pico de temperatura das misturas, tendo a mistura com menor teor de RBRO um retardo no pico de temperatura, podendo representar um aumento no tempo de pega.

No estado endurecido os resultados indicam que a adição do RBRO nas misturas eleva a resistência à compressão nas idades iniciais (7 dias) sem prejuízo a resistência em idades futuras (28 dias), sendo uma aplicação viável para casos onde existe a necessidade de maior ganho de resistência em menor tempo.

Para a difusão comercial da utilização do RBRO em misturas autoadensáveis, em especial para concretos, se faz necessário maiores estudos com mais variações nos traços, com substituições em relação ao cimento, relação a/c e quantidade de aditivo.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados da utilização do RBRO em substituição ao agregado miúdo se mostraram promissores para argamassas, portanto é válido o estudo de sua aplicação em concretos autoadensáveis, com mais variação nos traços e na utilização de aditivos, portanto ficam como sugestões:

- Estudos com a adição mineral do RBRO em concretos autoadensáveis;
- Validação dos resultados para argamassas autoadensáveis em mais testes e em traços mais variados;
- Estudos da influência de RBRO de diferentes origens em misturas autoadensáveis;
- Verificação da correlação de resultados com a utilização de diferentes tipos de cimentos.

6. REFERÊNCIAS

ABIROCHAS. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **O Setor Brasileiro de rochas ornamentais - Informe 05/2018.**

ALIADBO, A. A.; ALMOATY, A. E. M. A.; AUDA, E. M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete, Constr. Build. Mater. 50 (2014) 28-41.

AREL, H. S. Recyclability of waste marble in concrete production. Journal of Cleaner Production 131 (2016) 179-188.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**. Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**. Concreto Autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

BACARJI, E.., TOLEDO FILHO, R. D., KOENDERS, E. A. B., FIGUEIREDO, E. P., LOPES, J. L. M. P., Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. Constr. Build. Mater. 45 (2013) 1-10.

BENJEDDOU, O.; ALYOUSEF, R.; MOHAMMADHOSSEINI, H.; SOUSSI, C. KHADIMALLAH, M. A.; ALABDULJABBAR, H.; TAHIR, M. M. **Utilisation of waste marble powder as low-cost cementing materials in the production of mortar,** J. Build. Engineering 32 (2020).

BONCIU, F. (2014). **The European Economy: From a Linear to a Circular Economy.** Romanian Journal of European Affairs 14(4), 78-91.

BRASIL, Lei 12.305 (2010), **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 15 de set. 2020.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, Resolução 307 (2002). Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307. Acesso em: 15 de set. 2020.

CALADO, C.F.A.; CAMÕES, A.; JALALI, S.; JUNIOR, B.B. Concreto Auto-adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC). Cap. 2. EDUPE. Recife, 2015.

CAMPOS, A. R. Tecnologia de rochas ornamentais. Pesquisa, lavra e beneficiamento. Capítulo 9 - Resíduos: Tratamento e aplicações industriais - Rio de Janeiro, CETEM/MCTI, 2014.

DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning: a scientific approach. E & FN Spon, London, 1999.

DOMONE PL, JIN J (1999) Properties of mortar for self-compacting concrete. In: Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete. Stockholm, Sweden, pp 109–120.

ESPÍRITO SANTO. Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Instrução Normativa 019 (2005). Disponível em: https://iema.es.gov.br/instrucao-normativa-019-de-17-de-agosto-de-2005. Acesso em 15 de set. 2020.

FELLENBERG, G. Introdução aos problemas da Poluição ambiental. 2 ed. São Paulo: USP, 1980. 193p.

FOSTER, A. ROBERTO, S. S. IGARI, A. T. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. 2016.

GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; KOCABAG, M. E.; BAYRAM V.; MERMERDAS K. Fresh and hardened characteristics of self-compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash, Constr. Build. Mater. 37 (2012) 160-170.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

KADHIM, A.S.; ATIYAH, A.A.; SALIH, S.A. **Properties of self-compacting mortar containing nano cement kiln dust, in: Mater. Today Proc.,** Elsevier Ltd, 2020: pp. 499–504.

LOZANO-LUNAR, A.; RAPOSEIRO DA SILVA, P.; DE BRITO, J.; FERNÁNDEZ, J.M.; JIMÉNEZ, J.R. Safe use of electric arc furnace dust as secondary raw material in self-compacting mortars production, J. Clean. Prod. 211 (2019) 1375–1388.

MATOS, A. M.; MAIA L.; NUNES S.; OLIVEIRA P. M. **Design of self-compacting high-performance concrete: Study of mortar phase,** Constr. Build. Mater. 167 (2018) 617-630.

MATOS, P.R.; PILAR, R.; BROMERCHENKEL, L.H.; SCHANKOSKI, R.A.; GLEIZE, P.J.P.; DE BRITO, J. Self-compacting mortars produced with fine fraction of calcined waste foundry sand (WFS) as alternative filler: Fresh-state, hydration and hardened-state properties, J. Clean. Prod. 252 (2020).

MONTANI, C. **Relatório mármore e rochas no mundo 2019** – Dossiê Brasil 2019. ABI Rochas.

MUNIR, M. J.; KAZMI, S. M. S.; WU, Y. Efficiency of waste marble powder in controlling alkali-silica reaction of concrete: A sustainable approach, Constr. Build. Mater. 154 (2017) 590-599.

NASR, D.; BEHFOROUZ, B.; BORUJENI, P.R.; BORUJENI, S.A.; ZEHTAB, B. Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modeling, Constr. Build. Mater. 229 (2019).

NÍELSSON, I.; WALLEVIK, O.H. Rheological evaluation of some empirical test methods – Preliminary results. Edição: O. Wallevik; I. Níelsson. In: International Rilem Symposium on sel-compacting concrete, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceeding.** France: RILEM Publications, 2003. p.59-68.

OLIVEIRA, J. C. P.; MEDINA, T. M. Estudo de concreto autoadensável com incorporação de escória de alto-forno resfriada ao ar moída. 2019. 72 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

OVARLEZ, G. Introduction to the rheometry of complex suspensions. In **Understanding the Rheology**. Edited by Nicolas Roussel. Woodhead Publishing. 2012.

PONTES, I. F. Aproveitamento de finos gerados nas serragens de mármores e granitos. São Paulo, 2001. 150p., Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PONTES, I. F., ALMEIDA, S. L. M. Aproveitamento de rejeitos de pedreiras e finos de serrarias de rochas ornamentais brasileiras. 2001.

REPETTE, W.L. **Concreto Autoadensável.** In: Concreto: Ciência e Tecnologia, Vol II. Cap. 48. IBRACON: São Paulo, 2011.

SARDOU, R. F. **Atlas de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo.** Brasília - CPRM, 2013.

SILVA, S. A. C. Caracterização do Resíduo da Serragem de Blocos de Granito. Estudo do Potencial de aplicação na Fabricação de Argamassas de Assentamento e de Tijolos de Solo – Cimento. Espírito Santo, 1998. 159p. Dissertação (Mestrado) - Núcleo de Desenvolvimento em Construção Civil - NDCC, Universidade Federal do Espírito Santo.

TOPÇU, I.B., BILIR, T., UYGUNOGLU, T., 2009. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. Constr. Build. Mater. 23 (5), 1947 e 1953.

VARDHAN, K.; GOYAL, S.; SIDDIQUE R.; SINGH M. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement, Constr. Build. Mater. 96 (2015) 615-621.

WALLEVIK, J. E. Relationship between the Bingham parameters and slump, **Cement and Concrete Research**, Volume 36, Issue 7, July 2006, Pages 1214-1221.

WANG, J.; MA, B.; TAN, H.; DU, C.; CHU, Z.; LUO, Z.; WANG, P. Hydration and mechanical properties of cement-marble powder system incorporating triisopropanolamine, Constr. Build. Mater. 266 (2021).

YANG, J.; LIU, L.; LIAO, Q.; WU, J.; LI, J.; ZHANG, L. Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar, Constr. Build. Mater. 201 (2019) 401–407.

ZULCÃO, R., CALMON, J. L., REBELLO, T. A., VIEIRA, D. R. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials. Constr. Build. Mater. 257 (2020) 119523.