

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

CAMILE RIFFEL LUDWIG

CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO PRODUZIDO COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE MARMORARIA EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
AO CIMENTO PORTLAND

São Carlos

2023

CAMILE RIFFEL LUDWIG

CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO PRODUZIDO COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE MARMORARIA EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
AO CIMENTO PORTLAND

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado ao
curso de Engenharia Civil
do campus São Carlos do
Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção
do diploma de Bacharel em
Engenharia civil.

Orientador: Ana Paula
Antonello Sieg

Coorientador: Allan
Guimaraes Borçato

São Carlos

2023

L948c Ludwig, Camile Riffel
Concreto de ultra alto desempenho produzido com incorporação de resíduo de marmoraria em substituição parcial ao cimento portland / Camile Riffel Ludwig ; orientadora: Ana Paula Antonello Sieg ; coorientador: Allan Guimarães Borçato. – São Carlos, SC, 2023.
31 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Engenharia Civil.

Inclui bibliografias

1. Engenharia civil. 2. Concreto. 3. Resíduos - Subprodutos. I. Sieg, Ana Paula Antonello. II. Borçato, Allan Guimarães. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Curso de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 624

CAMILE RIFFEL LUDWIG

CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO PRODUZIDO COM
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE MARMORARIA EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
AO CIMENTO PORTLAND

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenharia Civil,
pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e
aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

São Carlos, 27 de junho de 2023.

Documento assinado digitalmente
 ANA PAULA ANTONELLO SIEG
Data: 24/08/2023 17:05:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ana Paula Antonello Sieg

Orientadora

Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 ALLAN GUIMARAES BORCATO
Data: 02/08/2023 15:42:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Allan Guimaraes Borçato

Coorientador

Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 ISRAEL DA SILVA MOTA
Data: 02/08/2023 14:08:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Israel da Silva Mota

Instituto Federal de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 JOHNNY GILBERTO MORAES COELHO
Data: 02/08/2023 10:23:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Johnny Gilberto Moraes Coelho

Instituto Federal de Santa Catarina

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo desenvolver um concreto de ultra alto desempenho fazendo uso do resíduo de uma marmoraria local em substituição parcial ao cimento Portland. Justifica-se ao procurar uma forma de reduzir o impacto da construção civil no aquecimento global, buscando uma destinação correta ao resíduo de marmoraria e, ao mesmo tempo, diminuindo o uso de cimento, levando em conta que, atualmente, a indústria do cimento é uma das maiores contribuintes para essa problemática. As marmorarias também vêm sendo citadas por ambientalistas como fortes fontes de poluição do meio ambiente, devido à falta de processos de tratamento para eliminar seus resíduos, que são jogados diretamente no ecossistema. Os testes de resistência à compressão foram realizados 1, 7 e 28 dias. Utilizando a análise estatística de variância (ANOVA) e o teste de Tukey, observou-se que a substituição de 5% do cimento pelo resíduo (RR05) causou um aumento insignificante de 2,2% de resistência à compressão quando comparado ao traço de referência (REF). Já o traço onde o cimento foi substituído em 10% (RR10) e o traço onde utilizou-se o resíduo como agregado (RRAG) obtiveram, respectivamente, uma significativa redução de resistência de 11,7% e 5,7%. Quando realizada a análise de ecoeficiência dos traços fazendo uso do valor da emissão de CO₂ por m³ de concreto em relação a sua resistência à compressão aos 28 dias e comparando-os ao traço de referência o RR05 obteve uma diminuição de 7% da emissão de CO₂. Já os traços RR10 e RRAG obtiveram um aumento na emissão de CO₂ de 2,8% e 9,8%, respectivamente. Ao analisar as amostras através do teste de absorção por imersão e do índice de vazios conforme a NBR 9778 (2005), os resultados foram inconclusivos, vez que o traço RR05 que havia apresentado os melhores resultados até então, apresentou o maior resultado em ambos os testes, obtendo 5,7% de absorção e 12,5% de índice de vazios. As outras amostras obtiveram 5%, 5% e 4,2% em REF, RR10 e RRAG, respectivamente, no teste de absorção e 10,9%, 10,7% e 9,3% em REF, RR10 e RRAG, respectivamente, no teste de índice de vazios.

Palavras-Chave: Concreto De Ultra Alto Desempenho. Resíduo marmoraria. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This research aimed to develop an ultra-high performance concrete using waste from a local marble factory in partial replacement of Portland cement. It is justified by looking for a way to reduce the impact of civil construction on global warming, seeking a correct destination for waste from marble works and, at the same time, visiting the use of cement, considering that, currently, the cement industry is one of the biggest contributors to this problem. The marble factories have also been mentioned by environmentalists as sources of gases in the environment, due to the lack of treatment processes to eliminate their residues, which are thrown directly into the ecosystem. Resistance to resistance tests were carried out at 1, 7 and 28 days. Using a statistical analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test, it was verified that the replacement of 5% of the cement by the residue (RR05) caused an insignificant increase of 2.2% of resistance to resistance when compared to the reference mix (Ref.). The mix where the cement was replaced by 10% (RR10) and the mix where the residue was used as an aggregate (RRAG) obtained, respectively, a significant reduction in resistance of 11.7% and 5.7%. When the eco-efficiency analysis of the mixes was carried out using the CO₂ emission value per m³ of concrete in relation to its resistance to resistance at 28 days and comparing them to the reference mix, the RR05 obtained a 7% decrease in CO₂ emissions. The RR10 and RRAG traits obtained an increase in CO₂ emissions of 2.8% and 9.8%, respectively. When analyzing the sample through the immersion absorption test and the void index according to NBR 9778 (2005), the results were inconclusive, since the RR05 trait, which had presented the best results until then, presented the highest result in both tests, obtaining 5.7% of absorption and 12.5% of voids index. As other samples obtained 5%, 5% and 4.2% in REF, RR10 and RRAG, respectively, in the absorption test and 10.9%, 10.7% and 9.3% in REF, RR10 and RRAG, respectively, no voids index test.

Keywords: Ultra-High-Performance Concrete. Marble residue. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Preparação do pó.

Figura 2 - Preparação do resíduo.

Figura 3 - Processo de execução dos corpos de prova.

Figura 4 - Corpo de prova na prensa.

Figura 5 - Corpos de prova após rompimento.

Figura 6 - Comparação da resistência à compressão.

Figura 7 - Absorção.

Figura 8 - Índice de vazios.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da microsilica.

Tabela 2 – Densidade da microsilica.

Tabela 3 – Dosagem em kg/m³.

Tabela 4 – Quantidade de corpos de prova.

Tabela 5 – Emissão de carbono por m³ de concreto.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/a – água/aglomerante

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – Instituto Americano do Concreto

AFGC – Associação Francesa de Engenharia Civil

ASTM – American Society for Testing and Materials

cm – Centímetro

CO₂ – Gás carbônico

CUAD – Concreto de Ultra Alto Desempenho

g – grama

IFSC – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

kg/m³ – quilograma por metro cúbico

MPa – Mega pascal

Mt – Megatonelada

m³ – metros cúbicos

ONU – Organização das Nações Unidas

SiO – monóxido de silício

SiO₂ – dióxido de silício

UHPC – Ultra-high Performance Concrete

°C – Graus celsius

µm – Micrômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
2 ESTRUTURAÇÃO DO ARTIGO.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Concreto de Ultra Alto desempenho.....	14
3.2 Resíduo da indústria de beneficiamento de rochas	16
4 METODOLOGIA.....	17
4.1 Materiais utilizados	17
4.1.1 Pó de quartzo	17
4.1.2 Resíduo de marmoraria	18
4.1.3 Cimento Portland CP V-ARI	18
4.1.4 Superplastificante MC- POWERFLOW 4001	19
4.1.5 Sílica Ativa	19
4.2 Execução dos corpos de prova.....	20
4.2.1 Traços	20
4.2.2 Preparação dos corpos de prova	20
4.2.3 Absorção por imersão e índice de vazios	22
4.2.4 Análise de ecoeficiência.....	22
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5.1 Resistência à compressão.....	23
5.2 Ensaio de absorção por imersão e índice de vazios.....	25
5.3 Análise de ecoeficiência	27
CONSIDERAÇÕES FINAIS	28

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
---------------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

A construção civil está dentre as atividades que mais causam impacto ao meio ambiente, pois emite grandes quantidades de poluentes e danos pela extração de matéria prima, além de possuir uma grande geração de resíduos sólidos, sendo o cimento um dos maiores contribuintes dessa realidade.

A indústria do cimento é responsável por 8% da emissão de CO₂ que vai para a atmosfera, além disso, durante sua fabricação são liberados óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e compostos de chumbo, sendo todos eles extremamente poluentes.

Segundo Ashish (2014), aproximadamente 70 Mt (megatoneladas) de concreto estavam sendo produzidos anualmente em escala global, gerando aproximadamente 65 Mt de CO₂.

Ao longo dos anos, em decorrência dos males supramencionados, pesquisadores estudam maneiras de se fazer um concreto mais sustentável e verificam sua aplicabilidade, visando diminuir danos à natureza sem a perda de sua resistência.

A utilização de resíduos na indústria da construção civil não é apenas uma resposta racional para a gestão ambiental, mas também uma necessidade.

Hwang e Soo (2008), destacam a importância do desenvolvimento de tecnologias e reciclagem de resíduos de materiais devido ao elevado volume de produção na indústria e a crescente economia mundial.

Nesta pesquisa, apresenta-se uma alternativa de aproveitamento dos resíduos gerados em uma marmoraria localizada na cidade de São Carlos - SC, onde são realizados inúmeros processos de beneficiamento de diversos tipos de mármore e granitos.

O resíduo de marmoraria é encontrado em forma de lama, esta lama residual está classificada dentro do grupo de resíduos de construção de demolição, destinados a aterros ou de forma irregular no meio ambiente. Esta degradação tem relação com problemas cotidianos, como enchentes, alteração das paisagens e obstrução de vias de tráfego (JOHN, 2000).

Como medidas de verificação para avaliar a viabilidade da substituição, serão realizados alguns testes. Primariamente será feito o teste de rompimento à compressão, para análise de resistência mecânica das amostras produzidas.

Seguidamente, uma verificação visando obter a absorção por imersão e o índice de vazios das amostras. E, por fim, será calculada a ecoeficiência de cada traço realizado.

Os resultados esperados envolvem pouca variância de resistência mecânica quando substituído o cimento pelo resíduo, a fim de ser possível a utilização desta substituição visando um concreto mais sustentável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos de marmoraria na produção de concreto de ultra alta resistência (CUAD).

1.1.2 Objetivos específicos

- i. Determinar a resistência à compressão do CUAD com substituição parcial do cimento pelo resíduo de marmoraria;
- ii. Avaliar a ecoeficiência dos concretos de ultra alta resistência produzidos.

2 ESTRUTURAÇÃO DO ARTIGO

O presente artigo é composto de 7 tópicos. O primeiro tópico trata-se de uma breve introdução sobre a relevância do tema, os objetivos gerais e específicos e a apresentação do trabalho.

O segundo tópico apresenta a estruturação do artigo.

O terceiro tópico trata-se de uma revisão bibliográfica do concreto de ultra alto desempenho, tratando de suas propriedades, aplicabilidade e, em seguida, algumas observações sobre o resíduo de marmoraria.

O quarto tópico apresenta os materiais e métodos utilizados, assim como os ensaios feitos para estudo da pasta e os ensaios para testar a resistência mecânica à compressão em seu estado endurecido.

No quinto tópico estão apresentados todos os resultados da pesquisa, obtidos através dos ensaios realizados e citados no terceiro tópico, com suas devidas análises e comparações.

No sexto tópico são feitas as considerações finais sobre os resultados e, em seguida, possíveis ideias para futuras pesquisas.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Concreto de Ultra Alto desempenho

Contemporaneamente, mesmo com o avanço tecnológico na construção civil, o concreto ainda é um dos materiais mais utilizados nesse âmbito, e, ao longo dos anos, foram criados tipos de concreto para atender as mais diversas necessidades do mercado.

Larrard (1996) descreve que os concretos já não eram mais apenas confeccionados com cimento Portland, areia, brita e água. O uso de aditivos já era de grande valia para que se obtivesse misturas com melhor desempenho e durabilidade.

O descobrimento dos benefícios da incorporação das pozolanas e a introdução de aditivos é o grande responsável pelo avanço tecnológico do concreto (FEHLING, 2014).

O desenvolvimento do CUAD partiu da ideia de se ter um concreto tão resistente e durável quanto as rochas, porém, com uma fácil moldagem e a obtenção de dimensões e formas variadas.

O termo CUAD somente foi definido em 2013, quando o Instituto Americano do Concreto (ACI) e a Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC) entraram em concordância de que um concreto de ultra alto desempenho não possuiria agregado gráúdo em sua composição, utilizaria de baixa relação de água/cimento e alcance de resistência à compressão, com idade de 28 dias, superior a 120 MPa e resistência à tração maior que 8 MPa (CHRIST *et al.*, 2019).

A harmonia entre os constituintes do concreto é essencial e requer um estudo próprio e de alto controle no seu desenvolvimento (TORREGROSA, 2013).

Segundo Sobolev (2004), os elementos normalmente presentes no CUAD são: cimento, areias muito finas, pozolanas, aditivo superplastificante, fibras metálicas e água.

Devido à falta de agregados gráúdos em sua composição, a presença de vazios é minimizada. Segundo Viana (2019), a ausência desse material na composição, evita alguns dos problemas apresentados por concretos convencionais na zona de transição entre pasta e agregado.

O empacotamento das partículas está diretamente ligado a granulometria do material. Segundo Velasco (2002), o efeito *filler* acontece em razão da diminuição da porosidade, causada pela ocupação dos vazios de empacotamento.

Muitas pesquisas foram e estão sendo realizadas com o CUAD em diferentes partes do mundo. Porém, percebe-se uma lacuna na apresentação de um método de dosagem que possa ser utilizado com materiais locais, aplicável em diferentes regiões. Segundo Walraven (2009), a busca pelo aperfeiçoamento e melhor entendimento sobre o CUAD é uma preocupação recorrente no meio técnico.

Segundo Warnock (2005), a utilização do CUAD na construção civil, iniciou no ano de 1997, com a construção de uma passarela na cidade de Sherbrooke, no Canadá. A estrutura da ponte foi construída com concreto de pós reativos (CPR), com resistência à compressão de 200 MPa.

O uso do concreto CUAD pode auxiliar, principalmente, na recuperação de infraestruturas, até mesmo em meios agressivos e ambientes litorâneos. Sua elevada resistência à compressão e tração, quando comparado ao concreto convencional,

possibilitam estruturas mais duráveis e com elevada esbeltez, além de possibilitar a redução ou eliminação de armaduras passivas.

Deve-se citar que, para conseguir essas altas resistências, é necessário reduzir a água e o ar aprisionado na mistura, onde, segundo Salvador Filho (2007), a relação água/aglomerante fica entre 0,2 e 0,25. Para produzir o CUAD, devem ser escolhidos os cimentos mais puros possíveis, por isso, cimentos CP I e CP V ARI são os mais recomendados.

3.2 Resíduo da indústria de beneficiamento de rochas

O Brasil é responsável por uma forte atividade industrial de extração e beneficiamento de rochas ornamentais, tais como granito, mármore, gnaisse, ardósia, entre outras. No entanto, as atividades da indústria de rochas ornamentais geram enormes quantidades de resíduos sólidos, que podem causar consequências negativas ao meio ambiente (ABIROCHAS, 2011).

As rochas ornamentais são abundantemente utilizadas na construção civil, através de pisos, acabamentos, revestimentos, mobiliários, dentre outros. São cortadas e polidas, ainda em sua forma bruta, dentro de marmorarias (RODRIGUES, 2010).

Na fase do processamento do corte e polimento dessas rochas, ocorre uma perda de material tanto de retalhos quanto do pó em conjunto com água para a refrigeração das máquinas, onde é gerada uma espécie de lama, que muitas vezes, é descartada sem nenhum tratamento ou de forma inadequada (SANTOS, 2010).

Muitas empresas de pequeno e médio porte ainda encontram dificuldades e não têm conhecimento da correta importância da destinação final dos resíduos, estando em dissonância com a responsabilidade ambiental e, por esse motivo, descartam seus resíduos em caçambas misturados com outros tipos de materiais.

Diante do exposto, a reciclagem e a reutilização desses resíduos industriais, especificamente o uso do pó da lama de marmoraria na produção do concreto, pode gerar contribuições ambientais e viabilidade econômica significativa (FARIAS, 2017).

Um dos primeiros estudos no Brasil que buscou verificar o reuso do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais foi desenvolvido por Calmon *et al.* (1997), o resíduo foi utilizado em argamassas de assentamento substituindo a cal. Os autores observaram uma melhora nas propriedades físicas da argamassa em estado

endurecido. Também de acordo com os autores, essa substituição induz a pensar que o resíduo trabalhou com um *filler*, diminuindo a porosidade da mistura.

Vardhan *et al.* (2015) estudaram o efeito da substituição parcial do cimento pelo resíduo de mármore em teores de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Os autores concluíram que a substituição é viável em até 10% sem a diminuição da resistência à compressão e com a melhora da mistura.

Corinaldesi, Moriconi e Naik (2010) utilizaram o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais como substituição parcial ao cimento e à areia em argamassas com teor de 10%. Concluíram em sua pesquisa que houve uma queda de resistência de 10% quando substituído o agregado miúdo e uma queda de 20% quando substituído o cimento.

O resíduo a ser utilizado nesta pesquisa, foi coletado em forma de lama em uma marmoraria localizada na cidade de São Carlos, Santa Catarina, onde são processados mármore sintéticos e granito para uso geral na construção civil e será utilizado substituindo parcialmente o cimento em um Concreto de Ultra Alto Desempenho.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais utilizados

Neste tópico serão apresentados os materiais utilizados no programa experimental.

4.1.1 Pó de quartzo

O pó de quartzo é um conjunto de partículas de rocha desagregadas, forma-se à superfície da Terra pela fragmentação das rochas por erosão, por ação do vento ou da água. É um material de origem mineral. A preparação do material para a pesquisa começou a coleta da areia, após foi colocada em fôrmas para secagem na estufa e, depois de seca, peneirada, nesta pesquisa foi peneirada em peneira de 420 μm .

O processo supracitado pode ser mais bem observado na figura 1:

Figura 1 - Preparação do pó.



Fonte: A autora (2023).

4.1.2 Resíduo de marmoraria

O resíduo foi obtido através de uma doação de uma marmoraria localizada no município de São Carlos – SC. Inicialmente, o resíduo apresentava uma consistência similar a uma lama. Posteriormente, o material foi seco em estufa em uma temperatura de 100°C.. Após isso, o material foi separado em uma fôrma maior para finalizar a secagem. Em seguida, o material seco foi fragmentado com o auxílio de um gral e pistilo de porcelana. Finalmente, o material moído foi peneirado em uma peneira com abertura de malha de 0,075mm (#200).

Na figura 2 demonstra-se os processos de preparação:

Figura 2 - Preparação do resíduo.



Fonte: A autora (2023).

4.1.3 Cimento Portland CP V-ARI

Segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991), o CP V-ARI é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer

Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. A designação ARI representa o mínimo de resistência à compressão aos 7 dias de idade, ou seja, 34 MPa.

4.1.4 Superplastificante MC- POWERFLOW 4001

Segundo a MC, fabricante do superplastificante utilizado nesta pesquisa, o MC-PowerFlow 4001 é um superplastificante sintético baseado em uma tecnologia de polímeros policarboxilatos. Seu funcionamento torna possível a redução de água para o aumento da resistência.

Várias vantagens são obtidas com o uso do superplastificante no traço do concreto. Dentre elas, uma grande redução na quantidade de água; não retarda o tempo de pega; proporciona dispersão das partículas do cimento; possui dosagens econômicas.

4.1.5 Sílica Ativa

A Elkem Microsilica 920, utilizada nesta pesquisa, atende a norma brasileira NBR 13956 de 2012. As especificações contidas na Tabela 1 e Tabela 2, foram análises feitas de acordo com a Elkem Standard Test Methods for Microsilica (ESTMS).

Tabela 1 – Especificações da microsilica.

Elemento	Unidade	Valores
SiO ₂	%	Mín.: 85
H ₂ O	%	Máx.: 3
Perda ao fogo (975°C)	%	Máx.: 6
Índice de Atividade Pozolânica aos 7 dias	%	Mín.: 105
Partículas > 45 µm	%	Máx.: 10

Fonte: Elkem (2023).

Tabela 2 – Densidade da microsilica.

Elemento	Unidade	Valores
Densidade aparente	Kg/m ³	> 350

Fonte: Elkem (2023).

4.2 Execução dos corpos de prova

4.2.1 Traços

A dosagem utilizada no traço de referência foi feita com base no traço de Ren *et al.* (2021), onde foram feitas algumas alterações e adequações para os materiais disponíveis na região.

A não utilização de fibras metálicas ocasionou-se pela falta de recurso, onde no Brasil é de difícil acesso.

O traço de referência (REF) não possui incorporação do resíduo de marmoraria. O traço RR05 possui 5% da massa do cimento Portland substituída pelo resíduo de marmoraria. O traço RR10 possui 10% da massa do cimento Portland substituída pelo resíduo de marmoraria. Por fim, o traço RRAG possui a substituição completa do pó de quartzo pelo resíduo de marmoraria.

A Tabela 2 apresenta os traços utilizados no programa experimental.

Tabela 3 - Dosagem em kg/m³.

Traço	Cimento	Resíduo	Areia	Sílica	Água	Aditivo
REF	833,54	0,00	933,52	233,62	243,24	25,00
RR05	791,36	41,68	932,53	233,37	242,98	24,97
RR10	748,56	83,21	931,86	233,21	242,80	24,95
RRAG	806,76	903,53	0,00	226,12	254,03	68,49

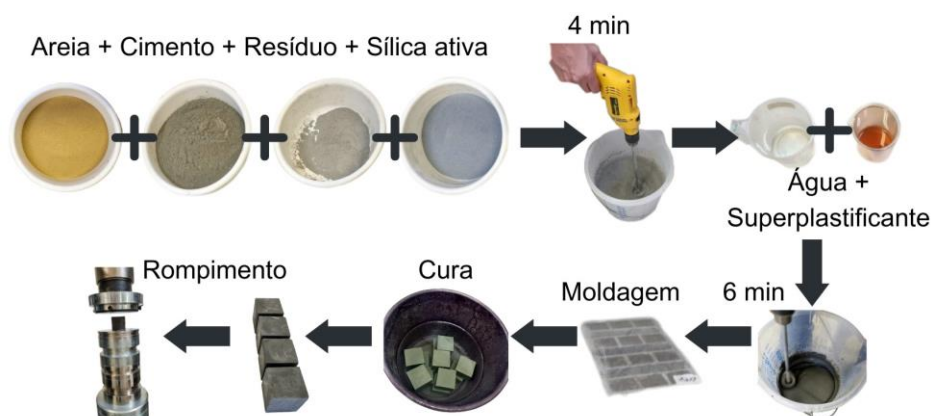
Fonte: A autora (2023).

4.2.2 Preparação dos corpos de prova

O material para a moldagem dos corpos de prova foi separado, pesado e, em seguida, misturado em um balde através de uma furadeira. Primariamente foram misturados os materiais secos (areia, cimento, resíduo e sílica ativa) por 4 minutos. Posteriormente, o superplastificante foi dissolvido em água e acrescentado na mistura, batendo por mais 6 minutos. Assim, ao término dos 10 minutos, os corpos de prova foram moldados e curados apenas imersos em água para, em seguida, serem rompidos à compressão.

A Figura 3 demonstra o detalhamento do processo.

Figura 3 - Processo de execução dos corpos de prova.



Fonte: A autora (2023).

Ao total, foram moldados 45 corpos de prova em moldes cúbicos de 5 x 5 cm; e 12 corpos de prova em moldes cilíndricos de 3,5 x 5 cm para teste de absorção por imersão e índice de vazios, todos curados da mesma forma.

Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova.

Ensaio	Geometria	Repetições	Total
Resistência à compressão ASTM C 109	Cúbico 5 x 5 cm	4 repetições 3 idades (1, 7 e 28 dias)	45
Absorção por imersão e índice de vazios NBR 9778/2005	Cilíndrico 3,5 x 5 cm	3 repetições	12

Fonte: A autora (2023).

Quatro corpos de prova do teste de referência, das substituições de 5% e 10% de substituição foram rompidos com 1, 7 e 28 dias e três corpos de prova do traço com substituição total do agregado foram rompidos nas mesmas idades com base na ASTM C 109 (ASTM, 2012).

4.2.3 Absorção por imersão e índice de vazios

Este teste foi realizado com base na NBR 9778 (ABNT, 2005). A absorção de água por imersão é o procedimento onde a água tenta se conduzir para os poros permeáveis de determinado corpo poroso para assim preenchê-lo. O índice de vazios, por sua vez, corresponde à relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

A primeira pesagem das amostras foi feita após 28 dias de cura, com os corpos de prova saturados. A segunda pesagem foi realizada em uma balança hidrostática com as amostras imersas em água. A terceira e última pesagem foi feita após 4 dias das amostras serem mantidas em estufa com uma temperatura em torno de 100°C, totalmente secas.

A absorção (A) é obtida em porcentagem através da equação:

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde:

M_{sat} é a massa da amostra saturada;

M_s é a massa da amostra seca.

O índice de vazios (iv) é calculado através da expressão:

$$iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100$$

Onde:

M_i é a massa da amostra imersa em água.

4.2.4 Análise de ecoeficiência

Para análise de ecoeficiência, foi necessária a quantidade de emissão de CO₂ por metro cúbico de cada material utilizado. De acordo com Campos *et al.* (2022), são eles: CP: 0,863 kg/m³; areia: 0,0016 kg/m³ e SP: 1,133 kg/m³. O fator de emissão da sílica ativa adotado foi de 0,014 kg/m³ (WANG, 2019).

Os valores de emissão de carbono foram divididos pela média de Mpa obtidos na resistência à compressão aos 28 dias, para assim obter a análise de ecoeficiência.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resistência à compressão

A Figura 4 apresenta a execução dos ensaios de resistência à compressão.

Figura 4 - Corpo de prova na prensa.



Fonte: A autora (2023).

A Figura 5 apresenta os corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão.

Figura 5 - Corpos de prova após rompimento.



Fonte: A autora (2023).

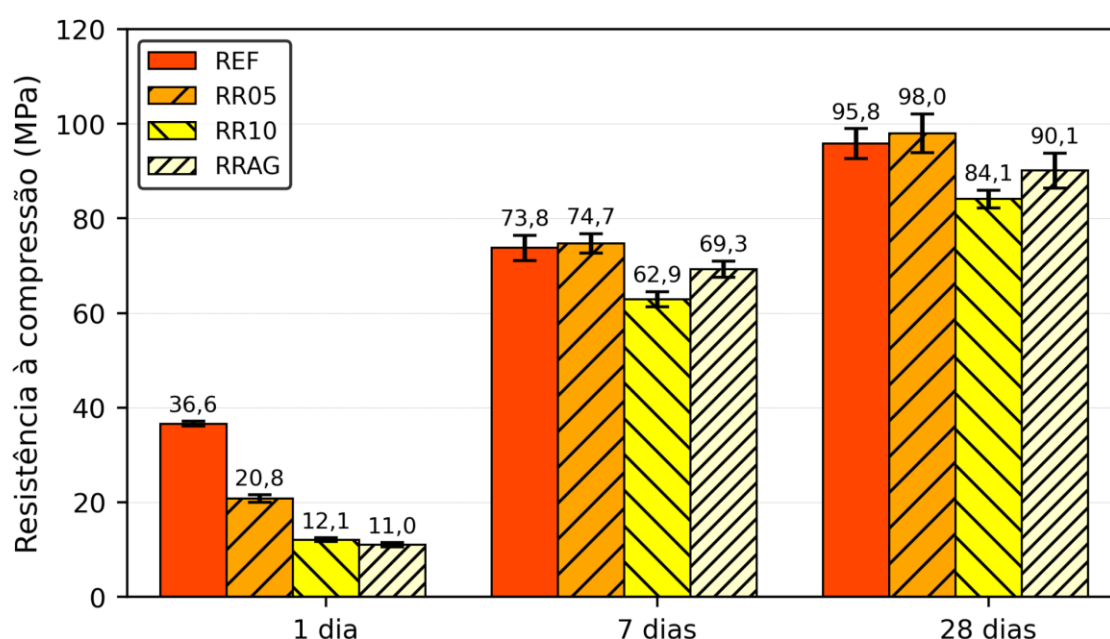
Diferentemente do primeiro dia, no sétimo dia o resultado com a substituição parcial de 5% obteve uma média de resistência estatisticamente igual ao traço de referência. Isso ocorre pelo fator de empacotamento, onde o resíduo, devido a sua finura, promoveu um refinamento na estrutura de poros.

Segundo Goldman e Bentur (1993), o efeito microfller é o principal fator para a densificação da zona de transição, contribuindo para um ganho nas propriedades mecânicas nas idades iniciais.

Aos 28 dias de idade, foram feitos os últimos rompimentos dos 4 traços.

A Figura 6 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias de idade.

Figura 6 - Comparação da resistência à compressão.



Fonte: A autora (2023).

A análise estatística de variância e o teste de Tukey, mostraram que a incorporação de 5% do resíduo de marmoraria no concreto em substituição parcial ao cimento, causou um aumento irrelevante na resistência 2,2% quando comparado ao traço de referência, ou seja, podem ser considerados idênticos.

Já a substituição de 10% e o uso do resíduo como agregado causaram uma diminuição significativa de 11,7% e 5,7%, quando comparados ao traço de referência aos 28 dias.

Como justificativa ao aumento de resistência obtido pelo traço onde obtinha-

se 5% de substituição do cimento pelo resíduo, Cabrera *et al.* (1998), em uma pesquisa sobre concretos de alta resistência, enfatiza que os materiais finos podem alojar-se entre os grãos de clínquer promovendo um melhor empacotamento e, assim, uma maior dispersão dos grãos dentro da mistura.

O mesmo é válido para a amostra onde realizou-se a substituição total do agregado pelo resíduo, o qual é mais fino que a areia.

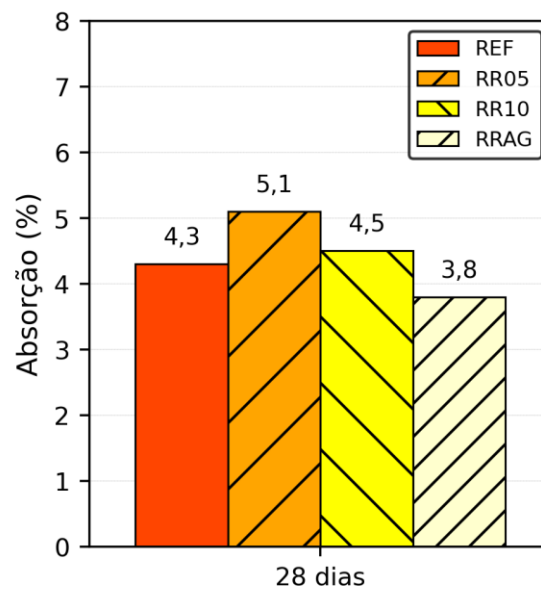
Em uma pesquisa similar Colangelo, Marroccolli e Cioffi (2010), avaliaram argamassas com substituição parcial do cimento e da areia por resíduo de mármore, com teores de 10%, 20% e 30% em relação ao agregado e com 10%, 15% e 20% em relação ao cimento. Os autores avaliaram a resistência à compressão das misturas e concluíram que em relação à substituição do agregado, houve uma melhora nessa propriedade em todos os teores de substituição. Já para a substituição do cimento, acima de 10% houve um decréscimo na resistência à compressão.

Segundo Isaia (1995), a incorporação dos grãos mais finos provoca segmentação dos poros maiores e incrementa os locais de nucleação para precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações e formando cristais de hidróxido de cálcio menores.

5.2 Ensaio de absorção por imersão e índice de vazios

Na Figura 7 pode-se observar uma comparação de absorção entre as médias obtidas.

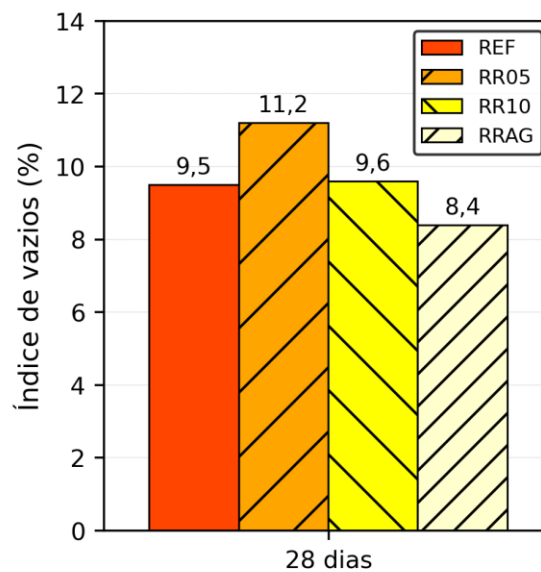
Figura 7 - Absorção.



Fonte: A autora (2023).

Diante de uma análise gráfica, com os valores representados na figura 7, percebe-se que o traço com 5% de substituição possui o maior de absorção, ou seja, é a amostra onde a água melhor conseguiu adentrar nos vazios.

Figura 8 - Índice de vazios.



Fonte: A autora (2023).

Análises indicam que quanto maior a resistência do concreto, menor o índice de vazios nele contido, porém, nesse caso, com o aumento do resíduo em

substituição ao cimento, aumentou o índice de vazios, o que torna o resultado inconclusivo.

Tuan *et al.* (2011) incorporou cinza de casca de arroz (RHA) na mistura de concreto em substituição à sílica ativa. Eles atingiram 150 Mpa com granulometria máxima e mostraram que à medida que o tamanho do RHA aumenta, a resistência à compressão diminui.

Toledo *et al.* (2012) atingiu 160 Mpa de resistência à compressão maximizando a compactação da mistura granular com base na distribuição granulométrica e no empacotamento das partículas.

Nguyen (2019) afirmou que esqueletos granulares mais otimizados são a cada dia mais utilizados à medida em que se diminui o consumo de cimento. O controle do empacotamento é fundamental. Aspectos como o tamanho dos grãos e a distribuição granulométrica dos agregados interferem diretamente no empacotamento.

5.3 Análise de ecoeficiência

Na Tabela 5 observam-se os valores de emissão de carbono por m³ de concreto calculados:

Tabela 5 - Emissão de carbono por m³ de concreto.

Traço	Cimento	Resíduo	Areia	Sílica	Água	Aditivo	Total CO ₂	Resistênci a média aos 28 dias (Mpa)	CO ₂ / MPa/ m ³
REF	719,34	0	1,49	3,27	0	28,32	752,43	95,8	7,85
RR05	682,94	0	1,49	3,27	0	28,29	715,99	98	7,31
RR10	646,01	0	1,49	3,26	0	28,27	679,04	84,1	8,07
RRAG	696,23	0	0	3,17	0	77,59	776,99	90,1	8,62

Fonte: A autora (2023).

O traço de referência obteve 7,85 CO₂/ MPa/ m³, o traço com 5% de substituição, obteve o melhor resultado, emitindo 7,31 CO₂/ MPa/ m³, o traço com 10% de substituição e o traço do resíduo como agregado atingiam, respectivamente, 8,07 e 8,62 CO₂/ MPa/ m³.

A resistência à compressão é considerada como a propriedade mais importante do concreto, por conta disto, a análise de ecoeficiência é dependente deste fator.

Pelisser, Vieira e Bernardin (2018) produziram concretos autoadensáveis com consumo de cimento reduzido com resistências de 20, 25, 30 e 40 Mpa aos 28 dias e índices de 9,8, 9,1, 8,5 e 7,7 kg/m³/Mpa respectivamente para os concretos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ante o exposto, através de análises estatísticas, obteve-se as seguintes conclusões:

- O traço executado com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de marmoraria, quando comparado aos demais traços mostrou-se o mais ecoeficiente e igualmente resistente ao traço de referência, não alterando significativamente suas propriedades mecânicas.
- Com a substituição parcial de 10% do cimento pelo resíduo de marmoraria, notou-se uma diferença significativa de perda de resistência à compressão e foi menos ecoeficiente que o traço de referência.
- O traço onde ocorreu a substituição total do agregado pelo resíduo de marmoraria tornou-se inviável pela dificuldade de execução do concreto e pela falta de trabalhabilidade obtida. O traço obteve uma redução significativa de resistência e foi o traço com a menor ecoeficiência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

American Society for Testing and Materials, **ASTM C 109**: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. 2012.

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. “**Balanco das exportações Brasileiras de rochas ornamentais**”, 2011.

ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; BRITO, J. de; SANTOS, J. R. **High-performance concrete with recycled stone slurry**. ScienceDirect Cement and Concrete Research, v. 37, p. 210-220, 2007b.

BUTTIGNOL, T. E. T. *et al.* **Aplicação do Concreto de Ultra Alto Desempenho em obras de reforço e recuperação de estruturas**. Foz do Iguaçu, 2018.

CABRERA, O., BONAVETTI, V., DONZA, H., IRASSAR, E. F., **Hormigones de alta resistencia con cementos de filler calcareo**. Buenos Aires, Argentina. Associação Argentina de Tecnología. 195 - 204 p. Jun, 1998.

Calado C., Camões A., Jalali S., Barkokébas Jr B. **Concreto Auto adensável (CAA), Mais do que Alternativa ao Concreto Convencional**, 2016. 262 p.

CALMON, J. L. *et al.* **Aproveitamento do Resíduo de Corte de Granito para a Produção de Argamassas de Assentamento**. Salvador, 1997.

CAMPOS, H. F.; BELLON, A. L.; LARA E SILVA, E. R.; VILLATORE, M. **Eco efficient concrete, optimized by Alfred’s particle packing model, with partial replacement of Portland cement by stone powder**. IBRACON Structures and Materials Journal, v. 15, 2022.

CHRIST, Roberto *et al.* **Conceitos e aplicações do concreto de ultra alto desempenho: panorama nacional e internacional.** Economia e Sociedade, Campinas, 2019.

COLANGELO, F.; MARROCCOLI, M.; CIOFFI, R. **Properties of self-levelling concrete made with industrial wastes.** 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G.; NAIK, T. R. **Characterization of Marble Powder for Its Use in Mortar and concrete.** 2010.

FARIAS, U. M. S. M. **Produção de concreto autoadensável com uso de fíler calcário de resíduo de serragem de pedra cariri.** Dissertação de mestrado. Departamento de ciências em engenharia civil e ambiental. Universidade Estadual de Feira de Santana BA, 2017.

FILHO CHIODO, C. RODRIHUES E. P. DE. Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. ABI Rochas. **Guia de Aplicação de Rochas em Revestimento.** Projeto Brula. 2009.

Guosheng Ren, Bin Yao, Huanghuang Huang, Xiaojian Gao. **Influence of sisal fibers on the mechanical performance of ultra-high-performance concrete,** Volume 286. 2021.

HWANG, Eui-Hwan; SOO-LO, YUNG. **Comparison of mechanical and physical properties of SBR-polymer modified mortars using recycled waste materials.** Journal of Industrial e Engenharia Química. Volume 14, 644-650 p, 2008.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo da durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1995.

JOHN N. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: a contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (Livre docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.

LISBÔA, Edvaldo Monteiro. **OBTENÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE E GRANITO E ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS**. Maceió, 2004. 144 p.

MORAES, I., **Mármore e Granito: Lavra, beneficiamento e Tratamento de Resíduos**, 2006. Disponível em http://biton.uspnet.usp.br/cirra/wpcontent/uploads/2013/09/IHMZ.ABES_.odf. Acesso em 10 de agosto de 2019.

MORENO, AN; PONCE PALAFOX, C.; AVALOS BEMOLTE, F.; MÚZQUIZ RAMOS, **EM Resíduos de mármore em materiais de construção: uma revisão do uso de pó de mármore em argamassas, concreto e tijolos**. Revista ALCONPAT, v. 12, n. 2, pág. 162 - 183, 1º de maio de 2022.

MULLER, Rodrigo Menegaz; KOELLE, Paulo; ALMEIDA, Claudio Nascimento. A utilização de UHPC em obras no Brasil. São Paulo, 2017.

NGUYEN, H. **A Enhancement of engineering Properties os slag-cement based self-compacting mortar with dolomite powder**. Journal of Building Engineering, 2019.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. **Efficient self-compacting concrete with low cement consupcion**. 2018.

R. V. Velasco. **Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras de Polipropileno e Sisal Submetido a Altas Temperaturas**. Tese, UFRJ, COPPE, Rio de Janeiro, RJ (2002).

Rodgers, Lucy. **Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO₂ que está por toda parte, mas você talvez não saiba**. BBC News. Dez. 2018.

SALVADOR FILHO, José Américo Alves. **Compósitos cimentícios de ultra-alto desempenho reforçados com fibras**. São Paulo, 2017.

SANTOS, J. G.; SILVA, S. S. F.; NASCIMENTO, N. M. S.; TRAJANO, M. F.; MELLO, V. S. **Caracterização da lama abrasiva gerada nos processos de beneficiamento do granito: um estudo de caso na Granfugi localizada em Campina Grande**. XXX

Encontro nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP. São Carlos, São Paulo, 2010.

SANTOS, J.F., CHIODI FILHO. C. **Programa Michelangelo Espírito Santo: uma proposta para liderança nacional em rochas ornamentais**. Brasília. D.N.P.M., 1991. 45 p.

SANTOS, R. A. dos; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. MORTAR WITH SUBSTITUTE THE NATURAL AGGREGATE BY THE RESIDUES THE CRUSHING THE GRANITE. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 1818–1828, 2013.

SC Bostanci. **Uso de resíduos de pó de mármore e vidro reciclado para produção sustentável de concreto**. J. Limpo. Prod., 2020.

SCHMIDT, Michael; FEHLING, Ekkehard. **Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe**. Deutschland, 2015.

SILVA, A. Z. D. **Metodologia de avaliação das práticas de gerenciamento ambiental dos resíduos de empresas de beneficiamento de rochas ornamentais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

TOLEDO, R.; KOENDERS, E.; FORMAGINI, S., *et al.* **Avaliação de desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibra de ultra alto desempenho em vista da sustentabilidade**, Journal Materials ans Design, 2012.

TUAN, N.; YE, G.; BREUGEI, K.; *et al.* **O estudo do uso de cinzas de casca de arroz para produzir concreto de ultra alto desempenho**. 2011.

VARDHAN, K. *et al.* **Mechanical Properties and Microstructural Analysis of Cement Mortar Incorporating Marble Powder as Partial Replacement of Cement**. 2015.

VEIGA, K.K.; GASTALDINI, A.L.G. Sulfate attack on a white Portland cement with activated slag, **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 494-503, 2012.

WANG, X. Y. Effect of carbon pricing on optimal mix design of sustainable high-strength concrete. **Sustainability**, v. 11, 2019.