

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

LUARA GIESE GARCEZ

CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS FLUIDOS A PARTIR DA ADIÇÃO DE
RESÍDUOS INDUSTRIAIS

São Carlos/SC

2022

LUARA GIESE GARCEZ

CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS FLUIDOS A PARTIR DA ADIÇÃO DE
RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de
Curso (TCC) apresentado
ao Curso de Engenharia
Civil do Câmpus São Carlos
do Instituto Federal de
Santa Catarina para a
obtenção do diploma de
Bacharel em Engenharia
Civil

Orientador: Anderson
Renato Vobornik Wolenski

São Carlos/SC

2022

Garcez, Luara Giese

Caracterização de concretos fluidos a partir da adição de resíduos industriais / Luara Giese Garcez ; orientador Anderson Renato Vobornik Wolenski. -- São Carlos, SC, 2022. 37 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus São Carlos, Curso de Graduação em Engenharia Civil, São Carlos, SC, 2022.

Inclui bibliografias.

1. Concretos fluidos. 2. Resíduos industriais. 3. Sustentabilidade. I. Wolenski, Anderson Renato Vobornik. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. Título.

LUARA GIESE GARCEZ

CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS FLUIDOS A PARTIR DA ADIÇÃO DE
RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Bacharel 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, 09 de dezembro de 2022.

Prof. Anderson Renato Vobornik Wolenski, Dr.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus São Carlos

Profa. Débora Fátima Alberici, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus São Carlos

Profa. Ana Paula Antonello Sieg, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus São Carlos

Dedico este trabalho a Deus, o maior orientador da minha vida! Em nenhum momento me desamparou, guiando e protegendo-me sempre com sua misericórdia.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sou grata a Deus, meu protetor, Salvador e melhor amigo! Sua luz guiou meu caminho durante a execução deste projeto com saúde e forças para chegar até o final com sucesso.

Sou grata à minha mãe, Veraluci, pelo seu amor, carinho e atenção, e por ser meu porto seguro ao longo de todo o processo e em toda minha vida. Agradeço também, por além de tudo isso, ter colocado a “mão na massa” e me ajudado quando necessário no laboratório.

Agradeço ao meu orientador, Anderson, por sempre me auxiliar de forma quase instantânea, tanto nas ideias e dúvidas, como também na formatação do texto, e por realizar todas as fases do desenvolvimento experimental do projeto comigo.

Sou grata às professoras Débora e Ana Paula, que participaram da Banca de Defesa, pela disposição, apoio e considerações prestadas.

Também agradeço à engenheira Simone, que me auxiliou com os equipamentos do laboratório MATSOLO.

Agradeço ao Felipe do Britador Knapp de Palmitos, pela doação de resíduo de britagem suficiente para a execução dos ensaios necessários do projeto.

E por fim, agradeço aos meus familiares, amigos, colegas e professores que de alguma maneira contribuíram durante a realização deste TCC.

RESUMO

Esse trabalho foi elaborado a fim de caracterizar concretos fluidos a partir da adição de resíduos industriais, com o intuito de unir a redução do consumo do cimento, e consequentemente as emissões de dióxido de carbono, com a correta destinação de um resíduo industrial. O objetivo é avaliar as propriedades físico-mecânicas de concretos fluidos a partir da substituição parcial do cimento por resíduos industriais, neste caso, resíduos de britagem de agregados provenientes da região oeste de Santa Catarina. O trabalho foi executado por meio de um estudo experimental, onde utilizou-se o método de dosagem REPETTE-MELO (MELO, 2005) com uma relação água/cimento igual a 0,50. Executou-se 36 corpos de prova a partir do traço definido pelo método, com as porcentagens de substituição do cimento por resíduo de britagem de 0%, 5% e 10%. Obteve-se como resultados a média de resistência à compressão dos corpos de prova (CPs) produzidos em idades iniciais (3, 7 e 21 dias) e de cálculo (28 dias), além do abatimento e das emissões de CO₂ em cada traço. Concluiu-se que: A resistência à compressão dos CPs com 5% e 10% de substituição foi menor em 3,90% e 14,86%, respectivamente, em relação ao traço de referência (0%); Os traços apresentaram abatimento médio de 24,17 cm, sendo suficiente para atender concretagens bombeadas em obras tradicionais; Em relação ao traço de referência (0%), os traços com 5% e 10% resultam em concretos com redução de emissões de CO₂ em 18,49 kg/m³ e 36,97 kg/m³, respectivamente.

Palavras-Chave: Concretos Fluidos. Resíduos Industriais. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This work was carried out in order to characterize fluid concretes from the addition of industrial waste, with the aim of uniting the reduction of cement consumption, and consequently carbon dioxide emissions, with the correct destination of an industrial waste. The objective is to evaluate the physical-mechanical properties of fluid concrete from the partial replacement of cement by industrial waste, in this case, aggregate crushing waste from the western region of Santa Catarina. The work was carried out through an experimental study, where the REPETTE-MELO dosage method (MELO, 2005) was used with a water/cement ratio equal to 0.50. Thirty-six specimens were executed from the mix defined by the method, with the percentages of replacement of cement by crushing waste of 0%, 5% and 10%. The average compressive strength of the test specimens (CPs) produced at initial ages (3, 7 and 21 days) and calculation (28 days) were obtained, in addition to the abatement and CO₂ emissions in each mix. It was concluded that: The compressive strength of CPs with 5% and 10% replacement was lower by 3.90% and 14.86%, respectively, in relation to the reference mix (0%); The traces had an average slump of 24.17 cm, which is enough to meet pumped concreting in traditional works; In relation to the reference mix (0%), the mixes with 5% and 10% result in concrete with CO₂ emission reductions of 18.49 kg/m³ and 36.97 kg/m³, respectively.

Keywords: Fluid Concrete. Industrial Waste. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Produção de clínquer do cimento	5
Figura 02 - Estocagem do resíduo de britagem	6
Figura 03 - Brita e areia	7
Figura 04 - Concreto	9
Figura 05 - Gráfico da faixa granulométrica do agregado miúdo	14
Figura 06 - Gráfico da faixa granulométrica do agregado graúdo	15
Figura 07 - Resíduo de britagem	16
Figura 08 - Gráfico da faixa granulométrica do resíduo de britagem	16
Figura 09 - Fluxograma de dosagem conforme o método REPETTE-MELO	17
Figura 10 - Ensaio pelo Cone de Marsh	19
Figura 11 - Pasta na argamassadeira	20
Figura 12 - Início do ensaio de Kantro	21
Figura 13 - Slump Test para determinação do teor de agregado graúdo	22
Figura 14 - Moldes dos CPs de concreto com 5% e 10% de substituição	23
Figura 15 - Ensaio de abatimento (Slump Test)	24
Figura 16 - Ensaio de Compressão	24
Figuras 17, 18 e 19 - Gráficos dos resultados dos ensaios de Cone de Marsh para 0%, 5% e 10% de substituição do cimento	25 e 26
Figura 20 - Diferentes espalhamentos na argamassa	27
Figura 21 - Diferentes abatimentos no concreto	29
Figura 22 - Gráfico dos parâmetros do concreto no estado endurecido	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Composição e informações sobre ingredientes do CP II-Z-32	12
Tabela 02 - Propriedades físicas e químicas do cimento Portland	13
Tabela 03 - Propriedades físicas e químicas do aditivo superplastificante Silicon Premix 40205	13
Tabela 04 - Resultados de espalhamento pelo ensaio de Kantro para as porcentagens ensaiadas	28
Tabela 05 - Traços por metro cúbico	29
Tabela 06 - Síntese dos parâmetros do concreto no estado endurecido	30
Tabela 07 - Módulo de elasticidade em cada traço	31
Tabela 08 - Emissões de CO ₂ em cada traço	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *American Concrete Institute*

a/c - Água/cimento

CO₂ - Dióxido de carbono

CP - Cimento Portland

CPs - Corpos de prova

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

MPa - Megapascal

NBR - Norma Brasileira

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SP - Superplastificante

USGS - *United States Geological Survey*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo geral	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Cimento Portland	4
2.2 Resíduos Industriais	5
2.3 Agregados	7
2.4 Concreto	8
3 MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1 Cimento Portland CP II-Z-32	12
3.2 Aditivo Superplastificante Silicon Premix 40205	13
3.3 Agregados	14
3.4 Resíduo de Britagem	15
3.5 Método de Dosagem	17
3.6 Ensaio na Pasta	18
3.7 Ensaio na Argamassa	20
3.8 Ensaio no Concreto	21
3.8.1 Ensaios de Controle do Concreto	23
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	25
4.1 Pasta	25
4.2 Argamassa	27
4.3 Concreto	28
4.3.1 Concreto no Estado Fresco e no Estado Endurecido	29
4.3.2 Análise de Ecoeficiência	31
5 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que atualmente o concreto é o material mais utilizado na construção civil em todo o mundo. Isso se dá a partir de diversos fatores, sendo um dos principais a sua elevada resistência à compressão. Bill Gates comentou sobre como o concreto tem sido utilizado em larga escala como material de construção, contribuindo para o crescimento da urbanização. Além disso, ele também citou a diferença entre a quantidade de concreto utilizada na China e nos Estados Unidos, baseado em dados da USGS: entre os anos de 2011 a 2013, a China utilizou 6,6 gigatoneladas de concreto, contra 4,5 gigatoneladas que foram utilizadas pelos Estados Unidos entre 1901 a 2000 (GATES, 2014). Tal fato demonstra o crescente uso de estruturas em concreto nos últimos anos em países emergentes, como é o caso da China.

O concreto é um material composto de 4 componentes básicos: cimento, areia, brita e água. No Brasil, a maior parte das obras são feitas em concreto. Porém, o cimento, um dos componentes principais do concreto, é fonte de aproximadamente 8% das emissões mundiais de CO₂. Segundo o instituto de pesquisa britânico Chatham House (2018), se sua indústria fosse um país, seria o terceiro maior emissor desse gás, no mundo, atrás apenas da China e dos Estados Unidos.

O aumento da população mundial e as necessidades implícitas em termos de construção de edifícios e outras obras de infraestrutura, tendem a agravar ainda mais o consumo de matérias-primas não renováveis, bem como a produção de resíduos (JALALI e TORRALBA, 2008). Portanto, verifica-se a necessidade de pesquisas acerca da utilização de outros materiais para substituir parcialmente o cimento na produção do concreto, visando reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera.

A utilização de adições minerais é uma das formas de redução do consumo de clínquer do cimento, que também gera benefícios ecológicos, visto que vários tipos de adições minerais são resíduos ou rejeitos em um processo industrial, os quais precisam de uma destinação adequada, ou seja, a sua correta destinação final gera um custo para a indústria em que ela é produzida (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Além disso, as adições minerais podem proporcionar benefícios técnicos para os concretos fluidos, minimizando os efeitos negativos oriundos do excesso de fluidez do compósito, como a segregação e a exsudação (BAUER, 2013; MALHOTRA e MEHTA, 1996).

O resíduo de britagem estocado nas pedreiras causa alteração da paisagem, criando um impacto ambiental, obstrução de canais de drenagem em virtude da sua deposição e geração de poeira nas operações de britagem. Esse material é estocado ao ar livre, gerando danos ambientais como a poluição atmosférica, assoreamento de rios e contaminação pelo material lixiviado nas áreas de drenagem (SÁ, 2006). Aproveitar o pó retirado das jazidas, além de trazer maior lucratividade para estas empresas, gera também benefícios ao meio ambiente (BUEST NETO, 2006).

Somado a este fato, a verticalização das cidades gera a necessidade de transporte do concreto em tempo hábil para sua aplicação, o que exige o aperfeiçoamento de equipamentos para o bombeamento do concreto (DAIBERT, 2014). As bombas são utilizadas para o transporte de diferentes proporções de concreto a grandes distâncias horizontais e verticais, onde a utilização de concretos convencionais não supre a necessidade do mercado, sendo essencial o emprego de concretos especiais, como os fluidos (MEHTA, 2014). Em Chapecó-SC, a maior cidade que compõe os municípios do entorno do presente trabalho, nota-se a frequência de projetos de edifícios com elevado número de andares, alcançando os 100 metros de altura, o que gera a demanda por mecanismos de bombeamento e de concretos de elevada fluidez.

Portanto, adicionar o resíduo de britagem no concreto une a redução do consumo de cimento, e conseqüentemente as emissões de CO₂, com uma alternativa para a destinação final de resíduos industriais, além de proporcionar benefícios técnicos em relação a exsudação e a segregação do concreto fluido.

Desse modo, esta e outras pesquisas referentes aos novos e diferentes concretos são imprescindíveis, para que sejam alcançadas soluções para o importante setor da construção civil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades físico-mecânicas de concretos fluidos a partir da substituição parcial do cimento por resíduos industriais, neste caso, resíduos de britagem de agregados provenientes da região oeste de Santa Catarina.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos este trabalho propôs:

- avaliar as propriedades dos agregados em termos dos ensaios de granulometria;
- avaliar as propriedades mecânicas de resistência (compressão) e rigidez do concreto;
- obter um concreto com resistência à compressão média de 30 MPa e fluidez mínima (mensurada via ensaio de abatimento no tronco de Abrams) de 20 cm;
- obter um concreto ecoeficiente a partir da incorporação de adições de resíduos industriais, mais especificamente, da adição de resíduo das usinas de britagem da região do entorno deste estudo, visando a diminuição de gás carbônico (CO₂) na atmosfera.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

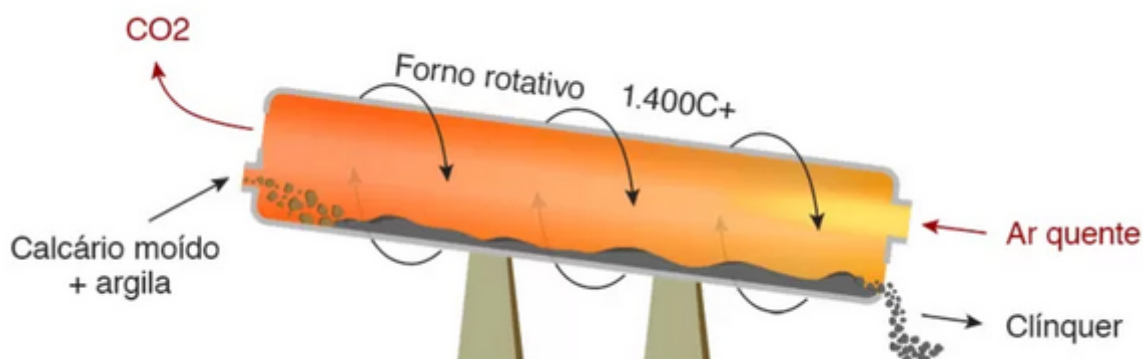
2.1 Cimento Portland

Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. A mistura obtida, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções, não se dissolvia em água e foi patenteada com o nome de cimento Portland, por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (SNIC, 2006).

De acordo com Maury e Blumenschein (2012), as obras e construções contemporâneas utilizam o cimento em grande escala como elemento de ligação, concretagem e elementos estruturais. As autoras definem que a utilização do cimento pode ser considerada como a “marca” da civilização atual na construção civil, pois desde o início do século XX tem sido a solução econômica para a execução de moradias, bem como de grandes obras da engenharia moderna.

Em contrapartida, o setor da construção civil é responsável por 39% do total de emissões de gases do efeito estufa (IPCC, 2021). Conforme o instituto de pesquisa britânico Chatham House (2018), somente o cimento é fonte de aproximadamente 8% das emissões mundiais de dióxido de carbono, o que nos apresenta que este dado não pode ser desprezado pensando em contribuições da ciência para a vida humana. A maior parte das emissões de CO₂ durante o ciclo de vida do cimento ocorre em sua etapa de produção. As grandes emissões nas usinas são ocasionadas principalmente na produção do clínquer: pela alta temperatura do forno rotativo, que consome grandes volumes de combustíveis, e pela decomposição química das matérias-primas (HENDRIKS *et al.*, 2004).

Figura 01 - Produção do clínquer do cimento



Fonte: BBC News Brasil (2018).

Além da emissão do dióxido de carbono, Santi e Sevá Filho (2004) destacam outros poluentes primários que são emitidos durante o processo de fabricação do cimento: material particulado, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio.

2.2 Resíduos Industriais

Segundo Jalali e Torgal (2008), o cimento Portland e o concreto são os materiais mais utilizados na indústria da construção em nível mundial, com tendência de aumento a cada próximo ano. Em razão disso, pesquisas consistentes em termos da utilização de resíduos em concretos e da incorporação de resíduos como agregados podem ser encontradas na literatura atual.

Entretanto, a utilização de adições minerais é uma das formas de substituição parcial do cimento que também gera benefícios ecológicos, ao passo que vários tipos de adições minerais são resíduos ou rejeitos em um processo industrial, os quais necessitam de uma destinação adequada (MALHOTRA e MEHTA, 1996).

A sílica ativa e o Metacaulim são exemplos de adições minerais, que diferente dos resíduos industriais, são industrializadas e fabricadas de modo padronizado. Os resíduos industriais são oriundos de subprodutos das indústrias. Neste trabalho, adotou-se o resíduo de britagem, comumente chamado de pó de pedra/brita, proveniente das indústrias de britagem, também conhecidas como pedreiras ou britadores.

Nas pedreiras, no processo de fragmentação das rochas para a produção de agregados de uso na construção civil, se resultam diferentes produtos comerciais.

Os primeiros encontram aplicações nobres, porém o último, que é o material fino (pó de pedra), acaba apenas sendo estocado em pilhas (ALMEIDA e SILVA, 2005). A estocagem deste resíduo está representada a seguir.

Figura 02 - Estocagem do resíduo de britagem



Fonte: Bezerra *et al.* (2017).

O pó de pedra é gerado a partir da lavagem do agregado miúdo de britagem. De acordo com Bastos (2003), um volume representativo de água é injetado sob pressão na peneira classificadora final do britador. O material gerado é composto por uma polpa bastante diluída que é disposta em bacias de decantação. Isto faz com que o assoreamento destes corpos d'água seja um agravante antieconômico ao processo produtivo (BUEST NETO, 2006).

Conforme Campos (2015), ao inserir tais adições em substituição parcial ao cimento, a questão ambiental é focada na diminuição de resíduos, na preservação de mananciais e na minimização das emissões de gases do efeito estufa, seja pela diminuição da produção de clínquer ou pelo menor consumo de combustíveis de transporte. Essa alternativa apresenta diversas vantagens, sendo as principais: aproveitamento integral das pedreiras, sem descarte de efluentes, menor consumo de cimento na preparação do concreto e solução de problemas ambientais (ALMEIDA e SILVA, 2005).

Nas cidades de Chapecó, Palmitos, Pinhalzinho, Saudades e São Miguel do Oeste existem britadores, com isso, nota-se um número significativo de indústrias de

britagem na região oeste de Santa Catarina e, por consequência, uma grande geração do resíduo de britagem.

2.3 Agregados

O termo “agregado” é utilizado no Brasil para atribuir as matérias primas minerais brutas ou beneficiadas de uso corrente na construção civil. Esse termo é atribuído ao fato de que a areia (agregado miúdo) e a brita (agregado graúdo) se agregam ao cimento para a obtenção do concreto.

Os agregados naturais são produzidos a partir de materiais rochosos consolidados e sedimentares, tais como areia e cascalhos. As rochas consolidadas são submetidas a processos de britagem e moagem, até atingir as especificações granulométricas requeridas pela construção civil (BERTOLINO *et al.*, 2012).

Figura 03 - Brita e areia



Fonte: A autora (2022).

As minerações típicas de agregados geralmente são os portos-de-areia e as pedreiras, como são popularmente conhecidas. Entretanto, a produção dos mesmos pode vir de outras fontes, e nestes casos, comumente a produção é destinada a usos que não requerem especificações rígidas.

Os produtores de agregados minerais no Brasil adotam os procedimentos laboratoriais da ABNT, tendo como referências as etapas iniciais de caracterização mineralógica e petrográfica dos depósitos visando a definição das propriedades requeridas para os diferentes usos: concreto e argamassa de cimento Portland, com e sem finalidade estrutural; concreto asfáltico; lastro ferroviário; aterros; proteção de taludes; filtros, dentre outros (LUZ e ALMEIDA, 2012, p. 4).

As propriedades físicas e químicas dos agregados são essenciais para a vida das estruturas em que são utilizados. Muitas vezes, o uso e a seleção inadequada dos agregados podem ser a causa da falência em estruturas.

A NBR 7211:2022 especifica os requisitos para produção e recepção dos agregados miúdos e graúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland. Conforme a própria NBR 7211:2022, esta não se aplica a agregados obtidos por processos industriais, como subprodutos, e a materiais reciclados, somente a agregados de origem natural lítica, já encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas.

Outra norma que abrange os agregados e é utilizada para a caracterização dos mesmos, é a NBR NM 248:2001, ela prescreve o método para a determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos para concreto. A norma traz a especificação das séries de peneiras a serem utilizadas para realização do ensaio e a descrição da aparelhagem e da execução do ensaio. Os resultados são as faixas granulométricas, que são obtidas através da porcentagem acumulada em cada peneira, além disso, também são obtidos os dados de dimensão máxima característica e módulo de finura. De acordo com a NBR NM 248:2001, a dimensão máxima característica é uma grandeza associada a distribuição granulométrica, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. E o módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

2.4 Concreto

Conforme Neville e Brooks (2013, p. 2), “o concreto, no sentido mais amplo, é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante.

Geralmente esse meio é o produto da reação entre um cimento hidráulico e água.”

Atualmente o concreto é o material mais utilizado na construção civil no Brasil e no mundo. Isso se dá por conta de diversos fatores, como a sua resistência à água, sua plasticidade, e um dos principais: sua elevada resistência à compressão. Basicamente, o concreto é um material composto de 4 componentes: cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo.

Os agregados são partículas minerais que vão aumentar o volume da mistura, reduzindo o custo da mesma. Conforme a NBR 7211:2022, os agregados miúdos possuem diâmetro (\emptyset) entre 0,075mm e 4,8mm, e os agregados graúdos possuem \emptyset maior que 4,8mm.

Figura 04 - Concreto



Fonte: A autora (2022).

O uso tão difundido do concreto também se deve à facilidade com que elementos estruturais de concreto podem ser executados, numa variedade de formas e tamanhos, bem como ao custo e a maior disponibilidade no canteiro de obras (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras. Além

disso, esses concretos podem ser aquecidos, curados a vapor, auto-clavados, tratados a vácuo, prensados, vibrados por impactos (*shock-vibrated*), extrudados e projetados (NEVILLE e BROOKS, 2013, p. 2).

A obtenção de um concreto resistente, durável, econômico e de bom aspecto, depende do estudo das propriedades de cada um dos materiais que o compõem, da proporção correta e execução cuidadosa da mistura, e da cura zelosa da mesma. Na cura é essencial evitar a evaporação prematura da água necessária à hidratação do cimento (ALMEIDA, 2002).

A execução do controle do concreto deve ser feita tanto no estado fresco, como no estado endurecido. O estado fresco é considerado até o início do momento de cura do concreto, e o estado endurecido é considerado após o período de cura.

Os concretos fluidos, assim como os concretos auto-adensáveis, necessitam da utilização de aditivos superplastificantes em sua dosagem, estes contribuem para diminuir a quantidade de água da mistura e dessa forma, aumentar a resistência e fluidez do concreto.

O princípio mais importante para concretos fluidos e resistentes à segregação, incluindo o CAA, é o uso de aditivos superplastificantes combinados com alto teor de materiais finos, sejam eles cimento Portland, adições minerais, fíler de rochas (calcáreo, basáltico, granítico) e/ou areia fina (TUTIKIAN, 2004, p. 29).

O método REPETTE-MELO desenvolvido pela Me. Karoline Alves de Melo e pelo Dr. Wellington Longuini Repette, é um método de dosagem para concretos auto-adensáveis que baseia-se em uma dada resistência à compressão e prioriza o ajuste do teor do aditivo SP em todas as suas etapas, que envolvem ensaios na pasta, ensaios na argamassa e ensaios no concreto (MELO, 2005).

Na fase pasta o teor de aditivo é determinado pelo ensaio no Cone de Marsh, que consiste em um funil pelo qual a pasta escoar. O procedimento segue a NBR 7681-2:2013, que estabelece o método para a determinação do índice de fluidez e da vida útil da calda de cimento para injeção pelo funil de Marsh, e a metodologia proposta por Roncero (2000), o qual executou uma pesquisa extensa sobre os aditivos superplastificantes e propôs que as interações entre as partículas de cimento e o SP são físicas e químicas.

Na fase argamassa o teor de agregado miúdo e o ajuste do teor de aditivo são determinados por meio dos ensaios de espalhamento e V-Funnel. Pelo fato de o presente trabalho ter o propósito de caracterizar concretos fluidos e não

auto-adensáveis, o ensaio V-Funnel não será aqui explanado. O ensaio de abatimento de Kantro, também chamado de mini-slump, consiste no preenchimento de um mini cone apoiado sobre uma base lisa sem inclinação (KANTRO, 1980). Os resultados do ensaio são obtidos pela medição do diâmetro ortogonal do espalhamento da argamassa e avaliados a partir dos parâmetros de espalhamento propostos por Gomes (2002). Em seu trabalho, Gomes (2002) apresentou uma metodologia de dosagem para concretos auto-adensáveis de alta resistência baseada nas etapas de pasta e esqueleto granular.

Na fase concreto o teor de agregado graúdo e o ajuste do teor de aditivo são determinados pelos ensaios no Slump Flow, V-Funnel e L-Box, estes que são utilizados para a caracterização de concretos auto-adensáveis, portanto, para concretos fluidos, o ensaio de abatimento (Slump Test) deve ser realizado para verificar a trabalhabilidade e a fluidez do concreto. O procedimento do ensaio segue a NBR NM 67:1998, que especifica o método para determinar a consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento, em laboratório e obra.

Para a moldagem e rompimento de CPs em laboratório é necessário seguir as normas vigentes. A NBR 16886:2020 estabelece os procedimentos para coleta e preparação de amostras de concreto fresco para a realização de ensaios ou moldagem de corpos de prova para ensaios de concreto endurecido. E a NBR 5739:2018 especifica o método de ensaio para a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto moldados conforme a ABNT NBR 5738 e testemunhos extraídos conforme a ABNT NBR 7680-1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Cimento Portland CP II-Z-32

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto CP II-Z-32 da marca Votoran (Votorantim Cimentos), que possui adição de material pozolânico em sua composição. O material pozolânico confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para obras subterrâneas com presença de água.

Os silicatos de cálcio que são os maiores constituintes do clínquer possuem propriedades hidráulicas. Enquanto os produtos pozolânicos são materiais silicosos ou sílico aluminosos que reagem com hidróxido de cálcio na presença de água e assim formam compostos com propriedades cimentícias (WOLENSKI, 2010).

Segundo a ABCP (2002), o cimento CP II-Z é utilizado para obras cotidianas em argamassas, concreto simples, concreto armado, concreto protendido, elementos pré-moldados, artefatos de concreto e concreto com agregados reativos. Na Tabela 01 encontra-se a composição do CP II-Z-32.

Tabela 01 - Composição e informações sobre ingredientes do CP II-Z-32

Componentes CP II-Z-32 (% em massa)			
Clínquer + Gesso	Escória de Alto Forno	Pozolana	Material Carbonático
71 - 94	-	6 - 14	0 - 15

Fonte: Adaptado de Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos Votorantim Cimentos (2020).

Decidiu-se trabalhar com esse tipo de cimento em razão da sua grande propagação no mercado, conforme a ABCP (2002, p. 10), “atualmente os cimentos Portland compostos são os mais encontrados no mercado, respondendo por aproximadamente 75% da produção industrial brasileira.” Na Tabela 02, têm-se as propriedades físicas e químicas do cimento Portland (que engloba o CP II-Z-32), fornecidas pelo fabricante.

Tabela 02 - Propriedades físicas e químicas do cimento Portland

Cimento Portland	
Estado físico	Sólido, pó cinza
Odor	Sem cheiro
pH em Solução Aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20°C
Massa Específica Absoluta	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2$ g/cm ³ a 20°C
Solubilidade em Água	até 1,5 g/l a 20°C

Fonte: Adaptado de Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos Votorantim Cimentos (2020).

Conforme Wolenski (2010, p. 32), “as principais propriedades físicas e químicas do cimento que possuem interferência direta em seu adensamento são a distribuição granulométrica e a composição mineral do cimento.”

3.2 Aditivo Superplastificante Silicon Premix 40205

O aditivo Silicon Premix 40205 da marca Tecnosil é um aditivo orgânico de última geração à base de policarboxilatos, é aplicado principalmente na confecção de concretos auto-adensáveis (CAA) e concretos de alta resistência (CAD), concretos usinados convencionais e bombeáveis, e concretos para pavimentos rígidos de rodovia. Conforme sua ficha técnica, proporciona grande poder de dispersão e grande trabalhabilidade, além de redução de água e ganho de resistência mecânica. A Tabela 03 expõe as propriedades físicas e químicas do aditivo.

Tabela 03 - Propriedades físicas e químicas do aditivo superplastificante Silicon Premix 40205

Aditivo Superplastificante Silicon Premix 40205	
Aspecto Físico	Líquido viscoso
Cor	Mel a castanho
Densidade a 20° C	1,03 - 1,07 g/cm ³
Teor de cloretos	< 0,1%

Fonte: Adaptado de Ficha Técnica Tecnosil [2018?].

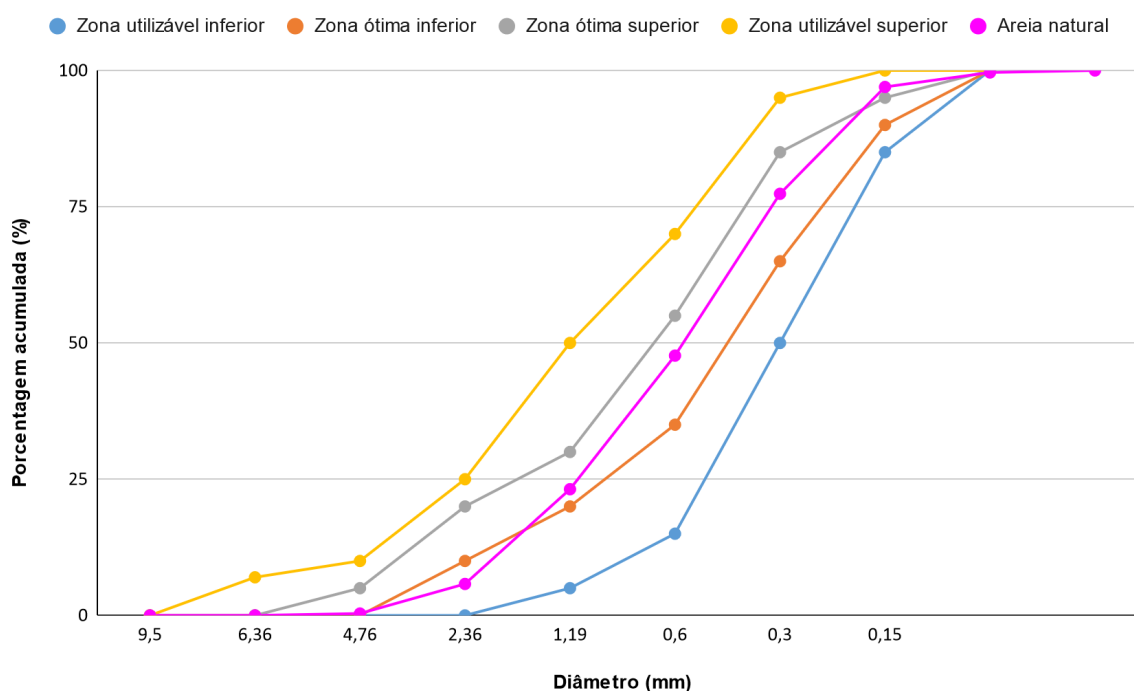
“Tal aditivo incorpora-se ao concreto através dos efeitos de absorção

superficial nas partículas de cimento, produzindo concretos de alta resistência com excelente fluidez. Porém, deve-se atentar para o efeito da superdosagem [...]” (SIEG *et al.*, 2017, p. 6).

3.3 Agregados

Para caracterização dos agregados miúdo e graúdo realizou-se o ensaio de granulometria, conforme a NBR NM 248:2001. A Figura 05 mostra a faixa granulométrica em que a areia utilizada (areia natural) encontra-se em relação aos limites inferiores e superiores da zona utilizável e da zona ótima, conforme a NBR 7211:2022.

Figura 05 - Gráfico da faixa granulométrica do agregado miúdo



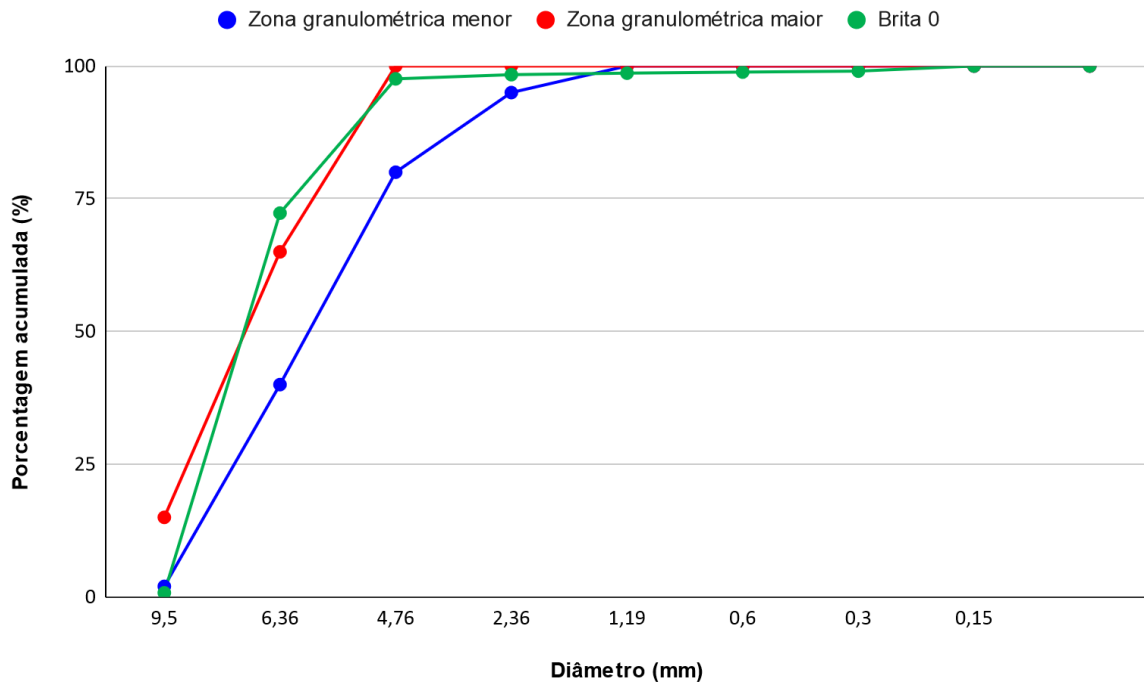
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O agregado miúdo apresentou um módulo de finura de 2,51 mm e um diâmetro máximo característico de 4,76 mm. Observa-se que a areia utilizada fica em grande parte dentro das zonas ótimas.

Utilizou-se como agregado graúdo a brita nº 0, material disponível e de grande abundância na região deste estudo, o que justifica seu emprego e

caracterização para obtenção de concretos fluidos.

Figura 06 - Gráfico da faixa granulométrica do agregado graúdo



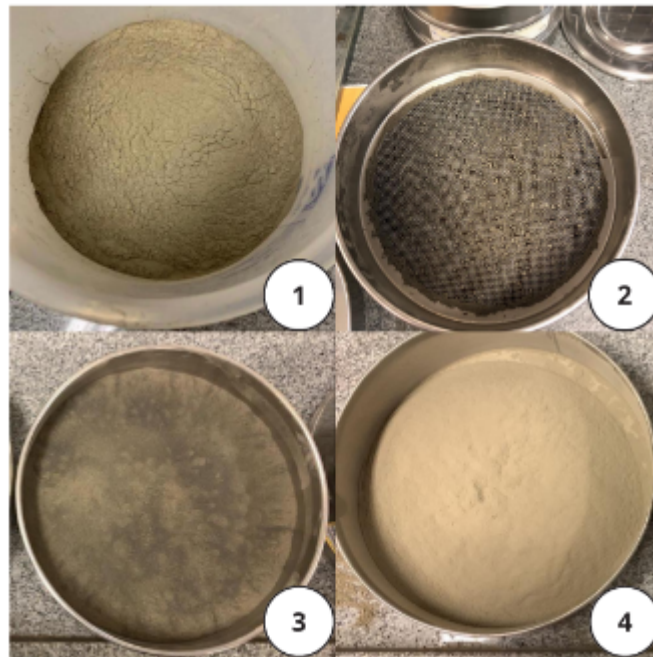
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A Figura 06 mostra a faixa granulométrica em que a brita encontra-se em relação a zona granulométrica menor e a zona granulométrica maior, conforme a NBR 7211:2009. O agregado graúdo apresentou um módulo de finura de 5,93 mm e um diâmetro máximo característico de 9,5 mm.

3.4 Resíduo de Britagem

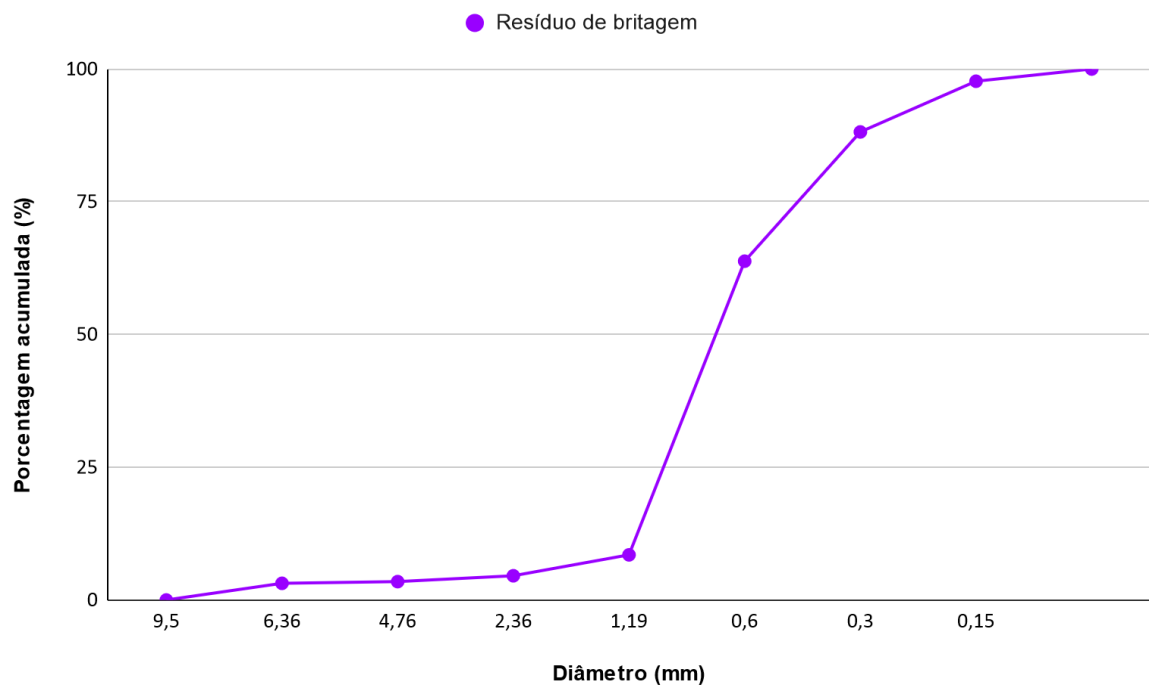
O resíduo de britagem utilizado foi adquirido em uma indústria de britagem da cidade de Palmitos, na região oeste de Santa Catarina. O mesmo passou pelo ensaio de granulometria, utilizando-se apenas do material mais fino, retido no fundo do conjunto da série normal de peneiras.

Figura 07 - Resíduo de britagem: (1) Amostra; (2) Material retido na peneira 1,2 mm; (3) Material retido na peneira 0,3 mm; (4) Material retido no fundo.



Fonte: A autora (2022).

Figura 08 - Gráfico da faixa granulométrica do resíduo de britagem



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A Figura 08 mostra a faixa granulométrica do resíduo de britagem, o mesmo

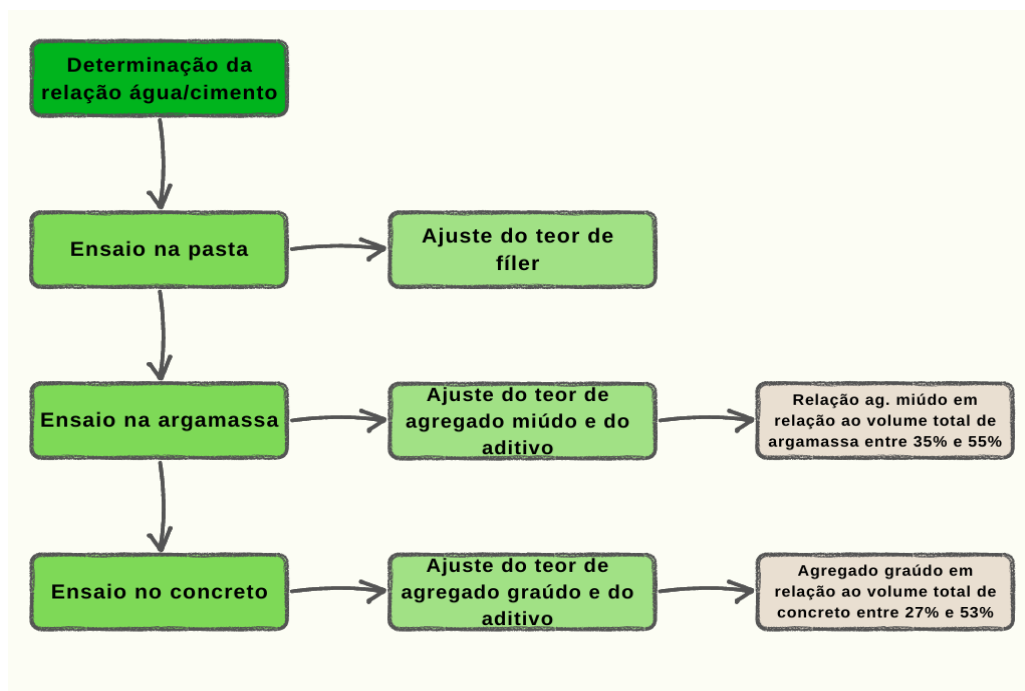
apresentou um módulo de finura de 2,66 mm e um diâmetro máximo característico de 6,36 mm.

3.5 Método de Dosagem

Para o estudo experimental que define os parâmetros dos estados endurecido e fresco do concreto, utilizou-se o método de dosagem REPETTE-MELO (MELO, 2005) com uma relação a/c igual a 0,50, com o objetivo de obter um concreto com resistência mecânica na faixa de 30 MPa e elevada fluidez em seu estado fresco.

Os concretos bombeáveis necessitam de elevada fluidez para que possam ser lançados a grandes alturas. Conforme o método REPETTE-MELO (MELO, 2005), a definição das proporções do concreto possui como princípio uma dada resistência à compressão. Em nenhuma das etapas do método é exigido um julgamento subjetivo da qualidade da mistura, por isso, o método se diferencia dos demais. Ensaio curtos e resultados quantitativos são a base para os ajustes dos elementos do concreto.

Figura 09 - Fluxograma de dosagem conforme o método REPETTE-MELO



Fonte: Adaptado de Melo (2005).

Segundo Melo (2005), a parcela de adição mineral precisa ter diâmetro inferior a 0,07 mm, os agregados miúdos precisam ter granulometria contínua e os agregados graúdos diâmetros até 10 mm. Deve-se levar em conta a necessidade de verificar a estabilidade da mistura, que não deve apresentar segregação, exsudação ou perdas de fluidez, tendo como parâmetro a proporção água/aglomerante.

O processo de dosagem apresentado pelo método dá prioridade ao ajuste do teor de aditivo superplastificante em todas as etapas da dosagem, pois o uso do aditivo evita problemas como a segregação e a exsudação caso o mesmo seja empregado de maneira inadequada.

3.6 Ensaio na Pasta

Conforme Aïtcin *et al.* (1994), nota-se a existência do denominado ponto de saturação, um teor máximo de aditivo capaz de promover o aumento da fluidez. O ponto de saturação pode ser determinado a partir de ensaios em pasta e argamassa. O procedimento envolve a variação do teor de aditivo, executando as medições em cada ponto. Quando o aumento no teor de aditivo não causa mais alterações significativas no resultado dos ensaios, a saturação ocorre.

O ensaio pelo Cone de Marsh visa realizar adições de 0,1% de aditivo para avaliar a sua compatibilidade com o cimento, e assim determinar a porcentagem ótima de saturação do aditivo superplastificante. Foram executados ensaios de compatibilidade com a relação a/c igual a 0,50, cimento CP II-Z-32 e o aditivo SP Silicon Premix 40205, para as porcentagens de substituição do cimento pelo resíduo de britagem de 0%, 5% e 10%. Os ensaios seguiram os parâmetros da NBR 7681-2:2013, que consistem em preencher o Cone de Marsh com (1800 ml +/-50 ml) e medir o tempo de escoamento de 1000 ml da pasta ensaiada.

Figura 10 - Ensaio pelo Cone de Marsh: (1) Início do ensaio; (2) Pipeta após o escoamento da pasta.



Fonte: A autora (2022).

A determinação do percentual ótimo de superplastificante, conforme metodologia proposta por Roncero (2000), ocorre com acréscimos de aditivo em 0,1%, até o instante da observação de exsudação da pasta ou ocorrência da variação no tempo de escoamento em intervalos consecutivos, menores que 1,0 segundo, para os tempos de escoamentos variando entre 5, 15 e 30 minutos.

O procedimento de mistura foi realizado em argamassadeira eletromecânica 5LTS, automática digital com controlador micro processado e movimento planetário para mistura de cimentos e argamassas, com cuba de 5 litros de capacidade e pá em aço, marca AMC Equipamentos.

Figura 11 - Pasta na argamassadeira



Fonte: A autora (2022).

A metodologia para a mistura da pasta foi adaptada de Wolenski (2010). No primeiro minuto o cimento e 90% da água foram misturados em velocidade V1. Os demais 10% da água com o aditivo foram adicionados lentamente e de forma constante ao longo de 30 segundos com a argamassadeira em movimento, após, por mais 30 segundos a mistura foi homogeneizada em velocidade V1. No terceiro minuto a argamassadeira foi desligada para a execução da limpeza do fundo da cuba e da pá. Para a homogeneização final da mistura, no quarto minuto, o processo foi realizado novamente em velocidade V1.

3.7 Ensaio na Argamassa

Para a fase Argamassa foi adotado o ensaio de abatimento de Kantro (mini-slump). O equipamento, proposto por Kantro (1980), consiste em um molde em forma de tronco de cone, com parâmetros de espalhamento para argamassas, definidos por Gomes (2002), entre 200 mm e 280 mm.

No ensaio, que originalmente foi desenvolvido para a caracterização de pastas, mas que devido à fluidez autores utilizam para argamassas, se verifica o diâmetro de espalhamento do material para avaliar sua fluidez (SILVA, 2016).

Conforme recomendações do método REPETTE-MELO (MELO, 2005), o teor de agregado miúdo varia entre 35% e 55% do volume total de argamassa, sendo as porcentagens de 40%, 42,5%, 45% e 47,5% testadas no presente trabalho para fins de definição do percentual ideal para a mistura. O desenvolvimento da formulação consistiu basicamente na verificação da fluidez e consistência da argamassa através do ensaio de Kantro.

Figura 12 - Início do ensaio de Kantro



Fonte: A autora (2022).

O processo de mistura da argamassa seguiu o descrito para a mistura da pasta, onde juntamente com o cimento foi adicionada a areia.

3.8 Ensaio no Concreto

Para a fase Concreto foi adotado o ensaio de abatimento (Slump Test) utilizando o tronco de Abrams. O Slump Test é um ensaio que avalia a trabalhabilidade e a fluidez do concreto no estado fresco, determinando se existe a presença de falha de concretagem, segregação, exsudação e vazios no concreto. A

NBR NM 67:1998 especifica os procedimentos e a aparelhagem do Slump Test, que incluem um molde de metal, haste de adensamento, placa de base, régua ou trena metálica, concha em seção U e colher de pedreiro.

De acordo com Tutikian (2004), o ACI não aconselhava o uso de misturas com abatimento maior que 175 mm até próximo da década de 70, pois a exsudação aumentava significativamente. Porém, com a vinda dos aditivos superplastificantes, foi possível dosar concretos fluidos com abatimento maior que 250 mm e com exsudação inexistente ou desprezível (TUTIKIAN, 2004).

Conforme recomendações do método REPETTE-MELO (MELO, 2005), o teor de agregado graúdo varia entre 27% e 53% do volume total de concreto, sendo os percentuais de 30%, 35%, 37,5% e 40% adotados neste trabalho.

Figura 13 - Slump Test para determinação do teor de agregado graúdo



Fonte: A autora (2022).

Executou-se 36 CPs a partir do traço definido pelo método de dosagem REPETTE-MELO (MELO, 2005), onde foram realizados traços com as porcentagens de substituição do cimento (CP II-Z-32) de 0%, 5% e 10%. Os corpos de prova seguiram as instruções da NBR 16886:2020, que estabelece o procedimento para a coleta e a preparação de amostras de concreto fresco.

Figura 14 - Moldes dos CPs de concreto com 5% e 10% de substituição



Fonte: A autora (2022).

Os CPs ficaram armazenados em tanque para cura submersa até as datas de rompimento, que realizaram-se em prensa servo controlada com capacidade máxima de 1.000 kN (*Intermetric iM Unique 2223*©), esta que foi calibrada na data de 27/10/2022 pela empresa SIMMETRO, conforme laudo técnico em posse do laboratório MATSOLO do IFSC - Campus São Carlos.

3.8.1 Ensaio de Controle do Concreto

No estado fresco, antes da moldagem dos CPs, realizou-se o ensaio de abatimento (Slump Test) no tronco de Abrams conforme a NBR NM 67:1998 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, com o objetivo de alcançar uma fluidez mínima de 20 cm.

Figura 15 - Ensaio de abatimento (Slump Test)



Fonte: A autora (2022).

No estado endurecido executou-se o ensaio de Compressão conforme descrito no item 4 da NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, onde realizaram-se a repetição de 3 CPs nas idades de 3, 7, 21 e 28 dias, com $\varnothing 10 \times 20$ cm.

Figura 16 - Ensaio de Compressão



Fonte: A autora (2022).

O objetivo foi verificar a resistência mecânica à compressão em idades iniciais e de cálculo, com a substituição parcial do cimento pelo resíduo de britagem.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

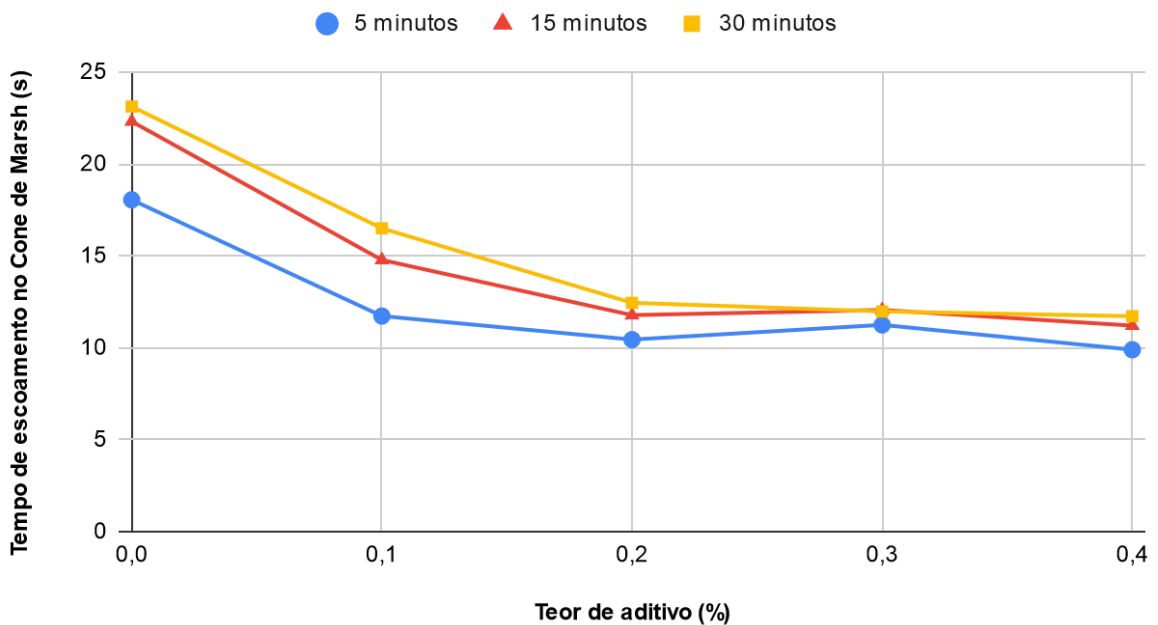
4.1 Pasta

Para a determinação do percentual de aditivo necessário para garantir fluidez à pasta, empregou-se o ensaio pelo Cone de Marsh. Em cada etapa do ensaio adicionou-se progressivamente 0,1% de aditivo, até a obtenção dos parâmetros de fluidez e trabalhabilidade sem a ocorrência de exsudação e segregação.

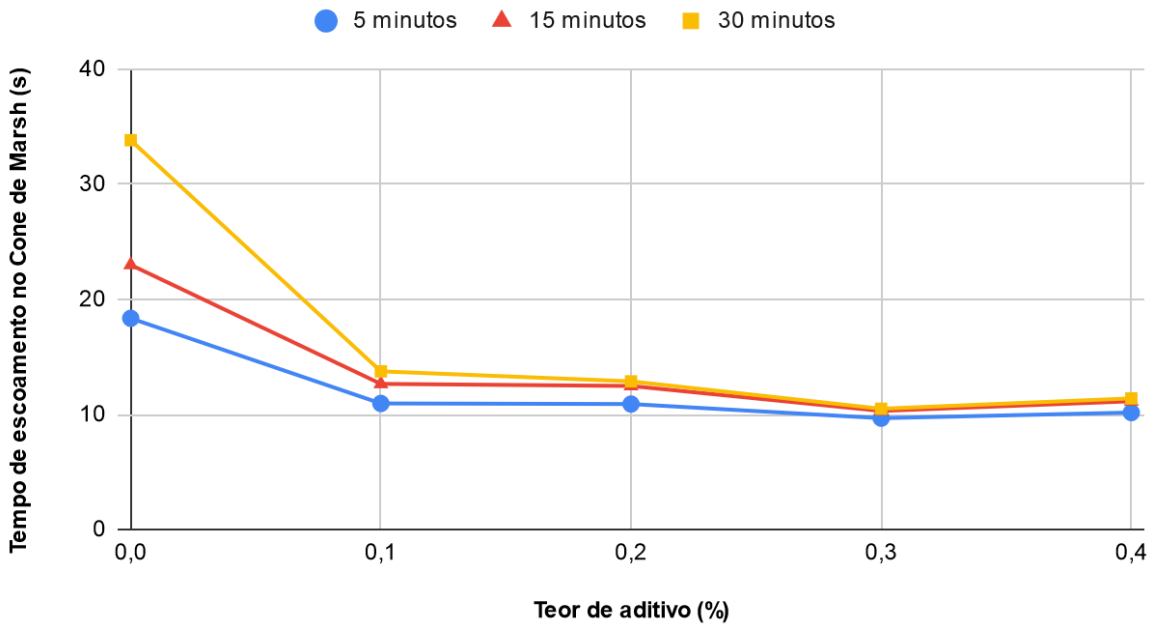
Nas Figuras 17, 18 e 19 são apresentados os resultados dos escoamentos pelo Cone de Marsh durante os intervalos de 5, 15 e 30 minutos, para as porcentagens de substituição do cimento pelo resíduo de britagem de 0%, 5% e 10%, respectivamente.

Figuras 17, 18 e 19 - Gráficos dos resultados dos ensaios de Cone de Marsh para 0%, 5% e 10% de substituição do cimento

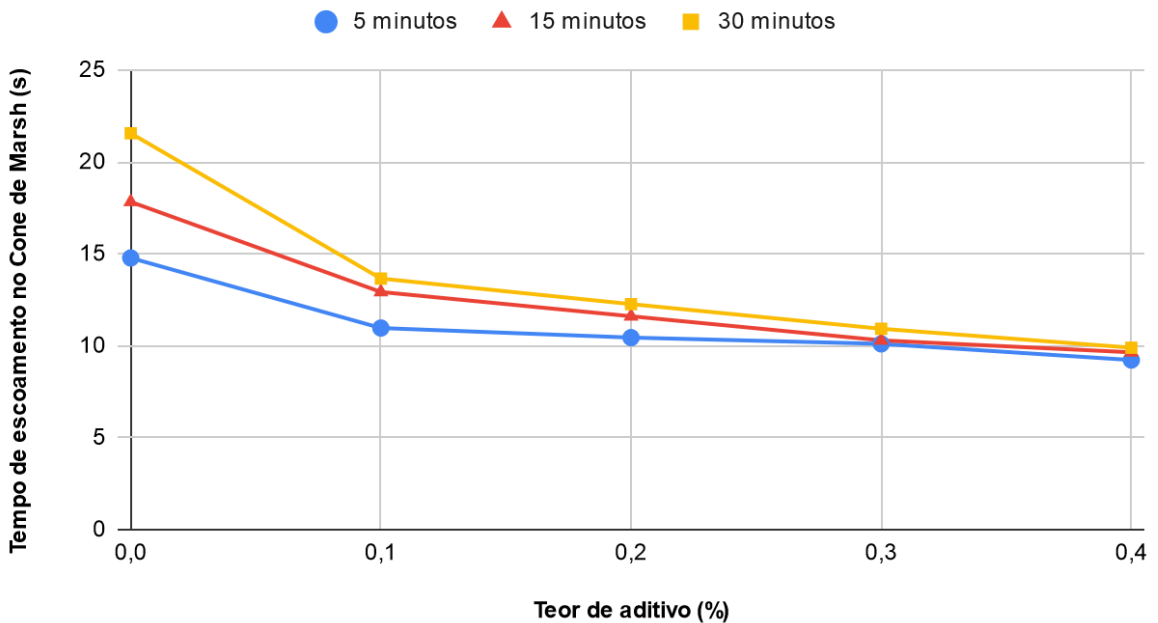
Ensaio de Cone de Marsh - 0% de resíduo de britagem



Ensaio de Cone de Marsh - 5% de resíduo de britagem



Ensaio de Cone de Marsh - 10% de resíduo de britagem



Fonte: Elaborados pela autora (2022).

Pela análise dos gráficos apresentados, pode-se observar um teor ótimo igual a 0,3%, notando-se que a substituição não interferiu no percentual ideal do aditivo SP.

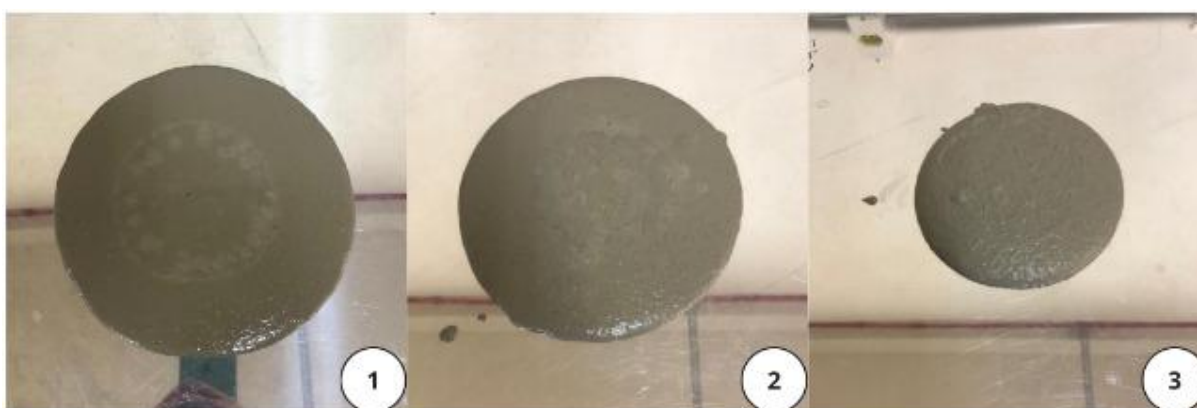
Por fim, verificou-se o atendimento aos parâmetros de trabalhabilidade para o aditivo SP e para a relação a/c utilizados, pois forneceram bons resultados de compatibilidade entre cimento/aditivo, além de proporcionar misturas fluidas, com coesão e sem a ocorrência de segregação e exsudação entre as partículas para o teor ótimo.

4.2 Argamassa

Para a determinação do percentual ótimo de agregado miúdo, empregou-se o ensaio de Kantro. Foram realizados ensaios com os percentuais de 40%, 42,5%, 45% e 47,5% de agregado miúdo. O primeiro ensaio com 40% foi realizado sem o peneiramento da areia, onde foi possível observar um leve indício de segregação da argamassa. Posteriormente repetiu-se o ensaio com a porcentagem de 40% e realizou-se os demais ensaios com a areia peneirada.

A Figura 20 sintetiza diferentes espalhamentos obtidos nos ensaios e a Tabela 04 demonstra os resultados de espalhamento para as porcentagens de agregado miúdo ensaiadas.

Figura 20 - Diferentes espalhamentos na argamassa: (1) Leve indício de segregação - ensaio com 40% sem peneiramento; (2) Teor ideal de areia - ensaio com 45%; (3) Elevado teor de areia - ensaio com 47,5%.



Fonte: A autora (2022).

Tabela 04 - Resultados de espalhamento pelo ensaio de Kantro para as porcentagens ensaiadas

Ensaio de Kantro		
% de areia	Espalhamento (mm)	
40%	237,01	234,00
42,50%	212,78	214,32
45%	202,81	202,92
47,50%	157,23	158,70
40% (areia não peneirada)	233,87	232,54

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Adotou-se 45% de agregado miúdo, com base no parâmetro mínimo de 200 mm de espalhamento e um percentual máximo de areia, visando o menor custo final do concreto.

4.3 Concreto

Para a determinação do percentual ótimo de agregado graúdo, empregou-se o ensaio de abatimento (Slump Test). Foram realizados ensaios com os percentuais de 30%, 35%, 37,5% e 40% de agregado graúdo. O primeiro ensaio com 30% apresentou elevado abatimento, 27 cm, sendo possível medir o espalhamento do mesmo. Neste sentido, optou-se por diminuir o teor de aditivo em 0,1%.

Os ensaios com 35%, 37,5% e 40% foram executados com 0,2% de aditivo e apresentaram abatimento de 24, 20 e 17 cm, respectivamente. A Figura 21 sintetiza diferentes abatimentos obtidos nos ensaios.

Figura 21 - Diferentes abatimentos no concreto: (1) Elevado teor de aditivo - ensaio com 30%; (2) Teor ideal de brita - ensaio com 35%; (3) Elevado teor de brita - ensaio com 37,5%.



Fonte: A autora (2022).

Adotou-se 35% de agregado graúdo, tendo em vista o resultado de abatimento maior do que o do objetivo (fluidez mínima de 20 cm), bem como um percentual intermediário de brita, para não interferir significativamente no custo final do concreto.

A partir das porcentagens de aditivo, agregado miúdo e agregado graúdo adotadas, foi definido o traço do concreto de referência (0%). A Tabela 05 demonstra a quantidade dos materiais por metro cúbico de concreto.

Tabela 05 - Traços por metro cúbico

Identificação	Cimento (kg)	Resíduo de britagem (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	Aditivo SP (kg)
CR	428,43	0,00	1022,00	763,43	221,82	0,857
C05	407,01	21,42	1022,00	763,43	221,82	0,857
C10	385,58	42,84	1022,00	763,43	221,82	0,857

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Após a definição do traço de referência foram determinados os traços com as porcentagens de substituição do cimento por resíduo de britagem de 5% e 10%.

4.3.1 Concreto no Estado Fresco e no Estado Endurecido

No estado fresco realizou-se o ensaio de abatimento (Slump Test), em que os resultados apresentaram valores semelhantes. O concreto de referência apresentou abatimento de 24 cm, e os concretos com 5% e 10% de substituição apresentaram abatimento de 24,5 e 24 cm, respectivamente.

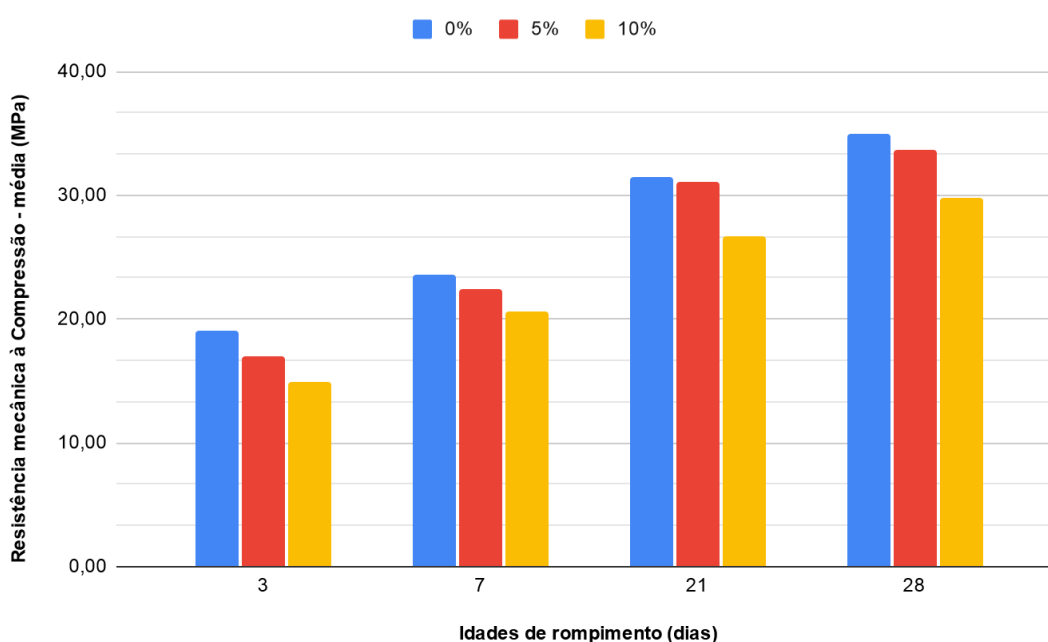
No estado endurecido realizou-se o ensaio de Compressão. A fim de sintetizar os resultados, na sequência têm-se os valores de resistência média obtidos para cada uma das porcentagens de substituição parcial do cimento nas idades estabelecidas. Na Tabela 06 e na Figura 22 estão agrupados os resultados de resistência à compressão média.

Tabela 06 - Síntese dos parâmetros dos concretos no estado endurecido

Idade (dias)	Resistência mecânica à Compressão (MPa) - média		
	0%	5%	10%
3	19,00	16,93	14,87
7	23,60	22,37	20,60
21	31,43	31,03	26,73
28	35,00	33,63	29,80

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 22 - Gráfico dos parâmetros dos concretos no estado endurecido



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Após calculada a média de resistência dos CPs produzidos sem resíduo de britagem obteve-se 19,00 MPa de resistência à compressão após 3 dias, 23,60 MPa após 7 dias, 31,43 MPa após 21 dias e 35,00 MPa após 28 dias da confecção. Da mesma forma, os CPs com substituição de 5% do cimento obtiveram média de 16,93, 22,37, 31,03 e 33,63 MPa após 3, 7, 21 e 28 dias, respectivamente.

A média de resistência à compressão dos CPs com substituição de 10% do cimento apresentou uma queda em relação aos outros dois traços. Aos 3 dias a média de resistência encontrada foi de 14,87 MPa, aos 7 dias 20,60 MPa, aos 21 dias 26,73 MPa e após 28 dias a resistência obtida foi de 29,80 MPa.

Nobrega (2014), em seu trabalho e estudo, que também envolveu a substituição parcial do cimento pelo resíduo de britagem, também obteve resistências à compressão inferiores nas amostras com substituição de 10% em relação às amostras sem substituição.

A partir dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias calculou-se a estimativa dos valores de rigidez (módulo de elasticidade) de maneira teórica por meio da expressão proposta pela NBR 6118:2014: $E_{ci} = \alpha E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$. Para αE utilizou-se o valor de 1,2, conforme o tipo de agregado. Na Tabela 07 estão apresentados os módulos de elasticidade dos concretos.

Tabela 07 - Valores de rigidez dos concretos

Módulo de Elasticidade	
% de substituição	Eci (MPa)
0%	39756,06
5%	38972,14
10%	36684,06

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.3.2 Análise de Ecoeficiência

Campos *et al.* (2022) adotou os fatores de emissão de CO₂ em kg/m³, dados pelo consumo de cada material: Cimento Portland: 0,863 kg/m³; aditivo SP: 0,0016 kg/m³; brita nº 0: 0,00155 kg/m³; areia: 0,0016 kg/m³. A análise de ecoeficiência dos concretos executados considerou os dados acima. Na Tabela 08 estão as emissões

de CO₂ em kg/m³ para cada porcentagem de substituição do cimento.

Tabela 08 - Emissões de CO₂ em cada traço

Id	Cimento (kg/m ³)	Resíduo de britagem (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	CO ₂ total (kg/m ³)	CO ₂ por MPa aos 28 dias (kg/m ³ /MPa)
CR	369,73	-	1,58	1,22	0,0014	372,54	10,64
C05	351,25	0,00	1,58	1,22	0,0014	354,05	10,53
C10	332,76	0,00	1,58	1,22	0,0014	335,57	11,26

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Pode-se observar que o traço com substituição de 10% emite os menores índices de CO₂ por m³ de concreto, o que se deve ao fato de que as emissões de CO₂ estão diretamente relacionadas com a quantidade de utilização do cimento. Porém, com base nas emissões de CO₂ aliadas com a média de resistência à compressão aos 28 dias é possível eleger o concreto com a substituição de 5% como sendo o mais ecoeficiente, pois é o traço que menos emite CO₂ por MPa aos 28 dias.

5 CONCLUSÃO

As conclusões do trabalho são abaixo elencadas:

- a resistência à compressão dos CPs com 5% de substituição foi 3,90% menor em relação aos CPs sem substituição. Da mesma forma, a resistência à compressão dos CPs com 10% de substituição foi 14,86% menor em relação aos CPs sem substituição. Nota-se que a razão pela qual a resistência diminui quando o cimento é substituído pelo resíduo de britagem é a diminuição nas propriedades cimentícias da mistura;
- os traços apresentaram abatimento médio de 24,17 cm, superior ao objetivo de fluidez (20 cm). Esse valor de abatimento é suficiente para atender concretagens bombeadas em obras tradicionais, porém para edifícios com elevadas alturas é necessário executar um estudo aprofundado para definir as características ideais do concreto a ser utilizado;
- comparado ao traço de referência (0% de substituição), o traço com a utilização de 5% resulta em concretos fluidos com redução de 18,49 kg/m³ (4,96%) de emissões de CO₂. Já o traço com a utilização de 10% resulta na redução de 36,97 kg/m³ (9,92%).

Praticamente todos os objetivos do trabalho foram alcançados, o único traço de concreto que não atingiu média de resistência de 30 MPa foi o com 10% de substituição, porém alcançou um valor muito próximo (29,80 MPa). Portanto, pode-se concluir que os concretos fluidos produzidos com resíduo de britagem demonstraram viabilidade técnica e sustentável. Como sugestão para outros estudos aconselha-se a aplicação de diferentes resíduos industriais em substituição ou adição ao Cimento Portland, e a avaliação de outras propriedades mecânicas do concreto, como por exemplo, a resistência à tração.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Boletim Técnico: Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7ª ed. São Paulo, 2002.

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. **Superplasticized: how they work and why they occasionally don't**. In: Concrete International, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2001 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2022 - Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7681-2:2013 - Calda de cimento para injeção - Parte 2: Determinação do índice de fluidez e da vida útil — Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16886:2020 - Concreto - Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:1996 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ALMEIDA, L. C. Concreto. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/>. Acesso em: 16 mai. 2022.

ALMEIDA, S. L. M.; SILVA, V. S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, 2005, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: 2005.

BASTOS, S. R. B. Uso de areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção e concretos convencionais. In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, 2005, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: 2005.

BERTOLINO, L. C.; PALERMO, N.; BERTOLINO, A. V. F. A. Geologia, Capítulo 4, **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, 2012.

BEZERRA, A. A. S. S.; BARBOSA, A. A. C. D.; BARBOSA, A. A. C. D.; VELOSO, A. A.; SANTOS, L. P. Estudo da viabilidade da utilização do resíduo do pó de pedra como agregado miúdo em concreto. *In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL*, 2017, Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande: 2017.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. 2006. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

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.

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental**. 2015. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CHATHAM HOUSE. Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. **Chatham House - International Affairs Think Tank**, 2018. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

DAIBERT, J. D. & MENDONÇA, A. V. R. M. de. **Equipamentos e Instalações para Construção Civil**. 1ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2014.

GATES, B. Have you hugged a concrete pillar today?. **GatesNotes**, 2014. Disponível em: <https://www.gatesnotes.com/>. Acesso em: 25 abr. 2022.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. Tese de Doutorado. Barcelona, 139 p., 2002.

HENDRIKS, C. A.; WORREL, E. de JAGER, D.; BLOK, K.; RIME, P. **Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry**. *Greenhouse Gas R&D*. 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. The Physical Science Basis. IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland, 2021.

JALALI, S. & TORGAL, P.F. **Considerações sobre a sustentabilidade dos materiais de construção**. *Engenharia e Vida*, 2008.

KANTRO, D.L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - A miniature slump test. *Cement, Concrete anual Aggregates*, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980. Disponível em: <https://www.astm.org/>. Acesso em: 18 out. 2022.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, 2012.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan-jun. 2012. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/>. Acesso em: 16 mai. 2022.

MEHTA, P. K. & MALHOTRA, V. M. **Pozzolanic and Cementitious Materials – Advances in concrete technology**. Amsterdam, 1996.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, K.A. **Consideração à Dosagem de Concreto Auto-Adensável com Adição de Fíler Calcário**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). 180 p., Florianópolis, Santa Catarina, 2005.

NEVILLE, A. M. & BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.

NOBREGA, A. K. C, *et al.* Caracterização do resíduo de pó de pedra ornamental adicionado à argamassa em substituição parcial ao cimento. *In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA (COBEQ)*, Florianópolis: 2014.

REPETTE, W.L. **Self-compacting concrete – a labor cost evaluation when used to replace traditional concrete in building construction**. *In: 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Ghent, Bélgica, 2007.

RODGERS, L. Aquecimento global: a gigantesca fonte de CO₂ que está por toda parte, mas você talvez não saiba. **BBC News Brasil**, 17 dez. 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/>. Acesso em: 16 mai. 2022.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes**. Tese (Doutorado) - Universidade Politècnica de Barcelona. Barcelona, Espanha, 2000.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ FILHO, A. O. Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações. *In: Encontro da ANPPAS - Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade*, 2., 2004, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: 2004.

SÁ, M. V. V. A. **Influência da substituição da areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SIEG, A. P. A., WOLENSKI, A. R. V., FACCIN, C. L., SOUZA, S. A. S., BACHENDORF, V. L. Avaliação da compatibilidade cimento/aditivo a partir do ensaio de Cone de Marsh visando a elaboração de concretos auto-adensáveis. *In*: 59º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: IBRACON, 2017.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **SNIC 50 Anos**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: www.snic.org.br. Acesso em: 16 mai. 2022.

SILVA, S. H. L. **Desenvolvimento de formulação de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná (UFPR). 117 p., Curitiba, Paraná, 2016.

TUTIKIAN, B. F. **Métodos para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 148 p., Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2004.

WOLENSKI, A. R. V. **Estudos teórico e experimental do concreto auto-adensável frente ao emprego do cimento CP IV e da adição de Metacaulim**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Mato Grosso (UNEMAT). 150 p., Sinop, Mato Grosso, 2010.