

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

FELIPE CARLOS DE SOUZA

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO CONCRETO COM A  
ADIÇÃO DE PÓ DE BRITA

Joinville

2019

FELIPE CARLOS DE SOUZA

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO CONCRETO COM A  
ADIÇÃO DE PÓ DE BRITA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Me. Valéria Bennack

Joinville

2019

FELIPE CARLOS DE SOUZA

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO CONCRETO COM A  
ADIÇÃO DE PÓ DE BRITA.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Me. Valéria Bennack  
Orientadora  
Presidente

---

Eng. Me. Maria Rosane Vilpert Vitali  
Membro  
Universidade Católica

---

Prof. Me. Juliana Cristina Frankowiak  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a minha mãe Anita Maria Schmitt, pai José Carlos de Souza e meus irmãos Mateus Souza, Carlos Alberto e Luana Souza por todo o apoio e paciência em todos esses anos.

À minha orientadora Valéria Bennack não só por todas as dicas e orientações deste trabalho, mas também pela paciência e dedicação em toda a graduação.

Aos integrantes do InfraTEC, Igor Oliveira e Vinicius Krauser que me auxiliaram nos ensaios feitos em laboratório.

Aos amigos Diego Rebelo, Victo Hugo Dagnoni, Gustavo Ramos, Felipe Hirata e João Daniel que me acompanharam e evoluíram comigo ao longo do curso, contribuindo para minha graduação e tornando o ambiente de estudos mais fácil e prazeroso.

Aos amigos Gabriela Heinzen, Aline Achy, Geandle Fagundes e Bianca Gabardo que apesar de conhecer ao final do curso se tornaram grandes amigos e tiveram grande relevância em minha graduação, ajudando e incentivando em todos os momentos.

Aos amigos que ganhei na faculdade Fernando Galvan, Lucas Viana, Nicolas Almeida, Renato Finoteli, Gabriel Prado, Cesar Augusto, Leonardo Hinckel, Gabriela Dutra, Géssica Pedott, Natália Morales e Rafaela Scariot, por toda a parceria envolvida e por terem tornado a vida ao longo dos anos da graduação melhor e mais fácil.

Agradeço ao Luiz Guilherme e Arthur Dutra amigos que tive a oportunidade de morar durante esses anos e que me ajudaram em momentos essenciais para minha graduação.

A todos que de alguma forma me ajudaram e contribuíram para a minha formação.

## RESUMO

Com o crescente aumento da fabricação do concreto convencional, necessita-se de uma maior produção de agregados, como a areia, agregado miúdo mais utilizado para a produção de concreto, onde sua extração tem influências diretas na natureza. A utilização do pó de brita para a fabricação de concreto pode ser uma alternativa interessante, visto que a areia está se tornando um produto cada vez mais escasso e custoso, além dos danos ambientais causados pela utilização desse agregado. O presente trabalho apresenta um estudo sobre a substituição total e parcial nas porcentagens de 10, 25, 50, 75% do agregado proveniente da britagem de rochas (pó de brita) como agregado miúdo, no lugar da areia natural. Foram realizados ensaios de consistência, resistência à compressão axial, porosidade aberta, absorção de água e densidade relativa do concreto. Os resultados obtidos apresentaram uma melhora na resistência à compressão e relativa diminuição da trabalhabilidade, demonstrando possibilidade de utilização desse material.

Palavras-chave: Pó de brita; concreto; agregado.

## ABSTRACT

With the increasing production of conventional concrete, a larger production of aggregates is needed, such as sand, the smallest aggregate used for concrete production, where its extraction has direct influences on nature. The use of crushed stone powder can be an interesting alternative, since sand is becoming an increasingly scarce and costly product, besides the environmental damages caused by the use of this aggregate. The present work presents a study about the total and partial substitution in the percentages of 10, 25, 50, 75% of the aggregate coming from rock crushing (crushed stone) as a small aggregate, instead of natural sand. Tests of consistency, axial compressive strength, open porosity, water absorption and relative density of concrete were performed. The results showed an improvement in the compressive strength and a relative decrease in the workability, demonstrating the possibility of using this material.

**Keywords:** Stone powder; concrete; aggregate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.....	19
Figura 2: Relação entre porosidade e resistência.....	20
Figura 3 - Fluxograma do processo de britagem. ....	28
Figura 4 - Materiais utilizados: Pó de brita (a); Cimento (b); Areia (c); Brita 0 (d); Água (e). .....	30
Figura 5 - Fluxograma metodológico. ....	32
Figura 6 - Massa mínima por amostra de ensaio. ....	36
Figura 7 - Conjunto de peneiras dispostas no agitador mecânico. ....	37
Figura 8 – material saturado com superfície seca após a retirada do molde. ....	38
Figura 9 – Transparência da água antes e após o processo de lavagem. ....	40
Figura 10 - Tabela de avaliação visual dos graus de esfericidade e arredondamento. ....	42
Figura 11 - Moldes de corpo-de-prova após concretagem. ....	43
Figura 12 - Posicionamento do molde ao lado do corpo-de-prova.....	44
Figura 13 - Areia (a) e pó de brita (b) retidos na peneira 1.18mm vistos pelo microscópio em um aumento de 3.2x. ....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características utilizadas para a determinação da dosagem.....	33
Quadro 2 - Porcentagem de água a ser empregada sobre a quantidade de materiais secos.....	33
Quadro 3 - Determinação do teor de argamassa.....	34
Quadro 4 - Traço obtido pelo método CIENTEC.....	35
Quadro 5 - Quantidade de material utilizado para ensaio. ....	39
Quadro 6 - Dosagem obtida pelo método CIENTEC.....	46
Quadro 7 - Formulações utilizadas.....	46
Quadro 8 - Formulação com teor de a/c corrigido.....	47
Quadro 9 - Características do agregado.....	47
Quadro 10 - Massa específica dos agregados miúdos. ....	49
Quadro 11 - Absorção de água dos agregados miúdos.....	49
Quadro 12 - Teor de material pulverulento dos agregados miúdos.....	49
Quadro 13 - Grau de esfericidade dos grãos. ....	50
Quadro 14 - Grau de arredondamento dos grãos.....	50
Quadro 15 - Abatimento para as diferentes porcentagens de substituição.....	51
Quadro 16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	52
Quadro 17 - Estimativa da resistência à compressão aos 28 dias.....	53
Quadro 18 - Porosidade aberta média.....	55
Quadro 19 - Porcentagem de absorção de água média.....	56
Quadro 20 - Densidade relativa média. ....	57



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Propriedade do concreto influenciadas pelas características do agregado. ....	23
Tabela 2 - Limites de distribuição granulométrica de agregado miúdo. ....	24
Tabela 3: Classificação dos estágios de britagem. ....	27
Tabela 4 - Propriedades do cimento CPV ARI.....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Água/Cimento
Ar	Areia
Br	Brita
cm	Centímetro
CP	Corpo-de-prova
CPVARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DMC	Dimensão Máxima Característica
g	Gramas
Kg	Quilograma
m	Massa
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
SC	Santa Catarina
µm	Micrômetros

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
<b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1. CONCRETO.....	16
<b>2.1.1 Propriedades do concreto .....</b>	<b>17</b>
<u>2.1.1.1 Trabalhabilidade .....</u>	<u>17</u>
<u>2.1.1.2 Resistência à compressão .....</u>	<u>18</u>
<u>2.1.1.3 Porosidade .....</u>	<u>19</u>
<u>2.1.1.4 Permeabilidade .....</u>	<u>20</u>
2.2 AGREGADOS .....	21
<b>2.2.1 Características dos agregados .....</b>	<b>22</b>
<u>2.2.1.1 Composição granulométrica .....</u>	<u>23</u>
<u>2.2.1.2 Textura superficial e forma das partículas.....</u>	<u>25</u>
<b>2.2.2 Agregado miúdo – Areia natural .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3 Agregado miúdo - Pó de brita .....</b>	<b>26</b>
<u>2.2.3.1 Processo de obtenção do pó de brita.....</u>	<u>27</u>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1 MATERIAIS .....	30
<b>3.1.1 Cimento .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.2 Agregados .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.3 Água .....</b>	<b>31</b>
3.2 MÉTODOS.....	31
<b>3.2.1 Dosagem referência .....</b>	<b>32</b>
<u>3.2.1.1 Relação água/cimento.....</u>	<u>33</u>
<u>3.2.1.2 Traço em massa .....</u>	<u>33</u>
<u>3.2.1.3 Cálculo do teor de cimento .....</u>	<u>34</u>
<u>3.2.1.4 Cálculo do teor de areia .....</u>	<u>34</u>
<u>3.2.1.5 Cálculo do teor de agregado graúdo .....</u>	<u>35</u>
<u>3.2.1.6 Definição da dosagem unitária .....</u>	<u>35</u>
<b>3.2.2 Formulações .....</b>	<b>35</b>

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	35
<b>3.3.1 Granulometria .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.2 Absorção de água.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.3 Teor de material pulverulento.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3.4 Massa específica.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.5 Análise da forma dos grãos.....</b>	<b>41</b>
3.4 EXECUÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA .....	42
3.5 TRABALHABILIDADE .....	43
3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	44
3.7 ÍNDICES FÍSICOS .....	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
4.1 DOSAGEM REFERÊNCIA.....	46
4.2 GRANULOMETRIA .....	47
4.3 MASSA ESPECÍFICA .....	48
4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	49
4.5 MATERIAL PULVERULENTO .....	49
4.6 ANÁLISE DA FORMA DOS GRÃOS .....	49
4.7 TRABALHABILIDADE .....	51
4.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	52
4.9 ÍNDICES FÍSICOS .....	54
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é um produto extremamente comum e pode ser encontrado em diversos tipos de obras, desde as de pequeno porte, como residências e edifícios, até as grandes obras, como usinas hidroelétricas e nucleares. Além do que, a crescente demanda do mercado da engenharia civil faz com que se tenha a necessidade do aumento da produção de concreto (IBRACON, 2009).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2013), no período entre 2005 e 2012, no Brasil, o aumento de concreto preparado em centrais foi de 180%, e que os principais influenciadores do crescimento dessa demanda ocorreu em obras de infraestrutura e habitações.

O concreto convencional é composto por aglomerante, brita, areia e água, e o ligante mais importante utilizado pela indústria é o cimento Portland (ARAUJO, RODRIGUES e FREITAS, 2000). O aumento da necessidade de produção do concreto gera influências diretas na natureza, visto que, para Dutra (2013), a maior parte do agregado miúdo utilizado na construção civil para a mistura de concreto, ainda é a areia.

Segundo Almeida e Silva (2005), a areia utilizada na construção civil, tem como origem em sua maior parte a mineração de leitos e rios, o que representa 90% da produção brasileira.

A remoção desordenada de areia dos leitos de rios provoca impactos negativos durante e após a retirada de areia, de acordo com Lelles *et al.* (2005), incluindo a interferência na velocidade e direção dos rios, alteração da calha original dos cursos d'água, depreciação da qualidade física, química e biológica e indução a uma instabilidade nos ambientes ribeirinhos.

Além disso, há problemas quanto à logística desse material, considerando que a distancia das jazidas de areia pode acarretar em um aumento do custo final do produto, visto que o transporte representa cerca de 2/3 do valor final no preço da areia (LELLES *et al.*, 2005).

A necessidade de tornar o concreto cada vez mais sustentável, sem aumentar o seu custo e sem perder as características físicas e químicas, faz com que de forma crescente, a indústria procure novas tecnologias e novos processos de elaboração de concreto, agregado a isso também há uma legislação cada vez mais restritiva quanto à utilização de recursos naturais (SILVA, DEMETRIO e DEMETRIO, 2015).

Com foco na sustentabilidade, estudos foram realizados, utilizando o pó de brita como adição ao concreto, sendo que, Rodrigues (2002) apud Almeida de Sá (2006), relatam que o

pó de brita é utilizado em larga escala nos Estados Unidos, África do Sul e diversos países da Europa, em blocos de concreto, pré-moldados, concreto compactado com rolo, base e sub base asfáltica.

De acordo com Menossi *et al.* (2010), o pó de brita não possui destinação definida e permanece estocado nos pátios de pedreiras; além da alteração da paisagem, pode gerar impactos ambientais, como obstrução de canais de drenagem e assoreamento dos rios, quando carregados pela chuva.

A questão ambiental, também está diretamente relacionada, principalmente quanto à diminuição do consumo de areia na construção civil, reduzindo os impactos ambientais causados pela extração de matéria-prima.

Este trabalho pretende através de alguns ensaios físicos e mecânicos realizados no laboratório interdisciplinar de Construção Sustentável, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, obter resultados que identifiquem a validade da aplicação da substituição da areia pelo pó de brita para a produção de concreto.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento do concreto no estado fresco e endurecido com a substituição da areia pelo pó de brita em diferentes porcentagens.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os agregados (granulometria, absorção de água, massa específica, teor de material pulverulento e análise da forma do grão);
- Definir a dosagem referência;
- Elaborar os corpos-de-prova (concreto referência e substituições parciais de areia por pó de brita);
- Realizar o ensaio de consistência do concreto;
- Realizar os ensaios de resistência à compressão axial;
- Determinar índices físicos (porosidade aberta, absorção de água e densidade relativa);
- Analisar a viabilidade técnica da substituição.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. CONCRETO

De acordo com Neville e Brooks (2013) o concreto pode ser definido em um sentido mais amplo, como qualquer produto ou massa produzido a partir de um meio cimentante. Os autores ainda dizem que o concreto convencional é produto resultante do endurecimento da mistura de agregados, cimento e água quando utilizado em proporções adequadas. Ainda, segundo Mehta e Monteiro (2008), é normalmente produzido com a mistura de Cimento Portland, areia, brita e água.

Petrucci (1998) define o concreto como sendo um material oriundo da mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes a água que, quando recém-misturado, deve oferecer condições de plasticidade que facilitem as operações de manuseio indispensáveis ao lançamento nas formas, adquirindo com o tempo, coesão e resistência.

Para Neville e Brooks (2013) existem três possibilidades para a relação entre os constituintes do concreto, a primeira no meio cimentício, os produtos da hidratação do cimento são considerados como sendo o principal material de construção. Na segunda considera o agregado graúdo como uma espécie de bloco de alvenaria unidos pela mistura de cimento hidratado e agregado miúdo. A terceira é o entendimento que o concreto possui duas fases: a pasta de cimento hidratado e os agregados, e como resultado, as propriedades são regidas por essas duas fases, bem como a interface entre elas.

Quanto à resistência do concreto, Mehta e Monteiro (2008) dividem em três categorias, com base na resistência à compressão:

- Concreto de baixa resistência: menos de 20 MPa;
- Concreto de resistência moderada: de 20 MPa a 40 MPa;
- Concreto de alta resistência: mais de 40 MPa.

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto de moderada resistência, chamado de concreto normal ou comum, é utilizado para a maioria das obras estruturais, deixando a aplicação de concreto de alta resistência apenas para aplicações especiais.

## 2.1.1 Propriedades do concreto

### 2.1.1.1 Trabalhabilidade

De acordo com Duran e Fracaro (2011) trabalhabilidade é a combinação de consistência, coesão e homogeneidade durante o espaço de tempo em que o concreto permanece plástico. Neville e Brooks (2013) definem como a quantidade de energia necessária para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto buscando a obtenção do adensamento total.

Ainda para Neville e Brooks (2013), os principais fatores que interagem com a trabalhabilidade são: o tipo e a granulometria dos agregados, a relação agregado/cimento, a presença de aditivos, a finura do cimento, o tempo e a temperatura, porém, o mais importante fator influenciador é a água na mistura. Entre os problemas causados na elaboração do concreto, pode-se citar a falta de coesão, que pode ser descrita como a resistência a exsudação e segregação do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Neville e Brooks (2013) descrevem que “segregação pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea de modo que sua distribuição não seja mais uniforme” ainda complementam que no concreto, essa separação pode ocorrer pelo deslizamento das partículas maiores, assentando mais que as partículas finas, ou pela separação da pasta de cimento da mistura.

A exsudação é uma forma de segregação, na qual a água da mistura tende a migrar para a superfície do concreto, devido à incapacidade da retenção da água por parte dos constituintes sólidos quando são assentados em direção ao fundo (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Lodi (2006), diz que a maior parte dos métodos que medem a trabalhabilidade, na realidade restringem-se a medir a consistência, os mesmos se baseiam na medida de deformação que é causada a uma massa de concreto fresco a partir de uma aplicação de uma força, ou energia determinada.

No Brasil, a medida de consistência do estado fresco do concreto é determinada pelo ensaio denominado de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) e segue a norma NBR NM 67 (1998) da ABNT.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a trabalhabilidade é uma das características-chave para a capacidade de execução adequada de uma construção, visto que se o concreto



produzido não tiver condições de ser facilmente lançado ou plenamente adensado, provavelmente não atingirá a resistência e a durabilidade esperada.

#### 2.1.1.2 Resistência à compressão

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a resistência é a medida da quantidade de tensão que um determinado material suporta para seu rompimento, ou seja, sua capacidade de suportar a tensão geradora de uma deformação no elemento.

A resistência à compressão normalmente é considerada como a propriedade mais importante do concreto, visto que está diretamente ligada à estrutura da pasta de cimento, ainda que em determinadas situações existam outras características que podem ser mais relevantes quando comparadas à resistência à compressão, sendo elas, a durabilidade, a impermeabilidade e a estabilidade de volume (NEVILLE e BROOKS, 2013).

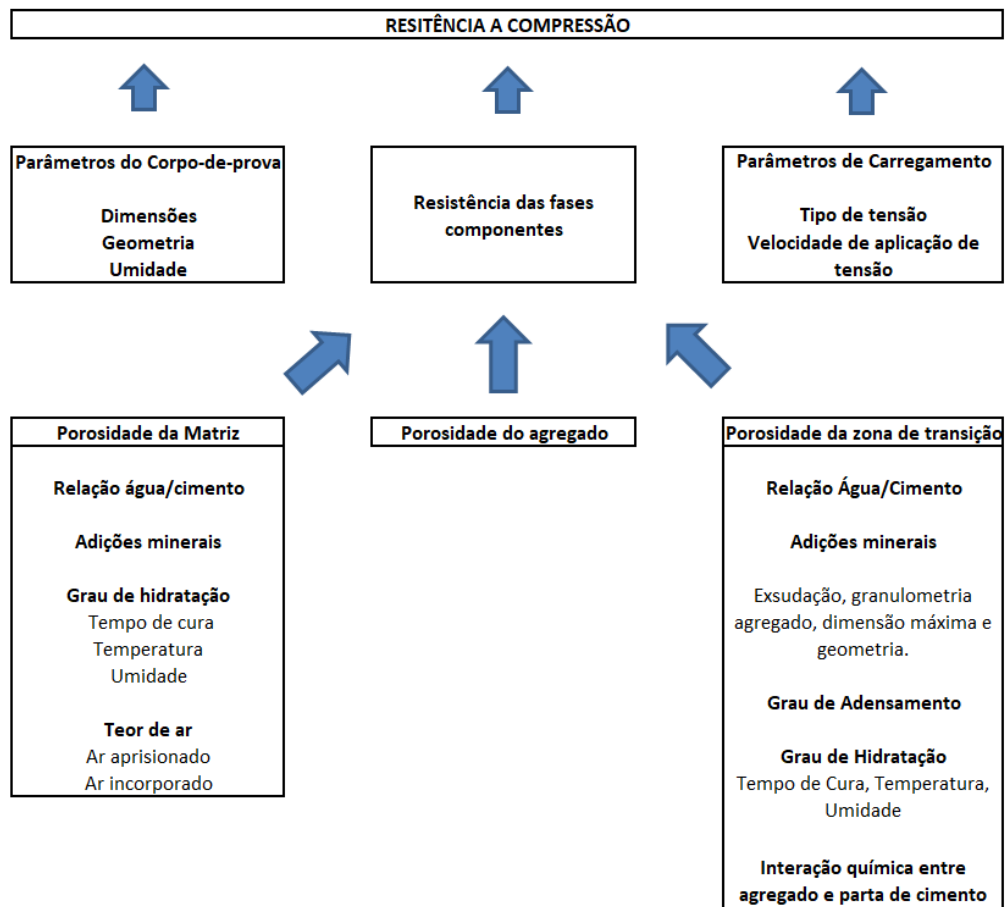
Para Mehta e Monteiro (2008) a resistência à compressão no concreto é normalmente especificada, pois o ensaio é relativamente fácil quando comparado a outros ensaios, além disso, outras propriedades do concreto, como módulo de elasticidade, impermeabilidade e resistência a intempéries podem ser deduzidas a partir dos dados de resistência à compressão.

Helene e Terzian (1993) citam que existem vários fatores que interferem na resistência à compressão do concreto, como a heterogeneidade dos materiais, a variabilidade do proporcionamento destes materiais, a qualidade e a operação dos equipamentos de dosagem e mistura e as operações de ensaio e controle.

Para Mehta e Monteiro (2008) a resposta do concreto às tensões aplicadas, não depende apenas do tipo de tensão, mas também da combinação de vários fatores que afetam a porosidade do concreto, tais como, as características e proporções dos materiais que formam o traço do concreto, o grau de compactação e as condições de cura. Por afetar a porosidade da matriz da pasta de cimento e a zona de transição na interface entre matriz e agregado graúdo, a relação entre água/cimento e porosidade é o fator mais importante relacionado à resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Lodi (2006) a resistência à compressão é um parâmetro que está sujeito a variações decorrentes das etapas de elaboração e moldagem. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência é regida por diversos fatores que a influencia, à Figura 1 apresenta uma correlação de alguns dos fatores preponderantes no resultado final da resistência de um concreto.

Figura 1 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

### 2.1.1.3 Porosidade

De acordo com Lodi (2006) porosidade é a relação entre o volume ocupado pelos vazios e poros com o volume total do concreto, sendo que pode ser classificada de duas formas, porosidade aberta e porosidade fechada, aberta quando os vazios são interligados por canais e com o meio externo, fechada, quando não existe comunicação entre os poros. Ainda salienta que em períodos secos esses vazios são preenchidos por ar, enquanto que em períodos úmidos a água pode substituir o ar até que se atinja um equilíbrio.

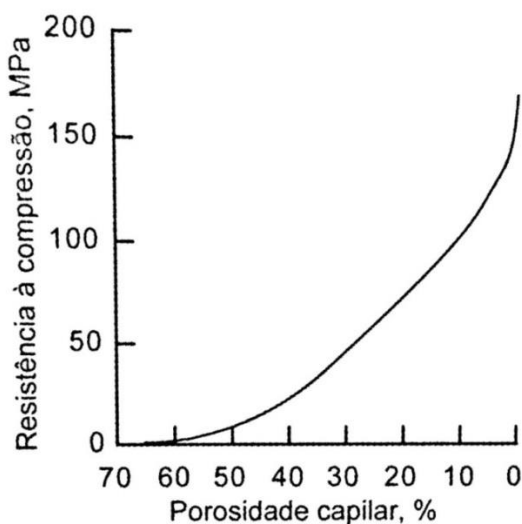
Recena (2014) afirma que a porosidade pode ser obtida por três diferentes formas, a porosidade capilar, a qual permite que o fluido possa se movimentar sem alterar o volume; a porosidade gel, de menores diâmetros e causa grande variação de volume, composta pela água evaporável; a porosidade ar, composta por bolhas de ar que interrompem os canais capilares.

Os poros presentes no concreto podem ser oriundos dos produtos de hidratação dos compostos cimentícios, do ar aprisionado durante a operação de lançamento do concreto, da evaporação da água utilizada em excesso, ou ainda pelas microfissuras geradas pela exsudação, retração por secagem, expansão térmica e cura inadequada do concreto (PETRY, 2004).

Lodi (2006) destaca que a compactidade e a porosidade se complementam e possuem papéis fundamentais no estudo dos materiais, pois influenciam diversos fatores como, o peso, resistência mecânica, absorção de água, permeabilidade e o isolamento acústico e térmico.

A porosidade e a resistência à compressão possuem uma relação inversa, ou seja, com o aumento da porosidade sua resistência à compressão diminui, o que pode ser observado na Figura 2 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Figura 2: Relação entre porosidade e resistência.



Fonte: Powers (1958) apud Mehta e Monteiro (2008)

#### 2.1.1.4 Permeabilidade

A permeabilidade é a facilidade de movimentação de líquidos e gases dentro do concreto, sendo interessante sua determinação para a estanqueidade de estruturas destinadas à contenção de líquidos e para minimizar ataques químicos (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Para Lodi (2006), permeabilidade é definida como a possibilidade de um material ser atravessado por um líquido por consequência de uma diferença de pressão entre duas faces. Ainda ressalta que o cálculo se dá pela medida de quantidade de água infiltrada durante certo tempo sobre pressão constante.

Petry (2013) enfatiza que a permeabilidade está diretamente relacionada à porosidade, sendo uma das variáveis que mais influenciam na durabilidade de uma estrutura, pela probabilidade da ocorrência de degradação do concreto devido à penetração de fluidos agressivos.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o tamanho e a continuidade dos poros controlam o coeficiente de permeabilidade, ainda comentam que uma relação água/cimento alta e grau de hidratação baixa, terá como consequência porosidade capilar alta, com poros relativamente grandes e conectados, tendo assim como resultado alta permeabilidade.

Neville e Brooks (2013) comentam que o agregado tem grande influência na permeabilidade, pois podem aumentar a porosidade do concreto, além da possibilidade do surgimento de fissuras no processo de cura no entorno das partículas de agregado.

## 2.2 AGREGADOS

A NBR 7225 (ABNT, 1993) define agregado como um material natural com propriedades adequadas ou obtido pela fragmentação de pedra, podendo apresentar dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075mm.

Para Petrucci (1998), agregado pode ser descrito como um material granular, sem forma e volume definidos, normalmente inerte, com dimensões e formas adequadas para sua utilização em obras de engenharia.

Mehta e Monteiro (2008), complementam que a visão tradicional que o agregado se enquadra, sendo um material inerte, vêm sendo questionada, devido a melhor compreensão do papel desempenhado pelo agregado na determinação de propriedades importantes para o concreto.

Neville e Brooks (2013), apontam que cerca de 75% do volume do concreto é ocupado pelos agregados, o que implica em considerar relevante a qualidade do agregado a ser utilizado, pois suas propriedades afetam significativamente o desempenho estrutural do concreto.

Além do seu papel relevante quanto à trabalhabilidade e o custo envolvido, o agregado possui grande influencia na sua forma endurecida, atuando sobre a resistência, estabilidade dimensional e durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para Mehta e Monteiro (2008), os agregados podem ser categorizados de três formas distintas; quanto a sua dimensão, sendo classificados em agregados graúdos e miúdos; quanto

a sua densidade, podendo variar entre agregados leves, normais e pesados; e quanto a sua origem, sendo classificados em agregados minerais naturais e artificiais.

De acordo com Bernucci (2008), agregados naturais são aqueles encontrados na natureza, que passam por processamentos como a britagem ou os que podem ser obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação, também os provenientes de dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. Este mesmo autor define como agregados artificiais os resíduos de processos industriais como escória de alto forno e de aciaria, ou fabricados com o objetivo de alto desempenho como a argila calcinada e argila expandida.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) classifica os agregados e define agregado miúdo como sendo grãos passantes pela peneira com abertura de malha 4,75mm e retidos na peneira de malha 150 $\mu$ m, e agregado graúdo como passantes na peneira com abertura de malha de 75 mm e retidos na peneira com abertura de 4,75 mm.

### **2.2.1 Características dos agregados**

Para Sbrighi Neto (2000) é importante o conhecimento das propriedades na escolha do agregado que irá compor a mistura do concreto, visto que esse poderá representar uma otimização na relação entre custo x benefício.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) coloca como requisito a composição dos agregados grãos minerais compactos, duros, estáveis, duráveis, limpos nos quais as substâncias contidas não afetem a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra corrosão, a durabilidade e quando requerido, o aspecto visual do concreto.

As características importantes relacionadas ao agregado que influenciam as propriedades do concreto, são decorrentes da microestrutura da rocha matriz, condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A Tabela 1 apresenta uma relação entre as propriedades do concreto e algumas dessas características.

Tabela 1: Propriedade do concreto influenciadas pelas características do agregado.

<b>PROPRIEDADES DO CONCRETO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DO AGREGADO</b>
Resistência mecânica	Resistência mecânica e sanidade Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura Superficial Limpeza Dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Módulo de elasticidade Coeficiente de poisson Granulometria
Resistência à derrapagem	Tendência ao polimento (Abrasão) Textura superficial
Economia	Forma dos grãos Textura superficial Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

Fonte: Adaptado de Sbright Neto (2000) apud Weimann (2008)

### 2.2.1.1 Composição granulométrica

Para Weidmann (2008) a composição granulométrica pode ser definida como o tamanho das partículas dos agregados, sendo expressa em termos de porcentagem passante/acumulada em uma série de aberturas de peneiras, ou ainda em porcentagens entre certos intervalos. Neville e Brooks (2013) definem como o processo de dividir uma amostra em frações de partículas de igual dimensão e diz que seu resultado pode ser expresso como forma de tabelas e gráficos.

A granulometria além de influenciar a trabalhabilidade do concreto, possibilita um melhor adensamento e conseqüentemente valores maiores de resistência (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Neville e Brooks (2013) ressaltam que não existe uma granulometria ideal que atenda de forma satisfatória todos os principais fatores que afetam a trabalhabilidade, pois isso se dá em função da relação existente entre os mesmos.

De acordo com Viacelli (2012) a granulometria de um agregado é utilizada tanto para caracterizá-lo quanto para determinar sua classificação, analisando a dimensão máxima característica e módulo de finura.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) define módulo de finura como sendo a soma das porcentagens retidas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal dividida por 100, e dimensão máxima característica como sendo a abertura correspondente a malha da peneira de série normal que apresenta valor em massa igual ou inferior a 5% de porcentagem retida acumulada.

Para Mehta e Monteiro (2008), a dimensão máxima do agregado resulta em uma diferença no custo, pois, quanto maior a dimensão, menor será a área superficial coberta pela pasta de cimento e assim menor a quantidade de cimento utilizado.

Para Lodi (2006) o estudo da granulometria de um agregado, está relacionado à qualidade do concreto, quando utilizados grãos muito finos, há uma necessidade maior de água, aumentando o fator água/cimento e conseqüentemente o custo final do concreto.

Uma granulometria equilibrada consegue atingir uma mistura trabalhável e econômica, produzindo uma mistura mais fechada e assim evitando a penetração de agentes agressivos (SBRIGHI NETO, 2005).

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) são estabelecidos os limites da zona ótima e da zona utilizável para os agregados miúdos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de distribuição granulométrica de agregado miúdo.

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA	PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA			
	LIMITES INFERIORES		LIMITES SUPERIORES	
	Zona utilizavel	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Fonte: Adaptado de NBR 7211 (ABNT, 2009).

### 2.2.1.2 Textura superficial e forma das partículas

A influência do formato das partículas é devido não só exclusivamente às características da rocha mãe, mas também pelo processo e equipamento utilizado na britagem (DAMO, 2011).

A NBR 7225 (ABNT, 1993) classifica os grãos quanto às arestas e cantos como angulosos e arredondados, sendo definidos como angulosos os grãos que apresentam arestas vivas e cantos angulosos, e arredondados os que não apresentam tais características. Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que partículas que são formadas por atrito, como areias de regiões marítimas ou rios, tendem a possuir geometria arredondada. Já os agregados de origem britada de acordo com Lodi (2006) geralmente são angulosos e possuem superfície áspera.

Para Damo (2011) a determinação das formas de um agregado é importante pois influencia as propriedades do concreto principalmente no estado fresco. Uma textura lisa e geometria arredondada proporcionam um ganho na trabalhabilidade pela diminuição no consumo de água, porém, a textura lisa diminui a aderência entre a pasta de cimento e o agregado o que prejudica na resistência à tração do concreto (LODI, 2006).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), partículas de textura áspera, angulosas e alongadas necessitam de maior quantidade de água, quando comparados as de superfície lisa e geometria arredondada, isso pode ser explicado pelo fato de que necessitam de maior quantidade de pasta de cimento para produzir misturas de concreto trabalháveis.

Devido aos grãos alongados e textura áspera, Mehta e Monteiro (2008), especificam que partículas alongadas e lamelares devem ser evitadas, ou limitadas a no máximo 15% em massa do total do agregado.

A textura superficial das partículas pode afetar a resistência à flexão durante as primeiras idades do concreto; uma textura mais áspera fornece uma aderência física mais forte entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A norma NBR 7389 (ABNT, 2009) define o agregado em seu grau de esfericidade, como sendo alto ou baixo, e seu grau de arredondamento como sendo anguloso, sub anguloso, subarredondado e arredondado. Weidmann (2008) comenta que essa classificação é qualitativa e seu resultado depende da experiência do avaliador.



### 2.2.2 Agregado miúdo – Areia natural

Weidmann (2008) diz que o agregado miúdo é de origem natural quando proveniente de leito de rios, cavas ou depósitos eólicos sem sofrer qualquer processo de cominuição de grãos. Para Mehta e Monteiro (2008) agregados minerais naturais derivam de rochas de diversos tipos. Lodi (2006) reforça que esses agregados naturais são sujeitos ao intemperismo e sedimentam no local de formação, e então através de correntes fluviais, marítimas, enxurradas e ventos fortes são transportados.

Para Barber Greene *et al.* (1986) apud Damo (2011) a areia natural é um material miúdo quartzoso proveniente da decomposição e erosão de rochas, devido a ação do vento ou da água.

Para a extração da areia natural, Da Costa (2005) diz que as areias de leitos de rios são retiradas de depósitos sedimentares por meio de sucção e areias de cava são extraídas por escavação mecânica ou desmonte hidráulico dos depósitos aluvionares em fundos de vales cobertos por capa de solo.

Pela NBR 7225 (ABNT, 1993) areia é um agregado miúdo como sendo natural, de propriedades adequadas com dimensão nominal máxima inferior a 2mm e mínima igual ou superior a 0,075mm.

### 2.2.3 Agregado miúdo - Pó de brita

O Pó de brita pode ser definido como produto do processo de beneficiamento dos agregados naturais de britagem, sendo obtido através da trituração de pedras maiores por equipamentos mecânicos (LODI, 2006).

Damo (2011) define pó de brita como sendo um agregado resultante do processo de britagem passante na última tela do beneficiamento final, com seu diâmetro máximo variante de acordo com cada região do país.

Para Weidmann (2008) a utilização do pó de brita “*in natura*” é em pequena escala e sazonal, sendo basicamente utilizado como base, sub-base em concreto asfáltico nas obras de pavimentação, constituindo grandes estoques nas pedreiras, sendo muitas vezes considerado como subproduto, resíduo ou até mesmo rejeito.

### 2.2.3.1 Processo de obtenção do pó de brita

Segundo Bernucci *et al.* (2008) a exploração de uma pedreira tem como finalidade o desmonte da rocha sã, reduzindo o tamanho do material para a produção de agregados.

Luz *et al.* (2004) definem britagem como sendo um conjunto de operações com a finalidade de fragmentar blocos de minérios, até que se atinja uma granulometria compatível para utilização direta ou para posterior processamento. Ainda comentam que a fragmentação se dá através de sucessivas etapas de processos de britagem para redução em tamanhos convenientes. A Tabela 3 apresenta os estágios de britagem e respectivos tamanhos de alimentação e produção (LUZ *et al.* 2004).

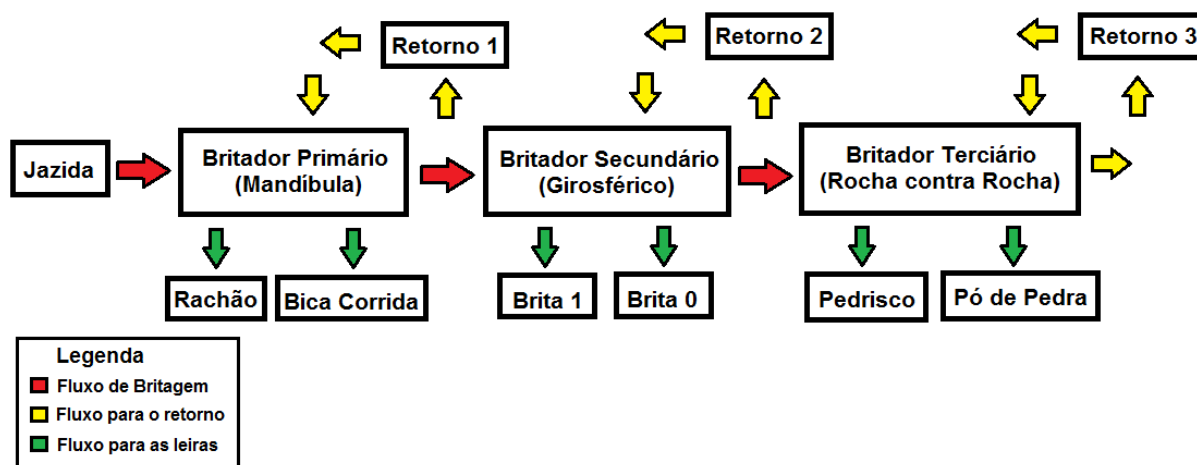
Tabela 3: Classificação dos estágios de britagem.

<b>ESTÁGIO DE BRITAGEM</b>	<b>TAMANHO MÁXIMO DE ALIMENTAÇÃO (mm)</b>	<b>TAMANHO MÁXIMO DE PRODUÇÃO (mm)</b>
Britagem primária	1000	100,0
Britagem secundária	100	10,0
Britagem terciária	10	1,0
Britagem Quaternária	5	0,8

Fonte: Adaptado de LUZ *et al.* (2004).

De acordo com Weidmann (2008) o entendimento dos processos e do equipamento a ser utilizado no processo de britagem é muito importante, pois estes influenciam nas características finais dos agregados miúdos de britagem. Para Neville e Brooks (2013) a forma de um agregado é relacionada não só pelas características da rocha mãe, mas como também pelo tipo de britador e sua taxa de redução. A Figura 3 apresenta o fluxograma de britagem segundo Meurer (2015).

Figura 3 - Fluxograma do processo de britagem.



Fonte: Meurer (2015).

Os britadores podem ser classificados em britadores de compressão e de impacto. O primeiro grupo se caracteriza pelo material ser esmagado até que se quebre, compreendendo os britadores mandíbula, cônicos, giratórios e de rolo. O segundo se caracteriza pela cominuição devido ao impacto gerado contra uma peça de metal ou contra a própria rocha, sendo dividido ainda em britadores de impacto de eixo horizontal e de eixo vertical (WEIDMANN, 2008).

Para Sbrighi Neto (2011) a produção dos agregados de britagem é realizada considerando as etapas de desmonte, britagem e beneficiamento. Os principais processos na produção dos agregados até que se atenda a granulometria desejada são apresentados na sequência.

- a) Desmonte de Rocha: A rocha é fragmentada com o uso de explosivos em determinadas perfurações devidamente espaçadas e caso necessário, há a possibilidade de nova fragmentação nos blocos considerados inaptos para o transporte (SBRIGHI NETO, 2011).
- b) Britador Primário: Estágio do beneficiamento para a produção de agregados que possui uma redução em torno de 8":1". A britagem é realizada a seco e sem descarte do material fino sendo utilizados britadores de grande porte como o de mandíbulas, britador giratório, britador de impacto e de rolos dentados (LUZ *et al.*, 2004).

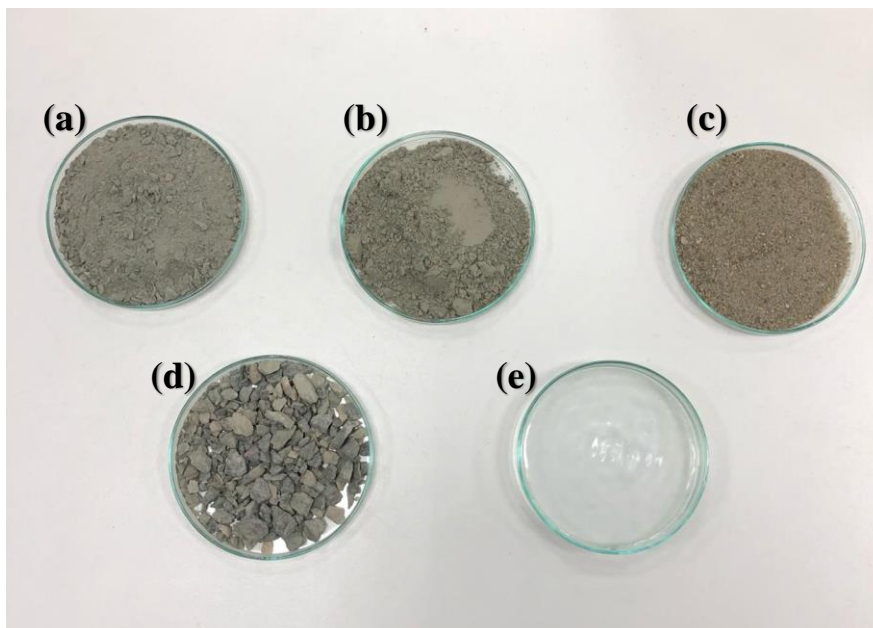
- c) Britador secundário: Etapa que ocorre a britagem dos materiais subsequentes do britador primário e tem como objetivo reduzir a granulometria do material para a moagem. Em alguns casos ocorre a retirada da fração fina na alimentação, aumentando assim a capacidade de produção. Os britadores normalmente utilizados neste estágio são os britadores giratório secundário, mandíbulas secundário e martelo que se diferenciam da primeira etapa pelas dimensões menores, assim como os britadores cônico, martelo e rolo (LUZ *et al.*, 2004).
  
- d) Britador terciário: Geralmente a última etapa do processo de britagem que utiliza britadores cônicos (algumas usinas utilizam britadores quaternários ou retornam o material para o britador terciário (LUZ *et al.* 2004). Para Damo (2011) a obtenção de agregado com formato cúbico se dá pela utilização de um britador de impacto vertical (VSI) na linha de britagem.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAIS

Na composição deste trabalho foram utilizados materiais provenientes da região de Joinville-SC. A Figura 4 apresenta os materiais utilizados.

Figura 4 - Materiais utilizados: Pó de brita (a); Cimento (b); Areia (c); Brita 0 (d); Água (e).



Fonte: Autor (2019).

##### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado no trabalho foi o CPV-ARI, de alta resistência inicial proveniente da empresa Votorantim. As características do mesmo, obtidas com o fabricante, estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades do cimento CPV ARI.

Características e propriedades		Unidade	CPV ARI
Massa específica (NBR 6474)		Kg/dm <sup>3</sup>	3,14
Massa unitária no estado solto (NBR 7251)		Kg/dm <sup>3</sup>	1,02
Finura	Retido # 200 (NBR 11579)	%	0,20
	Retido # 325	%	3,40
	Sup. Esp. Blaine (NBR 7224)	cm <sup>2</sup> /g	4687
Tempo de pega	Início (NBR 11581)	Min	130
	Fim (NBR 11581)	Min	210
Resistência à compressão (fcj) (NBR 7215)	1 dia	MPa	27,7
	3 dias	MPa	42,0
	7 dias	MPa	46,7
	28 dias	MPa	56,1

Fonte: Votorantim (2019).

### 3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados no presente trabalho foram obtidos na empresa Rudinick minérios, sendo eles: areia média, pó de brita e brita 0.

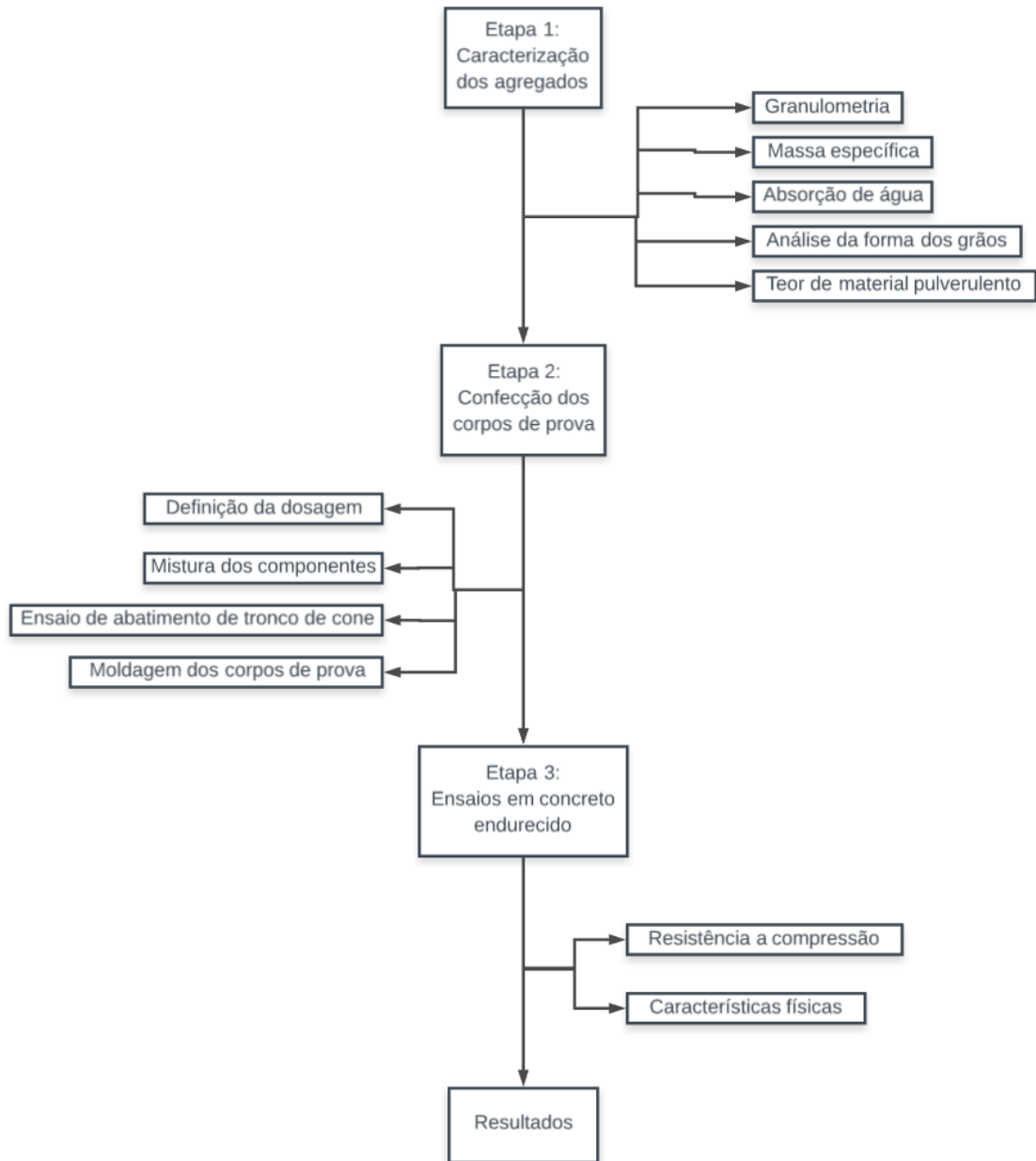
### 3.1.3 Água

A água utilizada no presente trabalho é proveniente da rede de abastecimento de Joinville-SC.

## 3.2 MÉTODOS

A realização dos experimentos constituiu de algumas etapas, conforme apresentado no fluxograma abaixo (Figura 5).

Figura 5 - Fluxograma metodológico.



Fonte: Autor (2019).

### 3.2.1 Dosagem referênciã

Para o desenvolvimento do presente trabalho, o método de dosagem escolhido pelo autor foi o CIENTEC. A sequencia de passos adotada através da metodologia para obter a dosagem referênciã estão dispostas a seguir. As informações utilizadas para a definição da dosagem para este trabalho estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características utilizadas para a determinação da dosagem.

<b>fck (MPa)</b>	30
<b>Cimento</b>	CPV Ari
<b>Brita</b>	0
<b>Areia</b>	Média
<b>Origem da rocha</b>	Granítica

Fonte: Autor (2019).

### 3.2.1.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento é obtida através da equação de Abrams que considera o tipo de cimento e o  $f_{ck}$ . Assim o cálculo da relação (a/c) para um  $f_{ck}$  de 30 MPa aos 28 dias é dada pela Equação 1.

$$a/c = \frac{2,15 - \log f_{ck}}{1,27} \quad (1)$$

### 3.2.1.2 Traço em massa

Dando sequencia, obteve-se o valor de H através da correlação entre o tipo de cimento e a classificação da brita como demonstra o Quadro 2.

Quadro 2 - Porcentagem de água a ser empregada sobre a quantidade de materiais secos.

<b>Tipo de cimento</b>	<b>Classificação da brita</b>	<b>H (%)</b>
Pozolânico (CPIV)	0	10.5
	1	9.8
	2	9.6
	3	9.4
Comum (CPI e CPII) e de alta resistência inicial (CPV)	0	10.2
	1	9.6
	2	9.4
	3	9.2

Fonte: Adaptado de Recena (2014).

Com o valor identificado, utilizou-se a Equação 2 para a obtenção do traço em massa.

$$1 + m = \frac{100 \times a/c}{H} \quad (2)$$



Onde:

$m$  = Soma da proporção de areia e agregado graúdo;

$H$  = Quantidade de água empregada em 100 partes de material seco;

$a/c$  = Relação de água/cimento.

### 3.2.1.3 Cálculo do teor de cimento

Considerando que  $(1+m)$  representa 100% do material seco, o resultado do teor de cimento é através de uma regra de três simples demonstrada abaixo.

$$\begin{array}{l} 1 + m \rightarrow 100\% \\ 1 \rightarrow \%Cimento \end{array}$$

### 3.2.1.4 Cálculo do teor de areia

Para o cálculo do teor de areia, primeiramente é estipulado o teor de argamassa ( $\alpha$ ), o qual depende da natureza da rocha e da classificação da brita, conforme indicado pelo Quadro 3.

Quadro 3 - Determinação do teor de argamassa.

Natureza da rocha	Classificação da brita	Teor de argamassa (%) Grão normal
Granítica	0	60
	1	53
	2	51
	3	49
Basáltica	0	60
	1	55
	2	53
	3	51

Fonte: Recena (2014).

Com o teor de cimento ( $\%Ci$ ) calculado anteriormente e o teor de argamassa estipulado, pode-se determinar o teor de areia ( $\%Ar$ ) conforme a Equação (3).

$$\%Ar = \alpha - \%Ci \quad (3)$$

### 3.2.1.5 Cálculo do teor de agregado graúdo

O teor de agregado graúdo (brita) expresso em porcentagem total de materiais secos é a diferença entre a porcentagem total de material seco e o teor de argamassa, conforme a Equação 4.

$$\%Br = 100\% - \alpha \quad (4)$$

### 3.2.1.6 Definição da dosagem unitária

Para a definição da dosagem unitária deve-se dividir a porcentagem de areia e brita pelo teor de cimento conforme indicado no Quadro 4.

Quadro 4 - Traço obtido pelo método CIENTEC.

Material	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço	$\%Ci/\%Ci$	$\%Ar/\%Ci$	$\%Br/\%Ci$	$a/c$

Fonte: Autor (2019).

## **3.2.2 Formulações**

Foram criadas seis diferentes formulações para o presente estudo, a primeira sendo considerada a referência, utilizando o traço unitário e as demais contendo uma fração de pó de brita. A porcentagem considerada de substituição em massa para cada tipo de formulação (10 – 25 – 50 – 75 – 100%).

## **3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS**

### **3.3.1 Granulometria**

O procedimento foi executado conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) que descreve o método para a determinação granulométrica de agregados miúdos e graúdos.

Primeiramente verificou-se a Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados, o que segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), corresponde à abertura nominal da malha da peneira na qual o agregado apresente uma porcentagem retida acumulada imediatamente inferior a 5% em massa. Com a DMC calculada conseguiu-se estabelecer a quantidade mínima de material necessário para a realização do ensaio, utilizando-se assim 1kg de agregado para cada amostra, conforme determina a Figura 6.

Figura 6 - Massa mínima por amostra de ensaio.

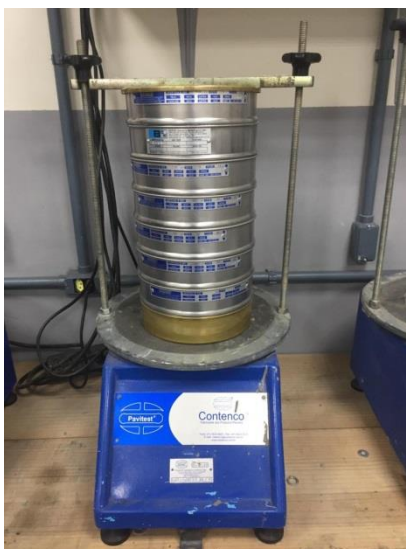
Masa mínima de la muestra de ensayo / Massa mínima da amostra de ensaio kg
0,3*
1
2
5
10
15
20
35
60
100
150
300

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a determinação da granulometria, foram utilizadas as peneiras 6.3mm; 4.75mm; 2.36mm; 1.18mm; 0.6mm; 0.3mm; 0.15mm e 0.075mm e o fundo. Previamente ao ensaio foram coletadas as massas de cada peneira e fundo com o auxílio de uma balança de precisão.

Com a massa determinada, as peneiras foram agrupadas de acordo com a sua abertura, empilhando-as a partir do fundo da peneira de menor abertura para a de maior abertura (Figura 7).

Figura 7 - Conjunto de peneiras dispostas no agitador mecânico.



Fonte: Autor (2019).

Posteriormente ao quarteamento separou-se 1kg de cada material como determinado anteriormente, colocando-os em estufa e resfriando em temperatura ambiente, com isso, o mesmo foi despejado no conjunto de peneiras, dando início à execução do peneiramento de forma mecânica por 6 minutos e manualmente por 1 minuto. Após esse processo, as peneiras com o material retido foram pesadas novamente e suas respectivas massas comparadas com a medição anterior, dando origem à curva granulométrica.

### 3.3.2 Absorção de água

O ensaio de absorção de água do agregado miúdo destinado ao concreto segue a NBR NM 30 (ABNT, 2001) a qual estabelece um método para a determinação na condição saturado de superfície seca.

Na preparação do ensaio separou-se 1kg de amostra para cada agregado (areia e pó de brita) o qual foram alocados à estufa em uma temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  até sua constância de massa. Após sua secagem, o material foi inserido em um recipiente coberto com água onde permaneceu descansando pelo período de 24 horas.

O agregado saturado foi despejado em uma superfície plana onde foi iniciado o processo de secagem da superfície pela ação de uma corrente de ar quente. A cada intervalo de tempo de 5 minutos, inseriu-se o material em um molde de tronco de cone e o mesmo foi golpeado suavemente 25 vezes com uma haste, com isso, retirou-se o molde a fim de verificar

a estabilidade da forma do agregado. O processo foi repetido até que o material não mantivesse sua forma (Figura 8).

Figura 8 – material saturado com superfície seca após a retirada do molde.



Fonte: Autor (2019).

A massa do agregado com superfície seca foi então aferida e o material novamente colocado em estufa. Com o material seco, foi verificada a massa do material. A porcentagem de absorção de água do agregado é dada pela equação 5.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$A$  = absorção de água, em porcentagem;

$m_s$  = massa da amostra na condição de saturado e superfície seca, em gramas;

$m$  = massa da amostra seca em estufa, em gramas.

### 3.3.3 Teor de material pulverulento

O teor de material pulverulento é determinado pela NBR NM 46 (ABNT, 2003) a qual descreve o procedimento para a determinação por lavagem da quantidade de material mais fino que a abertura da malha da peneira de 75  $\mu\text{m}$ .

As peneiras utilizadas no procedimento foram as de abertura 75  $\mu\text{m}$  e 1.18mm, as quais foram dispostas com a peneira de menor abertura abaixo da peneira com a maior. Previamente ao ensaio, a partir da dimensão máxima nominal de cada agregado, foi possível determinar, de acordo com a norma, a quantidade necessária de cada tipo de agregado para a execução do ensaio. O Quadro 5 indica a quantidade utilizada para os agregados miúdos estudados.

Quadro 5 - Quantidade de material utilizado para ensaio.

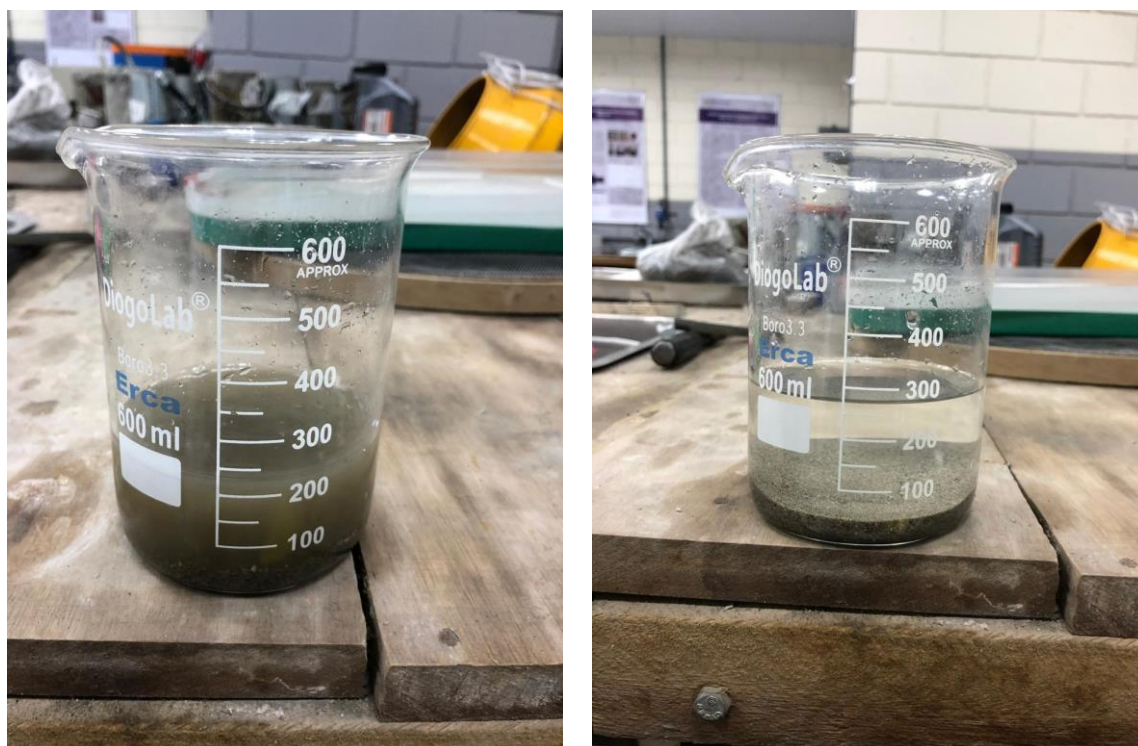
<b>Pó de brita</b>	500g
<b>Areia média</b>	100g

Fonte: Autor (2019).

O material foi inserido em um recipiente e levado a estufa onde permaneceu à temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  até sua constância de massa. Após esse procedimento a sua massa foi aferida.

Posteriormente, inseriu-se água no recipiente agitando-o a fim de separar a fração fina do restante da amostra. Imediatamente após o recipiente ser agitado, a água foi despejada nas peneiras, retirando assim o material fino presente. Esse procedimento foi repetido até que a água suja com agregado apresentasse transparência semelhante à água comum. A Figura 9 demonstra a diferença da água entre o início do ensaio e após o processo de lavagem.

Figura 9 – Transparência da água antes e após o processo de lavagem.



Fonte: Autor (2019).

Após a lavagem, o agregado retido nas peneiras foi devolvido ao recipiente e o material foi colocado na estufa para posteriormente obter sua massa seca. A partir da Equação 6 pode-se calcular a porcentagem de material fino passante na peneira de abertura 75  $\mu\text{m}$ .

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$m$  = Porcentagem de material mais fino que a peneira de 75  $\mu\text{m}$  por lavagem;

$m_i$  = Massa original da amostra seca, em gramas;

$m_f$  = Massa da amostra seca após a lavagem, em gramas.

### 3.3.4 Massa específica

A massa específica dos agregados foi determinada de acordo com a DNER-ME 194/98 a qual determina massa específica como sendo a relação entre o volume do sólido e a massa do agregado seco em estufa até sua constância, considerando os poros impermeáveis.

Para a execução do ensaio foram inseridos 200cm<sup>3</sup> de água no frasco Chapman deixando-o em repouso até que sua face interna estivesse completamente seca, em seguida, foram introduzidos 500g de material no frasco agitando-o de forma a eliminar as bolhas presentes. Com isso, fez-se a leitura da marca atingida pelo nível de água com o agregado.

Assim, utilizou-se a Equação 7 para determinar a massa específica do agregado.

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (7)$$

Onde:

$\gamma$  = Massa específica do agregado, expressa em g/cm<sup>3</sup>;

L = Leitura no frasco.

### 3.3.5 Análise da forma dos grãos

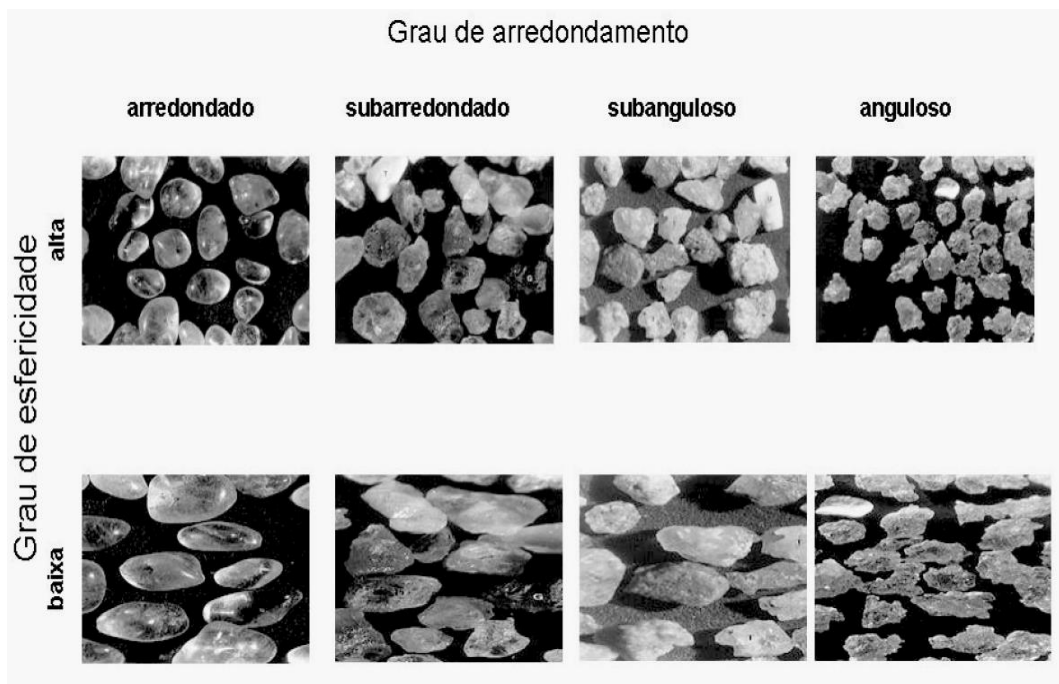
A análise da forma dos grãos foi determinada com base na NBR 7389-1 (ABNT, 2009), a qual descreve uma metodologia de avaliação da forma do agregado miúdo, de acordo com seu grau de arredondamento e seu grau de esfericidade. O equipamento utilizado para se obter uma melhor visualização do grão foi o microscópio óptico Olympus SZX10.

Primeiramente foram separados 300 g de agregado miúdo e inseridos em uma sequência de peneiras de série normal, a fim de separar o agregado em frações, facilitando assim a visualização dos grãos em uma mesma lente de aproximação. Após o peneiramento, o material retido na peneira de 1.18mm e 0.6mm foi inserido em um recipiente de vidro e alocado no microscópio óptico, onde, foram capturadas imagens do agregado.

Com as imagens obtidas, foram analisados individualmente a forma de 100 grãos para cada tipo de agregado miúdo comparando-os com a Figura 10, primeiramente classificando seu grau de esfericidade e posteriormente de arredondamento.



Figura 10 - Tabela de avaliação visual dos graus de esfericidade e arredondamento.



Fonte: NBR 7389 (ABNT, 2009).

### 3.4 EXECUÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

O processo de moldagem dos corpos-de-prova seguiu a NBR5738 (ABNT, 2015) para as diferentes formulações. Para a confecção e moldagem dos corpos-de-prova foram utilizados a betoneira, balança de precisão, peneirador eletromagnético, contador de golpes padrão e moldes de dimensões 10cm de diâmetro e 20cm de altura.

Previamente à mistura dos materiais, os moldes foram revestidos internamente com óleo e todos identificados com os devidos números da formulação. Os materiais foram depositados na betoneira seguindo a sequência: metade da água, brita, areia, pó de brita, cimento e o restante de água. O material no interior da betoneira foi misturado por 5 minutos para todas as formulações, de forma a padronizar o preparo dos corpos-de-prova, após esse tempo a mesma foi interrompida para que fosse executado o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*). Com o final do teste, o material foi alocado à betoneira onde novamente iniciou-se o processo de mistura pelo tempo de 2 minutos.

Iniciou-se então o processo de moldagem e adensamento. Por se tratar de um molde com dimensão básica de 10cm e adensamento manual, o mesmo foi preenchido em 2 camadas com 12 golpes em cada uma. Com os moldes preenchidos, utilizando uma régua metálica executou-se o rasamento da superfície com a borda do molde em um ângulo de

aproximadamente 45 graus. A betoneira foi então lavada e após sua secagem repetiu-se o processo para todas as formulações.

Finalmente, os corpos-de-prova foram alocados em uma superfície plana por 24 horas (Figura 11). Após esse tempo os CPs foram desmoldados e depositados em uma solução de água e cal para sua cura, onde aguardaram até o momento de seu rompimento.

Figura 11 - Moldes de corpo-de-prova após concretagem.



Fonte: Autor (2019).

### 3.5 TRABALHABILIDADE

O ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump test*) segue a NBR NM 67 (ABNT, 1998) que especifica a metodologia para determinação da consistência do concreto fresco através da medida de seu assentamento.

Após a mistura dos materiais na betoneira pelo tempo de 5 minutos, com o molde umedecido, o concreto foi despejado no seu interior, em 3 camadas, e para cada uma das camadas foram efetuados 25 golpes. Com a última camada golpeada, a superfície do concreto foi rasada e imediatamente retirou-se o molde verticalmente, colocando-o ao lado do concreto abatido (Figura 12) para que fosse medida a diferença de entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo-de-prova.

Figura 12 - Posicionamento do molde ao lado do corpo-de-prova.



Fonte: Autor (2019).

### 3.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de compressão dos CPs foi realizado por uma prensa hidráulica da marca Solotest pertencente à empresa Perville Engenharia e Empreendimentos S.A e seguiu a NBR 5739 (ABNT, 1994) que descreve o método pelo qual devem ser ensaiados os corpos-de-prova cilíndricos de concreto.

Previamente ao ensaio os CPs tiveram sua superfície retificada e os mesmos foram alocados na máquina de compressão, de forma centralizada. O carregamento imposto aos CPs foi constante, de velocidade  $(0.45 \pm 0.15) \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$  até seu rompimento, onde aferiu-se o valor da força máxima suportada pelo corpo-de-prova. Foram ensaiados 4 corpos-de-prova para cada formulação, sendo F4, F5 e F6 ensaiados após 7 dias de cura e F1, F2 e F3 ensaiados após 14 dias de cura. A resistência à compressão tem-se pela Equação 8.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (8)$$

Onde:

$F$  = Força máxima alcançada (N);

$D$  = Diâmetro do Corpo-de-prova (mm).

### 3.7 ÍNDICES FÍSICOS

Com o rompimento dos corpos-de-prova, foram separados 5 fragmentos de cada formulação com o intuito de utilizá-las para o ensaio. Através do princípio de Arquimedes as propriedades físicas do concreto após os 28 dias foram obtidas.

Os fragmentos foram colocados na estufa, onde permaneceram por 24h à temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  e após esse período foi aferida a massa seca dos pedaços ( $M$ ). Posteriormente, os pedaços foram imersos em água por 72h onde, obteve-se o registro da sua massa imersa em água ( $M_a$ ). Por fim, secou-se superficialmente as amostras e determinou-se sua massa saturada de superfície seca ( $M_{SS}$ ). As equações 9, 10 e 11 foram utilizadas para a determinação da porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água respectivamente.

Porosidade aberta (%):

$$P_{aberta} = \frac{M_{SS} - M}{M_{SS} - M_a} * 100 \quad (9)$$

Densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ):

$$D_{aparente} = \frac{M}{M_{SS} - M_a} \quad (10)$$

Absorção de água (%):

$$A = \frac{M_{SS} - M}{M} * 100 \quad (11)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DOSAGEM REFERÊNCIA

Os resultados referentes à determinação da dosagem referencia inicial, estão apresentados no Quadro 6, assim como as formulações referentes a esse traço dispostas pelo Quadro 7.

Quadro 6 - Dosagem obtida pelo método CIENTEC.

Material	Cimento	Areia	Brita	Água
%	19,27	40,73	40	10,2
<b>Traço</b>	<b>1</b>	<b>2.12</b>	<b>2.08</b>	<b>0.53</b>

Fonte: Autor (2019).

Quadro 7 - Formulações utilizadas.

Formulação	% de substituição	Material (g)	CPV-Ari (g)	Areia (g)	Pó de brita (g)	Brita 0 (g)	Água (g)
<b>F1</b>	0%	3800	730.77	1549.23	0.00	1520	387
<b>F2</b>	10%	3800	730.77	1394.31	154.32	1520	387
<b>F3</b>	25%	3800	730.77	1161.92	387.31	1520	387
<b>F4</b>	50%	3800	730.77	774.62	774.62	1520	387
<b>F5</b>	75%	3800	730.77	387.31	1161.92	1520	387
<b>F6</b>	100%	3800	730.77	0.00	1549.23	1520	387

Fonte: Autor (2019).

Para o traço anteriormente calculado, a relação de água/cimento estabelecida não se mostrou eficiente quanto à trabalhabilidade apresentando abatimento igual a 0 que possivelmente foi causado pelo estado seco da superfície da betoneira, tornando inviável a comparação entre formulações. De forma a corrigir este problema adicionou-se 26,41% de água na mistura para todas as formulações, o que tornou a superfície da betoneira molhada, impedindo que a mistura perdesse água.

Quadro 8 - Formulação com teor de a/c corrigido.

Formulação	% de substituição	Material (g)	CPV-Ari (g)	Areia (g)	Pó de brita (g)	Brita 0 (g)	Água (g)
F1	0%	3800	730.77	1549.23	0.00	1520	490
F2	10%	3800	730.77	1394.31	154.32	1520	490
F3	25%	3800	730.77	1161.92	387.31	1520	490
F4	50%	3800	730.77	774.62	774.62	1520	490
F5	75%	3800	730.77	387.31	1161.92	1520	490
F6	100%	3800	730.77	0.00	1549.23	1520	490

Fonte: Autor (2019).

## 4.2 GRANULOMETRIA

Realizados os ensaios para determinação granulométrica dos agregados miúdos, obteve-se a dimensão máxima característica (DMC) e módulo de finura apresentados no Quadro 9.

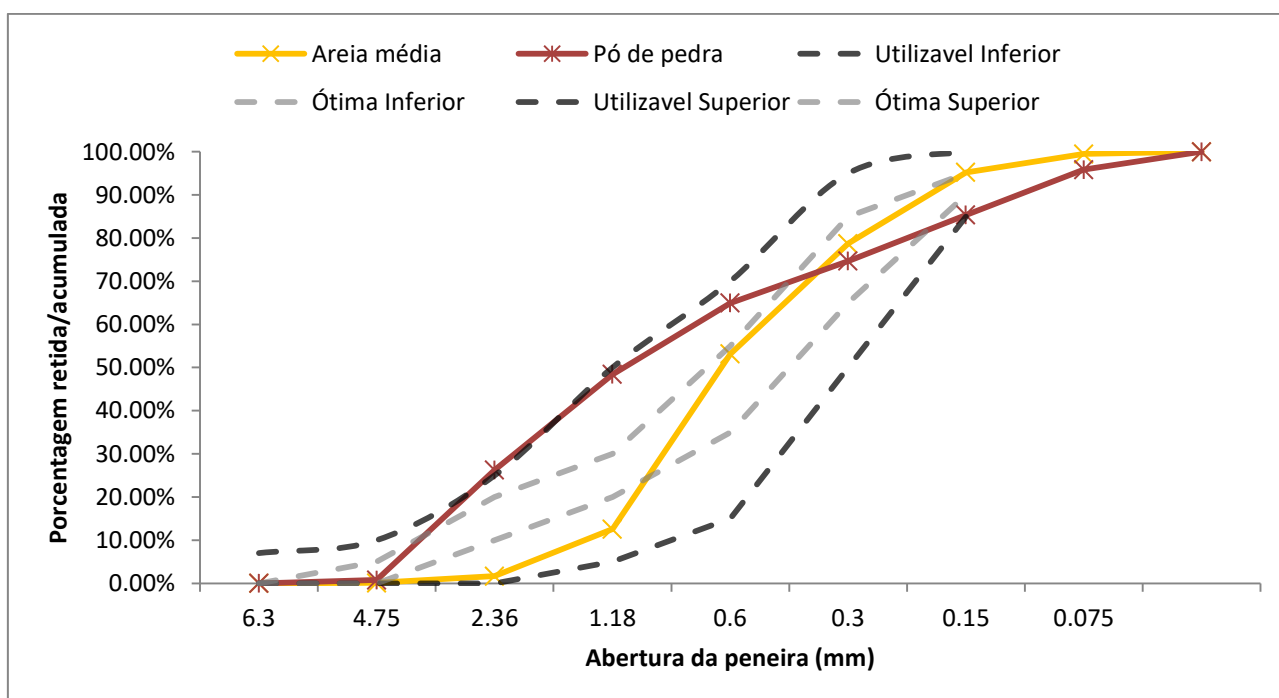
Quadro 9 - Características do agregado.

Material	Módulo de finura	DMC (mm)
Areia	2.41	2.36
Pó de brita	3	4.75

Fonte: Autor (2019).

O Gráfico 1 apresenta a distribuição granulométrica referente aos agregados miúdos estudados, onde, o eixo vertical representa a porcentagem de material retido acumulado e o eixo horizontal as aberturas das peneiras em milímetros.

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados miúdos.



Fonte: Autor (2019).

Ao analisar os resultados encontrados na curva granulométrica, verificou-se que a areia natural encontra-se dentro dos limites de utilização no concreto, estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT 2009), o que difere do pó de brita, já que este apresenta um pequeno intervalo entre a peneira de 4.75mm e 1.18mm acima do limite utilizável apresentado na norma, o que inviabilizaria o uso do pó de brita para o concreto caso não se comprove sua aplicabilidade.

A areia natural apresenta uma melhor curva granulométrica quando comparada ao pó de brita, pois se encontra em sua maior parte dentro dos limites de curva ótima.

De acordo com a NBR 7211 (ABNT 1983) pelo seu módulo de finura, a areia natural pode ser caracterizada como areia média e o pó de brita como agregado grosso, o que é explicado pela curva granulométrica, já que em sua maior parte a areia média encontra-se abaixo da linha do pó de brita, representando como um agregado mais fino.

#### 4.3 MASSA ESPECÍFICA

O Quadro 10 apresenta os resultados referentes à massa específica dos agregados miúdos. Por se tratar de valores próximos, para Vieiro (2010) pode-se entender que não haverá uma diferença significativa no peso específico do concreto no estado fresco e endurecido.

Quadro 10 - Massa específica dos agregados miúdos.

Propriedade	Areia natural	Pó de brita
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	2.85

Fonte: Autor (2019).

#### 4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O Quadro 11 apresenta os resultados referentes à absorção de água dos agregados miúdos. Observa-se que a areia natural possui uma absorção maior em relação ao pó de brita, isso se deve ao fato da areia possuir uma maior porosidade. A absorção de água influencia na trabalhabilidade de forma inversa, quanto maior a absorção menor a trabalhabilidade.

Quadro 11 - Absorção de água dos agregados miúdos.

Propriedade	Areia natural	Pó de brita
Absorção (%)	1.96	0.67

Fonte: Autores (2019).

#### 4.5 MATERIAL PULVERULENTO

O Quadro 12 apresenta os resultados do teor de material pulverulento dos agregados miúdos. O pó de brita possui um teor consideravelmente maior que a areia natural o que explica os resultados da curva granulométrica. O pó de brita excede os limites impostos pela norma, a qual especifica que para grãos gerados durante a britagem de rocha utilizados em concreto protegido de desgaste superficial esse limite chega a 12%.

Quadro 12 - Teor de material pulverulento dos agregados miúdos.

Propriedade	Areia natural	Pó de brita
Material pulverulento (%)	1.35	12.65

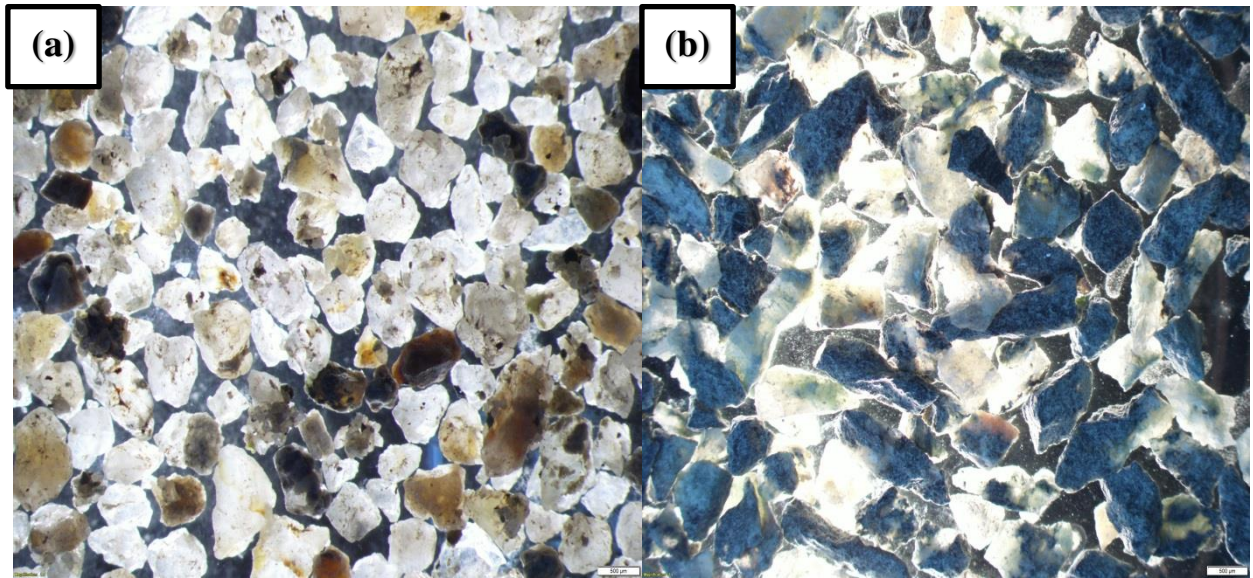
Fonte: Autores (2019).

#### 4.6 ANÁLISE DA FORMA DOS GRÃOS

A Figura 13 apresenta os resultados das imagens utilizadas na comparação com a tabela da NBR7389 (ABNT, 2009).



Figura 13 - Areia (a) e pó de brita (b) retidos na peneira 1.18mm vistos pelo microscópio óptico em um aumento de 3.2x.



Fonte: Autor (2019).

O Quadro 13 apresenta as informações referente à análise da forma dos grãos quanto ao grau de esfericidade, observa-se que a areia possui grãos predominantemente esféricos, enquanto que o pó de brita apresenta uma certa equivalência.

Quadro 13 - Grau de esfericidade dos grãos.

Grau de esfericidade	Areia (%)	Pó de brita (%)
Alto	79	46
Baixo	21	54

Fonte: Autor (2019).

Para o grau de arredondamento, observa-se que tanto a areia quanto o pó de brita possuem predominância em grãos subangulosos, sendo essa mais expressiva no pó de brita, que apresenta essa característica em 77% dos grãos estudados. Conforme apresentado no Quadro 14.

Quadro 14 - Grau de arredondamento dos grãos.

Grau de de arredondamento	Areia (%)	Pó de brita (%)
Arredondado	1	0
Subarredondado	36	18
Subanguloso	57	77
Anguloso	5	5

Fonte: Autor (2019).

#### 4.7 TRABALHABILIDADE

O Quadro 15 apresenta os resultados do abatimento para as diferentes formulações. Pode-se observar que quanto maior a porcentagem de substituição de areia por pó de brita, menor é o abatimento. De acordo com Cabral (2007), isso pode ser explicado pela quantidade elevada de finos, forma angulosa e aspereza dos grãos do pó de brita. Costa (2013) explica que grãos lisos e arredondados diminuem o atrito interno, fazendo com que se obtenha maior fluidez, ainda ressalta que o aumento dos finos, faz com que se tenha maior superfície específica e consequentemente maior perda de abatimento.

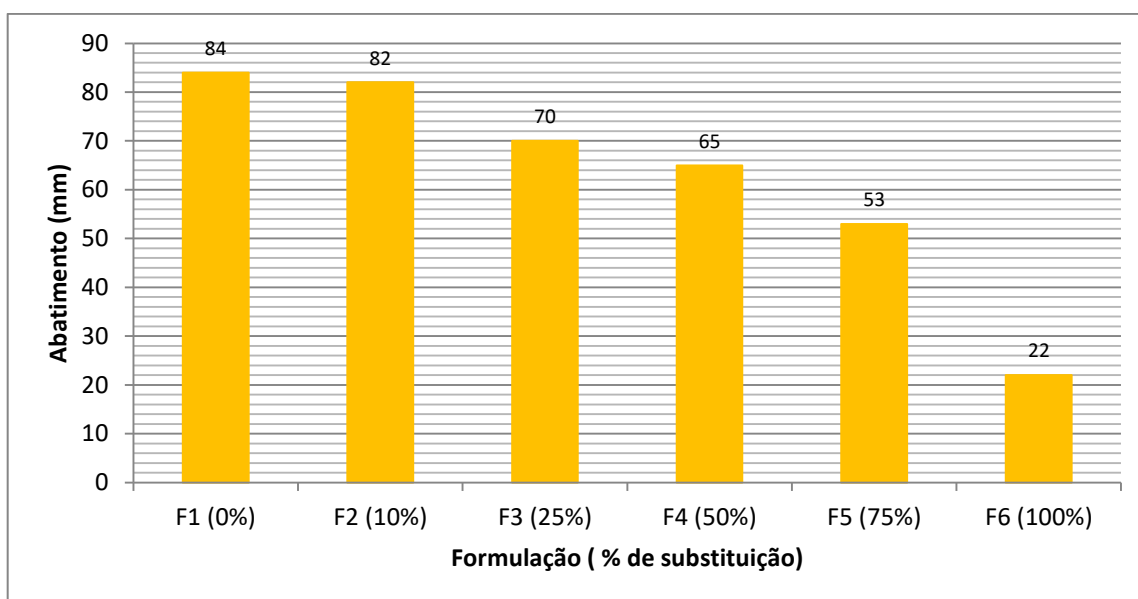
Quadro 15 - Abatimento para as diferentes porcentagens de substituição.

<b>Formulação</b>	<b>Substituição (%)</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
F1	0	84
F2	10	82
F3	25	70
F4	50	65
F5	75	53
F6	100	22

Fonte: Autor (2019).

O Gráfico 2 apresenta a comparação do abatimento entre as diferentes formulações, pode-se observar que há uma expressiva diminuição da trabalhabilidade da formulação referência (F1) para a formulação com 100% de substituição (F6) obtendo 73,81% de redução de abatimento.

Gráfico 2 - Comparação do abatimento entre as diferentes formulações.



Fonte: Autor (2019).

#### 4.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão encontram-se no Quadro 16. Vale ressaltar que os ensaios realizados na empresa Perville Engenharia e Empreendimentos S.A em função da disponibilidade da mesma para o rompimento, foram realizados em dias diferentes, assim metade dos corpos-de-prova foram rompidos em 7 dias e a outra metade em 14 dias.

Quadro 16 - Resultados do ensaio de resistência à compressão.

Formulação	Substituição (%)	Tempo de cura	Resistência à compressão média (MPa)
F1	0	14 dias	26.901
F2	10	14 dias	27.048
F3	25	14 dias	30.105
F4	50	7 dias	25.655
F5	75	7 dias	25.093
F6	100	7 dias	24.731

Fonte: Autor (2019).

Para se obter uma comparação entre as diferentes formulações, adotou-se como valor de resistência a correlação especificada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), onde, foi possível

estimar a resistência à compressão para o concreto aos 28 dias, de acordo com o seu tipo de cimento. Os resultados da estimativa de resistência à compressão aos 28 dias são demonstrados pelo Quadro 17.

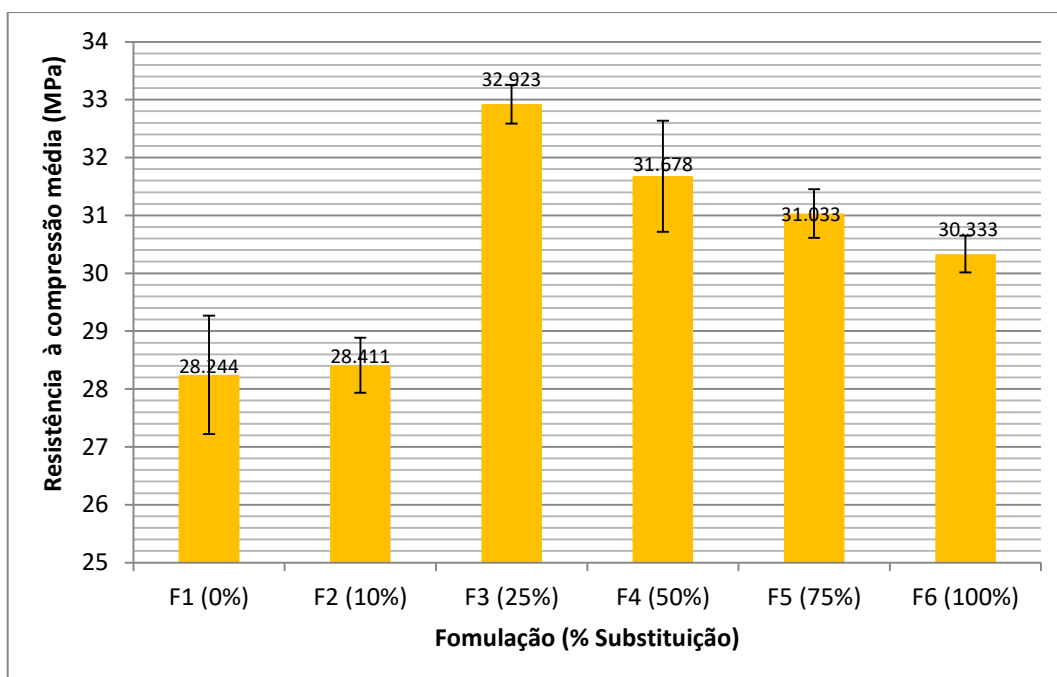
Quadro 17 - Estimativa da resistência à compressão aos 28 dias.

Formulação	Substituição (%)	Estimativa de idade	Resistência à Compressão Média (MPa)
F1	0	28 dias	28.244
F2	10	28 dias	28.411
F3	25	28 dias	32.923
F4	50	28 dias	31.678
F5	75	28 dias	31.033
F6	100	28 dias	30.333

Fonte: Autor (2019).

O Gráfico 3 apresenta a média dos resultados de resistência à compressão, para as diferentes formulações.

Gráfico 3 - Resistência à compressão média.



Fonte: Autor (2019).

Ao se analisar a média observa-se que F1 e F2 obtiveram os menores valores de resistência comparados com as demais formulações, sendo que F2 obteve um acréscimo de

0,59% na resistência em relação à referência. Em F3 houve um aumento de 16,57% de resistência quando comparado à referência, sendo esse o melhor resultado. F4, F5 e F6 apresentaram uma melhora de 12,16%, 9,87% e 7,4% respectivamente em relação à referência.

Pode-se observar que a substituição do agregado natural pelo pó de brita, aumenta a resistência, isso pode ser explicado pelo teor de finos, forma do grão e aspereza. O agregado proveniente da britagem de rochas possui maior aspereza, alto valor de material pulverulento e forma mais angulosa o que confere ao concreto uma maior resistência. De acordo com Menossi (2004) quando se aumenta o teor de finos, gera-se uma maior compacidade diminuindo a porosidade e como consequência resultará em um concreto mais resistente. Para Costa (2013) grãos lisos e arredondados prejudicam a aderência entre pasta de cimento e grãos, resultando assim em uma menor resistência. Cabral (2007) complementa que os agregados que apresentam estrutura áspera proporcionam um maior travamento, com isso, condicionam a uma maior resistência.

No entanto, nota-se que a substituição da areia pelo pó de brita torna-se benéfica até determinado teor de substituição, sendo que após este valor ocorre uma tendência de diminuição da resistência à compressão, podendo ser justificado pelo teor de finos em excesso. Com o aumento do teor de finos há a necessidade de uma maior quantidade de pasta de cimento, caso não seja corrigido o teor de água/cimento há a probabilidade de ocorrerem vazios e consequentemente a diminuir sua resistência. Para Viero (2010) com o aumento dos finos reduz-se a trabalhabilidade, o que faz com que se necessite uma maior quantidade de água para suprir essa perda, dando como consequência uma menor resistência no concreto.

#### 4.9 ÍNDICES FÍSICOS

A média dos resultados do ensaio de porosidade aberta referentes aos fragmentos utilizados a partir dos corpos-de-prova, estão dispostos no Quadro 18.

Quadro 18 - Porosidade aberta média.

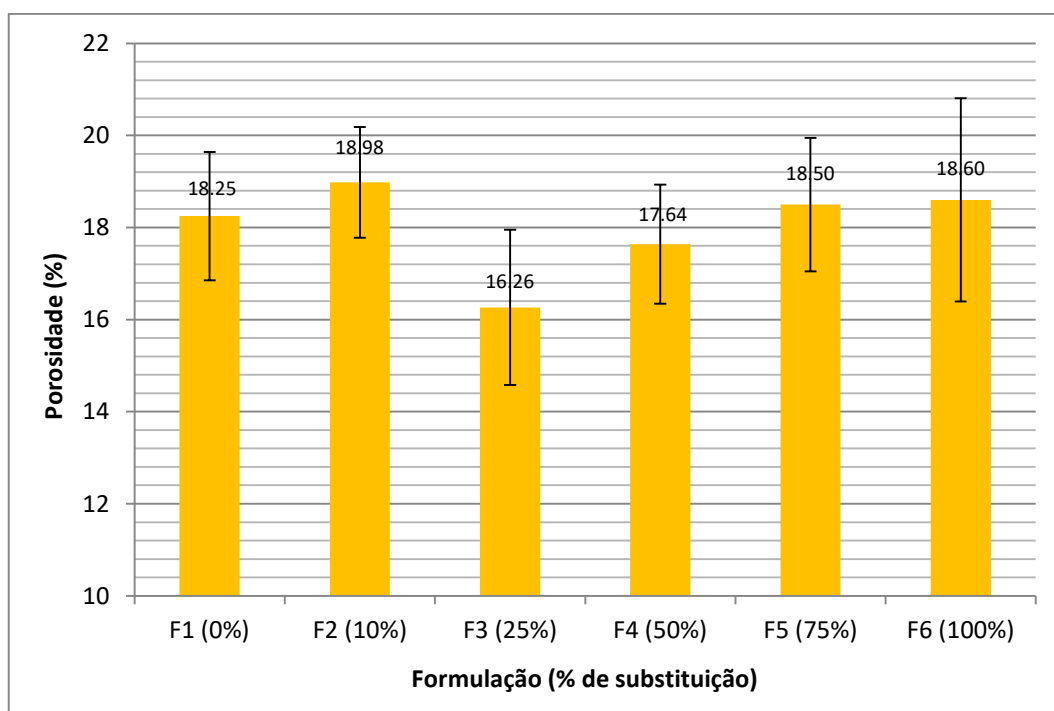
<b>Formulação</b>	<b>Substituição (%)</b>	<b>Porosidade aberta média (%)</b>
F1	0%	18.25
F2	10%	18.98
F3	25%	16.26
F4	50%	17.64
F5	75%	18.50
F6	100%	18.60

Fonte: Autor (2019).

Observa-se que as formulações F1 e F2 apresentam elevados teores de porosidade, o que pode ser explicado pela maior absorção de água por parte da areia natural, que quando submetido ao processo de cura faz com que a água se evapore e crie vazios no interior do concreto. F2 apresenta um valor de 4,0% maior de porosidade em relação a F1, um aumento não esperado, possivelmente causado por fissuras internas provocadas pelas tensões que o corpo-de-prova foi submetido em seu rompimento.

Pode-se observar no Gráfico 4 que a partir de F3, com o aumento do teor de pó de brita, a porosidade obtém maiores valores, comportamento explicado pela quantidade elevada de finos provenientes do pó de brita. Para Martins (2008) com o aumento da superfície específica devido ao teor de finos, o concreto necessitará de maior quantidade de água e consequentemente de cimento para cobrir os grãos, caso essa correção de pasta de cimento não seja feita, o resultado é um concreto com menor trabalhabilidade, maior aspereza e mais vazios.

Gráfico 4 - Porosidade aberta média dos corpos-de-prova.



Fonte: Autor (2019).

A média dos resultados do ensaio de absorção de água referentes aos fragmentos utilizados estão dispostos no Quadro 19.

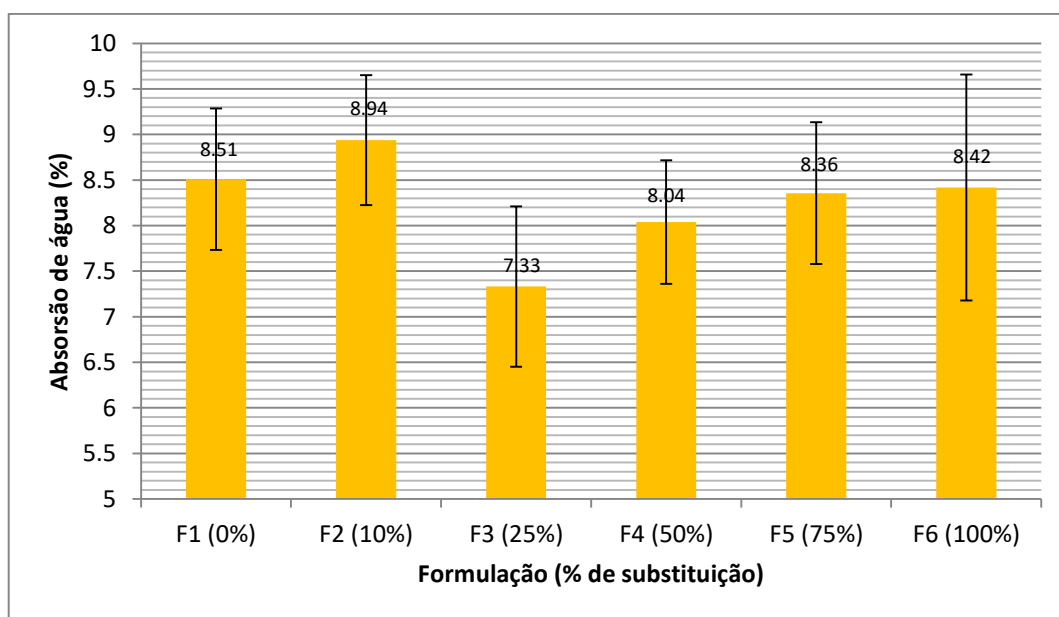
Quadro 19 - Porcentagem de absorção de água média.

Formulação	Substituição (%)	Absorção de água média (%)
F1	0%	8.51
F2	10%	8.94
F3	25%	7.33
F4	50%	8.04
F5	75%	8.36
F6	100%	8.42

Fonte: Autor (2019).

Pode-se observar no Gráfico 6 que os resultados de absorção de água no concreto são semelhante aos encontrados na porosidade, apresentando maior valor em F2 e menor valor em F3 com uma diferença de 5,05% e 13,87% respectivamente em relação à referência.

Gráfico 5 - Absorção de água média.



Fonte: Autor (2019).

A média dos resultados do ensaio para a densidade relativa, referentes aos fragmentos utilizados estão dispostos no Quadro 20.

Quadro 20 - Densidade relativa média.

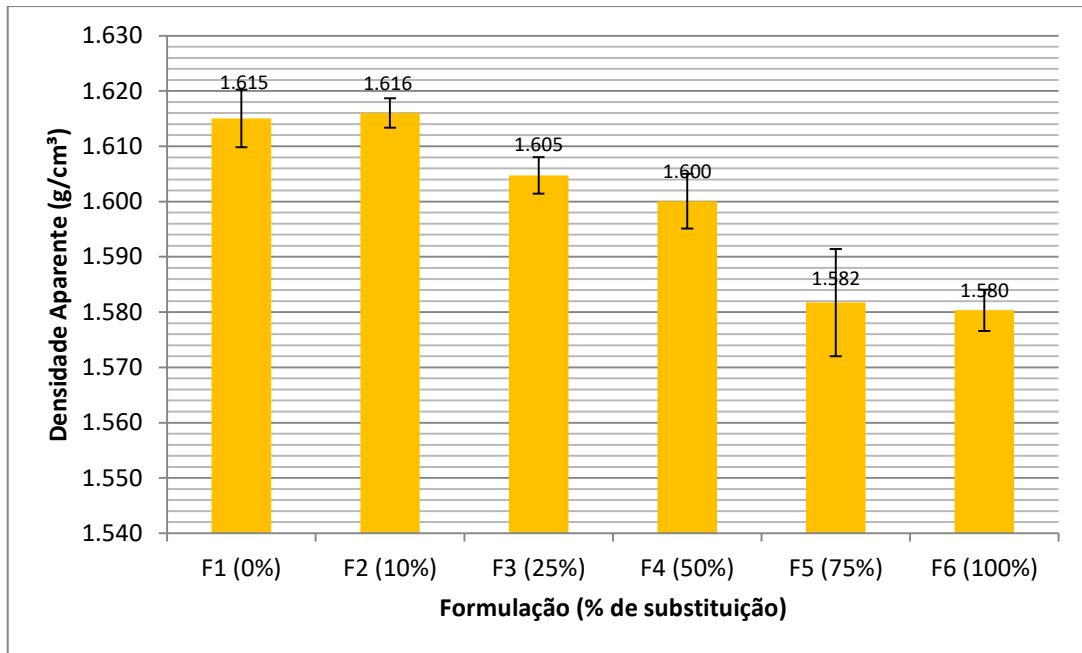
Formulação	Substituição (%)	Densidade relativa média (g/cm <sup>3</sup> )
F1	0%	1.615
F2	10%	1.616
F3	25%	1.605
F4	50%	1.600
F5	75%	1.582
F6	100%	1.580

Fonte: Autor (2019).

Observa-se pelo Gráfico 7 que apesar de não haver uma diferença significativa a densidade relativa diminui conforme o aumento do teor de substituição, quando comparado com a referência (F1) o concreto com 100% de substituição (F6) apresenta uma diferença de 2,16%. A diminuição da densidade relativa pode estar ligada ao aumento da porosidade visto que a partir de F3 esta se torna gradativamente maior. Apesar de apresentarem alta porosidade, as formulações F1 e F2 indicam os maiores valores de densidade, comportamento que pode ter sido influenciado pela diferença de tamanhos dos fragmentos utilizados no ensaio.



Gráfico 6 - Densidade relativa média.



Fonte: Autor (2019).

Considerando as informações de porosidade aberta e absorção de água pode-se afirmar que são diretamente proporcionais e ambos obtêm o menor valor com a substituição de 25% (F3). Esse resultado é coerente com os valores de resistência a compressão, a qual também obtém maiores índices de resistência para a mesma formulação. O resultado é esperado, já que um alto índice de porosidade indica uma menor resistência à compressão e uma maior absorção de água.

## 6 CONCLUSÃO

Em relação à caracterização dos agregados, o pó de brita se mostrou fora dos limites estabelecidos para a sua utilização como agregado miúdo no concreto, obtendo teores de material fino passante na peneira 75  $\mu\text{m}$  acima do permitido, assim como sua curva granulométrica, que apresenta um intervalo fora do limite utilizável especificado pela norma.

Quanto à consistência do concreto avaliada pelo abatimento de tronco de cone, observou-se que quanto maior a porcentagem de substituição da areia pelo pó de brita, menor o abatimento, quando comparado à referência, a formulação com 100% de substituição (F6) apresentou uma diminuição de 73,81% de abatimento, resultado causado pelo elevado teor de finos presentes, forma menos arredondada, mais subangulosa e por possuir grãos mais ásperos.

Para a resistência à compressão, foi observado que F1 e F2 não atingiram a resistência à compressão esperada, possivelmente devido ao rompimento ter ocorrido aos 14 dias ou eventualmente algum problema na execução dos corpos-de-prova. Entre as formulações realizadas a substituição de 25% de areia pelo pó de brita obteve o maior valor com um aumento de 16,57% em relação a F1. Observa-se que a partir do valor de 50% de substituição há um decaimento na resistência conforme o aumento do teor de pó de brita devido aos vazios criados pelo excesso dessa substituição.

A caracterização física do concreto, confirma os resultados encontrados na resistência à compressão, indicando um menor valor de porosidade e absorção de água na formulação com 25% de substituição. A densidade relativa, apesar de obter valores próximos, diminuiu conforme a adição de pó de brita.

Sendo assim, apesar do agregado não se encaixar nos parâmetros de granulometria impostos pela norma para ser utilizado em concreto, o uso do pó de brita em substituição a areia natural mostrou-se satisfatório, apresentando melhor resultado para a mistura de 25% de pó de brita e 75% de areia média.

Vale ressaltar que o pó de brita aumenta a resistência por proporcionar uma maior compactidade e apresentar um agregado com melhores características, porém, após atingir um pico de resistência, a quantidade exagerada de substituição tem como consequência uma diminuição da resistência e trabalhabilidade, dessa forma o agregado deve ser controlado de forma a se obter uma maior aproximação de um teor ótimo.

## **7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar a viabilidade da substituição variando porcentagens entre 10% e 50%;
- Analisar as propriedades da substituição com a lavagem dos agregados;
- Fazer um estudo na substituição com abatimento constante e variação da relação  $a/c$ ;
- Analisar a viabilidade econômica da substituição.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Salvador Luiz M. de; SILVA, Valesca da Silveira. Areia Artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. In: Seminário Uso da Fração Fina de Britagem 2., p. 1-5, 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** 2005.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. **Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto**. Vila Mariana: Andriolo Engenharia, 2005. 19 slides, color.

ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, L.H.V.; FREITAS, E.G.A. Materiais de construção. Rio de Janeiro, 2000. (Apostila)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 10786**: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 10787**: Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sobre pressão. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7225**: Materiais de pedra agregados naturais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7389-1**: Análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.; (2008). **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenharia.** Petrobras. Rio de Janeiro.

CABRAL, Keillon Oliveira. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaiss nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido.** 2007. 341 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

CALDAS, Rayla de Souza. **Relação entre características da rocha e comportamento na britagem para a produção de agregado.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

**CONCRETO: Material construtivo mais consumido no mundo.** Brasil: **Ibracon**, v. 53, mar. 2009.

COSTA, Felipe de Oliveira. **Estudo de areias naturais e de britagem para formulação e comercialização de agregado miúdo pronto para concretos de diferentes resistências.** 2013. 88 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DA COSTA, Marlo Jorge. **Avaliação do uso da areia artificial em concreto de cimento Portland: aplicabilidade em um método de dosagem.** Trabalho e Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul. 2005.

DAMO, Gabriela Ferreira. **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland.** 2011. 199 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 194/98: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1998.

DRAGO, Cristina; VERNEY, José Carlos Krause de; PEREIRA, Fernanda Macedo. **Efeito da utilização de pó de britagem em concretos de cimento Portland.** Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, 10p, maio 2009.

DURAN, Ana Paula; FRACARO, Danielly. **Verificação das propriedades básicas do concreto industrializado fornecido em embalagens de 30kg.** 2011. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Concreto, Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

DUTRA, Maria Bedeschi. **Produção do concreto com areia de granulometria ótima-obtida do resíduo de mineração de quartzo.** 2015. 89 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

HELENE, P. R. I. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** Ed. G.C. Isaías. São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. 1600p.

LELLES, Leandro C; SILVA, Elias; GRIFFTH, James; MARTINS, Sebastião. **Perfil ambiental qualitativo da extração de areia em cursos d' água.** *Árvore*, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 439-444, abr. 2005.

LODI, Victor Hugo. **Viabilidade Técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó- SC.** 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M., (2004). **Tratamento de Minérios.** Capítulo 4 – Cominuição. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro.

MARTINS, Paulo Benjamim. **Influência da granulometria agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Feira de Santana. 2008.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Ibracon, 2008. 782 p.

MENOSSE, Rômulo Tadeu et al. **Pó de pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto.** *Holos Environment*, Ilha Solteira, v. 10, n. 2, p. 209-221, out. 2010.

MENOSSE, Rômulo Tadeu. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** 2004. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

MEURER, Priscilla. **Caracterização de materiais rochosos do norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto.** Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

PETRUCCI, Eladio G. R.. **Concreto de cimento Portland.** São Paulo: Globo, 1998.

PETRY, S. B. **Estudo da permeabilidade à água na camada de cobrimento de protótipos de concretos com altos teores de cinza volante.** 2004. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Retração do concreto.** Porto Alegre: EdiPUCRS, 2014. 151 p.

SÁ, Maria das Vitórias Vieira Almeida de. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos.** 2006. 140 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro de Ciências exatas e da terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006

SBRIGHI NETO, C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** Ed. G.C. Isaías. São Paulo:

IBRACON, 2005. 2 v. 1600p.

SBRIGHI NETO, C. **A importância dos conceitos tecnológicos na seleção de agregados para argamassas e concretos.** ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. Revista Areia e Brita Nº 12. Out, nov, dez 2000.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados naturais, Britados e Artificiais para Concreto.** In: ISAIA, G.C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. V.1, p.233-260.

SILVA, L.S.; DEMETRIO, J.C.C; DEMETRIO, F.J.C. **Concreto Sustentável: Substituição da areia natural por pó de brita para confecção de concreto simples.** São Luís, 2015.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland.** In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 12.

VIACELLI, Luana. **Estudo da viabilidade da utilização de agregado miúdo de britado em concreto convencional.** 2012. Monografia (Conclusão de Curso de Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, Pato Branco, 2012.

VIERO, Edison. **Aplicação de areia de britagem de rochas basálticas na fabricação de concreto de cimento Portland.** 2010. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2010.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** 2008. 273 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

