

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
*CAMPUS* AVANÇADO DE POÇOS DE CALDAS

**CAROLINE MORAES DA CRUZ**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE SIENITO NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS:  
ESTUDO DAS EQUAÇÕES DE EMPACOTAMENTO E PROPRIEDADES  
TECNOLÓGICAS**

Poços de Caldas/MG

2017

CAROLINE MORAES DA CRUZ

**EFEITO DA ADIÇÃO DE SIENITO NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS:  
ESTUDO DAS EQUAÇÕES DE EMPACOTAMENTO E PROPRIEDADES  
TECNOLÓGICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Linha de pesquisa: Materiais e compósitos cerâmicos.

Orientadora: Prof. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli  
Co-orientadora: Prof. Dra. Carolina Del Roveri

Poços de Caldas/MG

2017

C957e Cruz, Caroline Moraes da.

Efeito da adição de sienito nas propriedades de concretos: estudo das equações de empacotamento e propriedades tecnológicas / Caroline Moraes da Cruz. – Poços de Caldas, 2017.  
55 f. –

Orientadora: Sylma Carvalho Maestrelli.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017.  
Bibliografia.

1. Concreto. 2. Equações. 3. Algoritmos. 4. Nefelina sienitos. 5. Concreto - Propriedades mecânicas. I. Maestrelli, Sylma Carvalho. II. Título.

CDD: 620.14

CAROLINE MORAES DA CRUZ

**EFEITO DA ADIÇÃO DE SIENITO NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS:  
ESTUDO DAS EQUAÇÕES DE EMPACOTAMENTO E PROPRIEDADES  
TECNOLÓGICAS**

A banca examinadora abaixo-assinada aprova a  
Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Ciência e Engenharia de Materiais pela  
Universidade Federal de Alfenas. Linha de  
pesquisa: Materiais e compósitos cerâmicos.

Aprovada em: 10/07/2017

Profª. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:



Prof. Fabiano Cabañas Navarro  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:



Profª. Dra. Eliana da Silva Rigo  
Instituição: Universidade de São Paulo

Assinatura:



Poços de Caldas

2017

Dedico este trabalho a meus pais, Cláudio e Célia, ao meu namorado, Eduardo, e às minhas orientadoras, Sylma e Carol. Sem o apoio e paciência de vocês esse trabalho não teria sido possível.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a meus pais, Cláudio e Célia, por terem me criado sempre me incentivando a explorar ao máximo minha capacidade. Seu apoio durante toda minha vida me ensinou a ser forte, inquisitiva e perseverante. Ainda, agradeço ao meu irmão Bruno, que me mostrou como é importante seguir nossos sonhos. Não posso deixar de citar minha tia Nena, que faz papel de mãe de vez em quando, e minha prima Patrícia, que sempre foi minha “melhor prima”. Grande parte de quem eu sou hoje é graças à família incrível na qual nasci.

Agradeço também a meu namorado, Eduardo, sem cuja paciência, apoio, encorajamento e ajuda eu não teria me candidatado ao mestrado. Obrigada por todas as vezes que você sentou ao meu lado e me ajudou a encontrar o caminho. Você tem sempre sido a base na qual eu me apoio para crescer.

Meu muito obrigado às minhas orientadoras, Sylma e Carol, que tem me acompanhado desde a graduação. Seu apoio e incentivo desde então, somados ao conhecimento que vocês me passaram e às risadas intercaladas foram essenciais para me guiar durante esse período. Agradeço também ao professor Fabiano Cabañas Navarro, por toda a sua ajuda para conseguir a matéria prima essencial a este trabalho, e ao professor Rodolfo Grillo, do IF Sul de Minas de Pouso Alegre, sem cuja ajuda na moldagem e análise dos corpos de prova este trabalho não teria sido possível.

Agradeço às minhas colegas de sala e companheiras de luta, Déborah e Ana Gabriela. Obrigada por toda a ajuda dentro e fora da sala de aula, nos momentos sérios e de brincadeiras. Não posso esquecer do Reginaldo, meu colega de trabalho e parceiro de desenvolvimento, que me guiou durante meus primeiros passos e me ensinou a importância de uma formulação bem-feita. Todos vocês me ajudaram mais do que imaginam.

*“São as nossas escolhas, Harry, que revelam quem realmente somos, muito mais do que as nossas qualidades”.*

*(ROWLING, 2000, p. 246)*

## RESUMO

O concreto é um compósito obtido a partir da combinação de agregados graúdos e miúdos, cimento e água, sendo um dos materiais mais baratos e facilmente produzidos do mundo. O custo e a qualidade dos concretos estão normalmente associados à proporção de seus constituintes (formulação cerâmica), bem como à redução do consumo de água. A determinação e otimização da formulação dos concretos é feita através da aplicação de modelos matemáticos de empacotamento e dosagem de concreto, como os métodos ABCP e IPT/USP, métodos práticos utilizados pela indústria civil, e Andreassen e Alfred, métodos teóricos amplamente utilizados na indústria cerâmica. Os agregados utilizados pelo concreto civil podem possuir origens diversas, e existe uma vertente de pesquisa para a substituição dos agregados convencionais por descartes e/ou materiais que causem impacto ao meio ambiente. O sienito extraído no Maciço Alcalino da Pedra Branca se apresenta como candidato a essa substituição. Sua aplicação atual é voltada para a produção de rochas ornamentais, e o rejeito vem sendo acumulado no meio ambiente, visto que seu aproveitamento durante a extração é baixo. Assim, esse trabalho teve como objetivo a investigação da adição de sienito como agregado na formulação de concretos e subseqüente propriedades. Para isso, foram calculadas e otimizadas as formulações das massas de concretos de construção civil a partir da utilização dos modelos matemáticos acima citados, bem como avaliadas as propriedades do produto obtido antes, durante e após a pega. A formulação que obteve o melhor conjunto de características foi aquela utilizando o modelo de empacotamento de Andreassen. A essa formulação foi feita a adição de sienito no lugar do pó de brita, nas proporções de 25, 50, 75 e 100%. A fim de manter a distribuição granulométrica original, foi desenvolvido um algoritmo para compensação das diferentes distribuições de tamanho de partícula, obtendo excelentes resultados nas propriedades avaliadas no estado fresco e endurecido. A correção granulométrica garantiu a manutenção das propriedades originais do concreto não apenas em substituições com sienito, mas também com outros agregados, tais como *scrap* (descarte) de louça sanitária e polímero termofixo. Embora todas as formulações testadas garantiram valores de resistência à compressão acima de 35 MPa, que era o valor esperado de resistência mecânica após 28 dias, a formulação que obteve o melhor conjunto de certificados foi com substituição de 25% de pó de brita por sienito.

**Palavras-chave:** Concreto. Equações de empacotamento. Algoritmo. Sienito. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

Civil concrete is a composite obtained from the combination of coarse and fine aggregates, cement and water, and it is one of the cheapest and most easily produced materials in the world. Concrete's cost and quality are normally associated to the proportion of its constituents (ceramic formulation), as well as the reduction of water consumption. The determination and optimization of concrete formulations is made through the application of mathematical models of packing and concrete dosage, like the methods ABCP and IPT/USP, which are practical methods used by civil industry, and Andreassen and Alfred, which are theoretical methods used by the ceramic industry. The aggregates used in civil concrete may have diverse origins, and there is a strand of research for the substitution of conventional aggregates by materials which cause impact to the environment. The syenite extracted at Maciço Alcalino da Pedra Branca is one of the materials that can be used for this substitution. Its current application is directed to ornamental rocks, and the reject is currently being accumulated in the environment, since the exploitation is low during extraction. Thus, this paper aims to investigate the addition of syenite as an aggregate in the formulation of concretes and its properties. In order to do so, the formulations of civil concrete were calculated and optimized using the mathematical models above mentioned, the properties of the product before, during and after final set-time were also evaluated. The formulation which obtained the best results was the one using Andreassen's method. To this formulation were made the additions of syenite in the place of the fine aggregate, in the proportions of 25, 50, 75 and 100%. In order to maintain the original granulometric distribution, an algorithm was developed to compensate the different particle size distributions, reaching excellent results in the properties evaluated in fresh and hardened concrete. The grain size correction guaranteed the maintenance of the original properties of the concrete not only in substitutions using syenite, but also with other aggregates, such as scrap (sanitary ware disposal) and thermoset polymer. Even though all formulations guaranteed values of mechanical resistance above 35 MPa, which was the value established as mechanical resistance after 28 days, the formulation with 25% substitution presented the best results.

**Keywords:** Concrete. Packing equations. Algorithm. Syenite. Mechanical properties.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland .....	18
Tabela 2 - Composição química típica do cimento Portland.....	18
Tabela 3 - Tipos de cimento .....	19
Tabela 4 - Classificação dos agregados .....	20
Tabela 5 - Descrição das formulações padrão .....	32
Tabela 6 - Formulações padrão calculadas.....	32
Tabela 7 - Formulações com sienito calculadas .....	33
Tabela 8 - Consistência do concreto.....	34
Tabela 9 - Análise granulométrica acumulada dos agregados .....	36
Tabela 10 - Ensaio físico dos agregados .....	37
Tabela 11 - Análise química (%) e pH dos agregados .....	38
Tabela 12 - Resistência mecânica das formulações padrão.....	41
Tabela 13 - Custo das formulações padrão.....	41
Tabela 14 - Propriedades das cinco formulações analisadas.....	42
Tabela 15 - Resistência mecânica das formulações com sienito.....	44
Tabela 16 - Custo das formulações com sienito .....	45
Tabela 17 - Propriedades das cinco formulações analisadas.....	46
Tabela 18 - Custo das Formulações Padrão (sem Sienito) .....	54
Tabela 19 - Custo das Formulações com Sienito .....	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismos de estabilização (a) eletrostática, (b) estérica e (c) eletrostérica.....	22
Figura 2 - Empacotamento de partículas de (a) sistema monodisperso e (b) máxima densidade de empacotamento teórica.....	23
Figura 3 - Fluxograma para o método de dosagem IPT/USP.....	27
Figura 4 - Sienito oriundo do maciço Pedra Branca.....	29
Figura 5 – Mapa geológico onde é observado o maciço Pedra Branca.....	30
Figura 6 - Ensaio de abatimento de concreto .....	34
Figura 7 - Análise granulométrica do pó de brita e sienito .....	37
Figura 8 - Ensaio de abatimento para as formulações (a) C1, (b) C2, (c) C3, (d) C4 e (e) C5	40
Figura 9 - Resistência mecânica das formulações padrão após 7, 14 e 28 dias.....	42
Figura 10 - Ensaio de abatimento para as formulações (a) C1-25, (b) C1-50,.....	43
Figura 11 - Resistência mecânica das formulações com sienito após 7, 14 e 28 dias.....	44
Figura 12 - Relação entre a resistência à compressão após 28 dias e o custo de cada formulação .....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A.A.** – Absorção de Água
- ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- C.P.** – Corpo-de-prova
- D.V.** – Densidade Volumétrica
- IPT/USP** – Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo
- M.E.A.** – Massa Específica Aparente
- M.E.A.S.** – Massa Específica Aparente Sólida
- P.A.** – Porosidade Aparente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
4.1	CONCRETO .....	17
4.2	MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO .....	17
4.2.1	Cimento .....	17
4.2.2	Agregados.....	19
4.2.3	Água .....	20
4.2.4	Aditivos .....	21
4.2.4.1	<i>Estabilização Eletrostática</i> .....	21
4.2.4.2	<i>Estabilização Estérica</i> .....	22
4.2.4.3	<i>Estabilização Eletrostérica</i> .....	22
4.3	FORMULAÇÃO DE CONCRETOS .....	23
4.3.1	Modelo de Andreassen .....	24
4.3.2	Modelo de Furnas .....	25
4.3.3	Modelo de Alfred .....	25
4.3.4	Modelo IPT/USP .....	26
4.4	ENSAIOS EM CONCRETOS .....	27
4.5	SIENITO .....	28
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>31</b>
5.1	MATERIAIS .....	31
5.2	METODOLOGIA .....	31
5.2.1	Caracterização dos Agregados .....	31
5.2.2	Formulações Padrão (sem Sienito).....	31
5.2.3	Formulações com Sienito .....	32
5.2.4	Caracterização do Concreto.....	33
5.2.4.1	<i>Preparação do Concreto</i> .....	33
5.2.4.2	<i>Determinação do Abatimento</i> .....	33
5.2.4.3	<i>Moldagem, Cura e Capeamento dos Corpos de Prova</i> .....	34
5.2.4.4	<i>Determinação da Resistência Mecânica à Compressão</i> .....	35
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>36</b>

6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	36
6.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM FORMULAÇÃO PADRÃO.....	39
6.2.1	Ensaio de Abatimento .....	39
6.2.2	Resistência à Compressão e Densidade Aparente .....	40
6.3	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM FORMULAÇÃO COM SIENITO	43
6.3.1	Ensaio de Abatimento .....	43
6.3.2	Resistência à Compressão e Densidade Aparente .....	44
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>48</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Economicamente falando, o concreto é um dos materiais mais baratos e facilmente produzidos do mundo, além de um dos materiais estruturais mais comuns (NEVILLE, 2016). No Brasil, a produção desse material no ano de 2012 atingiu 51 milhões de metros cúbicos, e estima-se que em 2017 a produção de concreto atinja 72 milhões de metros cúbicos (ABCP, 2013). Suas matérias-primas principais são os agregados graúdos e miúdos, compostos normalmente por pedriscos e areia, além da fase aglomerante (cimento) e água. A escassez de algumas matérias primas como areia, bem como a tentativa de diminuir o impacto da urbanização no meio ambiente, tem levado a várias pesquisas buscando incorporar descartes no concreto civil, tais como borracha de pneu, cinzas de carvão e areia de fundição (GRANZOTTO; SOUZA, 2013; SIDDIQUE et al., 2010; SINGH; SIDDIQUE, 2013).

O sienito é uma rocha de origem plutônica; seus principais minerais podem ser a nefelina e o feldspato alcalino, dependendo da quantidade de sílica disponível no sistema (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2008). A região de Poços de Caldas apresenta grande disponibilidade dessa rocha, com destaque para o Maciço Alcalino da Pedra Branca (sienito) e Maciço Alcalino de Poços de Caldas (nefelina sienito). As principais aplicações do sienito estão voltadas para a produção de rochas ornamentais. No entanto, o aproveitamento durante a extração é baixo, o que leva ao acúmulo de sienito no ambiente, sendo, muitas vezes, estocado a céu aberto. Desta forma, este rejeito se torna um potencial candidato à utilização como parte do agregado no concreto civil.

A formulação baseada nas equações de empacotamento de partículas visando a melhor combinação destes componentes é necessária com o intuito de se otimizar as propriedades do concreto (OLIVEIRA et al., 2011), visto que o empacotamento dos agregados tem influência direta nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido (HE et al., 2012). As formulações mais amplamente utilizadas para dosagem de concretos, na indústria civil, são os métodos da ABCP e IPT/USP, dentre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Esses métodos consistem na diminuição da relação água/cimento ( $a/c$ ) do concreto e são considerados métodos práticos, visto que o ajuste da quantidade de agregados é determinada no momento da mistura, de maneira a obter um material trabalhável. Já na indústria cerâmica os métodos de Andreassen e Alfred são muito usados (OLIVEIRA et al., 2011); tais modelos consistem em determinar a proporção de agregados de acordo com uma lei de potências. Nesse trabalho serão utilizadas as equações de empacotamento acima citadas a fim de avaliar a influência do empacotamento nas

propriedades finais do concreto, bem como garantir a manutenção de tais propriedades quando da substituição do agregado por sienito.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a influência da adição de sienito nas formulações de concreto de construção civil e otimizar essas formulações através das equações de empacotamento usualmente utilizadas.

Para o cumprimento desses objetivos, foram objetivos específicos deste trabalho:

- a. Realização de um levantamento bibliográfico detalhado relacionado à temática, principalmente no que tange às propriedades do sienito e os ensaios (ABNT) em concretos.
- b. Avaliação e comparação da eficiência de diferentes modelos matemáticos de empacotamento de partículas (métodos de Andreassen, Alfred e IPT/USP) aplicados a concretos com adições de sienito através dos ensaios e resultados obtidos no estado fresco e endurecido.
- c. Determinação do teor máximo de sienito a ser adicionado na massa de concreto, em concordância às normas da ABNT.

### **3 JUSTIFICATIVA**

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo; em alguns países, esse consumo, quando comparado com o aço, chega a ser de dez para um (NEVILLE, 2016). Assim, a formulação de concretos é de extrema importância, visto que ela auxilia no desenvolvimento de materiais com alta densidade de empacotamento, resultando em melhores propriedades mecânicas e reológicas do concreto, conferindo maior durabilidade do produto.

O sienito, cujo potencial não é totalmente aproveitado, vêm sendo acumulado no meio ambiente pois seu aproveitamento durante a extração é muito baixo. Dar um destino econômico para esta rocha é, por si só, uma justificativa para o desenvolvimento do presente projeto.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 CONCRETO

O concreto pode ser considerado um compósito, no qual a matriz é formada pela combinação de cimento e água, a fim de formar um meio aglomerante, e o reforço se apresenta na forma de agregados particulados ou fragmentados, dos quais destacam-se a areia natural, brita, pedregulho e pedriscos, entre outros. Os agregados podem ser classificados como graúdos ou miúdos (FUSCO, 2008; GAVA et al., 2001).

Os concretos podem ser classificados de acordo com sua massa específica ou resistência à compressão. Segundo a massa específica, os concretos podem ser classificados em leves (com massa específica até 1800 kg/m<sup>3</sup>), concretos de densidade normal (na ordem de 2400 kg/m<sup>3</sup>) e pesados (massa específica superior a 3200 kg/m<sup>3</sup>). Já com relação à classificação segundo a resistência à compressão, tem-se os concretos de baixa resistência (até 20 MPa), concretos de resistência moderada (entre 20 e 40 MPa) e concretos de alta resistência (maior que 40 MPa) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Pode haver ainda outros tipos de concretos, dependendo da variação na dosagem dos seus componentes principais. Desta forma, obtém-se, por exemplo, os concretos autoescoantes, concretos de alto desempenho e concretos de alta resistência inicial, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

### 4.2 MATÉRIAS-PRIMAS DO CONCRETO

#### 4.2.1 Cimento

O concreto civil utiliza o cimento Portland em sua formulação. O cimento Portland é uma mistura de calcário, argila, alumina e materiais que contenham óxido de ferro. Após a mistura, o material segue para um forno e é submetido a uma temperatura de 1450°C. A essa temperatura, ocorre a fusão de 20 a 30% do material, sendo obtidas esferas de 3 a 25 mm de diâmetro conhecidas como clínqueres. O produto é moído e a ele é adicionado sulfato de cálcio a fim de evitar a pega instantânea do cimento, resultando, finalmente, no cimento Portland como é conhecido (NEVILLE; BROOKS, 2010; NEVILLE, 2016).

Os principais compostos presentes no cimento Portland podem ser vistos na Tabela 1, na qual a abreviatura descreve cada óxido, a saber: CaO = C, SiO<sub>2</sub> = S, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = A e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = F.

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland

<b>Composto</b>	<b>Composição em óxidos</b>	<b>Abreviatura</b>
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminatotetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Fonte: NEVILLE; BROOKS, 2010

Os silicatos  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  são os mais importantes, visto que são os responsáveis pela resistência da pasta hidratada. A presença de  $\text{C}_3\text{A}$  praticamente não contribui para a resistência do concreto após as primeiras idades, ou seja, após os primeiros dias de hidratação, sendo assim indesejável. Ainda,  $\text{C}_3\text{A}$  tende a formar sulfoaluminato de cálcio na presença de sulfatos, o que pode resultar na desagregação do concreto. O  $\text{C}_4\text{AF}$  reage com a gibbsita para formar sulfoferrito de cálcio, portanto, sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos, mas ele está presente no cimento em pequenas quantidades e não afeta significativamente o comportamento do mesmo (NEVILLE; BROOKS, 2010).

A Tabela 2 mostra uma composição química típica do cimento Portland:

Tabela 2 - Composição química típica do cimento Portland

<b>Item</b>	<b>Teor Típico (%)</b>	<b>Limites (%)</b>
CaO	63,0	60,0 – 67,0
SiO <sub>2</sub>	20,0	17,0 – 25,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,0	3,0 – 8,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	0,5 – 6,0
SO <sub>3</sub>	2,0	1,0 – 3,0
MgO	1,5	0,1 – 4,0
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	1,0	0,2 – 1,3
Outros	1,0	-
Perda ao Fogo	2,0	-
Resíduo Insolúvel	1,5	-

Fonte: Adaptado de NEVILLE; BROOKS, 2010

Existem diversos tipos de cimentos para utilização na construção civil, sendo que todos eles têm suas propriedades normatizadas pela ABNT. A Tabela 3 demonstra os tipos de cimento utilizados no Brasil (BEZERRA, 2006):

Tabela 3 - Tipos de cimento

Tipo de Cimento	Resistência (MPa)	Clínquer + Gesso	Composição (%)		
			Escórias de Alto Forno	Pozolana	Filler
CP I	25-32-40	100			
CP I-S	25-32-40	95 - 99		1 – 5	
CP II-E	25-32-40	56 - 94	6 – 34		0 – 10
CP II-Z	25-32-40	76 - 94		6 – 14	0 – 10
CP II-F	25-32-40	90 - 94			6 – 10
CP III	25-32-41	25 - 65	35 - 70		0 – 5
CP IV	25-32-42	45 - 85		15 – 50	0 – 5
CP V ARI		95 - 100			0 – 5

Fonte: Adaptado de BEZERRA, 2006

Neste trabalho foi utilizado o cimento CP II-E devido à sua disponibilidade no mercado e sua ampla utilização no dia-a-dia.

#### 4.2.2 Agregados

Os agregados podem ser classificados como grãos ou miúdos. Um agregado grão se refere ao material com granulometria maior que 4,75 mm (malha nº4 Mesh); já o material menor que essa granulometria é denominado agregado miúdo. O agregado miúdo, juntamente com o meio aglomerante (cimento e água), formará a matriz do concreto, enquanto que os agregados grãos são o reforço (FUSCO, 2008).

A escolha do agregado é muito importante, visto que ele terá impacto no custo e trabalhabilidade do concreto fresco e poderá influenciar a resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto endurecido. A distribuição granulométrica afetará diretamente a trabalhabilidade do concreto, visto que a mesma está diretamente ligada à compactação das partículas (CASTRO, 2007; FUSCO, 2008). A Tabela 4 mostra a classificação

das britas conforme a sua granulometria; os concretos são normalmente produzidos utilizando as britas 0, 1 e 2 (FUSCO, 2008).

Os agregados podem ser divididos em diferentes grupos, sob o ponto de vista petrográfico. A classificação mineralógica dos agregados, apesar de ser válida para identificar as suas propriedades, não pode prever seu desempenho no concreto, visto que não há minerais desejáveis ou não para essa aplicação (NEVILLE, 2016).

Tabela 4 - Classificação dos agregados

<b>Categoria</b>	<b>Dimensões (mm)</b>	<b>Máximo Diâmetro Característico (mm)</b>
Brita 0	4,8 – 9,5	9,5
Brita 1	9,5 – 19,0	19,0
Brita 2	19,0 – 25,0	25,0
Brita 3	25,0 – 50,0	50,0
Brita 4	50,0 – 76,0	76,0
Brita 5	76,0 – 100	100

Fonte: FUSCO, 2008

Além da característica petrográfica do agregado; ou seja, suas características estruturais, mineralógicas e químicas, outras características também afetam a qualidade do concreto, sendo uma delas a forma e textura das partículas. Uma das maneiras de avaliar as propriedades geométricas dos agregados é através do *arredondamento*, que avalia a agudeza relativa ou a angulosidade das arestas e/ou cantos de uma partícula (NEVILLE, 2016). De acordo com Oliveira et al. (2010), quanto mais arredondada a partícula, melhor será o seu empacotamento na mistura. Todavia, quanto maior a rugosidade da superfície dos agregados e angulosidade dos cantos/arestas, melhor o ancoramento entre as partículas; assim, deve-se ter um equilíbrio no sentido não só de se ter um bom empacotamento final de partículas, mas também uma boa ancoragem.

#### 4.2.3 Água

A água de amassamento possui duas funções de fundamental importância no concreto. Uma das funções é propiciar as reações de hidratação; a outra é melhorar as propriedades

reológicas do concreto fresco. Essa quantidade deve ser calculada de modo que seja suficiente para desenvolver a resistência mecânica do cimento e também suas propriedades reológicas.

O excesso de água resultará em prejuízo às propriedades do concreto; no caso do concreto fresco, poderá haver exsudação, retração superficial, perda de coesão e perda na trabalhabilidade, enquanto que para o concreto endurecido haverá o aumento da porosidade e consequente diminuição da resistência mecânica (CASTRO, 2007; HOPPE FILHO, 2008).

Já a insuficiência de água na massa acarretará a não formação das fases desejadas de hidratação, havendo pouca coesão entre agregado e matriz.

#### 4.2.4 Aditivos

Após a adição da água, o cimento tende a flocular, aprisionando no interior dos flocos parte da água adicionada e comprometendo a trabalhabilidade do concreto. A água aprisionada só será liberada após cerca de quatro horas do início da hidratação, e ela causará um aumento na porosidade do concreto, diminuindo dessa forma a sua resistência mecânica (HARTMANN; HELENE, 2003).

De forma a evitar esse comportamento, aditivos para promover a defloculação do sistema devem ser adicionados à massa. Os defloculantes tem a função de distanciar as partículas umas das outras, inibindo a aglomeração de partículas e causando uma redução na viscosidade aparente. A determinação da quantidade de defloculante a ser utilizada, levando-se em conta as características do meio, é necessária para que seja fixado o ponto ótimo de defloculação (OLIVEIRA et al., 2000).

##### 4.2.4.1 Estabilização Eletrostática

O conceito de estabilização eletrostática leva em consideração o efeito da dupla camada elétrica de partículas. Na superfície das partículas, tem-se a interrupção dos planos cristalográficos, ocasionando a liberação dos átomos para realizarem ligações. Desta forma, a superfície das partículas fica carregada eletricamente e, quando a partícula é dispersa em um fluido, há a formação de uma nuvem de cargas elétricas ao seu redor, denominada dupla camada elétrica (OLIVEIRA et al., 2010).

Quando duas partículas se aproximam, tem-se a atuação das forças atrativas de Van der Waals e a repulsão ocasionada pela dupla camada elétrica. Quando a repulsão é superior à atração, tem-se a estabilização eletrostática. (OLIVEIRA et al., 2010).

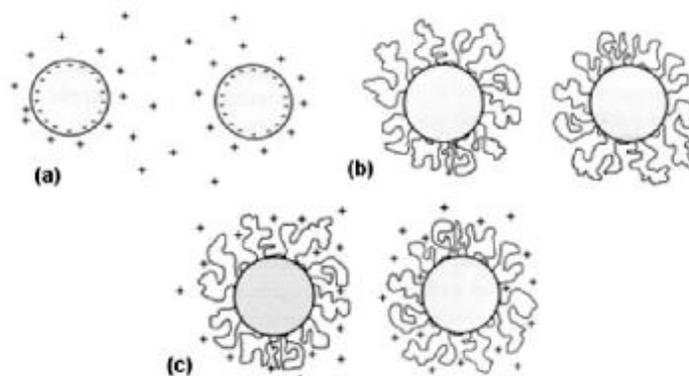
#### 4.2.4.2 Estabilização Estérica

A estabilização estérica ocorre devido à adsorção de moléculas poliméricas sobre a partícula, causando o afastamento físico das mesmas. As moléculas de polieletrólitos adsorvem sobre a partícula, nos sítios nos quais eles têm maior afinidade, e o restante da cadeia polimérica se projeta na solução. A espessura deve ser adequada a fim de inibir as forças atrativas de Van der Waals, desta forma estabilizando a solução. Caso a quantidade de defloculante utilizada não seja devidamente calculada, pode haver o entrelaçamento de partes da cadeia polimérica formando uma espécie de alça. Desta forma, pode haver a aglomeração de partículas, resultando em efeito contrário ao desejado (OLIVEIRA et al., 2010).

#### 4.2.4.3 Estabilização Eletrostérica

A estabilização eletrostérica se dá pela combinação dos mecanismos eletrostático e estérico, uma vez que o polímero ou polieletrólito modifica o perfil da camada dupla elétrica ao se adsorver na partícula, além de suas propriedades superficiais, levando à estabilidade da solução (OLIVEIRA et al., 2010). A grande vantagem dos defloculantes eletrostéricos é que através de sua utilização é possível obter níveis de viscosidade mais baixos (característica dos defloculantes eletrostáticos) e ao mesmo tempo que se mantém mesmo com um aumento do teor de defloculante; ou seja, mesmo com possíveis erros de dosagem desses defloculantes na composição, os níveis baixos de viscosidade são mantidos (característica típica de defloculantes estéricos). A Figura 1 demonstra os três mecanismos de estabilização:

Figura 1 – Mecanismos de estabilização



(a) eletrostático      (b) estérico      (c) eletrostérico

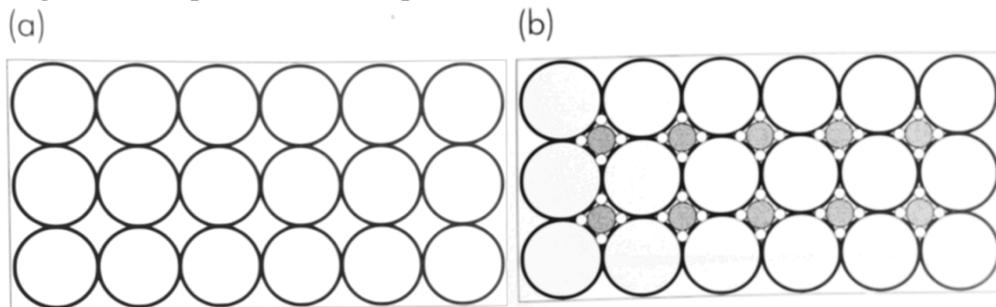
Fonte: OLIVEIRA et al., 2000

### 4.3 FORMULAÇÃO DE CONCRETOS

A formulação adequada de concretos, resultando em um empacotamento eficiente das partículas que os compõem, tem efeito direto em diversas de suas propriedades. No caso de concretos, bem como para cerâmicas estruturais, eletrônicas, nucleares e metalurgia do pó, por exemplo, é desejável que o produto tenha um empacotamento denso (OLIVEIRA et al., 2000).

A obtenção de empacotamentos densos está relacionada ao contínuo preenchimento dos espaços vazios entre partículas por partículas de menor diâmetro, conforme indicado na Figura 2. Um sistema monodisperso é aquele que possui partículas de um único tamanho, esféricas ou não esféricas, enquanto que um sistema polidisperso é aquele que combina duas ou mais monodispersões de maneira a criar um sistema com maior densidade de empacotamento (OLIVEIRA et al., 2000).

Figura 2 - Empacotamento de partículas



(a) sistema monodisperso

(b) máxima densidade de empacotamento teórica

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA et al., 2000

Deve-se atentar para a introdução de partículas maiores que aquelas presentes, visto que esse fato levará ao surgimento de novos vazios pelo deslocamento das partículas e consequente aumento na porosidade do material. Dessa forma, não apenas o tamanho das partículas, mas também a sua distribuição deve ser controlada a fim de determinar o aumento ou não da densidade de empacotamento (OLIVEIRA et al., 2000)

Além da distribuição granulométrica das partículas, outros fatores afetam o empacotamento das partículas (OLIVEIRA et al., 2000):

- a) **Morfologia:** a densidade de empacotamento de uma distribuição diminui quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, devido à fricção entre partículas resultante do contato das superfícies irregulares. Quanto menor a partícula, maior o efeito;

- b) **Porosidade:** a porosidade interna das partículas, sejam os poros abertos ou fechados, tem impacto na densidade final, visto que um empacotamento de máxima densidade requer partículas com a menor porosidade possível. Partículas com poros fechados terão comportamento similar às densas na distribuição granulométrica, no entanto a densidade da mistura é menor. Para as partículas com poros abertos, tem-se impacto na distribuição granulométrica, visto que apresentam formato irregular;
- c) **Densidade:** uma diferença acentuada de densidade entre os componentes de uma distribuição granulométrica pode levar à segregação, gerando gradientes de densidade de empacotamento na mistura;
- d) **Efeito da parede:** para partículas de diâmetros diferentes, em que a relação entre seus diâmetros é de pelo menos dez vezes, a partícula fina considera a superfície de contato com a partícula grossa como praticamente plana. Nesse caso, a porosidade na região próxima à superfície das partículas grossas será maior do que no restante do volume da mistura;
- e) **Técnica de compactação:** a técnica de compactação é responsável por fazer com que as partículas menores ocupem os interstícios das partículas maiores, otimizando o empacotamento e minimizando a porosidade;
- f) **Estado de dispersão das partículas:** partículas muito finas têm maior tendência à aglomeração; tais aglomerados podem alterar a curva de distribuição originalmente prevista. Além disso, os aglomerados são equivalentes a partículas ocas, prejudicando a resistência mecânica dos produtos.

Existem diversos modelos para determinar o empacotamento ideal de partículas. Neste trabalho foram estudados os modelos de Andreassen, de Alfred e IPT/USP.

#### 4.3.1 Modelo de Andreassen

O modelo de Andreassen considera as distribuições de partículas como contínuas. Para Andreassen, em um empacotamento de partículas ideal, a vizinhança de duas partículas específicas com tamanhos muito diferentes apresenta condições de similaridade, o que define a distribuição de tamanho de partículas de acordo com uma lei de potências, conforme indicado na Equação (1) (OLIVEIRA et al., 2000).

$$CPFT = \left( \frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100, \quad (1)$$

em que  $CPFT$  é a porcentagem acumulada de partículas menores que  $D_p$ ;  $D_p$  é o diâmetro da partícula;  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula e  $q$  é o módulo ou coeficiente da distribuição. A distribuição de Andreassen com maior empacotamento possível, teoricamente, é aquela que utiliza  $q = 0,37$  (OLIVEIRA et al., 2000).

#### 4.3.2 Modelo de Furnas

Furnas considera em seu modelo de empacotamento uma abordagem discreta; ou seja, com partículas individuais. Nesse caso, as proporções de materiais em uma dada formulação visando máxima densidade de empacotamento geram uma progressão geométrica conforme demonstrado na Equação (3) (OLIVEIRA et al., 2000):

$$CPFT = \left( \frac{D_p^{\log \bar{r}} - D_S^{\log \bar{r}}}{D_L^{\log \bar{r}} - D_S^{\log \bar{r}}} \right) \times 100, \quad (2)$$

em que  $CPFT$  é a porcentagem acumulada de partículas menores que  $D_p$ ;  $D_p$  é o diâmetro da partícula;  $D_S$  é o diâmetro da menor partícula;  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula e  $\bar{r}$  é o quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume da malha imediatamente inferior (OLIVEIRA et al., 2000).

#### 4.3.3 Modelo de Alfred

Considerando-se o modelo de Furnas para distribuições discretas de partículas, a quantidade de partículas finas gera uma progressão geométrica. Para o modelo de Andreassen, considerando-se distribuições contínuas de partículas, obtém-se uma reta quando o gráfico é gerado em escala log-log, indicando, dessa forma, que o modelo também é uma progressão geométrica (OLIVEIRA et al., 2000).

Pela combinação de ambos os modelos, chega-se ao modelo de Alfred, conforme demonstrado na Equação (3) (OLIVEIRA et al., 2000):

$$CPFT = \left( \frac{D_p^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100, \quad (3)$$

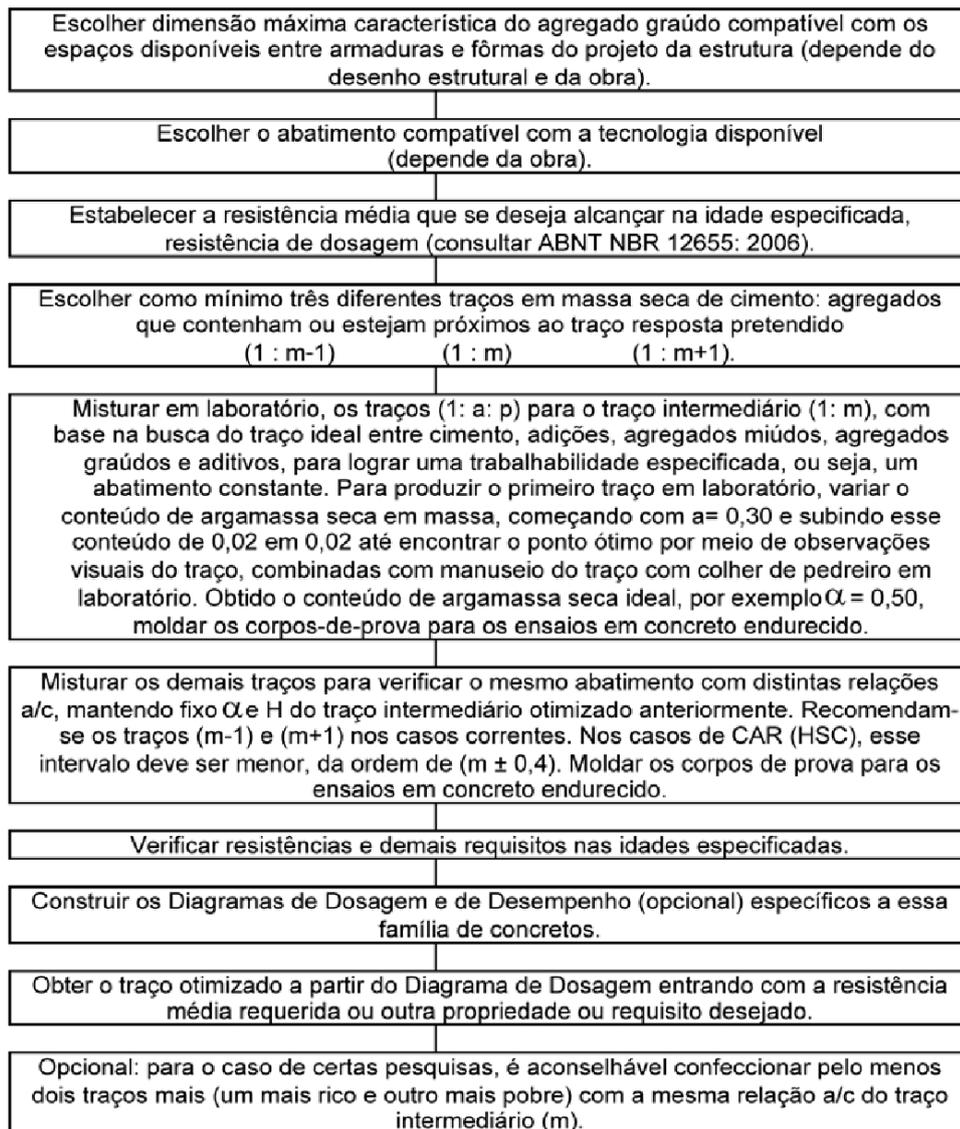
em que  $CPFT$  é a porcentagem acumulada de partículas menores que  $D_p$ ;  $D_p$  é o diâmetro da partícula;  $D_S$  é o diâmetro da menor partícula;  $D_L$  é o diâmetro da maior partícula e  $q$  é o módulo ou coeficiente da distribuição, sendo utilizado o mesmo valor de 0,37 para o melhor empacotamento teórico.

#### 4.3.4 Modelo IPT/USP

O método IPT/USP considera que a melhor proporção entre os agregados é aquela que resulta em menor consumo de água, e não necessariamente a máxima compacidade do esqueleto granular. Dessa forma, ao se conseguir o menor consumo de água possível para uma dada consistência, ter-se-á a maior resistência à compressão possível. O método é uma combinação dos métodos que consideram granulometria contínua e descontínua. O fluxograma de aplicação do método pode ser visto na Figura 3 (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

A partir do modelo descrito na figura 3, durante a preparação em laboratório foi fixado o teor de agregado graúdo e cimento e a trabalhabilidade foi ajustada visualmente, adicionando agregado miúdo até a obtenção de um material coeso.

Figura 3 - Fluxograma para o método de dosagem IPT/USP



Fonte: TUTIKIAN; HELENE, 2011

#### 4.4 ENSAIOS EM CONCRETOS

Para o concreto nas primeiras idades, normalmente as propriedades avaliadas são a trabalhabilidade, perda de abatimento, segregação e exsudação e tempo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 2008), conforme definições a seguir:

A *trabalhabilidade*, conforme ASTM C-125, é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco com perda mínima de homogeneidade. Ela tem impacto direto na capacidade de execução adequada de uma obra. A trabalhabilidade é uma propriedade composta por dois componentes principais, a fluidez e a coesão. A medida da fluidez de um concreto fresco, ou a sua consistência, pode ser medida

através de um teste de abatimento de tronco de cone. A coesão está relacionada à capacidade de retenção de água e dos agregados graúdos. Os principais fatores que afetam a trabalhabilidade são: consumo de água, consumo de cimento, características do agregado e aditivos e adições (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A *perda de abatimento* normalmente é definida como a perda de consistência do concreto fresco com o tempo. Ela ocorre devido ao consumo da água livre pelas reações de hidratação. Um concreto que apresente endurecimento prematuro acarretará problemas durante sua aplicação, como aderência à betoneira, necessidade de maior torque, necessidade maior de água e dificuldades no bombeamento e lançamento do concreto. Suas principais causas são: emprego de cimento com pega anormal, período longo para as operações e aumento da temperatura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A *segregação* é a separação dos componentes de tal forma que a sua distribuição deixe de ser uniforme; em misturas muito secas, há a separação dos agregados da argamassa. A *exsudação* é um tipo especial de segregação, comum em misturas de concreto muito fluidas, que é o surgimento de água na superfície após o concreto ter sido lançado e conformado, mas antes da sua pega. Sua medida não é quantitativa; normalmente, realiza-se apenas a observação visual. A causa da segregação e exsudação normalmente está associada à vários fatores, como combinação de consistência inadequada, quantidade excessiva de agregado graúdo e falta de partículas finas. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O *tempo de pega* de um concreto é definido como o início da solidificação de um concreto fresco. Os tempos de pega *inicial* e *final* são determinados pelo método de resistência à penetração, no qual mede-se o tempo necessário para o material resistir à penetração igual a 27,6 MPa. Os principais fatores que influenciam o tempo de pega em um concreto são a composição do cimento, temperatura, relação água/cimento e os aditivos utilizados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 4.5 SIENITO

O sienito é uma rocha ígnea com grande quantidade de feldspatos sódicos e potássicos (álcalis), que pode conter de 80 a 95% de feldspatos e feldspatóides em sua totalidade. A rocha apresenta uma quantidade praticamente nula de quartzo livre e possui minerais ferromagnesianos (DEL ROVERI et al., 2013; VOLKMANN, 2004).

Assim como o feldspato, o sienito fornece álcalis que agem como agente fluxante e diminuem a temperatura de fusão de misturas cerâmicas. Seu maior teor de alumina aumenta a

resistência ao risco e à quebra, melhora a resistência térmica e aumenta a durabilidade química. O sienito possui alta resistência mecânica e excelente resistência ao desgaste, as quais são úteis na indústria civil (KOGAL et al., 2006).

Sua aplicação é variada na indústria cerâmica, sendo utilizada na produção de vidro, grânulos para telhados, material para estradas, assim como asfalto e agregado para concreto, além de pigmentos e *fillers* (KOGAL et al., 2006). O sienito do Maciço da Pedra Branca é voltado para a comercialização de rochas ornamentais, devido à sua coloração marrom resultante de sua composição mineralógica.

No entanto, um limitante para sua utilização em massas cerâmicas se deve à presença de hidróxidos de ferro e magnetita; nesse caso, é preciso que os teores destes compostos sejam baixos. A separação magnética é efetiva na remoção destes minerais (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2008).

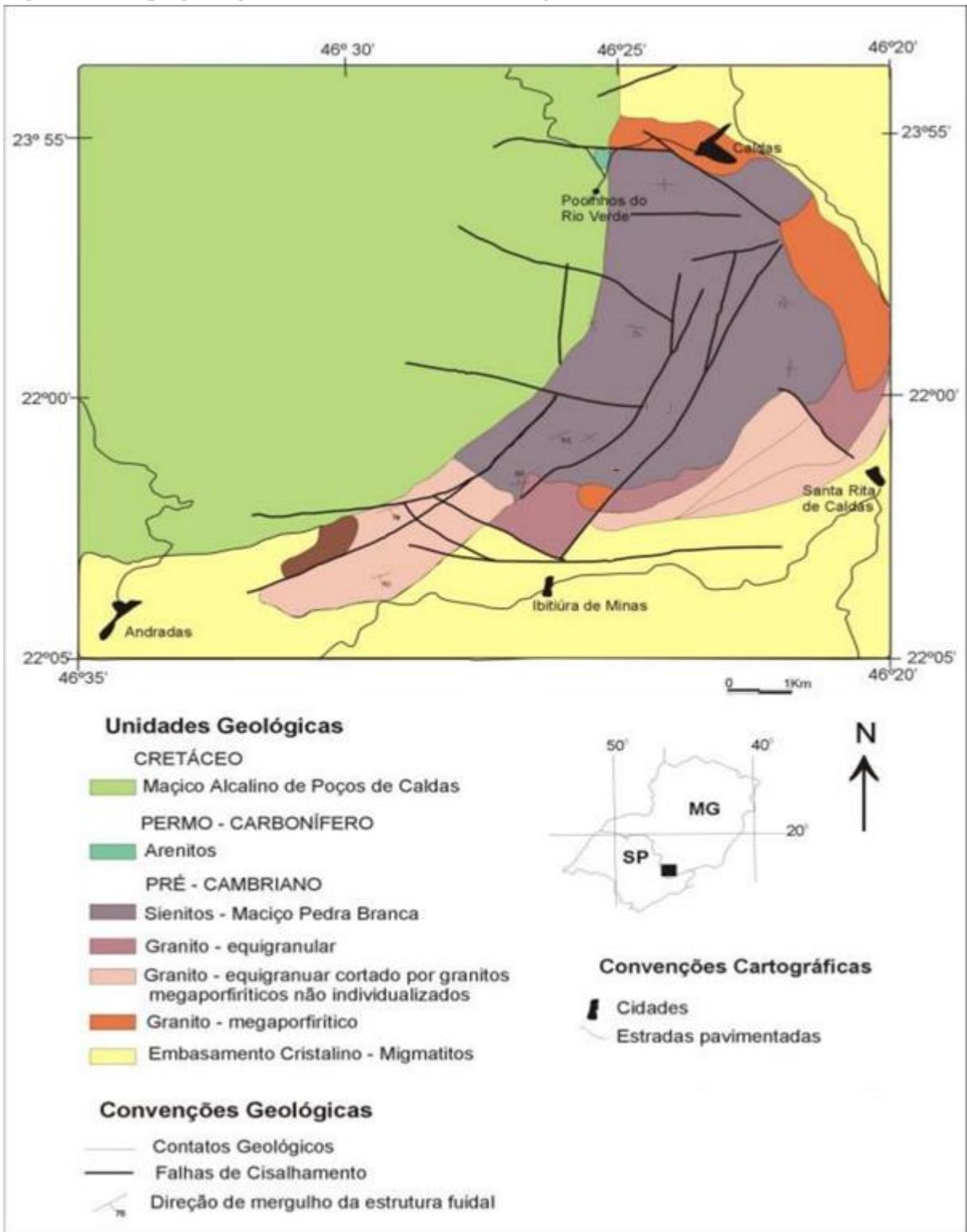
Nesse trabalho foi utilizado o sienito oriundo do Maciço Alcalino de Pedra Branca, localizado na região de Poços de Caldas, como indicado nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Sienito oriundo do maciço Pedra Branca



Fonte: Da autora.

Figura 5 – Mapa geológico onde é observado o maciço Pedra Branca



Fonte: MEYER et al., 2003 apud FIGUEIREDO, 2014

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 MATERIAIS

Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Cimento tipo CP II-E 32, do fabricante Holcim;
- b) Pó de brita da região de Pouso Alegre, como agregado miúdo ou matriz (sem fornecedor específico);
- c) Brita 1 da região de Pouso Alegre como agregado graúdo (sem fornecedor específico);
- d) Sienito oriundo do Maciço Alcalino de Pedra Branca, região de Poços de Caldas;
- e) Aditivo superplastificante de terceira geração, com nome comercial Glenium 51 do fabricante Basf S.A., classificado em relação à base química como éter poli carboxílico, com densidade variável de 1,067 a 1,107 g/cm<sup>3</sup>.

### 5.2 METODOLOGIA

#### 5.2.1 Caracterização dos Agregados

O agregado graúdo (brita 1) foi classificado utilizando peneiras de abertura entre 25 mm e 0,15 mm. Os agregados finos usados foram pós de brita e sienito, sendo que o último foi fragmentado em um britador de mandíbulas e moído em moinho tipo galga. O sistema de peneiras utilizado para os agregados finos contou com peneiras de aberturas entre 9,5 mm e 0,15 mm, e o material deveria se adequar aos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 7211:2009. O ensaio foi realizado em triplicata.

Foram ainda realizados os ensaios de massa específica aparente e porosidade aparente dos agregados, bem como sua análise química semiquantitativa por Fluorescência de Raios X e pH. Esses ensaios foram realizados na Togni S/A Materiais Refratários.

#### 5.2.2 Formulações Padrão (sem Sienito)

Foram calculadas cinco formulações diferentes utilizando as matérias primas acima (exceto sienito), através dos modelos de Andreassen, Alfred e IPT/USP. Para as três primeiras formulações, a quantidade de defloculante superplastificante utilizada foi fixada em 0,4% m/m de cimento, em razão dos bons resultados obtidos por Grillo (2014); a quantidade de água foi

ajustada experimentalmente até ser obtido um material com plasticidade trabalhável. Para as duas últimas formulações, a quantidade de água foi fixada e a quantidade de defloculante foi variada para obter a plasticidade. As descrições das formulações podem ser vistas na Tabela 5 e as formulações pesadas estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 - Descrição das formulações padrão

<b>Formulação</b>	<b>Modelo</b>	<b>Defloculante</b>	<b>Água</b>
C1	Andreassen	Fixo	Variável
C2	Alfred	Fixo	Variável
C3	IPT/USP	Fixo	Variável
C4	Andreassen	Variável	Fixo
C5	Alfred	Variável	Fixo

Fonte: Da autora.

Tabela 6 - Formulações padrão calculadas

<b>Matéria Prima</b>	<b>Formulações (kg)</b>				
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
Brita 1	40,383	51,475	40,383	40,383	51,475
Pó de brita	35,112	24,021	29,485	35,112	24,021
Cimento	27,696	27,696	27,696	27,696	27,696
Água	10,953	10,537	10,340	10,340	10,340
Defloculante	0,110	0,110	0,110	0,150	0,198

Fonte: Da autora.

### 5.2.3 Formulações com Sienito

Foram calculadas quatro formulações diferentes, com substituição do teor de pó de brita por sienito em 25, 50, 75 e 100%. Foi utilizado o procedimento descrito no Apêndice A para ajustar a granulometria de cada formulação de acordo com a granulometria da formulação padrão calculada por Andreassen, a qual apresentou o melhor resultado. As formulações pesadas estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Formulações com sienito calculadas

<b>Matéria Prima</b>	<b>Formulações (kg)</b>			
	<b>C1-25</b>	<b>C1-50</b>	<b>C1-75</b>	<b>C1-100</b>
Brita 1	40,463	40,149	39,893	39,701
Pó de brita	26,274	17,673	8,901	-
Sienito	8,758	17,673	26,702	35,794
Cimento	27,696	27,696	27,696	27,696
Água	11,130	11,130	11,130	11,130
Defloculante	0,111	0,111	0,111	0,111

Fonte: Da autora.

#### 5.2.4 Caracterização do Concreto

Para o concreto no estado fresco, o ensaio realizado foi de abatimento de tronco de cone para determinação da consistência, conforme a norma NBR NM 67. Já para o concreto no estado endurecido, foi feito o ensaio para determinação da resistência mecânica à compressão, conforme a norma NBR 5739:2007.

##### 5.2.4.1 Preparação do Concreto

Para a preparação do concreto, utilizou-se como referência a norma NBR 12655:2006, que estabelece o preparo e controle da resistência do concreto, e a norma NBR NM 33 que dá as diretrizes para a coleta e a preparação da amostra de concreto fresco. Para cada uma das cinco formulações analisadas, foram preparados 6 corpos de prova para cada idade (7, 14 e 28 dias), totalizando-se 90 corpos de prova.

##### 5.2.4.2 Determinação do Abatimento

O ensaio de abatimento de concreto, conforme norma NBR NM 67, visa medir a consistência do concreto fresco pela medida do seu assentamento. Ele consiste em preencher três camadas de concreto em um cone, sendo feito um adensamento para cada camada. Em seguida, retira-se o molde com um tempo total de oito segundos; a consistência do concreto é medida tomando-se como base a altura do cone metálico e a parte mais alta do cone de concreto.

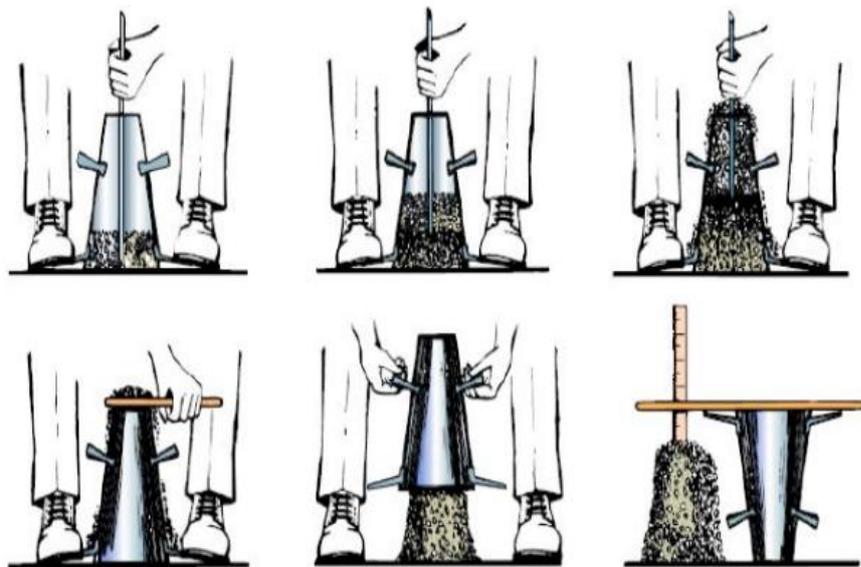
Dependendo da altura medida, a consistência é determinada através da relação na Tabela 8. O procedimento está ilustrado na Figura 6 e todas as composições foram submetidas a esse ensaio.

Tabela 8 - Consistência do concreto

Consistência	Abatimento (cm)
Seca	0 – 2
Firme	2 – 5
Média	5 – 12
Mole	12 – 18
Fluida	18 – 25

Fonte: NBR NM 67

Figura 6 - Ensaio de abatimento de concreto



Fonte: ARAGÃO, 2012 apud GRILLO, 2014

#### 5.2.4.3 Moldagem, Cura e Capeamento dos Corpos de Prova

O método para moldagem e cura de corpos de prova e o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos devem estar de acordo com as normas NBR 5738:2015 e NBR 5739:2007. Nesse trabalho, utilizou-se um molde cilíndrico de 10 x 20 cm, untado com óleo vegetal. De acordo com esses procedimentos, o preenchimento do molde é feito em duas camadas, e cada camada é adensada com 12 golpes. Para a segunda camada, coloca-se um excesso de concreto para que o molde fique completamente preenchido após o adensamento. Após 24 h de

moldagem, faz-se a cura pela submersão dos corpos de prova desmoldados em água com temperatura em torno de 21°C.

#### *5.2.4.4 Determinação da Resistência Mecânica à Compressão*

O ensaio foi realizado conforme a norma ABNT NBR 5739:2007. A dosagem do concreto foi determinada de modo que ele apresentasse espalhamento e resistência mecânica à compressão após 28 dias de cura úmida de 35 MPa, conforme resistência à compressão esperada após 28 dias de acordo com o cimento utilizado, CP II-E.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

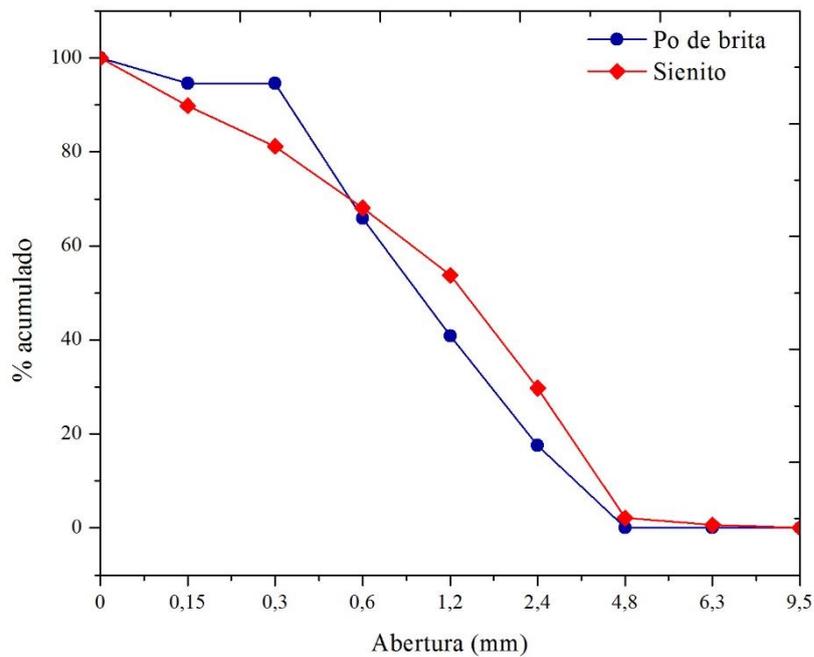
A análise granulométrica acumulada dos agregados utilizados pode ser visualizada na Tabela 9, bem como na Figura 7. Os valores abaixo dispostos são referentes à média de três análises realizadas para cada matéria prima.

Tabela 9 - Análise granulométrica acumulada dos agregados

<b>Abertura (mm)</b>	<b>Brita 1 (%)</b>	<b>Pó de brita (%)</b>	<b>Sienito (%)</b>
25,00	0,00	0,00	0,00
19,00	1,59	0,00	0,00
12,50	50,47	0,00	0,78
9,50	80,87	0,00	1,84
6,30	97,03	0,04	4,22
4,80	99,09	0,29	6,73
2,40	99,82	15,07	23,15
1,20	99,82	36,33	41,32
0,60	99,82	59,81	56,50
0,30	99,82	90,86	72,32
0,15	99,82	97,97	87,18
Fundo	100,00	100,00	100,00

Fonte: Da autora.

Figura 7 - Análise granulométrica do pó de brita e sienito



Fonte: Da autora.

Pode-se observar que a granulometria do sienito é bastante diferente da granulometria do pó de brita, sendo distribuída ao longo de uma faixa maior de diâmetros, e possuindo menor quantidade de finos. Tal fator, conforme observado por Godinho (2015), contribui para a segregação no concreto e consequente queda nas propriedades. Para corrigir esse fator, a proporção de agregados deve ser ajustada para compensar a diferença de análise e, dessa forma, manter as propriedades do concreto.

Os resultados dos ensaios físicos dos agregados podem ser vistos na Tabela 10; enquanto que a análise química e o pH podem ser vistos na Tabela 11.

Tabela 10 - Ensaios físicos dos agregados

<b>Material</b>	<b>M.E.A.</b> <b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>M.E.A.S.</b> <b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>A.A.</b> <b>(%)</b>	<b>P.A.</b> <b>(%)</b>
Brita	2,57	2,59	0,35	0,89
Sienito	2,71	2,78	0,91	2,46

Fonte: Da autora.

Tabela 11 - Análise química (%) e pH dos agregados

<b>Análise Química (%)</b>	<b>Brita</b>	<b>Sienito</b>
Perda ao Fogo	2,71	0,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,79	14,15
SiO <sub>2</sub>	54,44	55,08
TiO <sub>2</sub>	0,75	2,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,72	4,65
CaO	2,09	5,75
MgO	0,48	2,61
Na <sub>2</sub> O	7,32	3,14
K <sub>2</sub> O	7,41	7,79
F	-	1,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,87
BaO	0,23	0,50
SrO	0,20	0,44
ZrO <sub>2</sub>	0,12	0,12
MnO	0,27	0,10
SO <sub>3</sub>	0,08	0,08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,06
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,05
Cs <sub>2</sub> O	0,25	-
ZnO	0,02	-
Au	-	0,05
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,01
<b>pH</b>	<b>9,60</b>	<b>10,14</b>

Fonte: Da autora.

Nota-se que a diferença de densidade entre a brita e o sienito é grande e, por isso, espera-se que o concreto com sienito apresente um valor cada vez maior de densidade conforme se aumenta o percentual de substituição de brita por sienito. A maior porosidade do sienito, por sua vez, pode acarretar no maior consumo de água em concretos com sienito, podendo diminuir a sua resistência mecânica final.

As análises químicas de ambos materiais apresentam algumas diferenças também; tais diferenças podem impactar diretamente no processo de defloculação do material. Por exemplo,

tem-se que a relação  $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$  da brita é 7,43, enquanto que a do sienito é 17,54. Tal diferença pode fazer com que seja necessário menos defloculante e/ou água, interferindo nas propriedades final do concreto (LINK; BRAGANÇA; BERGMANN, 2013). O pH também tem sua influência, visto que a mudança pode tirar a suspensão do seu intervalo isoelétrico, causando segregação no concreto final.

## 6.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM FORMULAÇÃO PADRÃO

### 6.2.1 Ensaio de Abatimento

Para todas as formulações, foram realizados os ensaios de abatimento e resistência mecânica à compressão. O espalhamento das formulações pode ser visualizado na Figura 8.

Para a formulação C1, durante a preparação do concreto, foi observada boa distribuição e coesão do material. No ensaio de abatimento, não foi observada nenhuma segregação e a conformação do material foi fácil, sem necessidade de vibração.

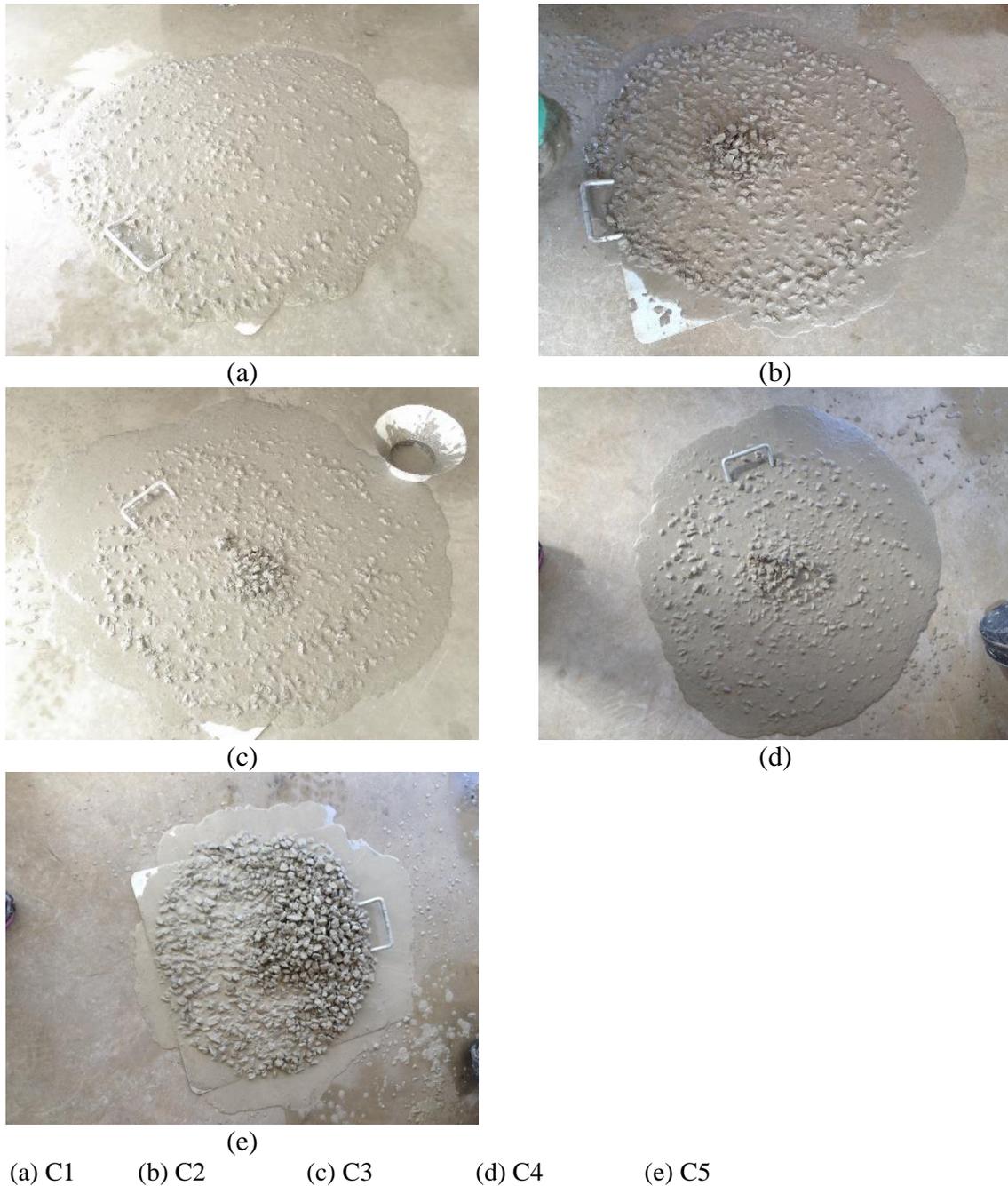
Para a formulação C2, o material apresentou baixa coesão, sendo necessário adicionar mais água para permitir a conformação. Apesar disso, a conformação desse material foi mais difícil que as outras formulações. No ensaio de abatimento, foi observada grande segregação, principalmente dos agregados grossos.

Para a formulação C3, o material teve boa coesão e distribuição. Apesar de apresentar uma leve segregação na parte central, o material pôde ser facilmente conformado.

A partir da formulação C4, foi alterada a quantidade de defloculante e mantida a quantidade de água. No entanto, observou-se que a adição de defloculante teve um efeito negativo na coesão do concreto se comparada à formulação C1. Foi observada segregação do material e a sua conformação foi um pouco mais difícil.

Para a formulação C5, o efeito do aumento de defloculante na formulação foi ainda mais drástico, havendo separação total dos agregados e matriz. A conformação dos corpos de prova foi extremamente difícil, sendo que só foi possível a conformação de quatro corpos de prova. Ainda, para as formulações C4 e C5 foi observada deformação plástica nos corpos de prova após a desmoldagem.

Figura 8 - Ensaio de abatimento para as formulações



Fonte: Da autora.

### 6.2.2 Resistência à Compressão e Densidade Aparente

Os resultados de resistência à compressão podem ser observados na Tabela 12 e Figura 9, juntamente com os valores de densidade aparente de cada uma das formulações.

Conforme esperado, a fórmula de Alfred (C2) apresentou o maior valor de densidade de empacotamento. No entanto, o mesmo não ocorreu com a resistência mecânica, levando à

conclusão de que, a densidade não é a única responsável por valores altos de resistência à compressão. Pode-se observar que a falta de coesão observada na formulação C2, tendo sido necessária a adição de mais água, impactou diretamente na resistência mecânica do material. As formulações C1 e C3 apresentaram resistência mecânica similar, o que é esperado visto que ambas possuem teores similares de agregados e apresentaram boa coesão durante a moldagem. As formulações C4 e C5 apresentaram valores de resistência mecânica bem maiores que a formulação C2 e próximos à formulação C1, devido ao menor valor de água utilizado. No entanto, o material ficou mais difícil de trabalhar e apresentou segregação, que são características não desejáveis para o material, além de aumentar o custo devido à maior quantidade de defloculante, conforme indicado na Tabela 13. O detalhamento do cálculo do custo está indicado no Apêndice B.

Tabela 12 - Resistência mecânica das formulações padrão

Formulação	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência Mecânica (MPa)		
		7 dias	14 dias	28 dias
C1	2,32	41,5 ± 2,6	45,4 ± 4,5	47,7 ± 3,8
C2	2,39	36,1 ± 2,8	37,8 ± 2,9	40,7 ± 3,7
C3	2,32	42,9 ± 2,4	44,3 ± 5,0	46,2 ± 5,1
C4	2,28	42,7 ± 2,0	53,7 ± 1,9	58,3 ± 3,7
C5	2,33	38,3 ± 2,0	46,0 ± 3,6	49,8 ± 2,0

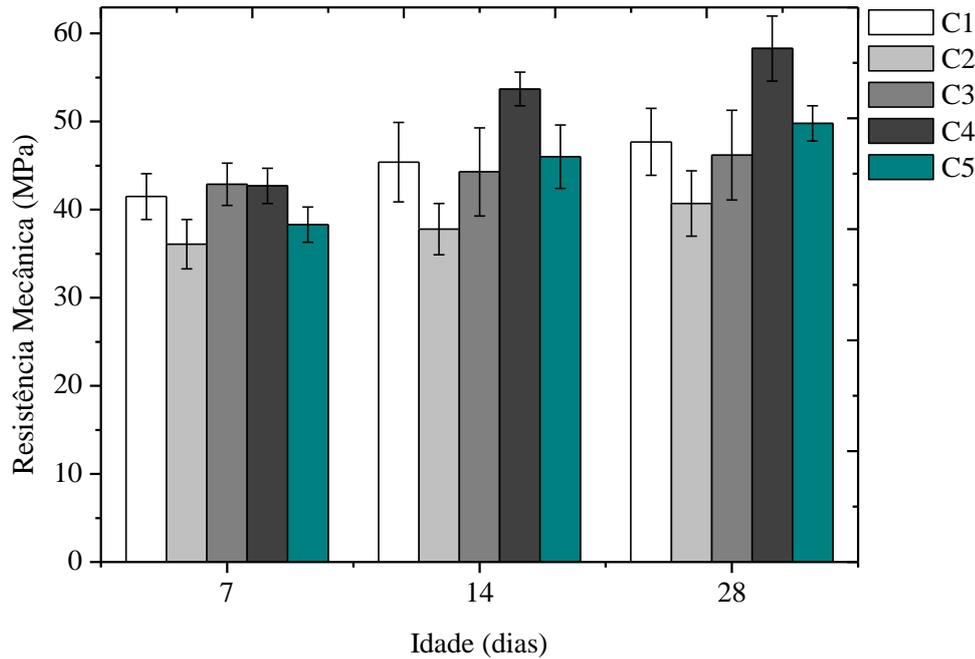
Fonte: Da autora.

Tabela 13 - Custo das formulações padrão

Formulação	Custo (R\$/ton.)
C1	166,87
C2	167,35
C3	172,92
C4	172,56
C5	178,81

Fonte: Da autora.

Figura 9 - Resistência mecânica das formulações padrão após 7, 14 e 28 dias



Fonte: Da autora.

Dessa forma, a fim de determinar a melhor formulação, foram comparados os ensaios de abatimento e os valores de densidade aparente, resistência à compressão e custo das formulações, conforme indicado na Tabela 14, sendo destacados os melhores resultados. A formulação C1, calculada com Andreassen, foi a que apresentou o melhor conjunto de resultados e, portanto, foi utilizada na próxima etapa para a substituição de brita por sienito.

Tabela 14 - Propriedades das cinco formulações analisadas

Formulação	Abatimento	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à compressão após 28 dias (MPa)	Custo (R\$/ton.)
C1	Ótimo	2,32	47,7 ± 3,8	166,87
C2	Regular	2,39	40,7 ± 3,7	167,35
C3	Regular	2,32	46,2 ± 5,1	172,92
C4	Regular	2,28	58,3 ± 3,7	172,56
C5	Ruim	2,33	49,8 ± 2,0	178,81

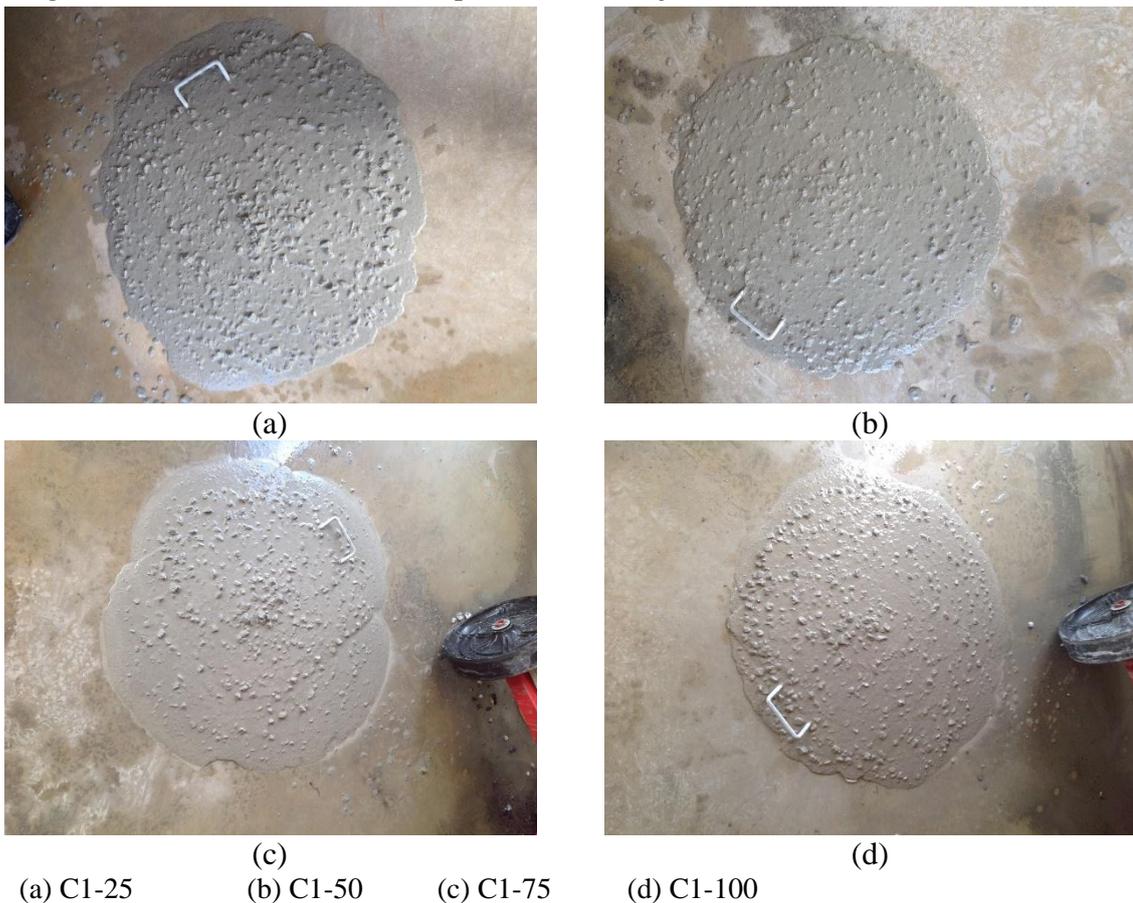
Fonte: Da autora.

### 6.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO COM FORMULAÇÃO COM SIENITO

#### 6.3.1 Ensaio de Abatimento

Para todas as formulações, foram realizados os ensaios de abatimento (Figura 10). Pelas imagens obtidas, pode-se notar que, mantendo-se a quantidade de água, a adição de sienito tende a piorar a coesão do concreto, sendo que a formulação C1-75 apresentou o maior efeito nesse sentido. Pode-se observar ainda que não houve segregação dos agregados no centro, indicando que o algoritmo utilizado foi eficaz para manter a distribuição granulométrica da formulação original. No entanto, outros efeitos contribuíram para a alteração na coesão do concreto, tais como o pH e composição química do sienito, conforme descrito na Seção 6.1.

Figura 10 - Ensaio de abatimento para as formulações



Fonte: Da autora.

### 6.3.2 Resistência à Compressão e Densidade Aparente

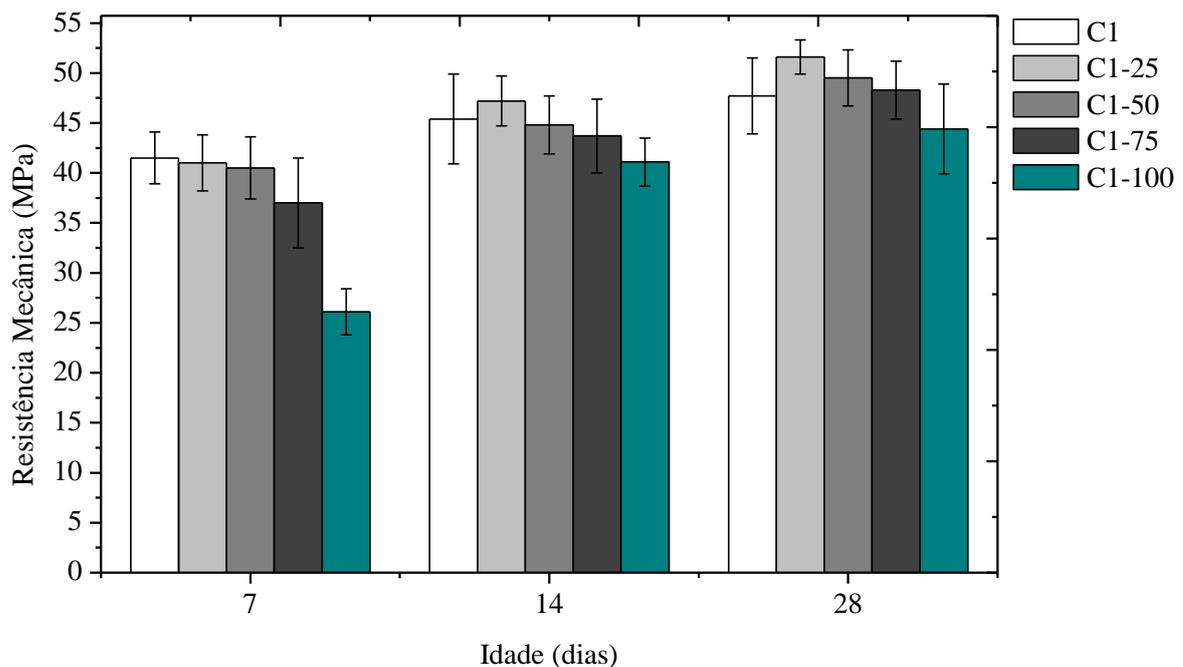
Os resultados de resistência à compressão podem ser observados na Tabela 15 e Figura 11, juntamente com os valores de densidade aparente (D.A.) de cada uma das formulações. Conforme esperado, quanto maior a adição de sienito, maior a densidade do concreto, o que já foi discutido na Seção 6.1. No entanto, pode-se observar que a resistência à compressão tende a diminuir com a adição de sienito, embora o menor valor encontrado após 28 dias ainda seja superior a 35 MPa, que era a resistência esperada pela dosagem utilizada. Dessa forma, pode-se afirmar que a adição de sienito no concreto não prejudica a resistência mecânica do concreto.

Tabela 15 - Resistência mecânica das formulações com sienito

Formulação	D.A. (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência Mecânica (MPa)		
		7 dias	14 dias	28 dias
C1-25	2,28	41,0 ± 2,8	47,2 ± 2,5	51,6 ± 1,7
C1-50	2,34	40,5 ± 3,1	44,8 ± 2,9	49,5 ± 2,8
C1-75	2,36	37,0 ± 4,5	43,7 ± 3,7	48,3 ± 2,9
C1-100	2,39	36,1 ± 2,3	41,1 ± 2,4	44,4 ± 4,5

Fonte: Da autora.

Figura 11 - Resistência mecânica das formulações com sienito após 7, 14 e 28 dias



Fonte: Da autora.

Foi avaliado também o custo de cada formulação analisada. Pode-se observar que o custo tende a diminuir em até 10% quando o pó de brita é totalmente substituído por sienito (Tabela 16). A oportunidade de negócio gerada a partir dos resultados é inquestionável, considerando-se ainda a diminuição do impacto ao meio ambiente causada pelo acúmulo do sienito.

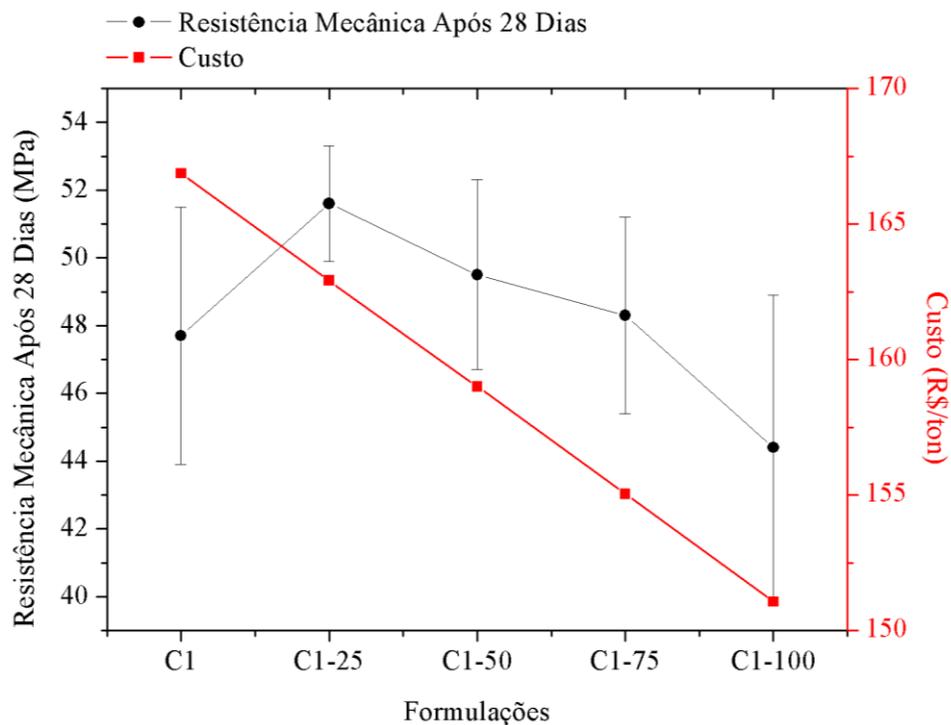
Tabela 16 - Custo das formulações com sienito

Formulação	Custo (R\$/ton.)
C1-25	162,91
C1-50	159,00
C1-75	155,04
C1-100	151,06

Fonte: Da autora.

A Figura 12 indica a relação do valor médio de resistência à compressão após 28 dias e o custo do concreto.

Figura 12 - Relação entre a resistência à compressão após 28 dias e o custo de cada formulação



Fonte: Da autora.

Finalmente, a fim de determinar a melhor formulação, foram comparados os ensaios de abatimento e os valores de densidade aparente, resistência à compressão e custo das formulações, conforme indicado na Tabela 17. Pode-se observar que a formulação C1-25 foi a que apresentou melhor valor de resistência à compressão, aliado à uma ótima coesão no ensaio de abatimento. A formulação C1-50 também apresenta estas características, aliadas à redução do custo por tonelada. Ainda, a formulação C1-100 apresentou maior valor de densidade aparente e menor custo e, embora sua resistência à compressão seja relativamente menor, ainda é superior a 35 MPa, valor esperado de resistência devido ao cimento utilizado. De acordo com os resultados obtidos, quaisquer dos teores analisados podem ser utilizados em formulações de concretos.

Tabela 17 - Propriedades das cinco formulações analisadas

<b>Formulação</b>	<b>Abatimento</b>	<b>Densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência à compressão após 28 dias</b>	<b>Custo (R\$/ton.)</b>
C1	Ótimo	2,32	47,7 ± 3,8	166,87
C1-25	Ótimo	2,28	51,6 ± 1,7	162,91
C1-50	Ótimo	2,34	49,5 ± 2,8	159,00
C1-75	Regular	2,36	48,3 ± 2,9	155,04
C1-100	Ótimo	2,39	44,4 ± 4,5	151,06

Fonte: Da autora.

## 7 CONCLUSÕES

O uso de modelos matemáticos para a formulação de concretos, tais como os modelos de Andreassen, Alfred e IPT/USP, conforme previamente demonstrado, mostraram-se viáveis, sendo que o melhor resultado obtido foi aquele onde utilizou-se a formulação de Andreassen, superando modelos clássicos usados para tal fim. A correta proporção entre os agregados acarretou ao concreto bons valores de densidade aparente e resistência mecânica, devido ao excelente empacotamento das partículas, bem como boa coesão.

O teor de água e defloculante impactam diretamente na qualidade final do produto. Conforme demonstrado, a adição de água no concreto causa diminuição da resistência mecânica final. O aumento do teor de defloculante, embora aumente a resistência mecânica, apresenta ainda mais efeitos adversos, tais como segregação e separação de cauda, dificuldade de moldagem e deformação plástica dos CPs após a cura, dependendo do teor utilizado. Ainda, o custo do material aumenta conforme aumenta o percentual de defloculante utilizado. Assim, para uma análise correta dos resultados, foi imprescindível avaliação dos ensaios de abatimento aliados às medidas de densidade e de resistência mecânica.

A utilização de um algoritmo para correção da proporção de agregados a fim de manter a distribuição granulométrica foi essencial, visto que as propriedades finais do concreto são fortemente dependentes da granulometria final. A granulometria afeta a quantidade de água adicionada e coesão do concreto, as quais têm efeito direto na resistência à compressão do concreto. Tal fator é comprovado pelos valores encontrados de resistência mecânica após 28 dias, os quais são bastante superiores ao valor esperado pela dosagem, 35 MPa. Todas as formulações analisadas apresentaram boas propriedades para o concreto civil, como boa coesão e densidade, sendo ainda obtida a diminuição do custo das formulações quanto maior a adição de sienito.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto.** 2013. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 09 out. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738.** Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739.** Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 12655.** Concretos de cimento Portland: Preparo, controle e recebimento – procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 33.** Concreto: Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67.** Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BEZERRA, U. T. **Compósitos Portland-biopolímero para cimentação de poços de petróleo.** 2006. 287f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, 2006.

CASTRO, A.L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** 2007. 302f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, São Carlos, 2007.

DEL ROVERI, C. et al.. Caracterização tecnológica para aproveitamento de matéria-prima sienítica com nefelina. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, p. 27-39, 2013.

FIGUEIREDO, J.M.V. **Aplicação de análise estrutural para orientação de lavra do sienito café imperial.** 2014. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Poços de Caldas, 2014.

FUSCO, P.B. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.** São Paulo: Editora PINI, 2008.

GAVA, P. P. et al.. **Concreto de normal e alta resistência:** definição do teor de aditivo redutor de água e dosagem para materiais da região do oeste do Paraná. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

GODINHO, P.M. **Formulações de concreto com sienito.** 2015. 28f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Poços de Caldas, 2015.

GRANZOTTO, L.; SOUZA, R.A. Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 35, n. 1, p-39-44, 2013.

GRILLO, R.H.F. **Estudo da influência de aditivos redutores de água em concretos da construção civil**. 2014. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Poços de Caldas, 2014.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes à base policarboxilatos destinados a concretos**. São Paulo: Boletim Técnico Escola Politécnica USP, 2003.

HE, H. et al.. Influence of particle packing on elastic properties of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 64, n. 2, p. 163-175, 2012.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2008.

KOGEL, J.E.; TRIVEDI, N.C.; BARKER, J.M.; KRUKOWSKI, S.T. **Industrial minerals & rocks: commodities, marks and uses**. 7. ed. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006.

LINK, M.; BRAGANÇA, S.R.; BERGMANN, C.P. Influência da razão  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  do silicato de sódio na defloculação de suspensões aquosas empregadas na conformação por colagem de barbotinas. **Cerâmica Industrial**, v. 18, n.1, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda., 2016.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda., 2010.

OLIVEIRA, I.R.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

PEDROSO, F.L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções**, n.53, Ano XXXVII, 2009.

SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A. Nefelina Sienito. In: \_\_\_\_\_. Rochas e minerais industriais: usos e especificações. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2008.

SIDDIQUE, R. et al.. Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1916-1925, 2011.

SINGH, M.; SIDDIQUE, R. Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 246-256, 2014.

TUTIKIAN, B.F.; HELENE, P. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.

VOLKMANN, A.R. **Estudos de rotas de beneficiamento da nefelina-sienito para aplicação como fundente na massa cerâmica do porcelanato**. 2004. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS, Porto Alegre, 2004.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Algoritmo utilizado para determinar as formulações com sienito

Tem-se a análise granulométrica dos três agregados, brita 1, pó de brita e sienito, denominadas respectivamente por  $A$ ,  $B$  e  $C$ . É desejado descobrir os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  da composição:

$$\alpha A + \beta B + \gamma C = Ot, \quad (4)$$

tal que a função  $Ot$  mais se aproxime de uma análise granulométrica ótima do concreto, dada por  $O$ . Esses coeficientes tem a interpretação de serem as porcentagens adicionadas de cada componente. Portanto:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (5)$$

O concreto vai possuir uma porcentagem  $\alpha$  de brita 1. O excedente  $1-\alpha$  refere-se ao pó de brita e sienito. A porcentagem de sienito nesse excedente é definida por:

$$\omega = \frac{\gamma}{(1 - \alpha)} \quad (6)$$

Com a equação anterior, consegue-se substituir  $\gamma$  por  $\omega$ :

$$\gamma = \omega(1 - \alpha) \quad (7)$$

É desejado escrever  $\beta$  em termos de  $\omega$  e  $\alpha$ , que são os parâmetros que se quer trabalhar. Para isso, basta isolar  $\beta$  em (5):

$$\beta = 1 - \alpha - \gamma$$

e substituir na Eq.(7):

$$\beta = 1 - \alpha - \omega(1 - \alpha) \rightarrow$$

$$\beta = (1 - \alpha)(1 - \omega) \quad (8)$$

Substitui-se então as Eqs. (7) e (8) em (4):

$$Ot = \alpha A + (1 - \alpha)(1 - \beta)B + \omega(1 - \alpha)C \quad (9)$$

Fatorando em  $\alpha$ :

$$Ot = \alpha[A - B + \omega(B - C)] + B - \omega(B - C) \quad (10)$$

Trabalhando com uma situação onde o valor de  $\omega$  é fornecido, precisa-se encontrar o melhor valor de  $\alpha$  que faz com que a curva  $Ot$  mais se aproxime da curva ótima  $O$ . Pra isso, pode-se definir a quantidade:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (O_i - Ot_i)^2 \rightarrow$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \{O_i - B_i - \omega(B_i - C_i) - \alpha[A_i - B_i + \omega(B_i - C_i)]\}^2 \quad (11)$$

Definindo:

$$R_i = O_i - B_i - \omega(B_i - C_i) \quad (12)$$

$$S_i = A_i - B_i + \omega(B_i - C_i) \quad (13)$$

tal que:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (R_i - \alpha S_i)^2 \quad (14)$$

Minimizando o valor de  $\chi^2$  da Eq.(14), obtém-se o valor de  $\alpha$  que garante a maior proximidade possível com a curva granulométrica alvo. O valor de  $\alpha$  é dado por:

$$\alpha_{min} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i S_i}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \quad (15)$$

## APÊNDICE B – Cálculo do custo das formulações

Preço das matérias-primas (cotação em 21/07/2017):

- Brita 1 (Simoso – Estrada São João da Boa Vista - Aguaí):
  - Preço: R\$ 40 / t
  - Frete: R\$ 15 / t
- Pó de Brita (Simoso – Estrada São João da Boa Vista - Aguaí):
  - Preço: R\$ 35 / t
  - Frete: R\$ 15 / t
- Sienito (Marrom Café – Caldas):
  - Preço: R\$ 30 / t
  - Frete: R\$ 15 / t
- Cimento Holcim CP II-E 32 (Carneiro Casa e Construção – Poços de Caldas)
  - Preço: R\$ 490,00 / t
- Superplastificante Basf Glenium 51 (NTC Brasil – São Paulo)
  - Preço: R\$ 3000 / tambor de 200 L = R\$ 13.799,45 / t considerando densidade média do fluido de 1,087 g/cm<sup>3</sup>
  - Frete: R\$ 176,00 / tambor = R\$ 809,57 / t

Tabela 18 - Custo das Formulações Padrão (sem Sienito)

Matéria Prima	Formulações (kg)				
	C1	C2	C3	C4	C5
Brita 1	40,383	51,475	40,383	40,383	51,475
Pó de brita	35,112	24,021	29,485	35,112	24,021
Cimento	27,696	27,696	27,696	27,696	27,696
Água	10,953	10,537	10,340	10,340	10,340
Defloculante	0,110	0,110	0,110	0,150	0,198
<b>Custo (R\$/t)</b>	<b>166,87</b>	<b>167,35</b>	<b>172,92</b>	<b>172,56</b>	<b>178,81</b>

Fonte: Da autora.

Tabela 19 - Custo das Formulações com Sienito

<b>Matéria Prima</b>	<b>Formulações (kg)</b>			
	<b>C1-25</b>	<b>C1-50</b>	<b>C1-75</b>	<b>C1-100</b>
Brita 1	40,463	40,149	39,893	39,701
Pó de brita	26,274	17,673	8,901	-
Sienito	8,758	17,673	26,702	35,794
Cimento	27,696	27,696	27,696	27,696
Água	11,130	11,130	11,130	11,130
Defloculante	0,111	0,111	0,111	0,111
<b>Custo (R\$/t)</b>	<b>162,91</b>	<b>159,00</b>	<b>155,04</b>	<b>151,06</b>

Fonte: Da autora.