

**PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM  
DIFERENTES TIPOS DE ADIÇÕES**

**SHEILLA PEREIRA VIEIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS  
E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM  
DIFERENTES TIPOS DE ADIÇÕES**

**SHEILLA PEREIRA VIEIRA**

**ORIENTADORA: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA, DSc.  
COORIENTADORA: VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, DSc.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM-06A/17  
BRASÍLIA/DF: MARÇO - 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM  
DIFERENTES TIPOS DE ADIÇÕES**

**SHEILLA PEREIRA VIEIRA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof.<sup>a</sup> Eugênia Fonseca da Silva, DSc. (ENC-UnB)  
(Orientadora)**

---

**Prof.<sup>a</sup> Valdirene Maria Silva Capuzzo, DSc. (ENC-UnB)  
(Coorientadora)**

---

**Prof. João Henrique Silva Rêgo, DSc. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Paulo César Correia Gomes, DSc. (UFAL)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 31 DE MARÇO DE 2017.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, SHEILLA PEREIRA	
Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições. [Distrito Federal] 2017.	
xv, 126 p. mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2017).	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Concreto autoadensável	2. Estado fresco e endurecido
3. Adições minerais	
I. ENC/FT/UnB	II. Título (mestre)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, S. P. (2017). Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-06A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 126 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Sheilla Pereira Vieira.

TÍTULO: Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições.

GRAU: Mestre

ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Sheilla Pereira Vieira

Rua Florentino Machado Pacheco, s/n, Valparaíso.

CEP: 38703-078 Patos de Minas – MG – Brasil

sheillaeng@gmail.com

*Dedico esta pesquisa aos meus pais e ao meu noivo  
em consideração ao amor e o apoio que recebi em  
todos os momentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida, pela saúde e proteção.

Aos meus pais, minha irmã, meu cunhado e meu noivo, pessoas queridas e parceiras nessa conquista.

Às professoras Dr.<sup>a</sup> Eugênia Fonseca da Silva, minha orientadora, e Dr.<sup>a</sup> Valdirene Maria Silva Capuzzo, minha coorientadora, pelos ensinamentos, confiança, disponibilidade e exemplo de amor à docência.

Aos professores Dr. João Henrique Silva Rêgo e Dr. Paulo César Correia Gomes, que me concederam a honra de compor a banca de avaliação da minha dissertação.

À Universidade de Brasília, pela oportunidade oferecida à minha formação profissional, em especial aos professores e colegas do programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas, pela realização profissional e aos colegas e amigos de trabalho, em especial, os funcionários e estagiários do Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção pelo companheirismo e apoio na realização das minhas atividades acadêmicas.

Às empresas fornecedoras e doadoras dos materiais utilizados na pesquisa e ao Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A. e Laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), em Brasília – DF pelos ensaios realizados.

## RESUMO

### PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM DIFERENTES TIPOS DE ADIÇÕES

**Autor:** Sheilla Pereira Vieira

**Orientadora:** Eugênia Fonseca da Silva

**Coorientadora:** Valdirene Maria Silva Capuzzo

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, Março de 2017.**

O setor da construção civil é um dos principais responsáveis pela poluição do meio ambiente, devido os processos de fabricação e transporte de materiais. O concreto autoadensável (CAA) apresenta várias vantagens que podem minimizar alguns impactos ambientais, como a capacidade de fluir sob as fôrmas e envolver as armações, sem a necessidade de vibração, o que economiza o uso de energia, e a inclusão de diversos tipos de materiais de origem naturais ou resíduos em sua dosagem. Assim, verificou-se a necessidade do estudo de diferentes tipos de adições minerais para composição do CAA, de acordo com a disponibilidade da região e de forma a melhorar a técnica de produção e as propriedades no estado fresco e endurecido do concreto, diminuindo o consumo de cimento Portland. Esta pesquisa avaliou a viabilidade técnica da produção de CAA, com o uso de cinco diferentes tipos de adições minerais: fíler calcário, resíduo de marmoraria, rocha fosfática, estéril de fosfato e cinza de eucalipto, em quatro teores de substituição ao cimento Portland. Foram comparadas as propriedades no estado fresco de autoadensabilidade, pelos ensaios de índice de estabilidade visual, espalhamento, tempo de escoamento, habilidade passante, viscosidade plástica e resistência à segregação, conforme a ABNT NBR 15823-1 (2010) e determinado o teor de ar. No estado endurecido, foram avaliadas as resistências mecânicas do CAA pelos ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade e características físicas, pelos ensaios da massa específica, absorção de água e índice de vazios. Após avaliação dos resultados obtidos, concluiu-se que o uso de fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática como adições minerais na produção de CAA, em substituição ao cimento, nos teores de 10 %, 20 %, 30 % e 40 %, apresentou viabilidade técnica e sustentável. Os concretos produzidos atenderam tanto as propriedades de autoadensabilidade, resistência mecânica e características físicas, quanto contribuíram com o meio ambiente ao utilizar resíduos industriais e adições minerais disponíveis localmente. A utilização de estéril de fosfato e cinza de eucalipto, no teor de 10 % de substituição ao cimento, demonstrou melhoria das propriedades mecânicas dos concretos, porém não atenderam os critérios de autoadensabilidade recomendados pela ABNT NBR 15823-1 (2010).

**Palavras chaves:** Concreto autoadensável, adições minerais, estado fresco e endurecido.

## **ABSTRACT**

### **PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH DIFFERENT TYPES OF ADDITIONS**

**Author: Sheilla Pereira Vieira**

**Supervisor: Eugênia Fonseca da Silva**

**Joint supervisor: Valdirene Maria Silva Capuzzo**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, March of 2017.**

The civil construction sector is one of the main responsible for environmental pollution, due to the processes of manufacture and transportation of materials. The self-compacting concrete (SCC) has several advantages that can minimize some environmental impacts, such as the ability to flow under the forms and wrap around the frames, without the need for vibration, which saves energy. Another advantage is the inclusion of various types of materials of natural origin or waste in their dosage. Therefore, it was verified the necessity to study the composition of the SCC with different types of mineral additions, available locally, in order to improve the production technique, the properties on the fresh and hardened state of the concrete, and reducing the consumption of Portland cement. This research evaluated the technical feasibility of SCC production with the use of five different types of mineral additions: limestone filler, marble residue, phosphate rock, sterile phosphate and eucalyptus ash, in four Portland cement substitution. The self-compacting properties in the fresh state of the concrete were compared by visual stability index, slump-flow,  $T_{500}$  time, passing ability, plastic viscosity and segregation resistance, according to ABNT NBR 15823-1 (2010) and determination of the air content. In the hardened state, the mechanical resistance of the SCC were evaluated by tests of compression strength, diametral compression traction and static modulus of elasticity. The physical characteristics were evaluated by tests of the specific mass, water absorption and voids index. After the evaluation of the obtained results, it was concluded that the use of limestone filler, marble residue and phosphate rock presented technical and sustainable viability as mineral additions in the production of SCC, in substitution of cement, with contents of 10 %, 20 %, 30 % and 40 %. The produced concretes achieved the properties of self compactability, mechanical strength and physical characteristics, and also contributed to the environment by using industrial waste and mineral additions locally available. The use of sterile phosphate and ash boiler in the 10% substitution content of the cement, showed improvement of the mechanical properties of the concretes, but did not reach the self-compacting criteria recommended by ABNT NBR 15823-1 (2010).

**Keywords:** Self-compacting concrete, mineral additions, fresh and hardened state.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	18
1.2	IMPORTÂNCIA DO TEMA .....	18
1.3	OBJETIVO GERAL.....	19
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>2</b>	<b>CONCRETO AUTOADENSÁVEL – estado da arte.....</b>	<b>20</b>
2.1	HISTÓRICO .....	20
2.2	IMPACTOS AMBIENTAIS .....	23
2.3	MATERIAIS CONSTITUINTES E A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DO CAA.....	23
2.3.1	Cimento Portland.....	24
2.3.2	Adições minerais .....	26
2.3.2.1	<i>Fíler calcário</i> .....	27
2.3.2.2	<i>Resíduo de marmoraria</i> .....	31
2.3.2.3	<i>Rocha fosfática e estéril de fosfato</i> .....	34
2.3.2.4	<i>Cinza de eucalipto</i> .....	36
2.3.3	Agregados e esqueleto granular.....	40
2.3.4	Aditivos químicos.....	41
2.3.5	Água .....	42
2.4	MÉTODOS DE DOSAGEM .....	43
2.5	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	44
2.5.1	Habilidade de preenchimento ou fluidez .....	45
2.5.2	Viscosidade plástica .....	47
2.5.3	Habilidade passante .....	48
2.5.4	Resistência à segregação .....	49
2.6	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....	50
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	54
3.1.1	Variáveis.....	54
3.2	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	55
3.2.1	Adições Minerais .....	56
3.2.1.1	<i>Difratometria de Raios-X</i> .....	61
3.2.1.2	<i>Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X</i> .....	65
3.2.2	Agregados.....	66
3.2.3	Cimento .....	69
3.2.4	Aditivo.....	72
3.2.5	Água .....	72
3.3	ESQUELETO GRANULAR.....	72
3.4	DOSAGEM DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS .....	75

3.4.1	Produção dos concretos .....	78
3.5	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	78
3.5.1	Determinação do teor de ar.....	78
3.5.2	Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento .....	79
3.5.3	Determinação do índice de estabilidade visual.....	80
3.5.4	Determinação da habilidade passante.....	80
3.5.5	Determinação da viscosidade aparente.....	82
3.5.6	Determinação da resistência à segregação.....	82
3.6	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	83
3.6.1	Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos .....	85
3.6.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	86
3.6.3	Módulo de elasticidade à compressão .....	87
3.6.4	Massa específica, absorção de água e índice de vazios.....	88
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
4.1	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	90
4.2	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	105
4.2.1	Resistência à compressão .....	105
4.2.1.1	<i>Concretos com mesmo teor de substituição e diferentes tipos de adições .</i>	<i>105</i>
4.2.1.2	<i>Concretos com mesmo tipo de adição e diferentes teores de substituição.</i>	<i>109</i>
4.2.1.3	<i>Resumo da resistência à compressão dos concretos para diferentes consumos de cimento.....</i>	<i>115</i>
4.2.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	117
4.2.3	Módulo de elasticidade à compressão .....	118
4.2.4	Massa específica, absorção de água e índice de vazios.....	119
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>123</b>
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	125
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>126</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>139</b>
A.1	- Resistência à compressão - ABNT NBR 5739 (2007).....	139
A.2	- Módulo de elasticidade - ABNT NBR 8522 (2008) .....	140
A.3	- Resistência à tração por compressão diametral - ABNT NBR 7222 (2011).....	141

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1– Critérios para avaliação qualitativa do IEV.....	46
Figura 3-1– Fases do programa experimental.....	53
Figura 3-2 – Amostra de fíler calcário.....	56
Figura 3-3 - Procedimentos para utilização do RM em: (a) coleta no tanque de decantação, (b) após evaporação de parte da água, (c) após secagem em estufa.....	57
Figura 3-4– Amostras antes de destorroar e peneirar de: (a) rocha fosfática e (b) estéril de fosfato.....	57
Figura 3-5– Processo de geração da CE em (a) madeira de eucalipto na esteira antes da queima, em (b) coleta de CE após a queima, em (c) amostra de CE.....	58
Figura 3-6- Granulometria a laser.....	59
Figura 3-7 - Granulometria por sedimentação.....	60
Figura 3-8 - Difratoograma de raios-X do fíler calcário.....	61
Figura 3-9- Difratoograma de raios-X do resíduo de marmoraria.....	62
Figura 3-10 - Difratoograma de raios-X da rocha fosfática.....	63
Figura 3-11 - Difratoograma de raios-X do estéril de fosfato.....	63
Figura 3-12 - Difratoograma de raios-X da cinza de eucalipto.....	64
Figura 3-13– Ensaio para caracterização dos agregados em (a) massa específica areia <sub>sup MF= 3,4</sub> (b) impurezas orgânicas, (c) e (d) massa específica brita <sub>9,5</sub> , (e) distribuição granulométrica da areia <sub>sup MF= 3,4</sub> , (f) massa unitária compactada areia <sub>inf MF=1,5</sub> , (g) material fino brita <sub>9,5</sub> .....	67
Figura 3-14– Distribuição granulométrica da areia <sub>inf MF=1,5</sub> .....	67
Figura 3-15– Distribuição granulométrica da areia <sub>sup MF= 3,4</sub> .....	68
Figura 3-16 - Distribuição granulométrica da brita <sub>9,5</sub> .....	69
Figura 3-17– Alguns ensaios para caracterização do cimento em (a) tempos de início e fim de pega, (b) massa específica, (c) método de Blaine e (d) resistência à compressão.....	70
Figura 3-18- Difratoograma de raios-X do CP II-E 32.....	71
Figura 3-19- Composição do esqueleto granular.....	73
Figura 3-20– Distribuição granulométrica da brita <sub>9,5</sub> + areia <sub>inf MF=1,5</sub> + areia <sub>sup MF= 3,4</sub> .....	74
Figura 3-21– Distribuição granulométrica da areia <sub>inf MF=1,5</sub> + areia <sub>sup MF= 3,4</sub> .....	74
Figura 3-22– Sequência da dosagem do CAA, em (a) materiais utilizados, (b) aditivo superplastificante, (c) dosagem da água (d) mistura do concreto.....	78
Figura 3-23 - Medidor tipo B para definição do teor de ar incorporado no concreto no estado fresco.....	79
Figura 3-24– Molde e placa de base.....	80
Figura 3-25 - Ensaio de espalhamento com o anel J.....	81
Figura 3-26- Caixa L e indicação das alturas H1 e H2.....	81
Figura 3-27- Execução do ensaio do Funil V.....	82
Figura 3-28– Coluna utilizada para o ensaio de segregação do CAA.....	83
Figura 3-29 – Corpos de prova, moldagem em (a, b, c, d), cura em (e), preparação da superfície em (f).....	84
Figura 3-30– Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova.....	86
Figura 3-31– Ensaio de resistência à tração dos corpos de prova.....	87

Figura 3-32– Ensaio de módulo elástico de elasticidade dos corpos de prova de CAA. ....	88
Figura 3-33– Ensaios para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do CAA. ....	89
Figura 4-1 - Índice de estabilidade visual dos concretos: (a) CAA-SF-0 e (b) CAA-FI-10.....	91
Figura 4-2 - Ensaios para o CAA em (a) espalhamento, $t_{500}$ e o índice de estabilidade visual (b) funil V, (c) anel J, (d) caixa L, (e) coluna de segregação. ....	94
Figura 4-3 -Ensaios de espalhamento, $t_{500}$ , índice de estabilidade visual, anel J e caixa L, em: (a) CAA-CE-10 e (b) CAA-ES-10. ....	95
Figura 4-4 - Ensaio de espalhamento dos concretos com diferentes tipos e teores de adições. ....	96
Figura 4-5–Ensaio do $t_{500}$ dos concretos com diferentes tipos e teores de adições. ....	98
Figura 4-6 - Ensaio do funil V dos concretos com diferentes tipos e teores de adições. ....	99
Figura 4-7–Ensaio do anel J dos concretos com diferentes tipos e teores de adições. ....	100
Figura 4-8–Ensaio da caixa L dos concretos com diferentes tipos e teores de adições. ....	101
Figura 4-9 - Ensaio na coluna de segregação dos concretos com diferentes tipos e teores de adições. ....	102
Figura 4-10 - Determinação do teor de ar incorporado no concreto no estado fresco. ....	104
Figura 4-11 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 10 %. ....	106
Figura 4-12 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 20 %. ....	107
Figura 4-13 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 30 %. ....	108
Figura 4-14 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 40 %. ....	109
Figura 4-15 - Resistência à compressão para o CAA com fíler calcário de 0 a 40 %.....	110
Figura 4-16 - Resistência à compressão para o CAA com RM de 0 a 40 %.....	111
Figura 4-17 - Resistência à compressão para o CAA com rocha fosfática de 0 a 40 % . ....	113
Figura 4-18 - Resistência à compressão para o CAA com estéril de fosfato de 0 a 10 % . - Resistência à compressão para o CAA com estéril de fosfato de 0 a 10 %.....	114
Figura 4-19 - Resistência à compressão para o CAA com cinza de eucalipto de 0 a 10 % . - Resistência à compressão para o CAA com cinza de eucalipto de 0 a 10 % . ....	115
Figura 4-20 - Resistência à compressão em relação ao consumo de cimento. ....	116
Figura 4-21 - Resistência à tração para os CAA com adições nos teores de 0 e 40 %, aos 28 dias.....	117
Figura 4-22 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 40 %, aos 28 dias. ....	118
Figura 4-23 - Massa específica para os CAA com adições nos teores de 0 a 40 % . ....	120
Figura 4-24 - Absorção (A) e índice de vazios (Iv) para os CAA com adições nos teores de 0 a 40 % . ....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais normas para os ensaios de CAA.....	22
Tabela 2 - Parâmetros e limites para dosagem de CAA. ....	44
Tabela 3- Classes de espalhamento ( <i>slump flow</i> ) do CAA.....	45
Tabela 4 - Classes do índice de estabilidade visual.....	47
Tabela 5- Classes de viscosidade plástica aparente $t_{500}$ (sob fluxo livre).....	48
Tabela 6- Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado).....	48
Tabela 7– Classes de habilidade passante pelo anel J. ....	49
Tabela 8- Classes de habilidade passante na caixa L (sob fluxo confinado).....	49
Tabela 9– Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação. ....	50
Tabela 10 - Matriz experimental da pesquisa e as variáveis independentes e dependentes. ....	55
Tabela 11– Caracterização das propriedades físicas das adições minerais. ....	58
Tabela 12– Composição química das adições minerais. ....	65
Tabela 13– Ensaios para caracterização dos agregados. ....	66
Tabela 14– Ensaios para caracterização física e mecânica do cimento CP II-E 32. ....	70
Tabela 15– Ensaios para caracterização química do cimento CP II-E 32. ....	71
Tabela 16 - Propriedades do aditivo superplastificante.....	72
Tabela 17– Ensaio para determinação da massa unitária das misturas M1 e M2. ....	73
Tabela 18 - Parâmetros e limites para dosagem de CAA - ACI 237R-07.....	76
Tabela 19– Cálculo do traço e consumos de materiais do CAA-SF. ....	77
Tabela 20- Consumos das misturas de CAA, em massa. ....	77
Tabela 21 - Programação dos ensaios no estado endurecido.....	85
Tabela 22 - Resultados e classificação dos concretos conforme ABNT NBR 15823-1 (2010). .....	90
Tabela 23 - Teor de ar aparente ( $A_1$ ) para cada tipo de concreto no estado fresco. ....	104
Tabela 24 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios em corpos de prova de CAA, aos 28 dias de idade, conforme a ABNT NBR 9778 (2005). ....	119

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABCIC	Associação Brasileira da Construção Industrializada em Concreto
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio (alumina)
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS EN	British Standard European Norm
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CAA	Concreto autoadensável
CaO	Óxido de cálcio
CCA	Cinza de casca de arroz
CCV	Concreto convencional vibrado
CE	Cinza de eucalipto
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato hidratado de cálcio
D <sub>Máx</sub>	Dimensão Máxima Característica
DRX	Difração de Raios-X
EDX	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X
EFNARC	European Federation of National Trade Associations
ES	Estéril de fosfato
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro
FI	Fíler calcário
FO	Rocha fosfática
GPa	GigaPascal
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IEV	Índice de estabilidade visual
ISO	International Organization for Standardization
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
LATEMC	Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção

MF	Módulo de finura
MG	Minas Gerais
MgO	Óxido de magnésio
Mi	Massa submersa
mm	Milímetro
MnO	Óxido de manganês
MPa	MegaPascal
Ms	Massa seca
Msat	Massa saturada
Mt	Mil toneladas
N	Newton
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
PECC-UnB	Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil – Universidade de Brasília
PF	Perda ao fogo
RI	Resíduo insolúvel
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
RM	Resíduos de marmorarias
s	Segundos
SCC	Self-Compacting Concrete
SF	Sem adição mineral
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
UNIPAM	Centro Universitário de Patos de Minas
AMV	Aditivo Modificador de Viscosidade
ρ <sub>r</sub>	Massa específica real
ρ <sub>s</sub>	Massa específica seca
ρ <sub>sat</sub>	Massa específica saturada

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil até a década de 1990, não havia enfrentado os problemas de sustentabilidade. Segundo Agopyan e John (2014) esse assunto era ignorado por órgãos governamentais, engenheiros e ambientalistas, apesar de ser um dos setores que mais consome recursos naturais e gera resíduos, com significativa emissão de poeira e poluição sonora em canteiros localizados dentro das cidades. Nos últimos anos, a importância do meio ambiente para a indústria da construção e o ambiente construído vêm sendo considerados de forma mais precisa e tem crescido expressivamente.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que por razões financeiras, o desenvolvimento industrial e econômico da construção civil, se baseava em metas simplistas e de curto prazo, resultando em grandes desperdícios e até prejuízos. A partir do século 20, questões como a durabilidade e a sustentabilidade dos materiais foram consideradas mais importantes que a alta resistência inicial ou a alta velocidade de produção das obras.

De acordo com Agopyan e John (2014) nas atividades de construção e demolição são gerados em torno de 90 milhões de toneladas anuais de resíduos. O setor também é um dos principais responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, devido aos processos de fabricação ou transporte de materiais. Dentre os materiais, a produção do cimento Portland é responsável por grandes consumos de energia e cerca de 7 % do total de emissão de CO<sub>2</sub> no mundo. Sendo que a cada tonelada de clínquer fabricado é liberado na atmosfera, em média, 1 (uma) tonelada de CO<sub>2</sub>, verifica-se a necessidade da redução no consumo de cimento. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto é um material de construção comumente produzido pela mistura de cimento Portland, areia, brita e água e seu consumo é estimado em 19 bilhões de toneladas métricas ao ano. (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O concreto é considerado o material mais consumido pela sociedade, por isso diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para a adoção de novas tecnologias, otimização dos materiais utilizados e implantação dos conceitos de sustentabilidade no concreto, juntamente com a exigência por maior durabilidade das estruturas, diminuição de ruídos na obra e em seu entorno e o aproveitamento de resíduos na construção civil. Na tentativa de atender todas essas exigências foi desenvolvido o concreto autoadensável (CAA).

O CAA é considerado um grande avanço na construção civil, apresentado pelo professor Hajime Okamura, da Universidade de Tecnologia de Kochi, no Japão, na década de 80, com o intuito de melhorar a uniformidade no adensamento, garantir sua qualidade e durabilidade, sem que ocorra segregação ou exsudação. Diferente do concreto convencional vibrado (CCV), o CAA apresenta a capacidade de fluir sob as fôrmas e envolver as armações sem a necessidade de vibração.

Khrapko (2007) afirma que o CAA é um concreto semelhante ao CCV quanto a composição de materiais, porém, sua dosagem e confecção exige maior controle tecnológico para garantir as propriedades de fluidez, viscosidade, coesão e a resistência à segregação.

Segundo Piovezam, Meleiro e Isa (2006) para garantir as propriedades do CAA, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, é necessária uma dosagem otimizada dos materiais constituintes, com a construção de um esqueleto granular dos agregados utilizados, associado a um volume mínimo de pasta cimentícia, além do uso de adições e aditivos para manter a estabilidade da mistura e produzir um concreto fluido.

O uso do CAA apresenta diversos benefícios, dentre eles: a diminuição de ruídos na obra e em seu entorno, em função da não utilização de equipamentos necessários para o adensamento mecânico, a facilidade de adequação às fôrmas de estruturas esbeltas e de diferentes arranjos arquitetônico e uma maior durabilidade da estrutura, pois reduz falhas de concretagem resultantes de má vibração. Já a composição do CAA, permite a utilização de diversos tipos de materiais na forma de agregados e adições minerais, sejam eles de origem naturais ou resíduos, originados da construção civil ou de outros processos industriais.

Os estudos sobre a utilização de resíduos industriais em forma de adição mineral, inerte ou reativa, segundo Araújo (2007), podem contribuir na dosagem e nas propriedades do CAA, reduzindo a demanda de cimento, a emissão de gases de efeito estufa, o descarte de resíduos de maneira inadequada, minimizando os impactos ambientais.

Quanto aos aspectos econômicos, o CAA apresenta maior eficiência durante a concretagem, podendo assim, aumentar a produtividade, reduzir o número de trabalhadores necessários para a atividade e o gasto com energia de vibração.

Esta dissertação contribui para o estudo da produção de concretos autoadensáveis com a utilização de adições minerais, sejam elas de origem naturais ou resíduos de processos

industriais e está inserida no Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (PECC-UnB), juntamente com os demais trabalhos realizados nessa área, por outros pesquisadores do programa, dentre eles: o uso de cinzas de casca de arroz (CCA's) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento (RÊGO, 2004), o gerenciamento, quantificação e caracterização de resíduos sólidos de construção e demolição (ROCHA, 2006), a influência da adição de fibras de celulose (papel kraft) nas características dos blocos de concreto não estrutural (ALVES, 2016), a avaliação da atividade pozolânica em cinza de casca de arroz (CCA) com diferentes teores de sílica amorfa (PINHEIRO, 2016) e o estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis (MENDES,2016).

### 1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Segundo RILEM (2000), é necessário o estudo de outras adições minerais para utilização como finos em CAA, com o objetivo de otimizar a composição, melhorar a técnica de produção, diminuir o consumo de cimento Portland e atender os critérios de viabilidade técnica e econômica, de acordo com a disponibilidade em cada região.

No Brasil, o estado de Minas Gerais é destaque em diversas atividades econômicas, dentre elas, a extração dos mais variados tipos de minérios e a produção de leite e seus derivados. No processo produtivo dessas atividades há uma geração expressiva de resíduos. Devido à grande disponibilidade de diferentes materiais nessa região, sejam eles minérios ou resíduos, este estudo teve como interesse, caracterizar e estudar a possibilidade de utilização destes materiais como adições minerais adicionados ao CAA.

### 1.2 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os estudos de Lisbôa (2004) demonstram que a utilização de resíduos industriais na construção civil constitui uma resposta racional e uma necessidade de gestão ambiental, além de ser um dos únicos setores capazes de absorver grande quantidade de resíduos gerados tanto em seus processos construtivos, quanto nos demais processos industriais. O uso de resíduos industriais, como, por exemplo, os provenientes das indústrias metalúrgicas e termoelétricas, como constituintes do concreto, têm crescido em todo mundo. Seu uso geralmente proporciona ao concreto melhores desempenhos no estado fresco e endurecido.

Este trabalho apresenta a utilização de diferentes tipos de adições minerais em concretos autoadensáveis sendo: os resíduos originados na britagem de rochas calcárias, denominado fíler calcário (FI); resíduos gerados na fase de corte e polimento das rochas de mármore e granito em marmorarias (RM); a rocha fosfática (FO) utilizada como matéria-prima para produção de fertilizantes; o estéril de fosfato que é um minério retirado da jazida em zonas superiores às camadas da rocha fosfática; e a cinza da queima de madeira de eucalipto em caldeira (CE), para geração de energia térmica nas cooperativas de laticínios. Os materiais foram adquiridos na região de Patos de Minas - MG, o fíler calcário é comercializado e embalado em sacos plásticos, o resíduo de marmoraria, a rocha fosfática, o estéril de fosfato e a cinza de eucalipto, foram recolhidas diretamente nas indústrias da região.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica da produção de CAA, com o uso de cinco diferentes tipos de adições minerais: fíler calcário, resíduo de marmoraria, rocha fosfática, estéril de fosfato e cinza de eucalipto, em quatro teores de substituição ao cimento Portland.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumprir o que foi proposto no objetivo geral, será necessário desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Verificar o atendimento aos requisitos de autoadensabilidade prescritos na ABNT NBR 15823-1 (2010), para os concretos com cinco tipos de adição, nos teores estudados (0 %, 10 %, 20 %, 30 % e 40 %).
- Avaliar o comportamento dos concretos produzidos no estado endurecido, por meio da avaliação das propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, para os concretos com cinco tipos de adição, nos teores estudados (0 %, 10 %, 20 %, 30 % e 40 %).
- Avaliar o comportamento dos concretos produzidos no estado endurecido, por meio da avaliação das características físicas da massa específica, absorção de água e índice de vazios, para os concretos com cinco tipos de adição, nos teores estudados (0 %, 10 %, 20 %, 30 % e 40 %).

## 2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL – ESTADO DA ARTE

Devido à exigência de estruturas de concreto com maior durabilidade, o concreto autoadensável (CAA) tem sido destaque na indústria da construção civil, substituindo cada vez mais o concreto convencional vibrado (CCV). O CAA é escolhido, principalmente, devido as vantagens apresentadas em seu estado fresco, dentre elas as capacidades de: fluir sob seu próprio peso, preencher completamente as fôrmas, mesmo na presença de alta concentração de armação e em áreas de difícil acesso, não utilizar vibração externa, permanecendo homogêneo, estável e sem segregação após seu lançamento e endurecimento. (DHAHEER; KULASEGARAM; KARIHALOO, 2016); (SUA-IAM; MAKUL, 2015); (EFNARC, 2002); (NEHDI; PARDHAN; KOSHOWSKI, 2004); (BROUWERS; RADIX, 2005); (DEHWAH, 2012); (ALTOUBAT, 2016).

As vantagens do CAA para a indústria da construção civil, também podem ser observadas na redução de serviços durante a concretagem. Como o CAA não necessita de adensamento mecânico, isso resultará na minimização de custos com a mão de obra, energia e no tempo de construção, melhorando o nível da produtividade. O uso de CAA também leva a uma redução no ruído durante o lançamento, melhora as condições de trabalho, a homogeneidade do concreto e a qualidade da superfície das peças concretadas. (OUCHI, 2003).

### 2.1 HISTÓRICO

Durante a década de 80, com a aceleração da economia japonesa, houve um aumento significativo nos investimentos em imóveis e novas construções. Porém, a indústria da construção civil do Japão apresentava uma queda no número de trabalhadores qualificados para atender a demanda das obras, comprometendo assim a qualidade e a durabilidade das estruturas executadas em concreto nesse período.

Preocupados com essa situação, o professor Hajime Okamura, dentre outros alunos, Ozawa e Maekawa desenvolveram, em 1988, as descrições básicas para um tipo de concreto que não dependesse da qualificação do trabalhador para os processos de lançamento e de adensamento. Este concreto, ao ser lançado sobre as fôrmas deve adensar pela ação de seu próprio peso, possuindo a capacidade de fluir, sem a necessidade de vibração, para áreas densamente armadas, espaços restritos ou a longas distâncias. (WALLEVIK; NÍELSSON, 2003).

Do Japão a tecnologia se espalhou pela Ásia chegando à Europa por volta de 1993. Wallevik e Níelsson (2003) informaram que entre os anos de 2000 a 2002 a quantidade de CAA produzido na América do Norte, ultrapassou o total de um milhão de metros cúbicos, sendo o maior consumo na indústria de pré-fabricados. No Brasil, a aplicação do CAA encontra-se em fase de crescimento, tanto nas indústrias de pré-fabricados quanto em obras com o concreto moldado no local.

No ano de 2015, a Associação Brasileira da Construção Industrializada em Concreto (ABCIC) realizou uma pesquisa junto às empresas de estruturas pré-fabricadas de concreto e as informações foram publicadas no anuário ABCIC 2015. Conforme a ABCIC (2015), entre os anos de 2013 e 2015, o consumo de CAA na indústria passou de 58,1 % para 66,7 % e do total de CAA consumido 47,2 % foi produzido pela própria empresa.

A Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP (2013), em seu primeiro levantamento divulgado para o setor de concreto no Brasil, demonstrou um aumento de 180 % de concretos preparados em concreteiras, sejam CAA ou CCV, entre os anos de 2005 e 2012. Este aumento pode refletir em um aumento do controle tecnológico, durante os processos de escolha de materiais, dosagem, mistura e transporte, contribuindo assim, para a produção do CAA.

Desde a origem do CAA várias pesquisas têm sido desenvolvidas com ênfase nos aspectos de dosagem, reologia, propriedades nos estado fresco e endurecido, durabilidade e a viabilidade de aplicação de diversos tipos de adições minerais, estabelecendo parâmetros para o uso correto e otimizado do CAA, de modo a garantir as propriedades esperadas e seus benefícios.

Em vários países foram criados os comitês técnicos com o intuito de integrar os setores envolvidos na produção, desenvolvimento de tecnologia e uso do CAA. Dentre os comitês técnicos pode-se destacar:

- RILEM Technical Committee 174: Self-compacting Concrete (1997-2000);
- RILEM Technical Committee 188: Casting of Self-compacting (2000-2006);
- RILEM Technical Committee 205: Durability of Self-compacting Concrete (2004-2007);
- RILEM Technical Committee 228: Mechanical Properties of Self-compacting Concrete (2007);
- ASTM Subcommittee C09.47: Self-consolidating Concrete (2001);
- ACI Committee 237: Self-consolidating Concrete (2003);

- ISO Technical Committee 71/ Subcommittee 1 (1981) / Work Group 2 (ISO/TC 71/SC 1/WG 2): Self-compacting concrete (2014);
- Comitê Técnico 202: Comitê IBRACON de Concreto Autoadensável (2015).

Com o passar dos anos, várias normas técnicas foram elaboradas com o objetivo de fornecer parâmetros mínimos para a realização dos ensaios de autoadensabilidade e análise da conformidade dos resultados encontrados. Dentre elas destaca-se a primeira norma publicada, em 2001, pela Japanese Standards Association (JSA). Na Tabela 1 verifica-se as principais normas correspondentes aos ensaios de CAA.

Tabela 1 - Principais normas para os ensaios de CAA.

<b>Normas técnicas</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Brasileira</b>	<b>Europeia</b>	<b>Norte-americana</b>
Geral	ABNT NBR 15823-1:2010 - Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco	-	ACI 237R-07:2007 - Self-Consolidating Concrete
<i>Slump flow</i> $t_{500}$	ABNT NBR 15823-2:2010 - Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams	BS EN 12350-8:2010 - Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. Slump-flow test	ASTM C1611/C1611M:2014 - Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete
Anel J	ABNT NBR 15823-3:2010 - Concreto autoadensável - Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J	BS EN 12350-12:2010 - Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. J-ring test	ASTM C1621/C1621M:2014 - Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring
Caixa L	ABNT NBR 15823-4:2010 - Concreto autoadensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L	BS EN 12350-10:2010. Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. L box test	-
Funil V	ABNT NBR 15823-5:2010 - Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V	BS EN 12350-9:2010 - Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. V-funnel test	-
Segregação	ABNT NBR 15823-6:2010 - Concreto autoadensável - Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação	BS EN 12350-11:2010 - Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. Sieve segregation test	ASTM C1610/C1610M:2014 - Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique

Fonte: Próprio autor.

## 2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS

O setor de edificações, incluindo o ambiente construído, é o maior consumidor final de energia no mundo, sendo responsável pelo consumo de 48,5 % da energia elétrica produzida no Brasil. A indústria da construção civil utiliza aproximadamente 50 % dos recursos naturais extraídos do planeta, na produção e manutenção do ambiente construído. Verifica-se que os impactos ambientais, causado pelo setor se inicia na extração da matéria-prima, fabricação, produção, transporte, comercialização, construção, até a fase de operação, utilização, manutenção e demolição. (CBCS, 2014).

Outros impactos ambientais associados à construção civil são as emissões de gases tóxicos da decomposição da matéria orgânica, tais como a madeira e compostos orgânicos voláteis de tintas, adesivos e asfalto e as emissões associadas aos fluidos de refrigeração e extintores. (AGOPYAN; JOHN, 2014).

Apesar do grande impacto causado ao meio ambiente pela indústria da construção civil, esse setor apresenta um dos maiores potenciais para aproveitamento de resíduos, não só os gerados pelos próprios processos, como também os de outras indústrias. (VASCONCELLOS *et al.*, 2004)

O desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento dos resíduos é um desafio e uma boa alternativa, visto que, o volume de material produzido gera diversos transtornos no seu armazenamento, manejo, transporte e destinação final, além de ônus para o produtor e problemas ambientais de difícil solução. (APOLINÁRIO, 2014).

## 2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES E A INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES DO CAA

Para EFNARC (2005), o concreto é considerado autoadensável se atender a três propriedades: a habilidade de preenchimento ou fluidez, a coesão necessária para que a mistura escoie intacta entre as barras de aço ou habilidade passante e a resistência à segregação.

Ainda conforme EFNARC (2005) a fluidez e a resistência à segregação do CAA garantem um elevado grau de homogeneidade, um mínimo de vazios e uma uniformidade na resistência, proporcionando um melhor acabamento e durabilidade da estrutura.

Quanto aos materiais constituintes, o CAA possui os mesmos que o CCV, contudo, o segredo para a produção do CAA está nas proporções de seus materiais. Para a dosagem do CAA, alguns

parâmetros são essenciais, tais como: a redução da proporção de água/finos, o aumento do volume de pasta, o controle do volume total de agregado graúdo e seu diâmetro máximo e a utilização de um aditivo superplastificante juntamente com grande quantidade de adições minerais e/ou um aditivo modificador de viscosidade. (NEHDI; PARDHAN; KOSHOWSKI, 2004); (GOMES; BARROS, 2009); (DOMONE; 2006).

Alguns autores afirmam que as propriedades de fluidez do CAA estão condicionadas a utilização de aditivos superplastificantes, já a moderada viscosidade e coesão ocorrem com o uso do aditivo modificador de viscosidade (AMV), ou um consumo elevado de finos (cimento e adições minerais) em torno de 500 a 600 kg/m<sup>3</sup>, elevando assim, os custos de produção, o calor de hidratação e a retração do CAA. (SUA-IAM; MAKUL, 2015); (SABET; LIBRE; SHEKARCHI, 2013); (SADEK; EL-ATTAR; ALI, 2016); (GOMES; BARROS, 2009).

Vários estudos têm sido realizados para avaliar o comportamento do CAA, nos estados fresco e endurecido, com a substituição parcial de cimento Portland por uma adição mineral. Outros estudos avaliam a substituição das adições minerais por materiais alternativos, de baixo custo e localmente disponíveis, como por exemplo, os resíduos industriais, apresentando benefícios técnicos, econômicos e alternativas sustentáveis para produção do CAA. (SUA-IAM; MAKUL, 2017); (ADEKUNLE *et al.*, 2015); (DEHWAH, 2012). A EFNARC (2005) recomenda o uso de adições minerais no CAA como substituição parcial ao cimento, para aumentar a trabalhabilidade do concreto e, torná-lo econômico.

EFNARC (2005) afirma que o CAA é um material complexo, pois a variação dos materiais constituintes pode alterar o desempenho de suas propriedades. Assim, a produção de CAA na obra pode ser limitada, devido à alguns fatores, como: a umidade dos agregados e a correta dosagem da água, o desempenho da central de produção composta por balança e misturador, o nível de controle de qualidade dos materiais, e das habilidades e o conhecimento dos trabalhadores. Portanto, é importante ter uma mistura de CAA robusta, minimamente afetada pelas fontes externas, mantendo as suas propriedades dentro do limite de variação especificado.

### 2.3.1 Cimento Portland

Todos os cimentos que estejam em conformidade com as normas vigentes podem ser utilizados para a produção de CAA. A escolha adequada do tipo de cimento é estabelecida pelas necessidades específicas de cada aplicação. (EFNARC, 2005).

Para garantir uma boa fluidez e resistência à segregação, o conteúdo de finos (cimento e adições minerais) não deve ser demasiado baixo. A ABNT NBR 12655 (2015), adota os valores mínimos de consumos de cimento entre 260 a 360 kg/m<sup>3</sup> de concreto, de acordo com a classe de agressividade ambiental prevista em projeto. Para a classe de agressividade ambiental “moderado-urbana”, mais utilizada, o consumo mínimo de cimento é fixado em 280 kg/m<sup>3</sup>.

Excessivo consumo de cimento poderá causar vários prejuízos as propriedades do CAA, tanto no estado fresco quanto endurecido. Assim, o ACI 237R-07 (2007) recomenda para produção de CAA um consumo mínimo de finos em 386 kg/m<sup>3</sup> e máximo em 475 kg/m<sup>3</sup>. A fração de pasta deve variar entre 34 e 40 % em relação ao volume do CAA, e a relação água /finos deve variar entre 0,32 a 0,45.

Conforme Tutikian e Dal Molin (2015), para escolha do cimento, deve haver o controle sobre o teor de C<sub>3</sub>A (aluminato tricálcico), pois acima de 10 % pode resultar em rápida perda da fluidez, dificultando a aplicação do CAA. Segundo os pesquisadores, quanto maior a superfície específica do cimento, menor será a tensão para início do escoamento e maior será a viscosidade da mistura, porém, quanto mais fino o cimento, maior será a liberação de calor durante sua hidratação e a retração do concreto.

O tipo de cimento também pode ser escolhido quanto ao atendimento às questões ambientais. A produção do CAA utilizando como finos adições minerais provenientes de resíduos industriais e cimento Portland composto, com adição de fíler calcário, escória de alto-forno ou materiais pozolânicos, pode classificar o CAA na categoria de concreto sustentável.

Segundo dados da Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP (2016), a produção de cimento Portland, é responsável por aproximadamente 5 % da emissão total de CO<sub>2</sub> mundial. O uso de cimentos com adições leva à diminuição de aproximadamente 18,6 Mt de CO<sub>2</sub> liberados na atmosfera. A emissão de CO<sub>2</sub> durante o processo de fabricação do cimento Portland é proveniente, prioritariamente, do consumo de combustíveis no forno e na decarbonatação do calcário para se transformar em clínquer, mas podem contribuir ainda as emissões relacionadas a extração, transporte e britagem de matéria-prima e ao uso de eletricidade.

Dentre os diversos cimentos produzidos no Brasil, a ABCP (2016) destaca que os cimentos Portland compostos (CP II-E, CP II-Z e CP II-F) são os mais encontrados no mercado e utilizados nas diversas obras de construção civil, responsável por quase 70 % da produção industrial brasileira. Portanto, suas utilizações na produção de CAA, conforme Nikbin *et al.*

(2016), pode contribuir para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e, conseqüentemente, às mudanças climáticas e o aquecimento global, promovendo o desenvolvimento sustentável na construção civil.

### 2.3.2 Adições minerais

EFNARC (2005) define as adições minerais como materiais inorgânicos finamente divididos, utilizados no concreto para melhorar determinadas características ou atingir propriedades especiais. Podem ser classificadas, de acordo com sua capacidade reativa, como materiais inertes, sendo o fíler e os pigmentos, reativos sendo os materiais pozolânicos, cinzas volantes e a sílica ativa, ou materiais cimentantes, sendo a escória granulada de alto-forno.

O efeito reativo ou químico para Tutikian e Dal Molin (2015) ocorre a partir da capacidade de reação com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , o qual forma um composto resistente, o silicato hidratado de cálcio, C-S-H, ocupando os vazios de maiores dimensões na pasta de cimento ou na zona de transição, aumentando o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto. Metha e Monteiro (2014) complementam que o refinamento dos poros oferece benefícios quanto a resistência à fissuração térmica, o aumento da resistência final e a impermeabilização do concreto.

Para Daczko (2012) a adição mineral é um material com tamanho de partícula menor que 0,125 mm e adicionado a uma mistura de CAA, com a intenção de aumentar o volume da pasta e/ou a melhorar a reologia do concreto.

As adições minerais podem ser proveniente também de resíduos de mineração, indústrias e agroindústrias. Dentre os resíduos industriais mais utilizados estão o fíler de calcário ou basalto, a cinza volante, a cinza de casca de arroz, a escória de alto-forno e a sílica ativa. As pesquisas apresentam bons resultados também para a utilização do resíduo de mármore e granito, resíduos de construção e demolição e o pó de vidro. (RILEM, 2014).

Conforme Yazici (2007) a incorporação de adições minerais no CAA, reduz o calor de hidratação, diminui ou elimina a necessidade de aditivos químicos para melhorar a viscosidade, diminui o teor de água do concreto aumentando sua durabilidade e reduz a formação de fissuras no concreto, causadas pelo calor de hidratação do cimento.

A cinza volante vem sendo utilizada nos concretos em altos teores de substituição ao cimento. De acordo com Hafid *et al.* (2016) a quantidade de cinzas volantes, adicionadas ao concreto,

para substituir o cimento é limitada entre 15 % e 20 % em massa de cimento. Porém Dinakar; Babu e Santhanam (2008) conseguiram resultados satisfatórios em suas pesquisas, com a utilização de 85 % de cinzas volantes em substituição ao cimento. Bouzoubaa e Lachemi (2001) fizeram testes substituindo até 60 % do cimento Portland por cinzas volantes no CAA, atingindo valores para resistência à compressão com 1 dia de 5 a 16,6 MPa e aos 28 dias de 35 a 40 MPa.

Assim, Felekoglu *et al.* (2006) afirmam que a seleção da quantidade e do tipo de adição mineral para utilização no CAA, depende das propriedades físicas, físico-químicas e microestruturais destes materiais, tais como, a forma da partícula, a textura superficial, a porosidade superficial, a taxa de adsorção ao superplastificante, a finura, a distribuição granulométrica das partículas e sua composição química e mineralógica.

Além das vantagens apresentadas nas propriedades do CAA, a substituição do cimento por resíduos industriais, pode minimizar o consumo de energia e recursos naturais, reduzindo substancialmente a emissão de gases gerados no processo de fabricação do cimento Portland. (SUA-IAM; SOKRAI; MAKUL, 2016); (RANJBAR *et al.*, 2016); (DINAKAR; BABU; SANTHANAM, 2008).

A utilização de resíduos industriais também pode contribuir para redução do custo do concreto, visto que o cimento é o componente mais caro de sua composição, reduzir seu teor o concreto uma solução mais competitiva.

#### 2.3.2.1 Fíler calcário

A adição de fíler calcário nos concretos tem sido indicada por vários pesquisadores, devido às diversas melhorias apresentadas, principalmente quanto ao empacotamento de partículas e a retenção de água, levando à boas propriedades tanto no estado fresco: menor permeabilidade, maior densidade e coesão, quanto no estado endurecido: aumento na resistência à compressão e na durabilidade dos concretos.

Neville (2016) enfatiza os efeitos benéficos nas propriedades do concreto, com adição de fíler sem atividade química, tais como na trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência à fissuração. Conforme Tutikian e Dal Molin (2015) sua ação se resume ao efeito físico de empacotamento granular e como pontos de nucleação para hidratação do cimento.

Até o ano de 2011, algumas definições diferentes para o termo fíler vinham dificultando a padronização nos setores técnicos e comerciais. Segundo a ABNT NBR 9935 (2005) fíler é considerado todo “material granular que passa na peneira 0,150 mm”, já conforme a ABNT NBR 7225 (1993) “fíler é o material constituído de pó de pedra ou outros materiais minerais inertes, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075 mm”.

Em 2011, a norma ABNT NBR 7225 (1993) foi cancelada e incorporada na versão atualizada da ABNT NBR 9935 (2011), a qual estabelece os termos relativos à agregados empregados em concreto e argamassa de cimento Portland, nesta norma o termo “fíler” foi substituído pelo termo “finos”. De acordo com a ABNT NBR 9935 (2011) “finos é todo material granular que passa na peneira de 0,150 mm” e materiais pulverulentos são as “partículas com dimensão inferior a 0,075 mm”. A norma define também, pó de pedra como o “material granular resultante da britagem de rocha, que passa na peneira de malha 6,3 mm”. Neste trabalho o termo fíler foi adotado como sinônimo ao termo finos.

Gobbi (2014) define o fíler calcário como um resíduo proveniente da britagem da rocha calcária, finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento Portland, possuindo como função principal o aumento da viscosidade e a resistência à exsudação nos concretos autoadensáveis.

O processo de produção dos materiais britados consiste em: extração da rocha (limpeza, decapeamento, perfuração e desmonte por explosivos), transporte para o britador, britagem primária e secundária e classificação. Aproximadamente 10 % de resíduos são gerados durante o processamento de rochas, nas etapas de desmonte e no processo de lavagem e classificação dos materiais britados, gerando nesta última etapa o fíler pulverizado ou com consistência de lama. São produzidos nas pedreiras alguns materiais denominados comercialmente como: rachão, gabião, brita graduada, brita corrida, pedrisco, pó de pedra e areia de brita. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009b).

Conforme Menossi (2004) a utilização do finos de pedras no concreto, tanto por aspectos relacionados à resistência e durabilidade, quanto por aspectos ambientais e econômicos, é de grande interesse, uma vez que as pedreiras poderão comercializar um produto oriundo de resíduos, causador de transtornos quanto à estocagem e descarte no meio ambiente.

O consumo de materiais britados se dá principalmente na indústria da construção civil, compreendendo os setores de edificações e de obras de infraestrutura, dividido entre os

subsetores de lojas de materiais de construção, concreto pré-misturado, fabrico de pré-moldados de concreto, concreto asfáltico, material aplicado em base/sub-base de rodovias, lastro ferroviário, enrocamento e filtro. (BRASIL, 2016b).

No Brasil, cerca de 10 % da brita produzida é proveniente da rocha calcária, pois é um produto relativamente barato e apresenta uma grande variedade de usos, desde matéria-prima para a construção civil, matéria-prima para a fabricação de cal e cimento, corretivos de solos ácidos, ingredientes na indústria de papel, plásticos, química, siderúrgica, de vidro; refratários e outras. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009b).

A produção de calcário bruto e beneficiado se dá em quase todos os estados brasileiros, e tem crescido nos últimos anos, atingindo, em 2014, um total de 48.938.163 toneladas de calcário bruto e 44.396.067 toneladas de calcário beneficiado, representando um valor da produção vendida, consumida ou transferida para industrialização de R\$ 686.860.048 reais. Apesar de sua importância na economia, nos segmentos industrial e agrícola, o calcário corresponde a apenas 2,2 % de toda a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) arrecadada no 1º semestre de 2016 no Brasil. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009c); (BRASIL, 2017); (BRASIL, 2016c).

A utilização de fíler calcário, como substituição parcial do cimento, também tem sido indicado por diversos pesquisadores, principalmente quanto ao empacotamento de partículas e à retenção de água, levando a boas propriedades do CAA no estado fresco, como menor permeabilidade, maior densidade e coesão, além de uma resistência à compressão consideravelmente maior no estado endurecido. Sua-Iam e Makul (2013); Barbhuiya (2011); Mohammed; Dawson e Thom (2013) concluíram que a presença de adições minerais reduz a porosidade da microestrutura do CAA, especialmente na zona de transição na interface pasta/agregado.

Sua-Iam e Makul (2013) analisaram o efeito do fíler de calcário sobre a hidratação do cimento Portland, observando que as partículas finas de calcário podem atuar como sítios de nucleação para os hidratos de silicato de cálcio, acelerando o desenvolvimento da resistência às idades precoces e produzindo compostos de carboaluminato por reação com as fases aluminato (particularmente C<sub>3</sub>A).

Os autores verificaram a viabilidade da utilização de fíler calcário como agente modificador no concreto autoadensável, substituindo parte do agregado miúdo por cinzas de casca de arroz não tratadas. Verificou-se que combinações adequadas de cinzas de casca de arroz com fíler calcário

diminuíram a relação água/cimento das misturas em mais de 28 %, proporcionando uma melhor trabalhabilidade e o desenvolvimento de maior resistência à compressão em idades precoces, devido ao efeito de enchimento e das reações pozolânicas. (SUA-IAM; MAKUL, 2013).

Gobbi (2014), em suas pesquisas quanto à reatividade de materiais finos, utilizou um fíler calcário com as seguintes características: massa específica de 2,70 g/cm<sup>3</sup>, superfície específica de 760 m<sup>2</sup>/kg, pelo método de Blaine e de 1413 m<sup>2</sup>/ kg, pelo método de BET, em sua composição química apresentou predominantemente 84,16 % de CaO e 11,07 % de MgO. Para análise da reatividade do fíler calcário, foi realizado o ensaio de Chapelle modificado apresentando um consumo de 174 mg de Ca(OH)<sub>2</sub>/g de pozolana e a análise mineralógica das pastas de hidróxido de cálcio com adição de fíler calcário, no DRX, não apresentando evidências da formação de qualquer produto hidratado. Assim o fíler calcário utilizado na pesquisa foi considerado um material inerte, podendo ser utilizado como material de enchimento melhorando o empacotamento das partículas.

Zhu e Gibbs (2005) apresentaram um estudo sobre o uso de diferentes tipos e finuras de fíler calcário e pó de giz como finos em concreto autoadensável, seus efeitos sobre a demanda de superplastificantes e as resistências das misturas de concreto. Foi verificado que a dosagem adequada do superplastificante depende mais do tipo de adição do que da finura do pó utilizado, sendo necessárias dosagens de superplastificantes mais elevadas para o CAA utilizando pó de giz do que para aquele que utiliza fíler calcário. A resistência à compressão das misturas de CAA contendo o fíler calcário e o pó de giz foi significativamente maior que a resistência do concreto convencional vibrado, com a mesma relação água/cimento.

Os autores observaram que a substituição parcial do cimento por fíler calcário e pó de giz aumentou o espalhamento de pastas destinadas a produção de CAA. Em geral, quanto menor o teor de adição empregado, maior foi o consumo de aditivo dos concretos, o que, segundo os autores, pode estar relacionado a maior necessidade de aditivo para envolver as partículas do cimento. (ZHU; GIBBS, 2005).

Mohammed; Dawson e Thom (2013) produziram, em suas pesquisas, concretos autoadensáveis com resistência à compressão de 50 a 60 MPa, com o consumo de cimento de 450 kg/m<sup>3</sup> e substituição de aproximadamente 33 % do cimento pela adição de fíler calcário. Os estudos da microestrutura do CAA indicaram a presença de maiores quantidades de Ca(OH)<sub>2</sub> e CaCO<sub>3</sub> na zona de transição e na pasta de cimento, indicando que a adição de fíler calcário no concreto

pode acelerar o processo de hidratação do  $C_3S$ . O fíler calcário utilizado neste estudo possui pureza muito elevada, 98 % de  $CaCO_3$ , massa específica de  $2650 \text{ kg/m}^3$  e superfície específica de  $526 \text{ m}^2/\text{kg}$ , pelo método de Blaine.

O fíler calcário também é utilizado na fabricação do cimento Portland durante a moagem do clínquer. A ABNT NBR 11578 (1991) e demais normas brasileiras de cimento Portland definem o fíler calcário como material carbonático finamente dividido e constituído no mínimo de 85 % de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). O carbonato de cálcio pode ser adicionado em até 5 % nos cimentos Portland de: alto-forno (CP III), pozolânico (CP IV) e alta resistência inicial (CP V-ARI) e em até 10 % nos cimentos Portland composto com: escoria (CP II-E), pozolana (CP II-Z) e fíler (CP II-F).

#### 2.3.2.2 *Resíduo de marmoraria*

As rochas ornamentais e de revestimento são extraídas da natureza em forma de blocos, transformadas em placas e posteriormente são cortadas em formatos variados e beneficiadas por meio de esquadrejamento, polimento e lustro. Podem ser aplicadas tanto como peças isoladas, em esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides, quanto em edificações, principalmente em revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, dentre outros. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009d).

A produção brasileira de rochas ornamentais e revestimento foi estimada, em 10.100.000 toneladas, no ano de 2014, classificando-se em 4º lugar no ranking mundial, representando 7,4 % da produção. (BRASIL, 2016b). Cerca de 1.000 variedades comerciais de rochas são colocadas nos mercados interno e externo. Os estados do Espírito Santo e Minas Gerais são polos de extração de rochas ornamentais no Brasil, sendo produzidos mármore, granitos, ardósias, quartzitos, pedra-sabão, pedra-talco, serpentinito, itabirito, dentre outros tipos. O setor de rochas ornamentais ainda é essencialmente integrado por micro e pequenas empresas, principalmente, de beneficiamento (serrarias) e acabamento (marmorarias) com elevado nível de informalidade. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009d).

As empresas mineradoras de rochas ornamentais provocam impactos ambientais em três diferentes etapas: primeira, grandes problemas hidrológicos, gerados pelo desmatamento da área de extração; segunda, a geração de elevada quantidade de resíduos para a obtenção dos blocos com dimensões padronizadas, e terceira, a produção do resíduo na forma de polpa abrasiva, chamada de lama nos processos de serragem dos blocos e polimentos.

(CAVALCANTI, 2006). Na lavra de rochas maciças, apresentam-se como resíduos, basicamente, os blocos extraídos com qualidade e dimensões inferiores aos teares convencionais, impossibilitando a serragem das peças. Na China, o aproveitamento de rejeitos de lavra e beneficiamento, já chega a 65 % do total geral. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009d).

Na etapa de desdobramento ou serragem, que consiste no processo de corte dos blocos de rocha em chapas, por meio dos teares, gera a maior quantidade de resíduo entre as demais etapas. O tipo de tear usado no processo de serragem das rochas, pode gerar diferentes tipos de resíduos. Teares multilâminas de aço utilizam uma polpa de cal, granalha de ferro e água para lubrificar e resfriar as lâminas, bem como evitar a sua oxidação e manchamento das chapas. Esse processo gera uma quantidade significativa de resíduo em forma de lama abrasiva, chegando a atingir 30 % dos blocos, na forma de costaneiras e lamas. Outras perdas costumam ocorrer por quebra de placas, falhas de empilhamento, defeitos de corte, uso de polpa abrasiva de composição inadequada, lâminas de corte pouco tencionadas e blocos fraturados. Aconselha-se a utilização de um tear diamantado que utilize apenas lâminas ou fios diamantados, dispensando o uso de cal e granalha de aço, facilitando o aproveitamento dos resíduos para usos diversos. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009d); (CAVALCANTI, 2006).

Na etapa de acabamento para obtenção do produto final, as chapas são cortadas de acordo com as dimensões comercializadas e realizado o polimento da superfície superior, sem utilização de lama abrasiva, gerando uma pequena quantidade de resíduo, até 2 %, do total de volume processado. (CAVALCANTI, 2006); (KUMAYAMA, 2014).

Conforme Kumayama (2014) essa lama gerada no processo de polimento pode representar grande volume no final de um mês de produção. Normalmente, esse resíduo é armazenado em tanques subterrâneos e retirado com pá para ser transportado por caminhões até o local de descarte, podendo ser lançado de forma inadequada gerando impactos ao meio ambiente.

Nas pesquisas de Barros (2008), foram fabricados concretos autoadensáveis utilizando o resíduo de corte de mármore e granito com as seguintes características: granulometria inferior a 300  $\mu\text{m}$ , composição química com predominância de  $\text{SiO}_2$  (56,89 %) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15,08 %), massa específica de 2,69  $\text{g/cm}^3$  e superfície específica de 0,34  $\text{m}^2/\text{kg}$  determinada pelo Método de Blaine. O autor verificou nos ensaios realizados acerca das propriedades de autoadensabilidade, resistência mecânica e durabilidade, que o CAA com resíduo de mármore

e granito proporciona a execução de estruturas tão duráveis quanto as estruturas com concretos convencionais, desde que obedecidas as exigências normativas quanto a especificações e controle tecnológico.

Nos ensaios de Barros (2008), a resistência à absorção da água por capilaridade, no CAA com resíduos, apresentou resultado 61 % maior que no concreto de referência, mostrando que a adição do resíduo proporcionou ao CAA uma estrutura com menor diâmetro de poros. Assim, o CAA com resíduo possui resultados favoráveis quanto à durabilidade, visto que, grande parte dos agentes causadores de deterioração penetra no concreto em forma de solução aquosa.

Lisbôa (2004) utilizou um resíduo de beneficiamento de mármore e granito com as seguintes características: dimensão máxima 600  $\mu\text{m}$ , densidade de 2,81  $\text{g}/\text{cm}^3$  e composição química com predominância de  $\text{SiO}_2$  (56,89 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15,08 %) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (9,58 %). Nesta pesquisa observou a possibilidade de obter um concreto autoadensável, utilizando o resíduo de beneficiamento de mármore e granito como um fíler mineral, apresentando resultados satisfatórios em relação à habilidade passante e a resistência à segregação, além de uma facilidade no preenchimento das fôrmas. Foi observada também, uma baixa presença de grandes vazios, provocados pela presença de bolhas de ar aprisionado. Foram obtidas resistências à compressão na ordem de 37 MPa a 41 MPa em corpos-de-prova de 10 cm  $\times$  20 cm.

Cavalcanti (2006) estudou as propriedades do concreto autoadensável com resíduo de serragem de mármore e granito com granulometria 300  $\mu\text{m}$ , estabelecendo comparações entre o resíduo de 300  $\mu\text{m}$  e o de 600  $\mu\text{m}$ , utilizado por Lisbôa (2004). O resíduo desta pesquisa é proveniente do polimento e corte de chapas, apresentando as seguintes características granulometria inferior a 300  $\mu\text{m}$ , massa específica de 2,69  $\text{kg}/\text{m}^3$  e superfície específica de 208,5  $\text{m}^2/\text{kg}$  pelo Método de Blaine.

Foi verificado por Cavalcanti (2006) que a redução na granulometria das partículas do aditivo mineral modifica de forma considerável as propriedades do CAA, principalmente no estado fresco. Sendo necessário o aumento da dosagem ótima do superplastificante e redução do volume de pasta. Além de melhorar as propriedades de autoadensabilidade do CAA, principalmente com relação à coesão da mistura.

Com relação aos resultados da resistência à compressão o CAA com resíduo de 300  $\mu\text{m}$ , embora com menor volume de pasta, para uma mesma relação água/cimento, teve comportamento similar ao CAA com resíduo de 600  $\mu\text{m}$ . Além de valores maiores que os encontrados para

concreto convencional. Os resultados de resistência à tração em razão da resistência à compressão, obtida para o CAA com resíduos, foi de 0,1 a 0,15. Os resultados do módulo de elasticidade do CAA com resíduos de 300 µm apresentou evolução com as idades de forma semelhante a resistência à compressão. (CAVALCANTI, 2006).

### 2.3.2.3 *Rocha fosfática e estéril de fosfato*

A principal aplicação da rocha fosfática no Brasil é como insumo na indústria de fertilizantes, sendo 65 % destinados à produção de ácido fosfórico e 35 % consumidos diretamente na produção de fertilizantes simples fosfatados. Os 10 % restantes, apresentam diversas formas de utilização nas indústrias alimentícia, química, metalúrgica, construção civil, têxtil, petrolífera entre outras. Como, por exemplo, a aplicação dos compostos da rocha fosfática para a fosfatização do aço que consiste, basicamente, de fosfato metálico ( $Zn(H_2PO)_2$ ) dissolvido em soluções aquosas de ácido fosfórico e aplicado nas superfícies dos metais antes da pintura como produto anticorrosivo. (J.MENDO CONSULTORIA, 2009a); (ALECRIM, 2010).

A rocha fosfática é um recurso mineral bem distribuído no globo terrestre e sem perspectivas de exaustão das jazidas. No Brasil, a produção de rocha fosfática, em 2014, foi de 6.514.000 toneladas, representando 3,0 % da produção mundial. A produção brasileira é oriunda de 13 minas, localizadas nos estados de Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Bahia, Tocantins e Pará, sendo que cinco delas são responsáveis, por 82 % da produção nacional. O estado de Minas Gerais abriga a maior mina do país, em Tapira, e constitui grandes reservas nos municípios de Araxá, Patos de Minas, Lagamar, Serra do Salitre e Patrocínio. (BRASIL, 2016b).

Conforme Vasconcellos (2012) os compostos de fosfatos de cálcio são de especial interesse também em medicina devido, principalmente, à sua ocorrência em calcificações normais (dentina, esmalte, osso) e patológicas (cálculos). Uma das aplicações dos compostos de rochas fosfáticas estão nos materiais desenvolvidos e pesquisados na área de biomateriais, dentre eles as biocerâmicas de fosfato de cálcio ( $Ca_3(PO_4)_2$ ).

Os cimentos ósseos de  $\alpha$ - fosfato tricálcico ( $\alpha$ -TCP) podem ser preparados utilizando-se o carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) (Nuclear) e o pirofosfato de cálcio ( $\gamma$ - $Ca_2P_2O_7$ ) através do processo de calcinação à temperatura de 1300 °C, seguido de resfriamento brusco. Misturando-se o cimento de fosfato de cálcio com água para que se forme uma pasta, este reage em temperatura ambiente formando um precipitado, contendo um ou mais fosfato de cálcio e ocorrendo a pega pelo intercruzamento dos cristais deste precipitado. Essa pasta de cimento de

fosfato de cálcio ( $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O} + \text{CaHPO}_4$ ) pode apresentar resistência à compressão de 34 a 51 MPa e resistência à tração de 12 MPa. (VASCONCELLOS, 2012).

Poucas pesquisas são encontradas utilizando rocha fosfática como adição ao concreto. Resende e Vieira (2016) fabricaram concretos autoadensáveis, dosados pelo método de Nan Su *et al.* substituindo o fíler calcário por rocha fosfática, nos teores de 25 e 50 %. Os autores verificaram que a fluidez das misturas diminuiu com o aumento da substituição, sendo necessário elevar a dosagem inicial de aditivo superplastificante. No entanto, os resultados encontrados para mistura com 25 % de rocha fosfática, aos 90 dias, superaram a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade, do concreto de referência respectivamente, em 43,4 %, 67,9 % e 1,5 %.

Conforme J.Mendo Consultoria (2009a) o fósforo não é encontrado diretamente na natureza, para sua elaboração é necessário o beneficiamento da rocha fosfática, sendo comercializada na forma de concentrados fosfáticos com 30 % a 38 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

De acordo com Alecrim (2010) a maioria das rochas fosfáticas pertence ao grupo da apatita ( $\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ) com teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  de 4 a 15 %. Os depósitos de apatita têm uma mineralogia extremamente complexa, contendo impurezas que interferem no beneficiamento dos minérios. Segundo J.Mendo Consultoria (2009), em média, 1,6 milhões de  $\text{m}^3/\text{ano}$  de produção de concentrados, geram 9 milhões de  $\text{m}^3$  de rejeitos, minérios marginais e estéreis. Esses resíduos sólidos são estocados em pilhas ou em barragens de rejeitos juntamente com os estéreis e minérios descartados na etapa de mineração, ocupando grande parte das áreas das minas.

Conforme J.Mendo Consultoria (2009a) a extração mineral nas jazidas brasileiras é mecanizada, a céu aberto e o desmonte é feito por explosivos ou retroescavadeira. O processo de produção consiste, “na britagem (primária, secundária e até terciária, por vezes), estocagem e homogeneização, moagem primária e separação magnética de baixo campo, moagem secundária e classificação, deslamagem e concentração por flotação e espessamento.”

Conforme Chula (2004) o perfil da mineração é classificado em zonas de acordo com as características mineralógicas da mina e normalmente corresponde a zona de estéril e zona de mineralização em fosfato.

A zona de estéril constitui a cobertura situada acima da zona de mineralização da rocha fosfática, removida por escavadeiras e o material duro é detonado por explosivos e transportado para a pilha de resíduos. Em algumas minas a relação estéril/rocha fosfática pode ser igual a 0,90. Esta zona é caracterizada por um solo de coloração amarelo-avermelhado, de consistência argilosa e de aspecto granular. Contém normalmente em sua composição mineralógica, caulinita, gibbsita, goethita, hematita, fosfatos secundários aluminosos e anatásio, bem como magnetita e quartzo residuais. Os minerais de fosfato que podem estar presentes nesta zona são secundários, com teor de  $P_2O_5$  de aproximadamente 6 %. (CHULA, 2004).

A zona de mineralização em fosfato é caracterizada por teores de  $P_2O_5$  solúvel maiores que 5 %. Sua composição mineralógica é composta, normalmente por piroxenitos e peridotitos, magnetita titanífera, piroxênio (diopsídio), olivina ferruginosa, micas e granadas. O teor de CaO acompanha o de fosfato e está relacionado também com a quantidade de perovskita e calcita, que aumentam em profundidade. É comum a presença de veios de carbonatito nas proximidades da rocha fresca. (CHULA, 2004).

#### 2.3.2.4 Cinza de eucalipto

Diversas indústrias de grande porte utilizam em suas caldeiras a madeira (biomassa) como fonte de energia, seja na forma de lenha, resíduos (cascas e aparas) ou processadas (cavaco). Com se trata de uma fonte de energia renovável, a tendência é que o consumo da madeira aumente substancialmente nos próximos anos, gerando grandes quantidades de cinzas. (RESENDE, 2013).

Conforme Brasil (2007) a fonte de energia mais antiga que a humanidade conhece é a madeira ou biomassa. Biomassa pode ser definida como toda a matéria de origem vegetal, existente na natureza ou gerada pelo homem ou animal, utilizada para obter energia, tais como: a lenha, o carvão vegetal, a cana-de-açúcar e seus produtos, os óleos vegetais, entre outros.

Segundo Foelkel (2011) as cinzas geradas em caldeira de biomassa são materiais residuais, recolhido tanto no fundo como no precipitador de coleta de particulados dos gases de exaustão da caldeira, quando alimentada de biomassa energética (madeira e/ou casca de árvores). A coloração das cinzas pode variar de preta intensa, devido a altos teores de carbono não queimado, ou cinza clara. A consistência é função das diferentes tecnologias das caldeiras apresentando cinzas bastante secas e cinzas úmidas recolhidas por ciclones e molhadas com água para resfriamento.

A produção de cinza é normalmente da ordem de 3 % em relação ao consumo da lenha. Parte dessas cinzas é de distribuição granulométrica mais fina, sendo suspensa pelos gases da combustão e dispersa na atmosfera, o restante tem sido, em sua maioria, descartada em áreas inadequadas e sem as medidas de proteção ambiental necessárias. Assim a lixiviação de áreas de disposição de cinzas, em céu aberto, traz a possibilidade de que elementos como metais pesados e íons sulfato tenham acesso ao lençol freático, por infiltração de água de chuva, contaminando fontes de abastecimento atuais e potenciais. (VASCONCELLOS *et al.*, 2004); (UDOEYO *et al.*, 2006); (VASKE, 2012).

Vários fatores influenciam nos aspectos qualitativos e quantitativos da cinza de madeira, dentre eles a temperatura de queima, os tipos de fornos e as espécies de árvores. Os fornos e incineradores podem ter temperatura de conversão térmica diferentes, resultando em variações nas propriedades químicas e de rendimento das cinzas. (CHEAH; RAMLI, 2011).

De acordo com Etiegni e Campbell (1991) a combustão de resíduos de madeira a temperaturas mais elevadas resulta, geralmente, numa menor quantidade de cinza produzida. A combustão da madeira à temperaturas superiores a 1000° C, que é a temperatura de operação típica para a maioria das unidades de caldeiras a lenha, resulta numa diminuição profunda no teor de carbonato devido à sua decomposição química a tais temperaturas.

Foelkel (2011) afirma que fábricas modernas podem gerar diferentes tipos e quantidades de resíduos sólidos. Para a queima da casca das toras das árvores a geração será significativamente maior do que para cavacos de madeira. Isso porque a casca possui teores de cinzas que podem ser entre 5 a 10 vezes maiores do que os da madeira. Caso a fonte energética fosse o carvão mineral, essa quantidade de cinzas será muito maior, já para o óleo combustível ou o gás natural, a geração de resíduos sólidos nessa fonte será mínima.

O uso da madeira para a geração de energia apresenta algumas vantagens e desvantagens, quando comparada com combustíveis à base de petróleo. Dentre as vantagens, destaca-se: o baixo custo de aquisição; não emite dióxido de enxofre; menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos); menor risco ambiental; é um recurso renovável e as emissões não contribuem para o efeito estufa. Dentre as desvantagens, apresenta: menor poder calorífico; maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera e maiores áreas para estoque e armazenamento. (SALOMOM; TIAGO FILHO, 2007).

Conforme o Balanço Energético Nacional divulgado pelo Ministério de Minas e Energia BRASIL<sup>a</sup> (2016) a oferta de lenha no Brasil, em 2015, foi de 79.094 mil toneladas, sendo destinadas para o consumo energético 53.774 mil toneladas, dividido em indústrias (45 %) e residências (38 %). Algumas unidades comerciais também utilizam a lenha como fonte de energia sendo: as centrais elétricas, as carvoarias, setores comerciais e agropecuários; as indústrias de cimento, ferro ligas, produtos químicos, alimentos e bebidas, têxtil, papel e celulose, cerâmica entre outros. Dentre as demais fontes de energia a lenha representa, juntamente com o carvão vegetal, 8,2 % da oferta brasileira.

Considerando o uso de outras cinzas já consagradas como adições minerais em concreto de cimento Portland, como a cinza volante e a cinza de casca de arroz, Vaske (2012) pesquisou as propriedades (resistência mecânica e/ou durabilidade) de concretos produzidos com adição de cinza de lenha. A possibilidade de utilização deste resíduo como uma adição mineral é uma forma coerente de reduzir o impacto ambiental.

Em sua pesquisa Vaske (2012) utilizou cinzas provenientes da captação de particulados por filtro multiciclone, durante o processo de combustão de lenha de toras de eucalipto, em caldeira fumotubular para geração de vapor. Nesse tipo de caldeira, parte da cinza gerada é depositada num cinzeiro abaixo da grelha e o restante é suspensa pelos gases da combustão. Antes de ser dispersa na atmosfera através da chaminé, a cinza de granulometria menor, passa por um filtro multiciclone sendo captada e depositada em recipientes para remoção.

Vaske (2012) verificou que as cascas das madeiras são ricas em cálcio (45 a 55%) e potássio (15 a 20 %). Em seus estudos as cinzas foram caracterizadas com massa específica de 2,47 g/cm<sup>3</sup> e superfície específica de 10.551 m<sup>2</sup>/kg. As micrografias apresentaram partículas com predominância de forma medianamente lamelar, baixo grau de esfericidade e estrutura alveolar com poros e cavidades.

Para a produção de concretos com resistência à compressão de 35 MPa e substituição de cimento Portland, em massa, por 15 % de cinza de lenha, Vaske (2012) observou que houve uma redução no consumo de cimento da ordem de 41 kg e incorporação de 47 kg de cinza por m<sup>3</sup> de concreto. A diminuição no consumo de cimento nos concretos resultou em: redução da temperatura durante as reações de hidratação do cimento, aumento da resistência à compressão e o módulo de elasticidade, melhor refinamento da estrutura dos poros da matriz cimentícia e diminuição da absorção de água.

A cinza de madeira pode ser considerada como uma mistura heterogênea de partículas de tamanho variável, geralmente de natureza angular, constituída basicamente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e cal ( $\text{CaO}$ ), podendo conter também a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). (CHEAH; RAMLI, 2011); (ETIEGNI; CAMPBELL, 1991).

Cheah e Ramli (2011) realizaram pesquisas com a utilização de cinza de madeira em substituição parcial ao cimento Portland na fabricação de misturas de concretos. Em suas pesquisas, verificou-se que a dosagem da água nas misturas aumenta proporcionalmente com a elevação do teor de substituição do cimento por cinza de madeira, isso ocorre, principalmente, devido à maior superfície específica das partículas da cinza em comparação com as partículas de cimento. Quanto à densidade aparente das misturas de concreto, foi observado uma redução de  $2482 \text{ kg/m}^3$ , a 0 % de teor de cinza, para  $2281 \text{ kg/m}^3$  a 40 % de substituição. A cinza de casca de madeira usada no estudo apresentou alto valor para a perda ao fogo (10,46 %), o que pode implicar na presença de conteúdo orgânico combustível na cinza.

Tanto Udoeyo e Dashibil (2002) e Cheah e Ramli (2011) relataram em seus resultados, uma redução na resistência à compressão, resistência à tração e na flexão do concreto com o aumento do nível de substituição do cimento por cinzas de madeira. Udoeyo *et al.* (2006) justificaram que a tendência observada é provavelmente, devido as partículas de cinza de madeira comportar-se mais como material de enchimento, dentro da matriz de pasta de cimento, do que como material aglomerante. Assim, o aumento de cinzas como substituição ao cimento resultou numa elevação da área superficial ocorrendo uma diminuição da resistência.

Elinwa, Ejeh e Mamuda. (2008) investigaram os efeitos da substituição parcial do cimento por cinza de madeira em misturas de concreto autoadensável. Foi verificado que para um aumento no teor de substituição, de 0 % para 20 % em relação a massa total do cimento, ocorre uma diminuição no espalhamento das misturas de concreto de 270 para 200 mm e um aumento nos tempos de escoamento de 4 segundos para 18 segundos.

As cinzas de madeira coletadas em uma usina de biomassa florestal e estudadas por Rajamma *et al.* (2009) foram identificadas como partículas finas, angulosas, com uma elevada porosidade superficial e um diâmetro médio inferior a  $50 \mu\text{m}$ . As áreas superficiais das cinzas de madeira coletadas, de duas fontes diferentes, apresentaram valores de  $40,29 \text{ m}^2/\text{g}$  e  $7,92 \text{ m}^2/\text{g}$ , respectivamente. A maior área superficial foi devido ao maior grau de irregularidade na forma da partícula da cinza e porosidade da sua superfície. O ensaio de perda ao fogo das amostras de

cinzas apresentou valores considerados elevados, 14 % e 7 %, isso implica em certo grau de ineficiência na conversão de carbono quando a temperatura é suficientemente elevada.

Vasconcellos *et al.* (2004) realizaram pesquisas com o objetivo de investigar o aproveitamento da cinza de caldeira à gás na construção civil. Dentre os estudos realizados foram produzidas argamassas com a substituição de parte do cimento Portland por diferentes teores de cinza. Os resultados revelaram que a adição de cinza de caldeira a gás às argamassas de cimento Portland, numa proporção de até 8 % do volume do cimento, provoca um aumento significativo na resistência à tração por compressão diametral e na resistência à compressão axial.

Resende (2013) afirma que o comportamento da cinza de madeira de eucalipto no concreto é apenas de preenchimento de poros (efeito fíler). Em seus estudos foram observados um aumento da resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova com substituição de até 35 % de cinza de eucalipto moída. Esse resultado pode ser explicado devido à finura da amostra de cinza de eucalipto, apresentando capacidade de preenchimento dos vazios e refinamento dos poros, aumentando assim a resistência da matriz cimentícia na zona de transição do concreto.

### 2.3.3 Agregados e esqueleto granular

Agregados compreendem entre 60 % e 80 % do volume total de uma mistura de CCV. No CAA, um baixo volume de agregado pode causar aumento da retração e potencial fissuras, enquanto um volume muito alto irá inibir o fluxo e a autoadensabilidade. (DACZKO, 2012).

Embora a proporção de agregados graúdos no CAA seja menor que no CCV, este material ainda é o principal constituinte do CAA e tem uma influência significativa nas propriedades frescas e endurecidas conforme Kapoor; Singh e Singh (2016). Segundo ACI 237R-07 (2007) a porcentagem de agregado graúdo na mistura de CAA varia entre 28 a 32 % em volume de CAA.

A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto, a porosidade, a forma e textura do agregado graúdo podem afetar as propriedades do concreto. (METHA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com EFNARC (2005) a distribuição granulométrica da partícula e a forma do agregado é muito importante afetando o empacotamento e os vazios. Gomes e Barros (2009) recomendam, que as faixas granulométricas dos agregados sejam especificadas, de forma a obter uma distribuição contínua dos componentes. Para produção de CAA recomenda-se o

tamanho máximo do agregado em 12 a 20 mm, contudo, o espaçamento das armaduras é o principal fator para determinar a dimensão máxima do agregado.

Para Tutikian e Dal Molin (2015) na produção de CAA pode-se utilizar como agregado miúdo, a areia natural ou a areia britada, sendo a areia natural mais recomendada, por possuir forma arredondada e textura mais lisa, contribuindo para o aumento da fluidez da mistura com uma mesma quantidade de água.

Resultados contrários foram verificados por Rezende (2016), em seus estudos os autores produziram dois concretos autoadensáveis, utilizando em um deles somente uma areia natural como agregado miúdo e no outro uma mistura de areia britada com uma areia natural. Quanto à fluidez, o concreto com areia natural apresentou resultados inferiores, devido ao empacotamento precário e a ausência de composição da areia natural. Quanto à resistência à compressão e à tração por compressão diametral, o concreto produzido com a areia britada obteve maior valor, já o módulo de elasticidade foi semelhante entre os concretos.

Para Brouwers e Radix (2005) e Su, Hsu e Chai (2001) nas misturas de CAA pode-se avaliar separadamente a composição da pasta e a otimização do esqueleto granular. A primeira é geralmente baseada em requisitos de fluidez e na relação água/finos, cumprindo os requisitos mínimos de resistência e durabilidade. O empacotamento estabelece a proporção de agregados e adições minerais no esqueleto granular, realizado pela medida da massa unitária dos agregados misturados em diferentes teores. Fochs (2011) explica que a mistura dos materiais deve ser feita dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro de partículas. Como exemplo, faz-se o empacotamento entre as britas, após, esta mistura é empacotada com a areia e assim por diante. Por fim, a mistura resultante das britas com as areias é empacotada com a adição mineral utilizada, o único material que não é empacotado é o cimento.

Conforme Su, Hsu e Chai (2001) durante o empacotamento um valor de massa unitária mais elevada, resulta em uma maior quantidade de agregados utilizados, diminuindo os vazios e consequentemente o teor de cimento no CAA.

#### 2.3.4 Aditivos químicos

EFNARC (2005) define os aditivos superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência como um componente essencial do CAA. Os aditivos modificadores de viscosidade (AMV) e outros aditivos também podem ser usados da mesma forma como em CCV, desde que se

verifique sobre o tempo de utilização e as propriedades físicas e químicas do cimento. Afirma ainda que, fatores como a finura, o teor de carbono, álcalis e  $C_3A$  pode influenciar nos efeitos dos aditivos, sendo recomendável a compatibilidade entre esses materiais.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) os superplastificantes são capazes de reduzir o teor de água de amassamento de três a quatro vezes, em uma mistura de concreto, quando comparados aos aditivos redutores de água normais. Quanto ao aumento das propriedades mecânicas é normalmente proporcional à redução na relação água/cimento.

Daczko (2012) estabelece como a principal função dos aditivos redutores de água de alta eficiência, o poder de dispersar as partículas de cimento, fornecendo elevados níveis de fluidez, sem a utilização de água, diminuindo assim o potencial de exsudação e segregação. Além de controlar a fluidez da mistura, oferece viscosidade ao CAA, apenas alterando o conteúdo de água e ajustando a dosagem do aditivo. Ainda segundo o autor, ao longo dos anos, foram desenvolvidos diferentes produtos químicos dispersantes, com vários níveis de dispersão, mas foi o aditivo dispersante a base de éter policarboxilato que facilitou o desenvolvimento de CAA.

O uso de aditivos modificadores de viscosidade, no CAA melhora a coesão no estado fresco, impedindo a segregação e a exsudação. Podem substituir os componentes finos do concreto, assim, a mistura terá poucas partículas de adições minerais, diminuindo a área superficial, e dependendo do tipo de adição, o consumo de água. (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Aditivos modificadores de viscosidade (AMV's) podem ser definidos como aqueles aditivos que além de aumentar a coesão aumentam a estabilidade de compostos à base de cimento (argamassas, grautes e concretos); características estas conseguidas através do aumento da viscosidade da água de mistura e da capacidade da pasta de cimento em manter seus constituintes em suspensão. (BARROS, 2008).

### 2.3.5 Água

Neville (2016) explica que a água está envolvida em toda a vida útil do concreto, além de atuar na trabalhabilidade e na resistência, pode influenciar nos seguintes aspectos: pega, hidratação, exsudação, retração por secagem, fluência, ingresso de sais, ruptura brusca de concretos de relação água/cimento muito baixa, colmatação autógena, manchamento superficial, ataque químico ao concreto, corrosão de armaduras, gelo e degelo, carbonatação, reação álcali-

agregado, propriedades térmicas, resistividade térmica, cavitação e erosão e qualidade da água potável passante por tubos de concreto para abastecimento.

Gomes e Barros (2009) consideram a água adicionada em uma mistura de concreto, com basicamente quatro funções: hidratação do cimento, absorção e adsorção dos agregados e materiais finos, preenchimento da porosidade do esqueleto granular e garantir a fluidez do concreto.

Conforme Recena (2011) a água utilizada para a produção dos concretos, se usada em quantidades maiores que aquelas mínimas necessárias, determina sérias alterações nas características do material, assim como podem ser alteradas em decorrência da presença de impurezas.

## 2.4 MÉTODOS DE DOSAGEM

Em comparação com o CCV a produção industrial de CAA requer maior precisão no controle dos materiais. A produção do CAA é muito sensível aos desvios de sua composição, especialmente a variação da dosagem de água, devido a umidade dos agregados. Um CCV pode manter as suas características no estado fresco mesmo com um desvio de  $10 \text{ l/m}^3$  na dosagem da água. Pelo contrário, o excesso ou a falta de tal quantidade de água pode provocar a segregação do CAA e o não cumprimento aos critérios de autoadensabilidade. (NGO *et al.*, 2016).

Gomes e Barros (2009) afirmam que há diferentes métodos de dosagem para a obtenção do CAA na literatura. Um dos principais foi desenvolvida no Japão por Okamura e Ouchi *et al.* Após, sugeriram diversos outros métodos de dosagem tais como Okamura *et al.*, Peterson *et al.*, Modelo de Empacotamento Compressível, Su *et al.*, Saak *et al.*, Repette-Melo, Tutikian e Tutikian e Dal Molin, Alencar e Helene, Díaz, EFNARC e Gomes *et al.* Cada método tem contribuído para o melhor entendimento do comportamento do CAA, alcançando, com êxito, misturas que atendem às propriedades de autoadensabilidade.

O Método de Dosagem Japonês, desenvolvido por Okamura e Ouchi *et al.*, baseia-se no conceito de que a relação água/finos e a dosagem do superplastificante deve ser obtida primeiro, por testes na pasta ou argamassa, reduzindo os ensaios de autoadensabilidade no concreto. No entanto, a proporção água/finos e o teor de dosagem do superplastificante, na maioria dos casos,

são ajustados ao se realizar a mistura da pasta com os agregados, para atendimento aos requisitos do CAA. (ZHANG; AN e NIE, 2016).

Su; Hsu e Chai (2001) e Su e Miao (2003) desenvolveram um método alternativo para a produção do CAA, referido como Método de Dosagem Chinês. O Método de Dosagem Chinês começa com o empacotamento de todos os agregados (areia e agregados graúdos), e após, o preenchimento dos vazios com pasta. O método é mais fácil de realizar, e necessita de menos pasta. Favorecendo o desempenho técnico do CAA, uma vez que o maior volume possível de agregado é vantajoso em termos de resistência, rigidez, permeabilidade, fluência e retração por secagem. (BROUWERS; RADIX, 2005).

O ACI 237R-07 (2007) é uma norma que fornece apenas parâmetros indicativos de proporções e consumo de materiais para a composição inicial do CAA, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros e limites para dosagem de CAA.

<b>Parâmetros</b>	<b>Limites ACI 237R-07</b>
Volume absoluto de agregado graúdo (%)	28 a 32
Fração de pasta (sobre o volume) (%)	34 a 40
Fração de argamassa (sobre o volume) (%)	68 a 72
Relação $a/(c+f)$	0,32 a 0,45
Consumo de cimento + finos (kg/m <sup>3</sup> )	386 a 475*
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Não se aplica

\* Pode ser inferior com o uso de um Aditivo Modificador de Viscosidade (AMV).

Fonte: ACI 237R-07 (2007)

A norma ACI 237R-07 (2007) é baseada em recomendações gerais para atendimento dos requisitos de autoadensabilidade, não propondo um método padrão para dosagem.

## 2.5 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Daczko (2012) afirma que é imprescindível conhecer as propriedades do CAA no estado fresco, pois são elas que determinam seu lançamento e consolidação diferenciando o CAA de outras misturas de concreto. Mas não quer dizer que as suas propriedades no estado endurecido podem ser ignoradas.

No Brasil, a ABNT NBR 15823-1 (2010) estabelece requisitos para a classificação, controle e recebimento do CAA no estado fresco, define e estabelece limites para as classes de autoadensabilidade e prescreve os ensaios para verificação das propriedades do CAA.

A aceitação de um CAA, segundo a ABNT NBR 15823-1 (2010) é baseada no mínimo na comprovação das propriedades de fluidez, viscosidade plástica aparente e pela habilidade passante. A norma recomenda, caso seja necessário, a comprovação de outras propriedades do CAA em função de sua aplicação, especialmente em casos de grande complexidade estrutural e alta densidade de armadura.

### 2.5.1 Habilidade de preenchimento ou fluidez

Conforme a ABNT NBR 15823-1 (2010) a habilidade de preenchimento ou fluidez é a capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços. O ensaio de espalhamento (*slump flow*) fornece indicações da fluidez do CAA e de sua habilidade de preenchimento em fluxo livre e é requisito de aceitabilidade do CAA em todas as aplicações.

A ABNT NBR 15823-1 (2010) classifica os valores de espalhamento conforme a Tabela 3.

Tabela 3- Classes de espalhamento (*slump flow*) do CAA.

<b>Classe</b>	<b>Espalhamento (mm)</b>	<b>Método de ensaio</b>
SF 1	550 a 650	NBR 15823-2 (2010)
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2010, p.4).

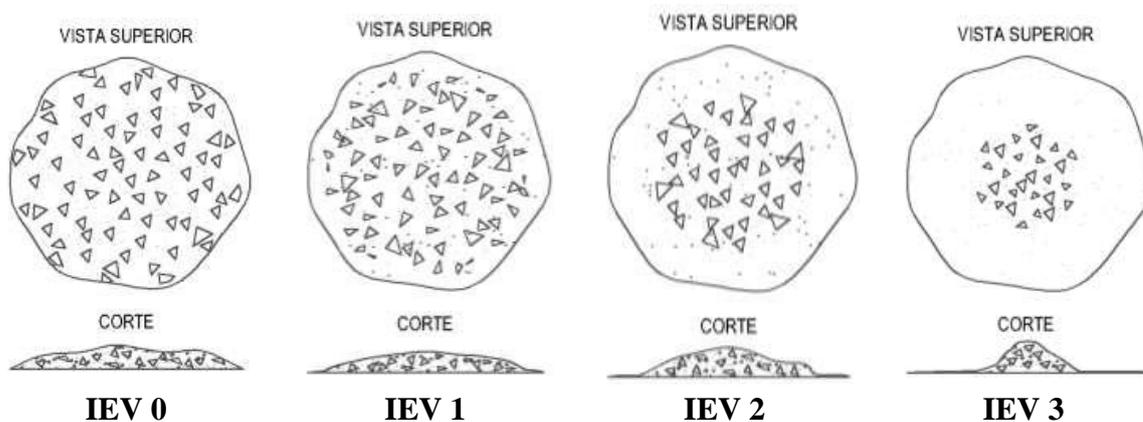
A ABNT NBR 15823-1 (2010) define e estabelece limites para as classes de autoadensabilidade e recomenda algumas aplicações para cada classe de espalhamento. Concretos classificados como SF 1 são recomendados para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto, com deslocamento livre, para estruturas que requerem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto autoadensável e para situações de bombeamento. A classificação SF 2 é adequada para a maioria das aplicações correntes. A classe SF 3 é aplicada em estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).

O ensaio de espalhamento é utilizado também para observação da estabilidade do CAA, após seu espalhamento sobre a placa de base, podendo ocorrer a formação de água nas extremidades do concreto ou a concentração de agregados no centro do espalhamento. Tutikian e Dal Molin (2015) afirmam que quando o diâmetro de espalhamento é muito pequeno o CAA está pouco fluído, sendo necessário acrescentar água ou aditivos superplastificantes, e caso o diâmetro esteja muito grande deve-se tornar o concreto mais coeso, utilizando o acréscimo de finos ou de aditivo modificador de viscosidade.

O índice de estabilidade visual (IEV) foi inserido no projeto de revisão da ABNT NBR 15823-1 (2010) e segundo Tutikian *et al.* (2016) tem como objetivo avaliar visualmente a capacidade de fluidez e a possibilidade de segregação do CAA, conforme aparência do concreto imediatamente após o ensaio de espalhamento. A distribuição dos agregados graúdos na mistura, a distribuição da fração de argamassa ao longo do perímetro e a ocorrência de exsudação, oferecem indicações interessantes sobre o CAA

Os critérios para avaliação qualitativa da estabilidade visual estão representados na Figura 2-1 e as classes de IEV na Tabela 4.

Figura 2-1– Critérios para avaliação qualitativa do IEV.



Fonte: Barbosa (2016).

Tabela 4 - Classes do índice de estabilidade visual.

Classe	IEV	Método de ensaio
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação	Projeto de revisão ABNT NBR 15823-2
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
IEV 2 (Instável)	Presença de pequena auréola de argamassa ( $\leq 10$ mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa $> 10$ mm)	

Fonte: Barbosa (2016).

A exsudação é um fenômeno de drenagem de parte da água da mistura, para a superfície do concreto recém lançado e adensado. Sendo responsável por uma elevada relação água/cimento nessa região, portanto uma camada de concreto porosa, fraca e não durável na superfície suscetível à fissuração por retração plástica. (METHA; MONTEIRO, 2014).

A exsudação influencia a qualidade do concreto no estado fresco e a durabilidade no estado endurecido, pois além da água acumulada na face superior do concreto, parte da água ascendente fica retida embaixo de agregados graúdos ou armaduras horizontais, deixando vazios que podem diminuir a resistência e aumentar a permeabilidade do concreto. A exsudação diminui com cimentos mais finos e é afetada por alguns fatores químicos como: alto teor de álcalis, C<sub>3</sub>A e cloreto de cálcio. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### 2.5.2 Viscosidade plástica

A viscosidade plástica aparente é uma propriedade relacionada com a consistência e a coesão da mistura, segundo a ABNT NBR 15823-1 (2010) quanto maior a viscosidade do concreto, maior a sua resistência ao escoamento. Essa propriedade é importante quando for requerido um bom acabamento superficial ou quando a densidade de armadura for expressiva, pode ser avaliada pelo tempo,  $t_{500}$ , durante o teste de espalhamento (*slump flow*) ou pelo tempo de fluxo no funil V e classificada conforme as especificações da norma mencionada, pelas Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5- Classes de viscosidade plástica aparente  $t_{500}$  (sob fluxo livre).

<b>Classe</b>	<b><math>t_{500}</math> (s)</b>	<b>Método de ensaio</b>
VS 1	$\leq 2$	NBR 15823-2 (2010)
VS 2	$> 2$	

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2010, p.4)

Tabela 6- Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado).

<b>Classe</b>	<b>Funil V (s)</b>	<b>Método de ensaio</b>
VF 1	$< 9$	NBR 15823-5 (2010)
VF 2	9 a 25	

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2010, p.4)

A classificação VS 1 para o ensaio do  $t_{500}$  e VF 1 para o ensaio do funil V recomenda que o CAA seja aplicado em elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas requer controle da exsudação e da segregação ou para concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. Para as classes VS 2 no ensaio do  $t_{500}$  e VF 2 no ensaio do funil V o CAA é adequado para a maioria das aplicações correntes, apresentando efeito tixotrópico, que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. Para essa classificação outros efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.

Conforme EFNARC (2005) o concreto com baixa viscosidade terá um fluxo inicial muito rápido, porém de curta duração, o concreto com alta viscosidade pode continuar a escoar por um tempo prolongado.

### 2.5.3 Habilidade passante

A habilidade passante conforme EFNARC (2002) é a capacidade do CAA se movimentar pela fôrma, passando por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação. Pode-se avaliar a habilidade passante do CAA através dos ensaios do anel J (sob fluxo livre) e da caixa L (sob fluxo confinado), os dois ensaios simulam as barras de aço em uma estrutura e os obstáculos para passagem do CAA. A ABNT NBR 15823-1 (2010) classifica o CAA quanto à habilidade passante conforme Tabela 7 para o anel J e Tabela 8 para a caixa L.

Tabela 7– Classes de habilidade passante pelo anel J.

<b>Classe</b>	<b>Anel-J (mm)</b>	<b>Método de ensaio</b>
PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	NBR 15823-3 (2010)
PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço	

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2010, p.4)

Tabela 8- Classes de habilidade passante na caixa L (sob fluxo confinado).

<b>Classe</b>	<b>Caixa L (H2/H1)</b>	<b>Método de ensaio</b>
PL 1	$\geq 0,80$ , com duas barras de aço	NBR 15823-4 (2010)
PL 2	$\geq 0,80$ , com três barras de aço	

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2010, p.4)

Concretos classificados como PL 1 / PJ 2 são adequados para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm e PL 2 / PJ 1 são recomendados para a maioria das aplicações correntes e elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.

#### 2.5.4 Resistência à segregação

A resistência à segregação ou estabilidade é a propriedade mais importante para uma aplicação bem sucedida do CAA. Devido a sua alta fluidez, o CAA é muito mais suscetível a problemas de estabilidade do que o CCV, caso não seja proporcionado para ser coeso. (PANESAR; SHINDMAN, 2012).

Neville e Brooks (2013) afirmam que o concreto não deve segregar, ou seja, deve-se manter coeso para que seja possível obter um adensamento máximo. Há duas formas de segregação no concreto. Na primeira as partículas maiores tendem a separar se assentando mais que as partículas mais finas, e, na segunda, ocorre prioritariamente nos concretos com excesso de água na qual parte da água da mistura tende a migrar para a superfície do concreto.

De acordo com Gomes e Barros (2009) a resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de evitar a separação de seus componentes, mantendo a uniformidade da mistura durante o transporte e o lançamento (segregação dinâmica) e a consolidação (segregação estática). Conforme a ABNT NBR 15823-1 (2010) a segregação estática é mais danosa em elementos estruturais altos, mas também em lajes pouco espessas, podendo causar fissuração e enfraquecimento da superfície.

O ensaio que classifica o CAA quanto à resistência à segregação é descrito pela ABNT NBR 15823-6 (2010), Tabela 9, e sua realização é fundamental para a homogeneidade e a qualidade do CAA, sendo particularmente importante em concretos autoadensáveis de maior fluidez e baixa viscosidade.

Tabela 9– Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação.

<b>Classe</b>	<b>Coluna de segregação (%)</b>	<b>Método de ensaio</b>
SR 1	$\leq 20$	ABNT NBR 15823-6
SR 2	$\leq 15$	

Fonte: (ABNT NBR 15823-1, 2010, p.4)

Concretos autoadensáveis classificados como SR 1 são recomendados para aplicação em lajes de pequena espessura e estruturas convencionais de pouca complexidade. A classificação SR 2 é indicada para a aplicação dos concretos em elementos de fundações profundas, pilares, paredes e elementos estruturais complexos e elementos pré-fabricados.

EFNARC (2002) expõe que devido a elevada fluidez do CAA, o risco de segregação e de bloqueio é muito alta. A tendência à segregação pode ser reduzida utilizando quantidade suficiente de finos ou usando um aditivo modificador da viscosidade.

A instabilidade de um CAA pode resultar em acúmulo e sedimentação dos agregados, deixando uma camada de argamassa sobre o concreto. Embora a segregação estática possa ser facilmente detectada por inspeção visual, se houver exsudação excessiva, torna-se mais difícil detectar o transporte interno da água. (BONEN; SHAH, 2005).

A mistura de CAA possui um maior volume de pasta, ficando mais susceptível à fissuração por retração em caso de segregação ou exsudação, devido ao assentamento dos agregados e a formação de uma camada superior mais rica em pasta sobre a superfície. (PANESAR, SHINDMAN, 2012).

## 2.6 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

A determinação das propriedades mecânicas do CAA é essencial para cumprir os requisitos das normas técnicas e de projeto. Parra; Valcuende e Gómez (2011) afirmam que geralmente o comportamento mecânico do concreto é governado por sua resistência à compressão, no

entanto, a resistência à tração e o módulo de elasticidade são duas importantes propriedades que influenciam a segurança, a durabilidade e a vida útil do concreto armado.

Quanto ao estado endurecido a EFNARC (2005) apresenta as seguintes comparações entre o CAA e o CCV:

- O CAA, com uma relação água-cimento semelhante a do CCV, terá uma resistência à compressão ligeiramente superior, apresentando uma melhor zona de transição.
- Quanto a resistência à tração, o CAA, para uma dada classe de resistência, pode assumir os mesmos resultados que um CCV.
- Como o CAA, muitas vezes, tem um teor de pasta mais elevado do que o CCV, o valor do módulo de elasticidade pode ser um pouco menor.
- A deformação causada por fluência pode ser maior, a deformação causada pela retração pode ser inferior e o valor da soma das deformações devido à retração e a fluência são quase semelhantes.
- Em geral, o CAA apresenta maior uniforme e baixa permeabilidade, oferecendo menos pontos fracos para ações deletérias do ambiente e, conseqüentemente, maior durabilidade.

Conforme Mehta e Monteiro (2014) a resistência à tração em CCV pode variar em torno de 0,1 a 0,15 (10 a 15 %) da resistência à compressão. Isto ocorre devido à estrutura heterogênea e complexa do concreto, principalmente os parâmetros que influenciam nas características da microestrutura da matriz de cimento e da zona de transição dos agregados com a pasta de cimento.

De acordo com Uygunoglu, Topçu e Celik (2014) e Topçu e Uygunoglu (2010) a relação água/finos desempenha um papel importante na zona de transição da matriz de cimento hidratado com o agregado, um aumento na sua proporção pode reduzir, significativamente, o valor do módulo de elasticidade. Contudo, o módulo de elasticidade do CAA não depende só da proporção água/finos, mas também do volume de cimento, da forma e rugosidade superficial dos agregados e da matriz de cimento hidratado.

A análise estatística dos resultados encontrados por Parra, Valcuende e Gómez (2011) em sua pesquisa, revela uma ligeira tendência para o CAA obter um módulo de elasticidade cerca de 2 % em média, menor que o CCV. Após foram realizados ensaios para determinar o módulo de elasticidade somente da pasta de cimento, e o CAA apresentou valores mais elevados que o

CCV. A análise da zona de transição agregado-pasta também foi mais densa e mais rígida no CAA. Portanto, dado que o módulo de elasticidade da pasta e da zona de transição é maior no CAA, a sua menor rigidez só pode ser explicada pelo maior teor de pasta que existe neste tipo de concreto, pois a deformabilidade da pasta é superior à dos agregados.

Parra, Valcuende e Gómez (2011) concluíram em sua pesquisa que as pequenas diferenças entre a rigidez do CAA e do CCV aparecem claramente entre as idades de 28 e 90 dias, enquanto aos 7 dias o módulo de elasticidade é praticamente o mesmo para os dois tipos de concreto. Isto pode ser explicado pelo efeito favorável proporcionado pelo fíler calcário na mistura, acelerando os processos de hidratação do cimento durante os primeiros dias e compensando a perda de rigidez produzida no CAA devido ao seu maior teor de pasta.

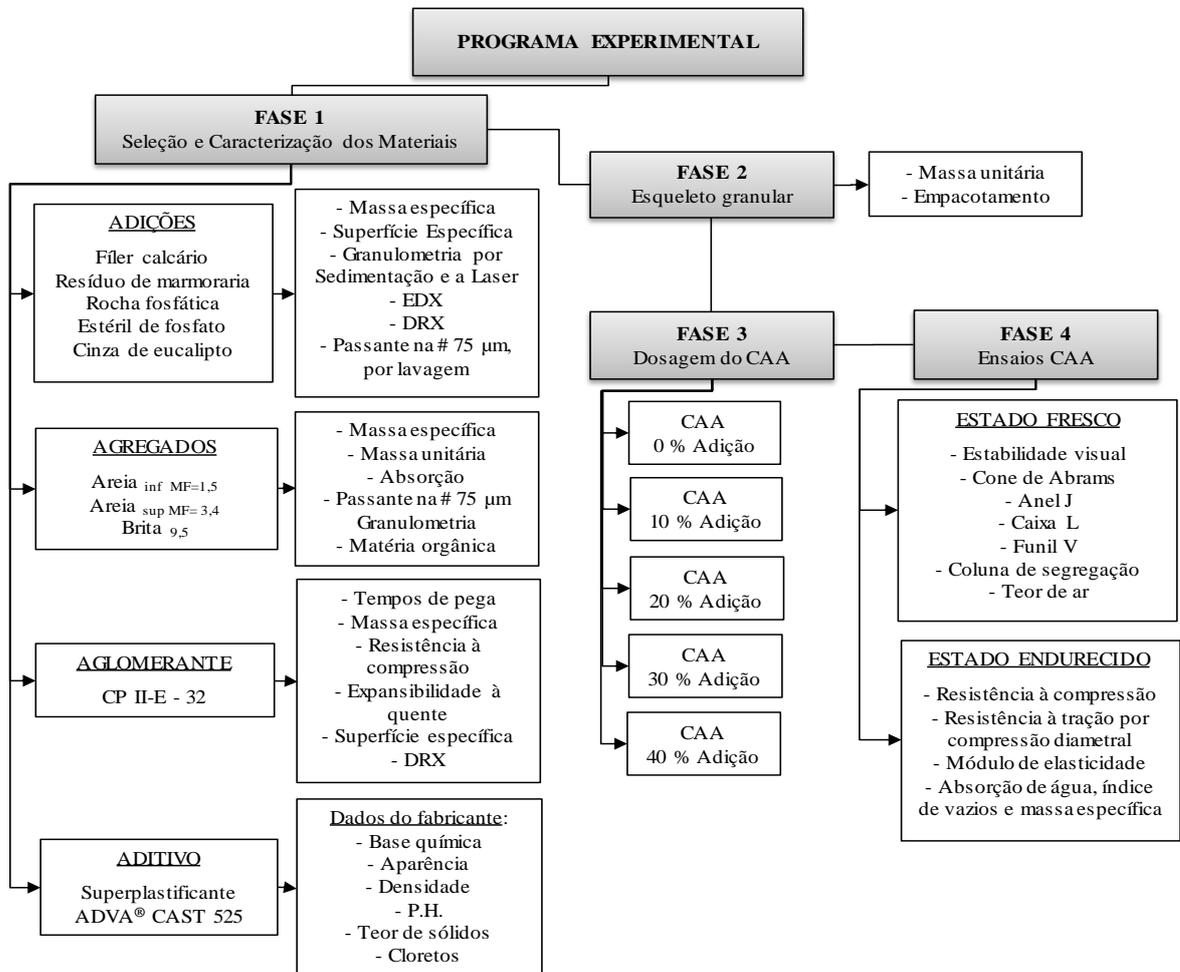
Os módulos de elasticidade estático e dinâmico do CAA estão diretamente relacionados à sua resistência à compressão. Após várias análises Uysal e Yilmaz (2011), afirmam que se a resistência à compressão das misturas de CAA aumenta, os módulos de elasticidade estático e dinâmico também aumentam. Em geral, as taxas crescentes de substituição de adições minerais diminuem a resistência à compressão e os módulos de elasticidade estático e dinâmico do CAA. Adições minerais inertes podem aumentar a resistência à compressão devido à um melhor empacotamento, além disso, as superfícies das adições minerais podem atuar como sítios de nucleação para as reações de hidratação do cimento. O efeito da nucleação sobre a resistência à compressão, depende da afinidade da adição mineral com o cimento, e aumenta com a finura e a área superficial da adição mineral.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos para o desenvolvimento do programa experimental, estruturado conforme os objetivos propostos neste trabalho. Os procedimentos foram divididos em quatro fases: a seleção e os ensaios para caracterização dos materiais, a definição do esqueleto granular dos concretos, o estudo de dosagem para produção do CAA e os ensaios no estado fresco e endurecido. Na Figura 3-1 é apresentado o fluxograma com os detalhes de cada fase do programa experimental.

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Análise Tecnológica de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (LATEMC/UNIPAM), em Patos de Minas-MG, no Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia - GO e nos Laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), em Brasília - DF.

Figura 3-1– Fases do programa experimental.



### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental para produção dos concretos autoadensáveis foi planejado considerando uma matriz 5×4, com cinco tipos de adições e quatro teores de substituição de cimento, em massa. Experimentalmente foi definido o traço do concreto referência com 0 % de adição mineral (CAA-SF) e o consumo de cada material (agregados, aglomerante, água e aditivo). Posteriormente, realizou-se a substituição do consumo de cimento no concreto de referência, nos teores de 10 %, 20 %, 30 % e 40 %, por diferentes tipos de adições minerais, produzindo os seguintes concretos:

- Concreto autoadensável com fíler calcário - CAA-FI;
- Concreto autoadensável com resíduo de marmoraria - CAA-RM;
- Concreto autoadensável com rocha fosfática - CAA-FO;
- Concreto autoadensável com estéril de fosfato - CAA-ES;
- Concreto autoadensável com cinza de eucalipto - CAA-CE.

#### 3.1.1 Variáveis

A pesquisa experimental, conforme Rampazzo (2005) consiste na manipulação das variáveis, proporcionando o estudo da relação entre causas e efeitos de um determinado fenômeno. Logo, para atingir os resultados, o pesquisador utiliza aparelhos e instrumentos apropriados, capazes de tornar perceptíveis as relações existentes entre as variáveis envolvidas no objeto de estudo.

Segundo Marconi e Lakatos (2003) variável independente é aquela que influencia, determina ou afeta outra variável, sendo o fator determinante para o resultado. Pode ser manipulada pelo investigador, na tentativa de assegurar a relação do fator com um fenômeno a ser descoberto e qual influência exerce sobre um possível resultado. A variável dependente consiste naqueles valores a serem descobertos, em virtude da influência da variável independente. Este fator varia à medida que o investigador modifica a variável independente.

Prodanov e Freitas (2013) afirmam que ao determinar um objeto de estudo, deve-se selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definindo as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Assim, as variáveis independentes, ou controláveis, deste estudo são: o tipo de adição mineral e o teor de adição mineral e as variáveis dependentes, consideradas como as respostas deste

programa experimental são: as propriedades do CAA no estado fresco e endurecido. A Tabela 10 apresenta a matriz experimental da pesquisa e as variáveis independentes e dependentes.

Tabela 10 - Matriz experimental da pesquisa e as variáveis independentes e dependentes.

Variáveis independentes		Nomenclatura dos concretos	Variáveis dependentes									
Tipo de adição	Teor de adição (%)		Propriedades do CAA									
			Estado fresco				Estado endurecido					
Sem adição	0	CAA-SF-0	Espalhamento ( <i>slump flow</i> )	Índice de estabilidade visual	Viscosidade aparente: $t_{500}$ e Funil V	Habilidade passante: Anel J e Caixa L	Resistência à segregação: Coluna de Segregação	Teor de ar	Resistência à compressão (3, 7 e 28 dias)	Resistência à tração por compressão diametral (28 dias)	Módulo de elasticidade (28 dias)	Absorção de água, índice de vazios e massa específica (28 dias)
Fíler calcário	10	CAA-FI-10										
	20	CAA-FI-20										
	30	CAA-FI-30										
	40	CAA-FI-40										
Resíduo de marmoraria	10	CAA-RM-10										
	20	CAA-RM-20										
	30	CAA-RM-30										
	40	CAA-RM-40										
Rocha fosfática	10	CAA-FO-10										
	20	CAA-FO-20										
	30	CAA-FO-30										
	40	CAA-FO-40										
Estéril de fosfato	10	CAA-ES-10										
	20	CAA-ES-20										
	30	CAA-ES-30										
	40	CAA-ES-40										
Cinza de eucalipto	10	CAA-CE-10										
	20	CAA-CE-20										
	30	CAA-CE-30										
	40	CAA-CE-40										

### 3.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção do CAA foram selecionados conforme disponibilidade na cidade de Patos de Minas – MG. Após a aquisição retirou-se amostras para caracterização, de acordo com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O fíler calcário é comercializado embalado, portanto os ensaios foram realizados sem qualquer tipo de beneficiamento prévio. As demais adições minerais: resíduo de marmoraria, rocha fosfática, estéril de fosfato e cinza de eucalipto, foram recolhidas diretamente nas indústrias e alguns procedimentos prévios foram necessários antes dos ensaios para caracterização das

amostras, tais como: secagem, destorroamento e peneiramento. Durante o período de execução do programa experimental, segundo semestre de 2016, todos os materiais foram secos em estufa e permaneceram armazenados em sacos plásticos vedados.

### 3.2.1 Adições Minerais

O programa experimental utilizou como adição mineral o fíler calcário, os resíduos de marmoraria, a rocha fosfática, o estéril de fosfato e a cinza de eucalipto, a escolha de todas as adições foi determinada para análises somente dos seus efeitos físicos no concreto.

O fíler calcário (FI) adquirido para a produção do CAA foi produzido pelo processo de britagem de rochas calcárias da região, Figura 3-2. Durante muitos anos esse material foi considerado como um resíduo do processo de britagem de rochas, com o aumento de sua utilização para concretos de cimento Portland e concreto asfáltico, esse material tem sido comercializado em embalagens plásticas de 40 kg.

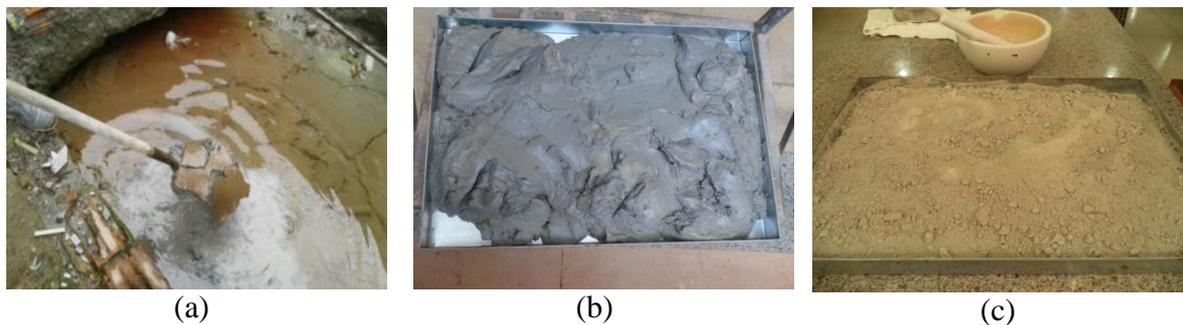
Figura 3-2 – Amostra de fíler calcário.



O resíduo de marmoraria (RM) é proveniente da fase de corte e polimento das chapas das rochas, em uma marmoraria da região, durante o processo de produção esse resíduo com aspecto físico de lama, é armazenado em um tanque de decantação. A limpeza do tanque é realizada periodicamente, de acordo com a produção, o resíduo é retirado por empresas de caçambas às quais depositam em áreas de descarte na zona rural da cidade. A utilização deste resíduo incentiva a redução dos riscos de degradação ambiental, devido sua deposição e acumulação inadequada na natureza.

Após coleta, o resíduo de marmoraria foi exposto sobre lonas plásticas para evaporação de parte da água, e após, levado à estufa sob a temperatura de 105 °C por 24 horas. Posteriormente, todo material foi destorroado no almofariz com o pistilo, passado na peneira de abertura 2,00 mm para retirada de materiais com granulometria superior (folhas, linhas, pedras) e embalado em sacos plásticos, conforme visto na Figura 3-3.

Figura 3-3 - Procedimentos para utilização do RM em: (a) coleta no tanque de decantação, (b) após evaporação de parte da água, (c) após secagem em estufa.



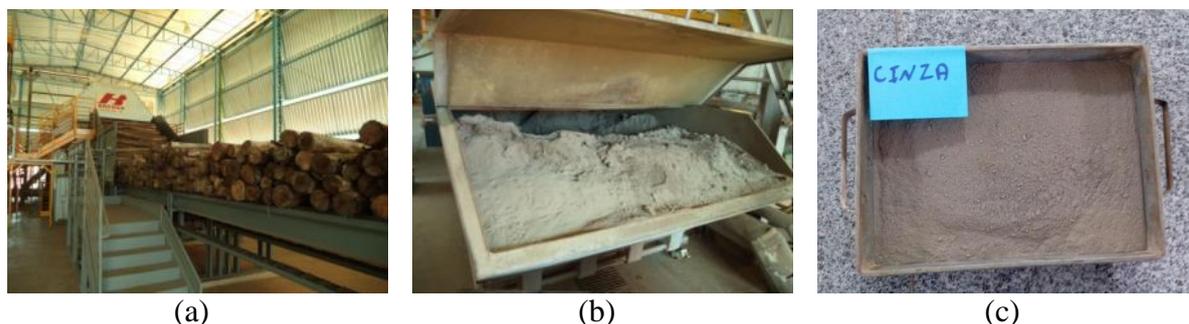
A rocha fosfática (FO) e o estéril de fosfato (ES) foram fornecidos por uma indústria de fertilizantes da região, na forma granular e ensacados. A rocha fosfática adquirida para a pesquisa trata-se de um concentrado de rocha fosfática. O estéril de fosfato trata-se de um mineral de coloração amarelado, retirado da jazida em zonas superiores a camada de rocha fosfática, sendo colocado em pilhas para posterior descarte. Após, os dois materiais foram secos em estufa sob a temperatura de 105 °C por 24 horas, destorroados no almofariz com o pistilo, peneirados na peneira de 2,00 mm, para retirada de resíduos com granulometria superior (alguns torrões e pedras) e embalado novamente em sacos plásticos. Na Figura 3-4 são apresentadas as amostras dos materiais secos em estufa antes de destorrear e peneirar.

Figura 3-4— Amostras antes de destorrear e peneirar de: (a) rocha fosfática e (b) estéril de fosfato.



A cinza proveniente da queima de madeira de eucalipto em caldeira (CE) foi obtida em uma empresa de laticínios da cidade, conforme Figura 3-5. Toda a cinza gerada após a combustão da madeira é considerada como resíduo do processo de produção, sendo armazenada em caçambas para resfriamento e posteriormente é retirada por empresa terceirizada. A cinza de eucalipto foi coletada na caçamba à temperatura de aproximadamente 90 °C, após o resfriamento foi passada na peneira de 2,00 mm para retirada de resíduos com granulometria superior (cavacos) e embalada em sacos plásticos.

Figura 3-5– Processo de geração da CE em (a) madeira de eucalipto na esteira antes da queima, em (b) coleta de CE após a queima, em (c) amostra de CE.



Após a aquisição de todas as adições minerais e preparo das amostras, foram realizadas as análises das propriedades físicas, químicas e microestruturais. Os ensaios para caracterização das propriedades físicas e granulometria por sedimentação foram realizados no Laboratório de Análise Tecnológica de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (LATEMC/UNIPAM). O ensaio de granulometria a laser foi realizado no Laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., utilizando um granulômetro da marca CILAS, modelo Microcuve. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11– Caracterização das propriedades físicas das adições minerais.

Propriedade	Método de ensaio	FI	RM	FO	ES	CE
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23 (2001)	2,74	2,78	2,95	2,51	2,88
Material fino que passa na peneira 75 µm, por lavagem (%)	NBR NM 46 (2003)	78,2	93,6	71,0	88,1	78,7
Superfície específica (método de Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	NBR 16372 (2015)	2448	5406	1971	7385	5761
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 10% das partículas – D <sub>10</sub> (µm)	Granulometria a laser	-	1,3	12,3	1,3	-
Dimensão Média (µm)		-	8,5	50,7	7,0	-
Diâmetro abaixo do qual encontram-se 90% das partículas – D <sub>90</sub> (µm)		-	34,4	92,3	32,6	-

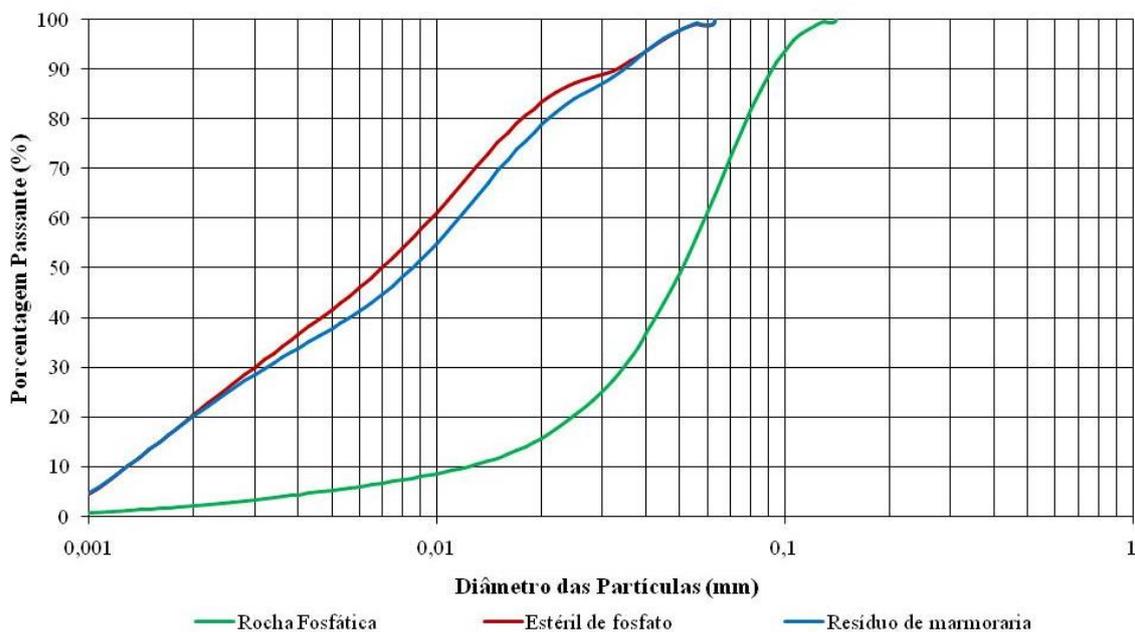
Conforme a ABNT NBR 16372 (2015) a determinação da finura ou superfície específica de materiais em pó, por meio do permeabilímetro de Blaine, não fornece resultados significativos fora do intervalo de 2000 cm<sup>2</sup>/g a 8000 cm<sup>2</sup>/g. Portanto, o valor encontrado para a rocha fosfática de 1971 cm<sup>2</sup>/g está fora do intervalo da norma.

Este método determina a finura do pó observando o tempo (t) necessário para uma determinada quantidade de ar atravessar a camada do pó compactado, de dimensões e porosidade

especificadas, sendo um método mais comparativo que absoluto, portanto é necessária a calibração do aparelho com uma amostra de cimento de superfície específica conhecida. Quanto maior a superfície específica do material, maior será sua finura e menor será o tamanho de suas partículas.

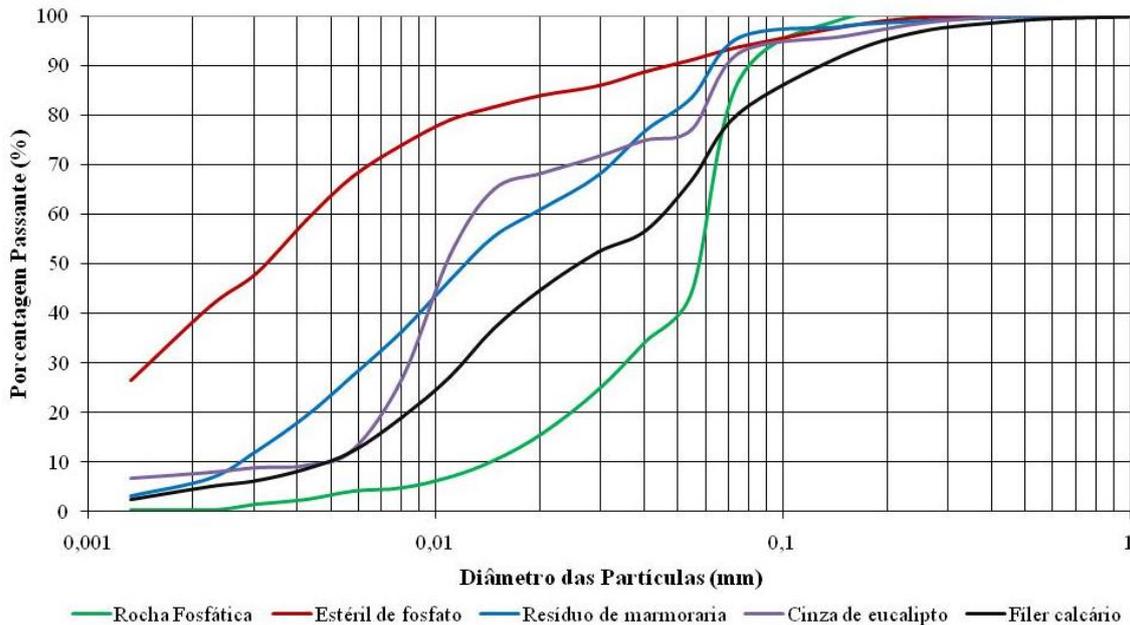
O ensaio de granulometria a laser foi realizado apenas para as amostras de rocha fosfática, estéril de fosfato e o resíduo de marmoraria, devido à problemas apresentados no equipamento de ensaio. As curvas de granulometria estão representadas na Figura 3-6.

Figura 3-6- Granulometria a laser.



O ensaio de granulometria por sedimentação foi realizado conforme a ABNT NBR 7181 (2016) e consiste basicamente no preparo das amostras, nas leituras do densímetro correspondentes aos tempos de sedimentação determinados pela norma, realização do cálculo dos diâmetros das partículas em suspensão e suas porcentagens. O resultado é dado a partir das curvas de granulometria por sedimentação para as amostras de rocha fosfática, estéril de fosfato, resíduo de marmoraria, cinza de eucalipto e fíler calcário, na Figura 3-7.

Figura 3-7 - Granulometria por sedimentação.



Quanto ao diâmetro das partículas de uma amostra, as curvas representadas na Figura 3-6 e Figura 3-7 mostram que há pequenas diferenças nos resultados encontrados para cada método de ensaio. Por exemplo, fixado o diâmetro de 0,150 mm nas curvas granulométricas das adições minerais, observa-se que:

- o fíler calcário apresenta no gráfico de granulometria por sedimentação apenas 92 % das partículas abaixo de 0,150 mm;
- o resíduo de marmoraria e o estéril de fosfato apresentam no gráfico de granulometria a laser 100 % e no gráfico de granulometria por sedimentação 98 % das partículas abaixo de 0,150 mm;
- a rocha fosfática apresenta no gráfico de granulometria a laser 100 % e no gráfico de granulometria por sedimentação 99 % das partículas abaixo de 0,150 mm;
- a cinza de eucalipto apresenta no gráfico de granulometria por sedimentação apenas 96 % das partículas abaixo de 0,150 mm.

Essa pequena diferença ocorre, principalmente, devido aos princípios físicos de análise utilizados para cada método. Estudos demonstram a diferença encontrada entre os resultados de uma amostra, ensaiada por diferentes métodos, para um único parâmetro, onde foi possível concluir que para cada tipo de material há um método de análise mais recomendado.

Assim, de acordo com a ABNT NBR 9935 (2011) e as Figura 3-6 e Figura 3-7 as adições minerais denominadas fíler calcário e cinza de eucalipto não podem ser classificadas como

finos, devido a porcentagem passante na peneira de 0,150 mm ser inferior a 100 % no ensaio de granulometria por sedimentação.

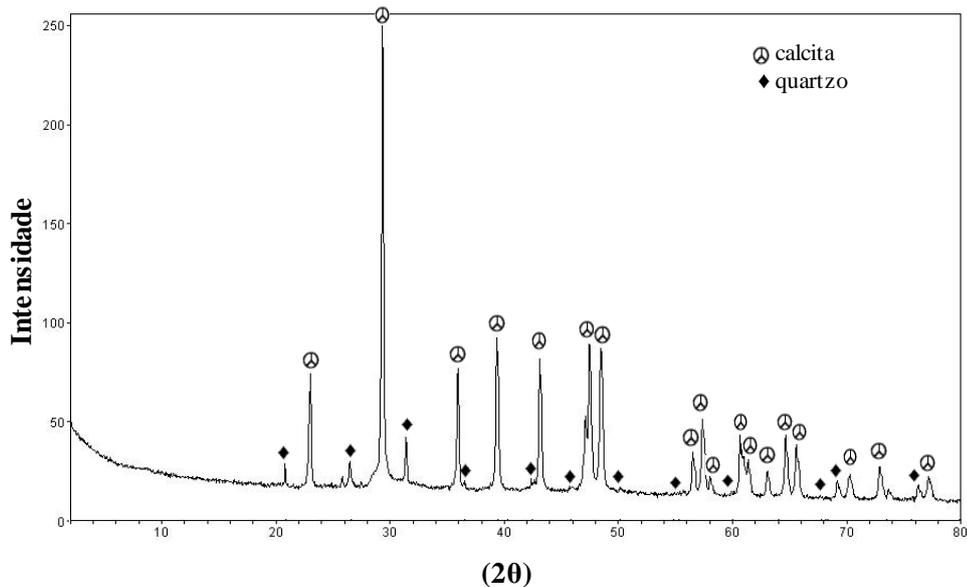
### 3.2.1.1 Difratomia de Raios-X

O ensaio consiste em uma técnica de identificação, qualitativa, de fases cristalinas em diversos materiais, a partir da difração de raios-X e a comparação dos picos (posição e intensidade) representados no difratograma, com um banco de dados referentes à cristalografia de minerais e rochas.

A composição mineralógica das adições minerais foi identificada no difratômetro de raios-X, da marca Rigaku, modelo Última IV com radiação de cobre, localizado no Laboratório do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB). As condições de análise foram definidas com base nas características dos materiais analisados, sendo: faixa angular ( $2\theta$ ) de 2 a 80°, com o passo angular de 0,05° e velocidade angular de 5° por minuto. Na Figura 3-18 apresentam-se as principais fases cristalinas identificadas para o fíler calcário.

Para identificação dos minerais encontrados, pelos ensaios do DRX, utilizou-se a Enciclopédia Multimídia de Minerais do Departamento de Petrologia e Metalogenia do curso de Geologia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), em Rio Claro/SP, conforme Machado, *et al.* (2003).

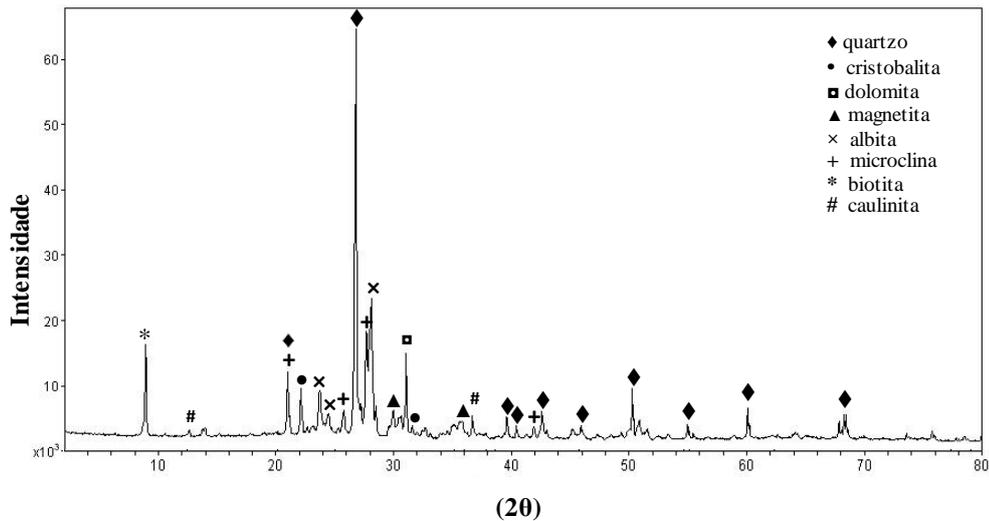
Figura 3-8 - Difrátograma de raios-X do fíler calcário.



O difratograma de raios-X do fíler calcário confirma a sua composição mineral cristalina, constituído por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), o que implica numa reatividade baixa do material.

Na Figura 3-9 verificam-se as principais fases cristalinas identificadas para o resíduo de marmoraria.

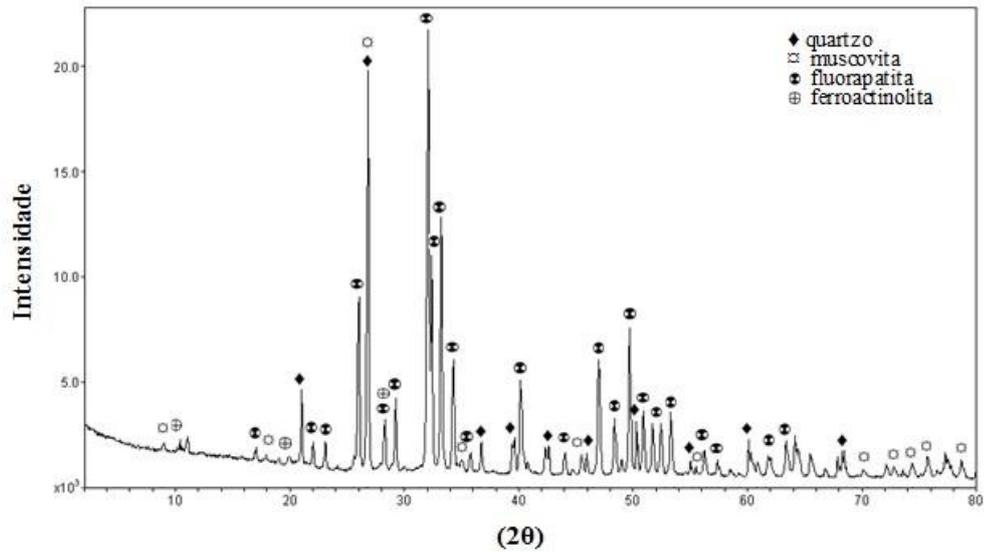
Figura 3-9- Difratograma de raios-X do resíduo de marmoraria.



Por se tratar de um resíduo de marmoraria, diversos minerais foram identificados em sua composição mineralógica, sendo: o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) encontrado em arenitos, granitos, gnaisses e quartzitos. A cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ) que é um polimorfismo do quartzo. A dolomita (carbonato de cálcio e magnésio) presente em calcários e mármore dolomíticos. A magnetita (óxido de ferro) comumente formada pela alteração de minerais que contém óxido de ferro. A albita ( $\text{Na}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_8$ ), a microclina ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) e a biotita (composta por  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ) que ocorrem em alguns granitos e gnaisses. A caulinita (silicato de alumínio hidratado) pode ser formada a expensas de muitos minerais.

Observa-se na Figura 3.10 as principais fases cristalinas identificadas para a rocha fosfática.

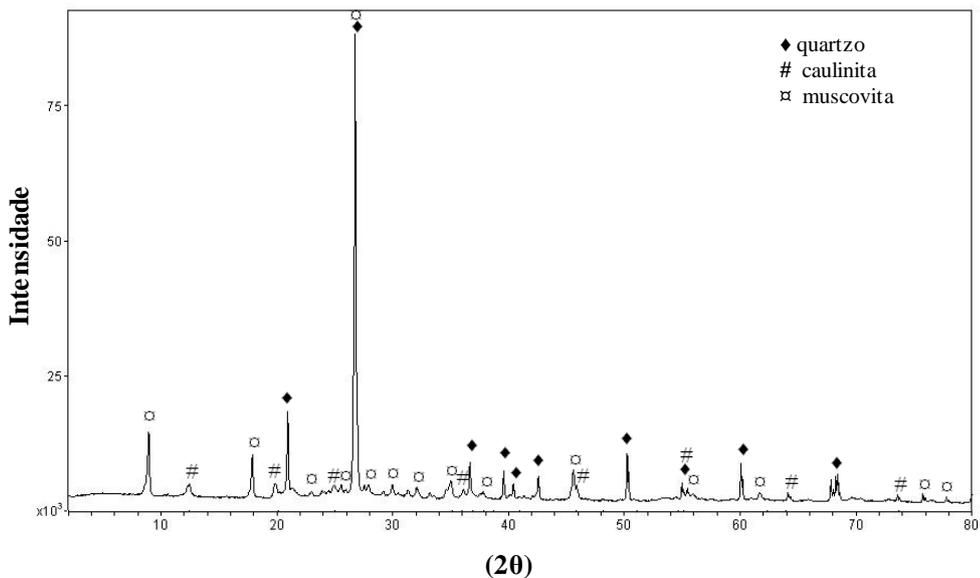
Figura 3-10 - Difratoograma de raios-X da rocha fosfática.



A rocha fosfática possui composição mineralógica composta por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), muscovita ( $\text{KA}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ), fluorapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ), que ocorre em rochas magmáticas, metamórficas e hidrotermais como mineral secundário e a ferroactinolita ( $\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ) encontrada em calcários dolomíticos, talco xistos, xistos cristalinos e anfibólitos.

Na Figura 3-11 foram apresentadas as principais fases cristalinas identificadas para o estéril de fosfato.

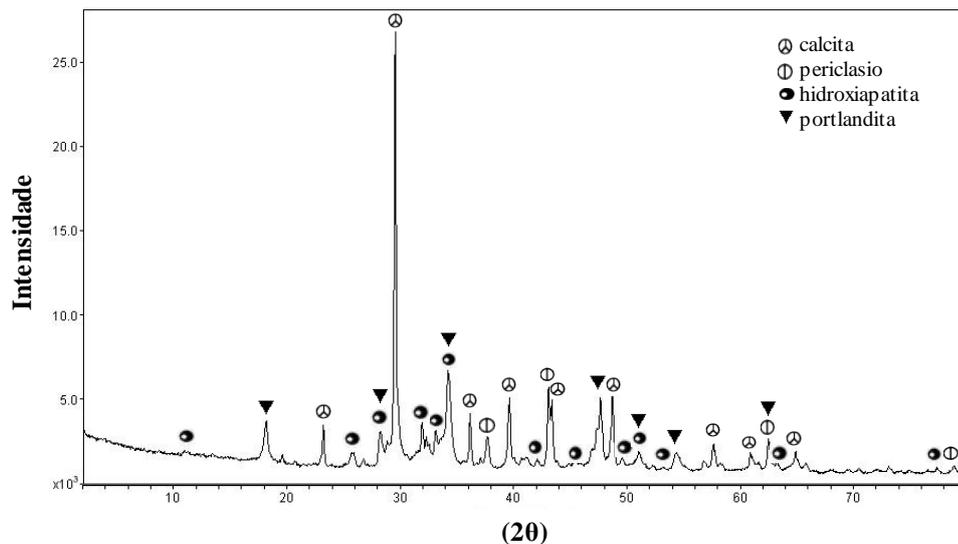
Figura 3-11 - Difratoograma de raios-X do estéril de fosfato.



A composição mineralógica do estéril de fosfato se assemelha a dos argilominerais, sendo composta pelo quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), a caulinita (silicato de alumínio hidratado) que pode ser associada a minerais aluminosos, solos e alteração de feldspatos e outros silicatos e a muscovita ( $\text{KA}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ) encontrada nos granitos com micas.

Na Figura 3-12 são identificadas as principais fases cristalinas identificadas para a cinza de eucalipto.

Figura 3-12 - Difratoograma de raios-X da cinza de eucalipto.



O difratograma de raios-X da CE apresentou como principais fases cristalinas a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o periclásio ( $\text{MgO}$ ) e a hidroxiapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ). Segundo Santana (2009) os principais elementos químicos constituintes da parte inorgânica da madeira, são o cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e potássio (K), mas o teor destes elementos pode variar de acordo com a espécie, quantidade de casca, e pela presença de terra e areia na madeira. O cálcio pode ser encontrado nas cinzas de madeira sob a forma de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Devido a intensidade dos picos apresentados nos difratogramas, pode-se caracterizar as adições minerais: fíler calcário, resíduo de marmoraria, rocha fosfática, estéril de fosfato e cinza de eucalipto como materiais cristalinos, sem a presença de fase amorfa, reduzindo assim, a possibilidade de atividade química entre os materiais.

### 3.2.1.2 Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X

A Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (EDX) é um processo quali-quantitativo, de identificação de elementos químicos e suas concentrações, em amostras de materiais líquidos ou sólidos. Segundo Bleicher e Sasaki (2000), o método utiliza energia de raios-X para provocar transições eletrônicas entre os orbitais dos átomos, e produzir radiações de fluorescência com comprimentos de onda diferentes para cada elemento atômico e intensidade relacionados com a sua concentração.

A Tabela 12 apresenta a composição química das adições minerais, obtida através do EDX, o aparelho utilizado foi o EDX 720 da marca Shimadzu.

Tabela 12– Composição química das adições minerais.

Composto químico	(% em massa)				
	FI	RM	RO	ES	CE
SiO <sub>2</sub>	0,56	62,31	17,29	59,34	0,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	14,06	3,60	18,81	0,69
MgO	0,27	2,29	0,32	1,79	6,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,56	5,83	2,83	9,40	1,96
CaO	97,54	5,19	48,32	1,53	70,40
Na <sub>2</sub> O	0,02	3,11	0,09	0,04	0,43
K <sub>2</sub> O	0,07	5,08	0,86	5,26	11,26
TiO <sub>2</sub>	0,02	1,21	0,35	1,16	0,29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15	0,44	25,42	2,03	3,66
MnO	0,10	0,09	0,13	0,40	3,42
SO <sub>3</sub>	0,04	0,08	0,01	0,01	0,65
Perda ao Fogo	43,06	2,57	1,75	5,66	22,17

As composições químicas identificadas nas amostras, pelo método do EDX, apresentadas na Tabela 12, confirmam os resultados encontrados pelo método do DRX. Para cada amostra alguns compostos químicos principais para sua formação mineral, foram relacionados a seguir:

- Fíler calcário: óxido de cálcio possui 97,54 % de CaO em massa.
- Resíduo de marmoraria: SiO<sub>2</sub> (62,31 %) no quartzo, cristobalita, albita, microclina, biotita e caulinita, o CaO (5,19 %) e o MgO (2,29 %) na dolomita, o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5,83 %) na magnetita e biotita e o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14,06 %) na albita, microclina, biotita e caulinita.
- Rocha fosfática: SiO<sub>2</sub> (17,29 %) no quartzo, muscovita e ferroactinolita, o CaO (48,32 %) na fluorapatita e ferroactinolita e o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (25,42 %) na fluorapatita.
- Estéril de fosfato: SiO<sub>2</sub> (59,34 %) no quartzo e caulinita, o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (18,81 %) na caulinita e o K<sub>2</sub>O (5,26 %) na muscovita.

- Cinza de eucalipto: CaO (70,40 %) na calcita, portlandita e hidroxiapatita, o MgO (6,09 %) e o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (3,66 %) na hidroxiapatita.

### 3.2.2 Agregados

Todos os agregados utilizados são provenientes da região de Patos de Minas – MG, sendo comercialmente fornecidos em sacos de rafia, em lotes com mesma data de embalagem. Foram utilizados como agregados miúdos, duas areias lavadas extraídas de rios, com diferentes módulos de finura, denominadas de  $Areia_{inf}$  MF=1,5 e  $Areia_{sup}$  MF= 3,4 e um agregado graúdo, proveniente da britagem de rocha calcária, denominado Brita<sub>9,5</sub>. A escolha destes agregados foi baseada na disponibilidade de materiais da região, para a construção de um esqueleto granular adequado à fabricação do CAA.

Os ensaios necessários foram realizados no Laboratório de Análise Tecnológica de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (LATEMC/UNIPAM). Antes da produção dos concretos os agregados foram levados à estufa para secagem, facilitando assim a repetição dos ensaios.

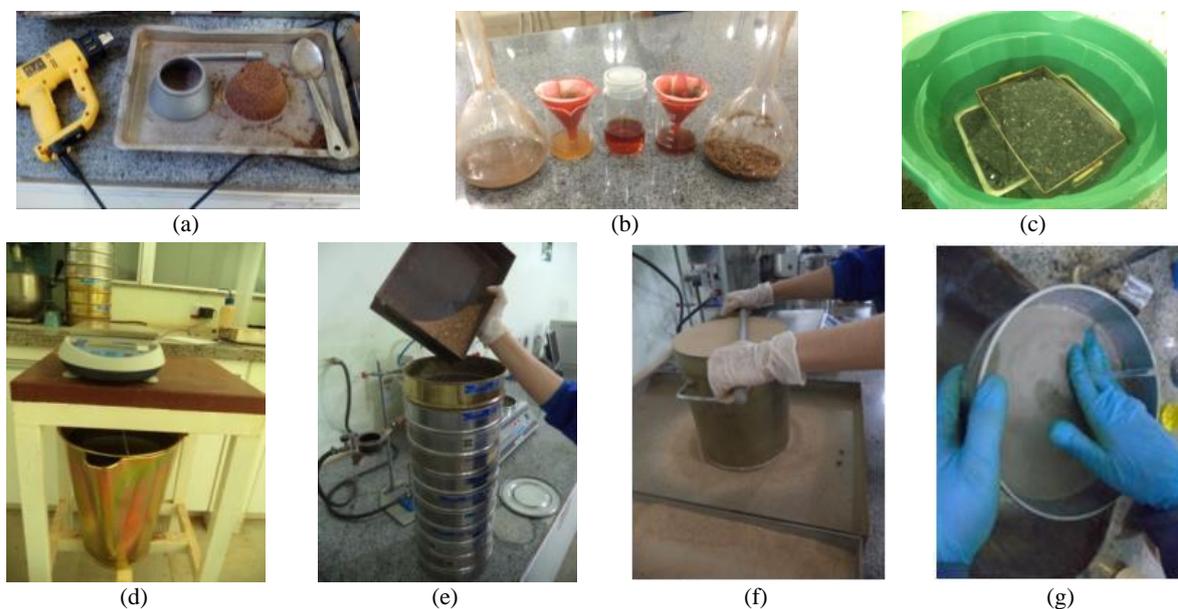
Na Tabela 13 são apresentados os resultados de caracterização dos agregados miúdos e do graúdo bem como as normas técnicas estabelecidas para cada ensaio.

Tabela 13– Ensaios para caracterização dos agregados.

Propriedade	Método de ensaio	Agregado miúdo		Agregado graúdo
		$Areia_{inf}$ MF=1,5	$Areia_{sup}$ MF= 3,4	Brita <sub>9,5</sub>
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (2009) NBR NM 53 (2009)	2640	2600	2740
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2006)	1634	1544	1523
Massa unitária no estado solto (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (2006)	1517	1468	1404
Material fino que passa na peneira 75 µm, por lavagem (%)	NBR NM 46 (2003)	2,14	2,17	1,85
Módulo de Finura	NBR NM 248 (2003)	1,5	3,4	5,7
Dimensão Máxima (mm)		0,6	4,8	9,5
Impurezas orgânicas (índice de cor em relação à solução padrão)	NBR NM 49 (2001)	+ clara	igual	-
Absorção (%)	NBR NM 30 (2001)	0,5	0,3	0,4

Na Figura 3-13 foram apresentadas algumas imagens dos ensaios realizados.

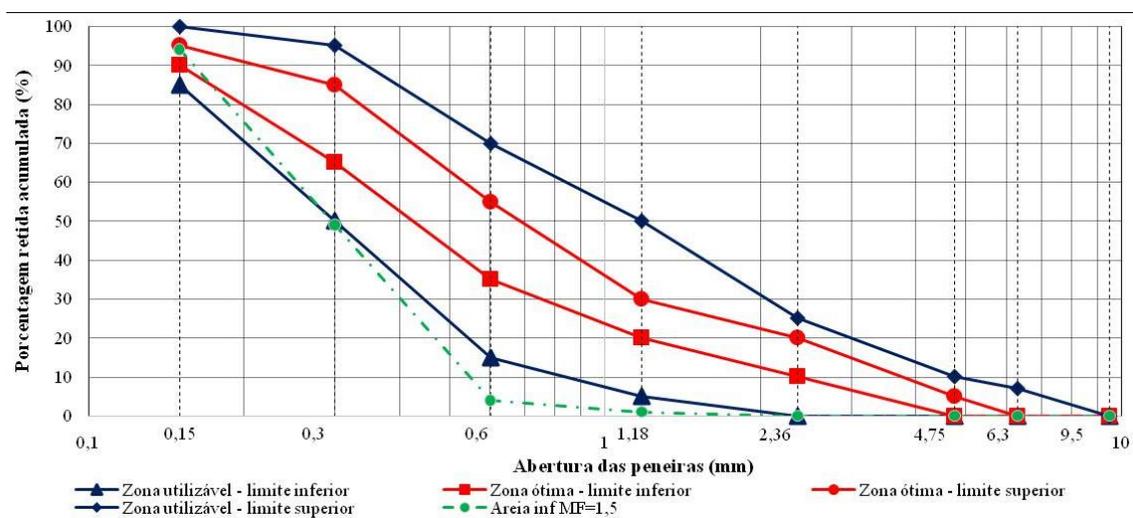
Figura 3-13– Ensaios para caracterização dos agregados em (a) massa específica areia<sub>sup</sub> MF= 3,4 (b) impurezas orgânicas, (c) e (d) massa específica brita<sub>9,5</sub>, (e) distribuição granulométrica da areia<sub>sup</sub> MF= 3,4, (f) massa unitária compactada areia<sub>inf</sub> MF=1,5, (g) material fino brita<sub>9,5</sub>.



Observa-se na Tabela 13 que os agregados miúdos e graúdo não excederam os limites máximos, de 5 % e 1 %, respectivamente, de massa de materiais pulverulentos, estabelecidos na ABNT NBR 7211 (2009).

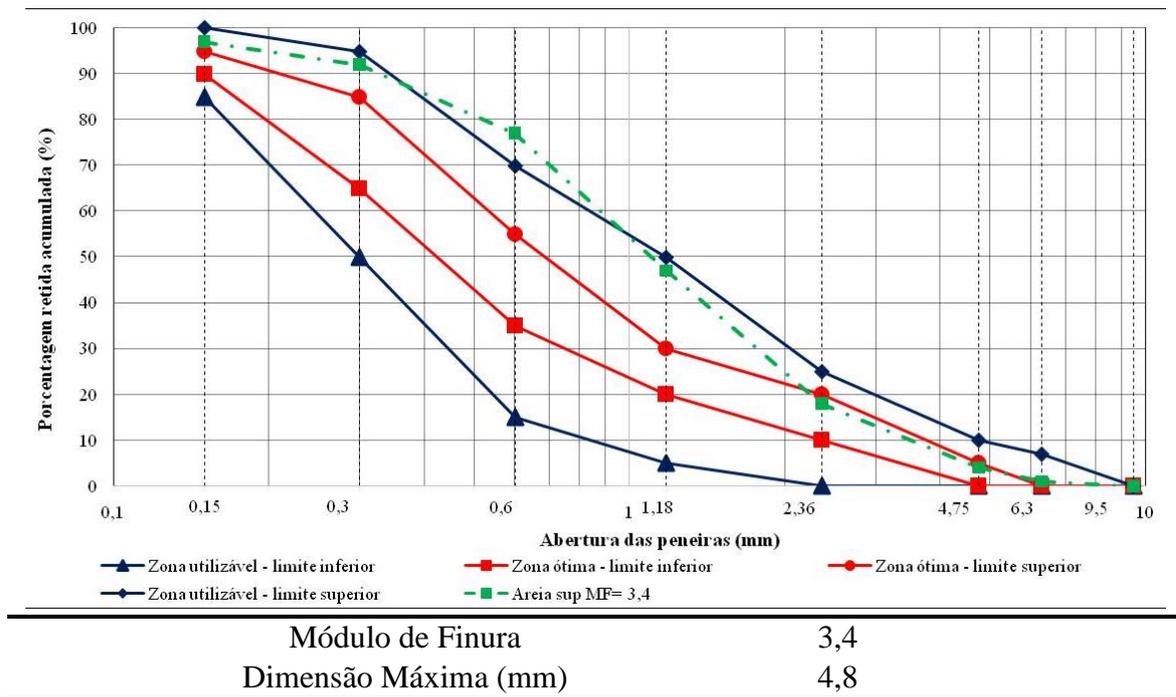
Na Figura 3-14 e Figura 3-15 são apresentadas as distribuições granulométricas obtidas para as amostras ensaiadas.

Figura 3-14– Distribuição granulométrica da areia<sub>inf</sub> MF=1,5.



Módulo de Finura	1,5
Dimensão Máxima (mm)	0,6

Figura 3-15– Distribuição granulométrica da areia<sub>sup</sub> MF= 3,4.

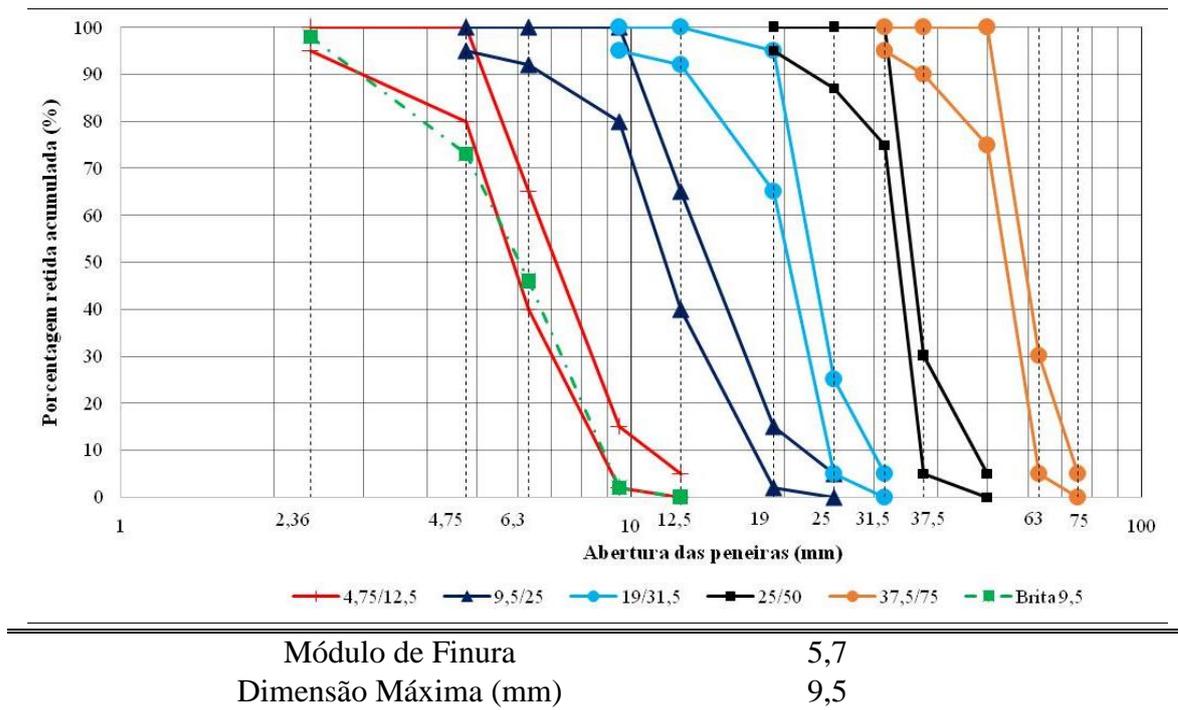


A ABNT NBR 7211 (2009) define as zonas de utilização dos agregados miúdos conforme o valor encontrado pelo módulo de finura. A partir do ensaio para análise da composição granulométrica dos agregados miúdos, obtiveram-se os módulos de finura de 1,5 e 3,4, para as areias, portanto, suas curvas granulométricas se encontram próximas da zona utilizável inferior e superior, segundo a norma, sendo denominadas neste trabalho como areia<sub>inf</sub> MF=1,5 e areia<sub>sup</sub> MF= 3,4, respectivamente.

Verificou-se que alguns pontos nas curvas das amostras se encontravam fora dos limites estabelecidos para as zonas utilizáveis, portanto foi realizado, em seguida, o empacotamento das duas areia<sub>inf</sub> MF=1,5 e areia<sub>sup</sub> MF= 3,4 de forma a determinar o esqueleto granular mais adequado.

Observa-se na Figura 3-16 que o agregado graúdo utilizado encontra-se parcialmente na zona granulométrica correspondente aos diâmetros 4,75/12,5 da ABNT NBR 7211 (2009).

Figura 3-16 - Distribuição granulométrica da brita<sub>9,5</sub>.



Sendo assim, o agregado graúdo foi denominado neste trabalho como brita<sub>9,5</sub>, devido à dimensão máxima de 9,5 mm, obtido através do peneiramento das amostras.

### 3.2.3 Cimento

Utilizou-se neste trabalho o cimento Portland composto com escória de alto-forno (CP II-E) com resistência à compressão mínima de 32 MPa, aos 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 11578 (1991). A escolha deste cimento se deve por ser um produto facilmente encontrado na região onde foi realizada a pesquisa e principalmente, devido em sua composição conter de 6 % a 34 % de escória de alto-forno. A escória de alto-forno é um resíduo gerado pelas siderúrgicas, utilizado em substituição parcial do clínquer na produção de cimento Portland, com capacidade de incrementar o desempenho do concreto e reduzir os danos ambientais.

Os ensaios necessários para a caracterização física e mecânica deste cimento estão apresentados na Tabela 14 e na Figura 3-17, sendo realizados no Laboratório de Análise Tecnológica de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (LATEMC/UNIPAM).

Tabela 14– Ensaio para caracterização física e mecânica do cimento CP II-E 32.

Propriedade		Método de ensaio	Limites NBR 11578 (1991)	Resultado
Tempos de início de pega (horas)		NBR NM 65 (2003)	$\geq 1$	3:19
Tempos de fim de pega (horas)			$\leq 10$	5:05
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		NBR NM 23 (2001)	-	3100
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	NBR 7215 (1996)	$\geq 10,0$	20,3
	7 dias		$\geq 20,0$	23,9
	28 dias		$\geq 32,0$	33,7
Expansibilidade de Le Chatelier (mm) - a quente		NBR 11582 (2016)	$\leq 5$	0
Superfície específica (Método de Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)		NBR 16372 (2015)	$\geq 2600$	3860

Figura 3-17– Alguns ensaios para caracterização do cimento em (a) tempos de início e fim de pega, (b) massa específica, (c) método de Blaine e (d) resistência à compressão.



(a)



(b)



(c)



(d)

A caracterização química deste cimento, disponibilizada pelo fabricante, foi apresentada na Tabela 15.

Tabela 15– Ensaio para caracterização química do cimento CP II-E 32.

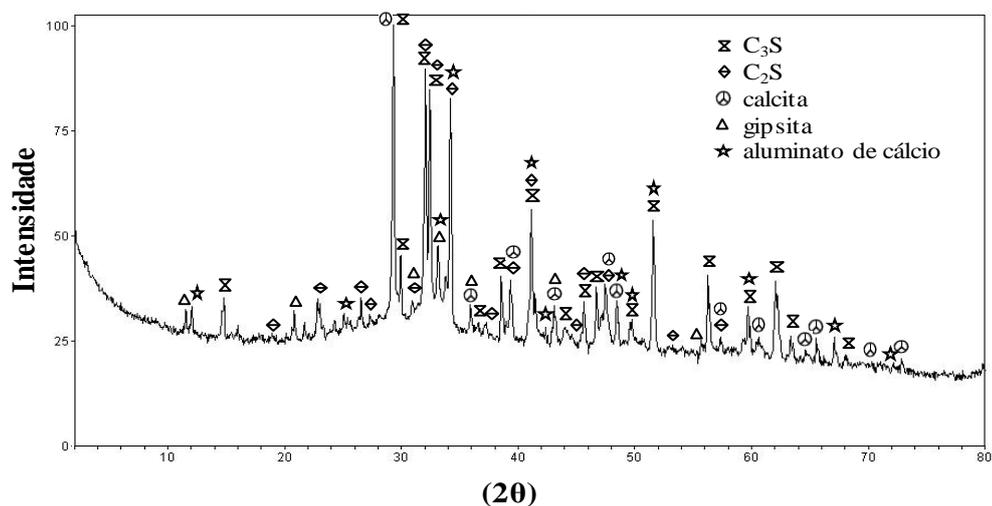
Propriedade	Método de ensaio	Limites NBR 11578 (1991)	Resultado
Resíduo Insolúvel (RI) (%)	NBR NM 22 (2012)	≤ 2,5	0,96
Perda ao Fogo (PF) (%)	NBR NM 18 (2012)	≤ 6,5	5,03
Óxido de Magnésio (MgO) (%)	NBR NM 11-2 (2012)	≤ 6,5	3,39
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)	NBR NM 16 (2012)	≤ 4,0	2,57
Óxido de Cálcio Livre – CaO (livre) (%)	NBR NM 13 (2012)	-	0,97

Fonte: CRH Brasil (2016).

Em todos os ensaios realizados os resultados encontrados demonstram conformidade com as exigências normativas.

A composição mineralógica foi identificada no difratômetro de raios-X, da marca Rigaku, modelo Última IV com radiação de cobre, localizado no Laboratório do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB). Na Figura 3-18 são identificadas as principais fases para o CP II-E 32.

Figura 3-18- Difratoograma de raios-X do CP II-E 32.



O cimento CP II-E 32 apresentou em sua análise mineralógica os seguintes compostos: o silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), também conhecido como alita, responsável pelo rápido endurecimento e elevado ganho de resistência mecânica do cimento; o silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S) ou belita, contribui significativamente na resistência mecânica do cimento em idades avançadas; o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) ou calcita e o aluminato de cálcio (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), também do clínquer

e o sulfato de cálcio hidratado ( $\text{CaSO}_4+2\text{H}_2\text{O}$ ) ou gipsita, adicionado no processo de fabricação do cimento para retardar o tempo de pega do clínquer. Ressalta-se a sobreposição de picos dificultando a identificação das demais fases cristalinas.

### 3.2.4 Aditivo

Neste trabalho foi utilizado um aditivo líquido a base de policarboxilato, classificado como superplastificante tipo II, de pega normal (SP II-N) de acordo com a ABNT NBR 11768 (2011). A caracterização físico-química do aditivo foi disponibilizada pelo fabricante, Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades do aditivo superplastificante.

Aditivo superplastificante	ADVA®CAST 525 - GCP Applied Technologies
Base química	Aditivo dispersante base policarboxilato
Dosagem recomendada (%)	0,4 a 1,2
Aparência	Líquido alaranjado
Peso específico à 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,040 – 1,060
pH à 25°C	3,00 – 5,50
Teor de sólidos (%)	28,97 – 32,02
Cloretos (%)	0,050

Fonte: Grace (2016).

Este aditivo possui capacidade de redução de água com aumento da fluidez e coesão do concreto sendo fornecido pelo fabricante de forma gratuita. A dosagem do aditivo foi obtida experimentalmente através da mistura de CAA-SF e fixada em 1,2 % para os demais tipos de concreto, assim foi possível a comparação de todas as misturas de concretos quanto aos limites normativos para autoadensabilidade.

### 3.2.5 Água

Foi utilizada água de amassamento fornecida pela companhia de abastecimento de água da região, não contendo impurezas visíveis.

## 3.3 ESQUELETO GRANULAR

A proporção dos agregados utilizados na dosagem dos concretos foi determinada experimentalmente, no Laboratório de Análise Tecnológica de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (LATEMC/UNIPAM). Utilizando a ABNT NBR NM 45 (2006) foram encontradas a massa unitária no estado compactado, das misturas dos agregados graúdos e miúdos em diferentes proporções.

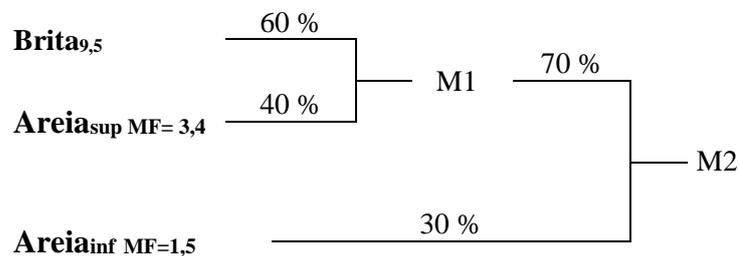
Foram determinadas as massas unitárias primeiramente de cada material individual, e após, das misturas: (M1) composta por brita<sub>9,5</sub> + areia<sub>sup MF= 3,4</sub> e (M2) composta pela M1 + areia<sub>inf MF=1,5</sub>. As massas unitárias das misturas foram encontradas empacotando os materiais em porcentagens de 0 % a 100 %, decrescendo de 10 em 10 %, conforme Tabela 17, foi determinado também a massa específica e o índice de vazios de cada mistura.

Tabela 17– Ensaio para determinação da massa unitária das misturas M1 e M2.

Mistura (M1)			Mistura (M2)		
Brita <sub>9,5</sub> (%)	Areia <sub>sup MF= 3,4</sub> (%)	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	M1 (%)	Areia <sub>inf MF=1,5</sub> (%)	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )
100	0	1523	100	0	1731
90	10	1566	90	10	1811
80	20	1652	80	20	1874
70	30	1689	70	30	1934
60	40	1731	60	40	1928
50	50	1715	50	50	1910
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		M1 = 2684	M2 = 2671		
Índice de vazios (%)		M1 = 35,5	M2 = 27,6		

A partir do empacotamento dos materiais (brita<sub>9,5</sub> + areia<sub>sup MF= 3,4</sub>) obteve-se a proporção referente a maior massa unitária da mistura M1 (60-40 %). Com a adição da areia<sub>inf MF=1,5</sub> à mistura M1 obteve-se a maior massa unitária da mistura M2, na proporção 70-30 %, definindo assim o esqueleto granular ideal com o menor índice de vazios para estes materiais, demonstrado na Figura 3-19.

Figura 3-19- Composição do esqueleto granular.



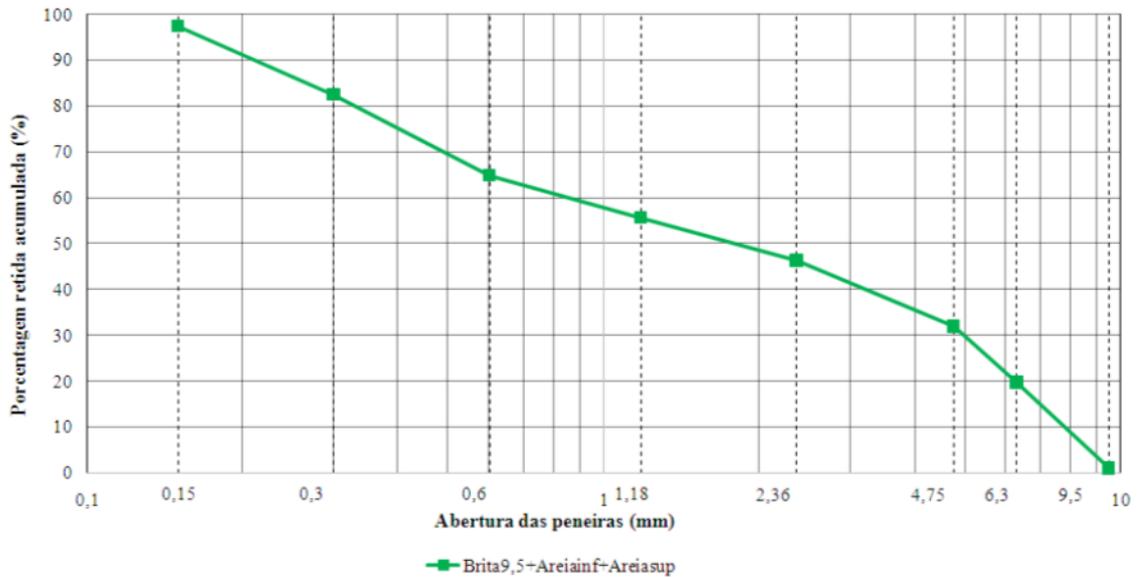
Com isso foi possível definir as proporções dos agregados utilizando a Equação 1.

$$0,7 \times (0,6 B_{9,5} + 0,4 A_{sup}) + 0,3 A_{inf} \quad (1)$$

Sendo: **Areia**<sub>inf MF=1,5</sub> = 30 %      **Areia**<sub>sup MF= 3,4</sub> = 28 %      **Brita**<sub>9,5</sub> = 42 %

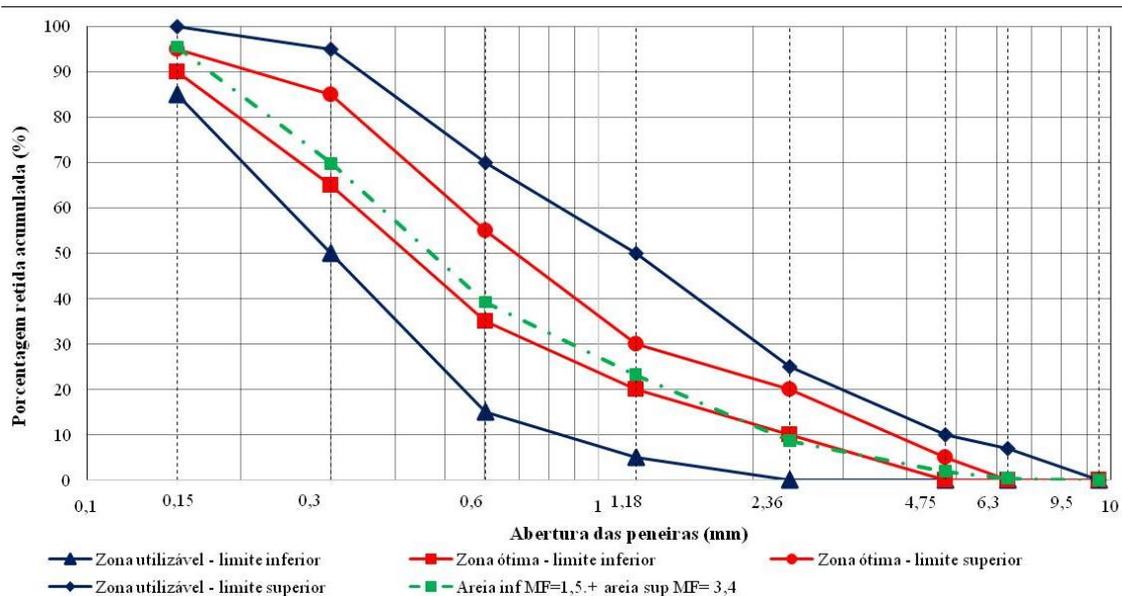
Nas Figura 3-20 e Figura 3-21 foram representadas, respectivamente, as distribuições granulométricas dos esqueletos granulares formados pelo empacotamento de todos os agregados (brita<sub>9,5+</sub> areia<sub>inf MF=1,5</sub>+ areia<sub>sup MF= 3,4</sub>) e somente das areias (areia<sub>inf MF=1,5</sub>+ areia<sub>sup MF= 3,4</sub>).

Figura 3-20– Distribuição granulométrica da brita<sub>9,5+</sub> areia<sub>inf MF=1,5</sub>+ areia<sub>sup MF= 3,4</sub>.



Módulo de Finura	4,0
Dimensão Máxima (mm)	9,5

Figura 3-21– Distribuição granulométrica da areia<sub>inf MF=1,5</sub> + areia<sub>sup MF= 3,4</sub>.



Módulo de Finura	2,4
Dimensão Máxima (mm)	4,8

A curva de distribuição granulométrica do esqueleto granular formado pelo empacotamento da areia<sub>inf MF=1,5</sub> e areia<sub>sup MF= 3,4</sub> demonstra que os pontos da amostra encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211 (2009), para as zonas ótimas, com apenas um ponto próximo da zona utilizável inferior. Logo, é possível verificar a importância do empacotamento, tanto para diminuir a quantidade de vazios, quanto para determinar uma adequada distribuição granulométrica dos agregados.

### 3.4 DOSAGEM DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS

Para o início da dosagem do CAA foi fixado o consumo de cimento + adição mineral no valor de 475 kg/m<sup>3</sup>, conforme parâmetros do ACI 237R-07 (2007), o qual recomenda o intervalo de 386 kg/m<sup>3</sup> a 475 kg/m<sup>3</sup> para o consumo destes materiais, Tabela 2. A escolha pelo maior valor do intervalo de consumo de cimento + adição do ACI 237R-07 (2007) se justifica pelo atendimento aos requisitos da ABNT NBR 12655 (2015), quando for realizadas as substituições de cimento por adições, a qual define o consumo mínimo de cimento em 280 kg/m<sup>3</sup> para a classe de agressividade II, ou seja, para ambientes urbanos, sendo uma premissa do estudo.

Na produção do CAA, sem adição mineral, o consumo de cimento foi fixado em 475 kg/m<sup>3</sup>. Nos demais concretos, a substituição do cimento por adição, nas porcentagens de 10 %, 20 %, 30 % e 40 %, foi calculada em relação ao consumo de cimento. Sendo assim, na produção do CAA com o teor máximo de substituição, 40 % de adição mineral, o consumo de cimento atingiu o valor de 339 kg/m<sup>3</sup>, respeitando os parâmetros estabelecidos pela norma ABNT NBR 12655 (2015). As relações de agregados/cimento (m) e água/cimento (a/c), bem como, o teor de aditivo superplastificante, foram obtidos experimentalmente, após a produção de diversas misturas de concretos tentando adotar os parâmetros do ACI 237R-07 (2007) e os critérios de autoadensabilidade, exigidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010).

Uma sequência de etapas para dosagem do CAA pode ser verificada no ACI 237R-07 (2007). Estas etapas apresentam a combinação adequada de materiais, para produção de concretos autoadensáveis com as características requeridas, tais como habilidade passante e estabilidade. São recomendados os valores limites para as proporções de agregados, a fração ideal de pasta de cimento+finos e de argamassa, a relação água/cimento+finos e o consumo de cimento+, verificados na Tabela 2.

Neste trabalho adotou-se, inicialmente, a norma do ACI 237R-07 (2007) como base para os cálculos da dosagem, porém, alguns limites estabelecidos pela norma não puderam ser

respeitados, devido às características físicas dos agregados disponíveis na região, ou seja, o volume absoluto de agregado graúdo e a fração de argamassa, assim o valor de  $m$  mais adequado para atingir os critérios de autoadensabilidade da ABNT NBR 15823-1 (2010), foi adotado em 3,6. Na Tabela 18 são apresentados os limites adotados para dosagem do CAA. Os valores adotados para a relação água/(cimento+finos) foi 0,39 e para o teor de ar no concreto igual a 2%.

Tabela 18 - Parâmetros e limites para dosagem de CAA - ACI 237R-07.

Parâmetros	Limites ACI 237R-07	Misturas de CAA				
		SF	10 %	20 %	30 %	40 %
Volume absoluto de agregado graúdo (%)	28 a 32	26	26	26	26	26
Fração de pasta (sobre o volume) (%)	34 a 40	36	36	36	36	36
Fração de argamassa (sobre o volume) (%)	68 a 72	74	74	74	74	74
Relação a/(c+f)	0,32 a 0,45	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Consumo de cimento + finos (kg/m <sup>3</sup> )	386 a 475	475	475	475	475	475
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Não se aplica	475	432	396	365	339

Fonte: Adaptado do ACI 237R-07 (2007).

Verifica-se na Tabela 18, uma diminuição da porcentagem de agregados graúdos nas misturas de CAA produzidas, em relação aos limites da norma. Isso ocorreu devido ao empacotamento dos agregados disponíveis para a pesquisa, sendo necessário o acréscimo de agregados miúdos no esqueleto granular para diminuir o índice de vazios entre os materiais. Com o aumento de agregados miúdos, conseqüentemente, a fração de argamassa extrapolou o limite recomendado pela norma.

A partir das proporções do esqueleto granular dos agregados, calculadas através da Equação 1 e os valores encontrados experimentalmente para  $m$ ,  $a/(c+f)$  e teor de ar aprisionado ao concreto, definiu-se o traço da mistura CAA-SF, Tabela 19. Com este traço (T) e a massa específica ( $\rho$ ) de cada material, determinaram-se os consumos de materiais para a dosagem de 1000 dm<sup>3</sup> de CAA através da Equação 2 e demonstrados na Tabela 19.

$$\text{Consumo de cimento} = \frac{1000 - \text{teor de ar aprisionado}}{\left(\frac{T_{\text{Cimento}}}{\rho_{\text{Cimento}}} + \frac{T_{\text{Ainf}}}{\rho_{\text{Ainf}}} + \frac{T_{\text{Asup}}}{\rho_{\text{Asup}}} + \frac{T_{\text{B}_{9,5}}}{\rho_{\text{B}_{9,5}}} + \frac{T_{\text{Água}}}{\rho_{\text{Água}}}\right)} \quad (2)$$

Tabela 19– Cálculo do traço e consumos de materiais do CAA-SF.

Dados	Cimento	Areia <sub>inf</sub> MF=1,5	Areia <sub>sup</sub> MF= 3,4	Brita <sub>9,5</sub>	Água	Ar
Traço em massa	1,00	1,07	1,03	1,50	0,39	0,02
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,10	2,64	2,60	2,74	1,00	-
Consumo (kg) por 1000 dm <sup>3</sup>	475,00	505,67	487,63	719,07	185,25	-
Volume de material para 1000 dm <sup>3</sup>	153,23	191,54	187,55	262,43	185,25	20,00

O teor de aditivo superplastificante foi definido em 1,2 % em relação à massa de cimento, para todos os traços. Este valor foi adotado em função dos ensaios no estado fresco do CAA-SF, garantindo o espalhamento, a viscosidade, a habilidade passante e a resistência à segregação do CAA conforme a ABNT NBR 15823-1 (2010).

Na Tabela 20 são apresentados os consumos, em massa, das misturas de CAA para cada tipo de adição, pequenas variações nos valores são causadas pelas diferentes massas específicas de cada adição.

Tabela 20- Consumos das misturas de CAA, em massa.

Concreto tipo	Teor de adição (%)	Consumo em massa (kg/m <sup>3</sup> )						
		Adição	Cimento	Areia <sub>inf</sub> MF=1,5	Areia <sub>sup</sub> MF= 3,4	Brita <sub>9,5</sub>	Água	Aditivo
CAA-SF	0	0	475	506	488	719	185	5,7
CAA-FI	10	43	432	504	486	717	185	5,2
	20	79	396	503	485	715	18	4,8
	30	110	365	502	484	714	185	4,4
	40	136	339	501	483	713	185	4,1
CAA-RM	10	43	432	504	486	717	185	5,2
	20	79	396	503	485	716	185	4,8
	30	110	365	502	485	715	185	4,4
	40	136	339	502	484	713	185	4,1
CAA-FO	10	43	432	505	487	718	185	5,2
	20	79	396	505	487	718	185	4,8
	30	110	365	504	486	717	185	4,4
	40	136	339	504	486	717	185	4,1
CAA-ES	10	43	432	503	485	715	185	5,2
	20	79	396	501	483	712	185	4,8
	30	110	365	499	481	710	185	4,4
	40	136	339	498	482	708	185	4,1
CAA-CE	10	43	432	505	487	718	185	5,2
	20	79	396	504	486	717	185	4,8
	30	110	365	504	486	716	185	4,4
	40	136	339	503	485	715	185	4,1

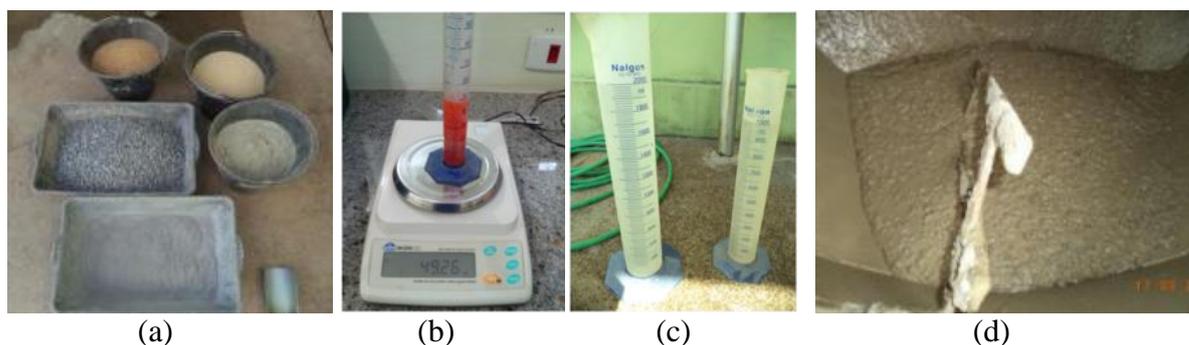
### 3.4.1 Produção dos concretos

As misturas de concretos autoadensáveis foram produzidas no Laboratório de Análise Tecnológica de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (LATEMC/UNIPAM), durante o segundo semestre de 2016.

Para a produção dos concretos, todos os materiais foram previamente secos em estufa, e resfriados na condição ambiente e armazenados. Todos os materiais foram pesados e imediatamente colocados na betoneira, obedecendo sempre a mesma sequência. O local onde foi produzido o concreto não possui climatização, portanto as misturas foram realizadas preferencialmente em horários mais frescos, como início da manhã e final da tarde, com temperaturas variando de 25 °C a 26 °C.

A sequência de execução do concreto pode ser observada na Figura 3-22.

Figura 3-22– Sequência da dosagem do CAA, em (a) materiais utilizados, (b) aditivo superplastificante, (c) dosagem da água (d) mistura do concreto.



Logo após o término da mistura iniciaram-se os ensaios para determinação das propriedades no estado fresco do CAA e moldagem de corpos de prova para os ensaios do CAA no estado endurecido.

## 3.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

Os ensaios realizados no estado fresco são necessários para determinação teor de ar aprisionado e das propriedades de autoadensabilidade, classificação, controle e aceitação do CAA em conformidade com os parâmetros estabelecidos na ABNT NBR 15823-1 (2010).

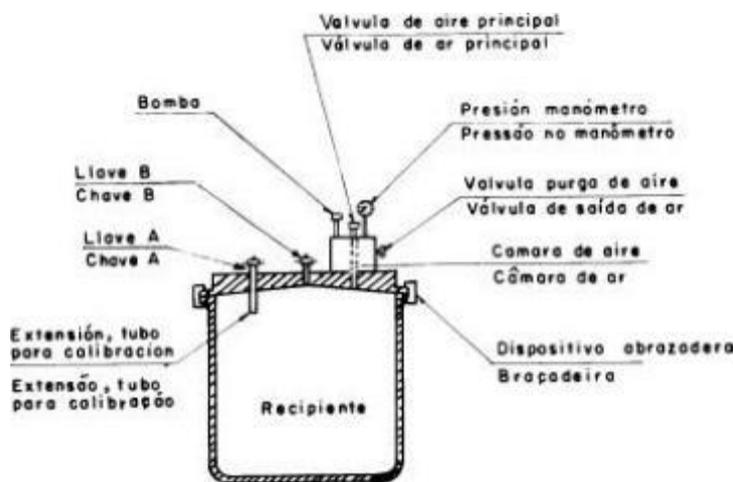
### 3.5.1 Determinação do teor de ar

Conforme a ABNT NBR NM 47 (2002), o teor de ar é o volume de ar aprisionado ou incorporado ao concreto, expresso em porcentagem do volume total de concreto fresco

adensado, e pode ser medido pelo Método Pressométrico. Este método determina o teor de ar aprisionado ou incorporado no concreto fresco, através da mudança do volume do concreto devido a uma alteração na pressão.

O equipamento utilizado é denominado pela norma como medidor tipo B, representado na Figura 3-23. Segundo a ABNT NBR NM 47 (2002), o princípio operacional deste medidor consiste em igualar as pressões de um volume de ar conhecido, a uma pressão conhecida, em uma câmara estanque, com um volume de ar desconhecido na amostra de concreto. A leitura do teor de ar aparente da amostra ( $A_1$ ) é feita diretamente no mostrador do manômetro, em porcentagem de ar existente no material para a pressão final observada.

Figura 3-23 - Medidor tipo B para definição do teor de ar incorporado no concreto no estado fresco.

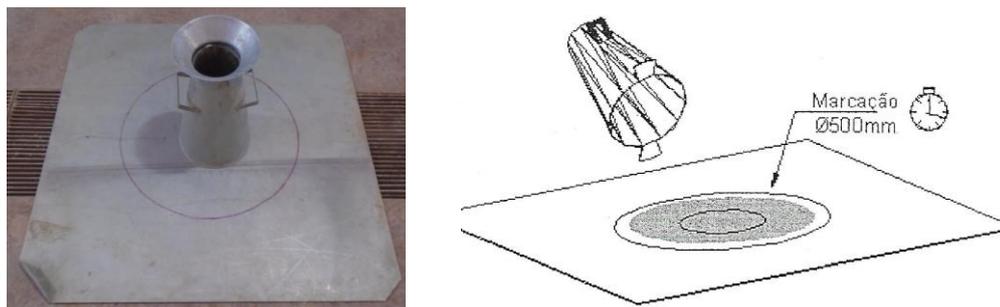


Fonte: (ABNT NBR NM 47, 2002, p.14)

### 3.5.2 Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento

A fluidez e a habilidade de preenchimento do CAA em fluxo livre, sob a ação do peso próprio é determinada utilizando-se o cone de Abrams, verificado na Figura 3-24, conforme a ABNT NBR 15823-2 (2010).

Figura 3-24– Molde e placa de base.



Fonte: (ABNT NBR 15823-2, 2010, p.2)

Registra-se o intervalo de tempo de espalhamento do CAA, desde o momento em que se inicia o espalhamento até o CAA atingir a marca de 500 mm na placa base. Após foi realizada a medida do espalhamento (*slump flow*), obtida pela média de duas distâncias perpendiculares do diâmetro de espalhamento, classificando o CAA conforme a Tabela 3 e na Tabela 5.

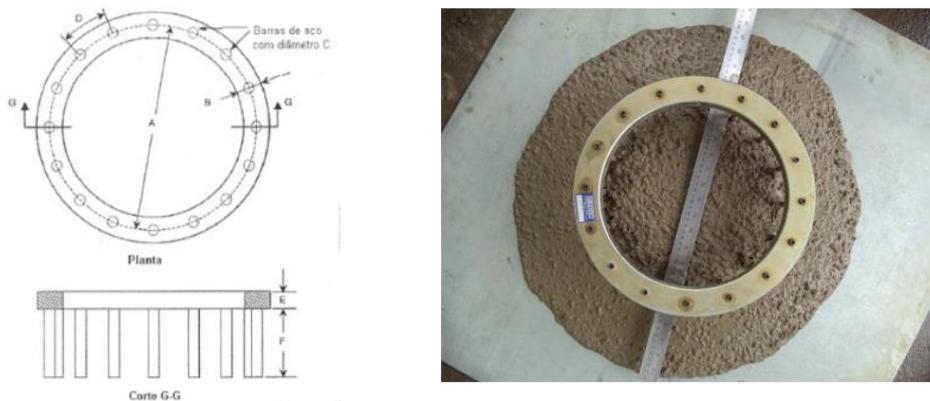
### 3.5.3 Determinação do índice de estabilidade visual

No Projeto 18:300.03-001/2 de revisão da ABNT NBR 15823-2 (2010), apresentado por Barbosa (2016), há uma proposta, com acréscimo do ensaio de índice de estabilidade visual (IEV) do concreto, o resultado é determinado visualmente imediatamente após o término do ensaio de espalhamento. Observa-se a distribuição da fração da argamassa ao longo do perímetro do CAA espalhado na placa base e a ocorrência de exsudação. Os critérios para avaliação qualitativa da estabilidade visual estão representados na Figura 2-1 e as classes de IEV na Tabela 4.

### 3.5.4 Determinação da habilidade passante

A capacidade do concreto fresco fluir sem perder sua uniformidade ou causar bloqueio, através de espaços confinados e descontinuidades geométricas, pode ser quantificada através de uma combinação do ensaio de espalhamento com o ensaio do anel J, conforme a ABNT NBR 15823-3 (2010), demonstrado na Figura 3-25, ou através do ensaio da caixa L, previsto na ABNT NBR 15823-4 (2010), demonstrado na Figura 3-26.

Figura 3-25 - Ensaio de espalhamento com o anel J.

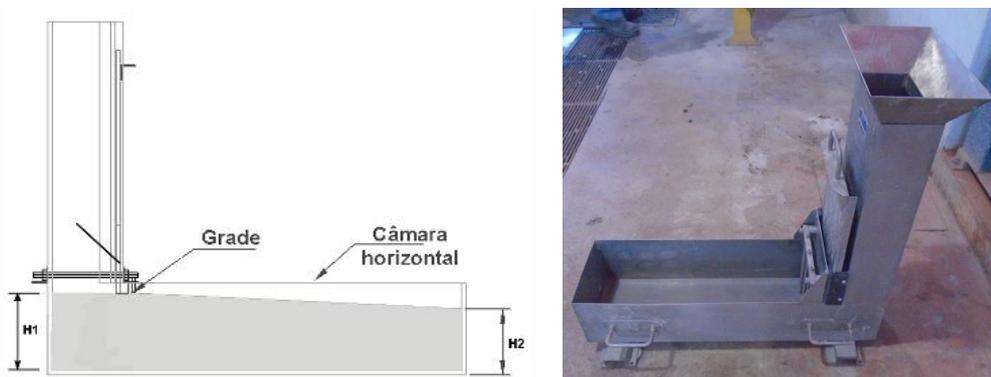


Fonte: (ABNT NBR 15823-3, 2010, p.2)

O resultado do ensaio do anel J consiste na diferença entre as determinações dos diâmetros médios de espalhamento do concreto sobre a placa de base, com o anel J e somente com o cone de Abrams no ensaio de espalhamento, conforme previsto na ABNT NBR 15823-2 (2010). A partir dos resultados observa-se a obstrução à passagem do concreto pelas barras do anel J e classifica o CAA de acordo com a Tabela 7.

No ensaio da caixa L, descrito pela ABNT NBR 15823-4 (2010), primeiramente deve-se preencher a câmara superior da caixa com CAA e após, é realizada a abertura da comporta de forma rápida, uniforme e sem interrupção, para que o concreto escoe para a câmara horizontal. Cessado o escoamento mede-se as alturas H1 e H2, conforme Figura 3-26, e calcula-se a habilidade passante do concreto (HP) utilizando a Equação 3, após classifica-se o CAA de acordo com a Tabela 8.

Figura 3-26- Caixa L e indicação das alturas H1 e H2.



Fonte: (ABNT NBR 15823-4, 2010, p. 4)

$$HP = \frac{H2}{H1} \quad (3)$$

### 3.5.5 Determinação da viscosidade aparente

Determina-se a viscosidade pela medida do  $t_{500}$ , durante o ensaio de espalhamento, prescrito na ABNT NBR 15823-2 (2010), ou pelo ensaio do funil V, conforme a ABNT NBR 15823-5 (2010), medindo o tempo de escoamento do CAA, através do estreitamento de uma seção, apenas por seu peso próprio, conforme Figura 3-27. A classificação do CAA é realizada de acordo com a Tabela 6.

Figura 3-27- Execução do ensaio do Funil V.



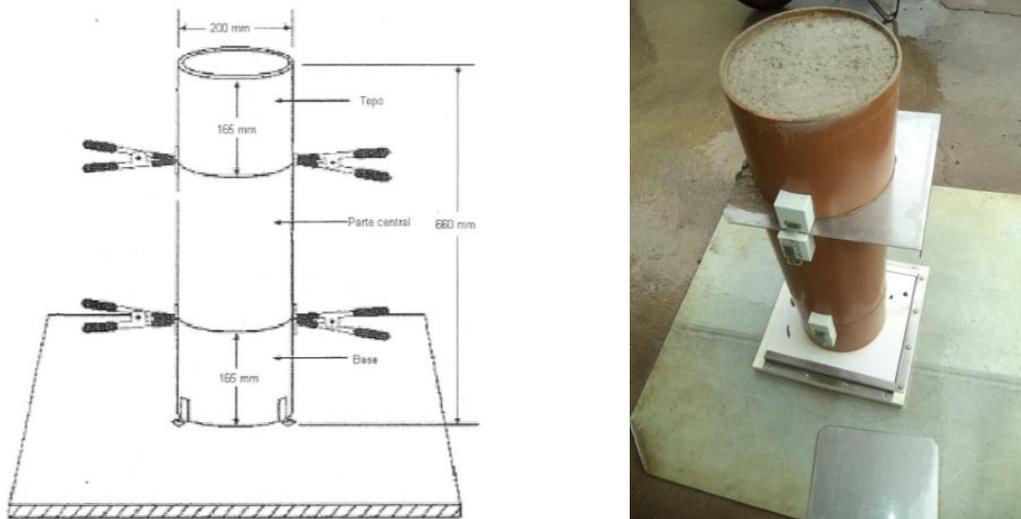
Fonte: (ABNT NBR 15823-5, 2010, p.3)

De acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2010) “o CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido escoamento, porém de curta duração, já o CAA com alta viscosidade pode continuar a se mover de forma lenta e progressiva por um tempo mais prolongado.”

### 3.5.6 Determinação da resistência à segregação

A resistência à segregação dinâmica (durante o lançamento) e a segregação estática (após o lançamento), pode ser mensurada em um CAA conforme ABNT NBR 15823-6 (2010), utilizando um tubo de PVC seccionado em três partes, presas por presilhas de fixação, conforme Figura 3-28, sua determinação é fundamental para homogeneidade e a qualidade do CAA.

Figura 3-28– Coluna utilizada para o ensaio de segregação do CAA.



Fonte: (ABNT NBR 15823-6, 2010, p.2)

O resultado da resistência à segregação do concreto é determinado pela Equação 4 e a sua classificação é realizada conforme a Tabela 9.

$$SR = \frac{2 \times (m_B - m_T)}{m_B + m_T} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

SR é a resistência à segregação do concreto, expressa em porcentagem (%);

$m_B$  é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada da base da coluna, expressa em gramas (g);

$m_T$  é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna, expressa em gramas (g).

De acordo com a ABNT NBR 15823-6 (2010) caso  $m_T$  seja maior ou igual a  $m_B$ , a segregação é considerada nula ou zero.

### 3.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

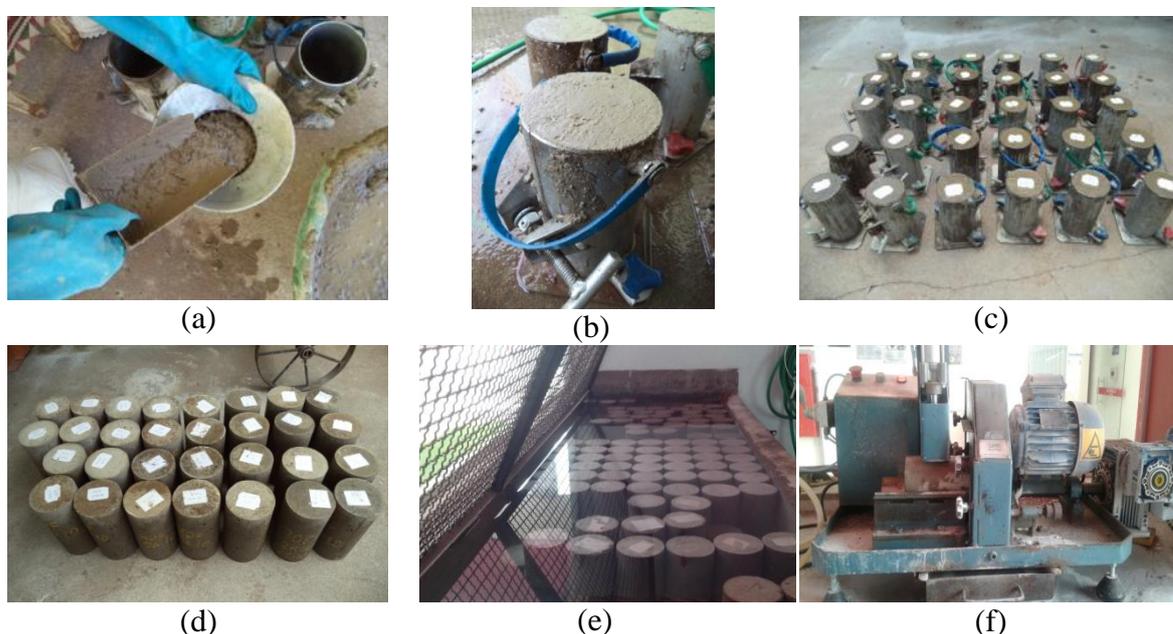
Para realização dos ensaios do CAA no estado endurecido foram moldados corpos de prova cilíndricos, com dimensões 100 mm x 200 mm. O concreto foi lançado no molde de uma única vez, sem adensamento e feito o rasamento da superfície com a borda do molde utilizando uma colher de pedreiro conforme a ABNT NBR 5738 (2015). Após 24 horas da moldagem, os

corpos de prova foram retirados dos moldes identificados e colocados em um tanque com água para realização da cura.

Nas datas determinadas para realização dos ensaios no estado endurecido, os corpos de prova foram retirados do tanque e sua superfície foi retificada mecanicamente proporcionando uma superfície lisa, plana e perpendicular ao eixo do corpo de prova.

A Figura 3-29 mostra a sequência do procedimento de moldagem, cura e preparação da superfície dos corpos de prova de CAA.

Figura 3-29 – Corpos de prova, moldagem em (a, b, c, d), cura em (e), preparação da superfície em (f).



No estado endurecido foram analisadas as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade à compressão. O objetivo destes ensaios foi observar a evolução das propriedades em relação ao tempo de cura, e os efeitos benéficos ou não causados pela redução do consumo de cimento e aumento dos teores de adições em cada traço do CAA. A Tabela 21 apresenta a programação dos ensaios para determinação das propriedades com suas respectivas idades.

Os ensaios foram realizado no Laboratório de Análise Tecnológica de Materiais de Construção do Centro Universitário de Patos de Minas (LATEMC/UNIPAM) utilizando uma prensa hidráulica de acionamento elétrico para ensaios em concreto, modelo DL20000, com capacidade máxima de 2000 kN, calibrada em 19/07/2016. O software utilizado durante o ensaio é o TESC versão 3.04.

Tabela 21 - Programação dos ensaios no estado endurecido.

Tipo de adição	Nomenclatura do corpo de prova	Teor de adição (%)	Propriedade / Método de ensaio / Idade				
			Resistência à compressão			Resistência à tração por compressão diametral	Módulo de elasticidade
			NBR 5739 (2007)			NBR 7222 (2011)	NBR 8522 (2008)
			3	7	28	28	28
Sem adição	CAA-SF-0	0	Confecção de no mínimo 2 corpos de prova (100 x 200 mm) por tipo de CAA e idade.				
Fíler calcário	CAA-FI-10	10					
	CAA-FI-20	20					
	CAA-FI-30	30					
	CAA-FI-40	40					
Resíduo de marmoraria	CAA-RM-10	10					
	CAA-RM-20	20					
	CAA-RM-30	30					
	CAA-RM-40	40					
Rocha fosfática	CAA-FO-10	10					
	CAA-FO-20	20					
	CAA-FO-30	30					
	CAA-FO-40	40					
Estéril de fosfato	CAA-ES-10	10					
	CAA-ES-20	20					
	CAA-ES-30	30					
	CAA-ES-40	40					
Cinza de eucalipto	CAA-CE-10	10					
	CAA-CE-20	20					
	CAA-CE-30	30					
	CAA-CE-40	40					

### 3.6.1 Resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos

O ensaio foi realizado conforme descrito pela ABNT NBR 5739 (2007), para determinação da resistência à compressão de corpos de prova de CAA com dimensões, 100 mm x 200 mm, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Após cura e preparo da superfície, foram coletadas as dimensões (altura e diâmetro) dos corpos de prova utilizando um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm. Posteriormente foi posicionado na máquina devidamente centralizado no prato inferior e deu início à aplicação do carregamento, contínuo, com a velocidade de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s até a ruptura do corpo de prova, conforme Figura 3-30.

Figura 3-30– Ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova.



Os resultados das resistências à compressão foram calculados pelo programa TESC versão 3.04 utilizando a Equação 5, e expressos através de tabelas e gráficos.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad (5)$$

Onde

$f_c$  é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);

$F$  é a força máxima alcançada, em newtons (N);

$D$  é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

### 3.6.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova de CAA cilíndricos, com dimensões de 100 mm x 200 mm, foi determinada aos 28 dias. Conforme a ABNT NBR 7222 (2011) antes do ensaio foram medidos com um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm, os diâmetros e altura do corpo de prova e traçado em cada extremidade uma linha reta diametral. Após o corpo de prova foi posicionado na máquina de forma que o plano axial, definido por geratrizes diametralmente opostas, coincidissem com eixo de aplicação de carga. A carga foi aplicada continuamente a uma velocidade de  $(0,05 \pm 0,02)$  MPa/s até a ruptura do corpo de prova. A Figura 3-31 apresenta a execução do ensaio e o formato de rompimento do corpo de prova.

Figura 3-31– Ensaio de resistência à tração dos corpos de prova.



Os resultados das resistências à tração por compressão diametral em corpos de prova de CAA cilíndricos foram calculados pelo programa TESC versão 3.04 utilizando a Equação 6, e expressos através de tabelas e gráficos.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times \ell} \quad (6)$$

Onde

$f_{ct,sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral, em megapascals (MPa);

$F$  é a força máxima obtida no ensaio, em newtons (N);

$d$  é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm);

$\ell$  é o comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm).

### 3.6.3 Módulo de elasticidade à compressão

O ensaio de módulo de elasticidade à compressão foi realizado conforme ABNT NBR 8522 (2008), aos 28 dias, em corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm. Os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas com um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm. Primeiramente foi realizado o ensaio de resistência à compressão do concreto em dois corpos de prova similares, provenientes da mesma betonada para determinação do módulo de deformação.

Após, para determinar o módulo de elasticidade foram ensaiados três corpos de prova, sendo aplicados carregamentos e descarregamentos de carga numa velocidade de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s,

conduzidos conforme a Metodologia A – Tensão  $\sigma$  fixa, descrita na norma ABNT NBR 8522 (2008), conforme Figura 3-32. As deformações foram medidas através do extensômetro eletrônico, com sensores independentes para medição em cada lado do corpo de prova e caixa de equalização para obtenção do sinal de deformação média, com resolução de 0,0001 mm, calibrado em 19/07/2016.

Os resultados foram calculados através do programa TESC versão 3.04 utilizando a Equação 7, e expressos através de tabelas e gráficos.

Figura 3-32– Ensaio de módulo elástico de elasticidade dos corpos de prova de CAA.



$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^{-3} \quad (7)$$

Onde

$E_{ci}$  é o módulo de elasticidade, em gigapascals (GPa);

$\sigma_b$  é a tensão maior, em megapascals; ( $\sigma_b = 0,3 f_c$ ) ou outra tensão especificada em projeto;

0,5 é a tensão básica, expressa em megapascals (MPa);

$\varepsilon_b$  é a deformação específica média, ( $\varepsilon = \Delta L/L$ ), dos corpos de prova sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

#### 3.6.4 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Após o ensaio de tração por compressão diametral, os corpos de prova de CAA rompidos foram utilizados para determinação das massas específicas da amostra seca ( $\rho_s$ ), da amostra saturada

( $\rho_{\text{sat}}$ ) e a massa específica real ( $\rho_r$ ), da absorção de água e do índice de vazios, conforme a ABNT NBR 9778 (2005).

O ensaio consiste basicamente em determinar e registrar as massas da amostra nas condições seca em estufa ( $M_s$ ), imersa em água na balança hidrostática ( $M_i$ ) e após a secagem da superfície com um pano úmido ( $M_{\text{sat}}$ ), conforme Figura 3-33.

Figura 3-33– Ensaio para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica do CAA.



Os cálculos para determinação da absorção, índice de vazios, massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ), massa específica da amostra saturada ( $\rho_{\text{sat}}$ ) e massa específica real ( $\rho_r$ ) serão realizados segundo a ABNT NBR 9778 (2005) e os resultados apresentados tabelados.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados determinados experimentalmente nos ensaios previstos na metodologia. Foram analisados os efeitos nas propriedades dos concretos, no estado fresco e no estado endurecido, produzidos com diferentes tipos de adições e porcentagens de substituição, em relação à massa de cimento.

### 4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

São verificadas neste item as análises dos resultados e a classificação das propriedades dos concretos no estado fresco quanto: ao espalhamento e tempo de escoamento, ABNT NBR 15823-2 (2010); ao índice de estabilidade visual, previsto no projeto 18:300.03-001/2 de revisão da ABNT NBR 15823-2 (2010), apresentado por Barbosa (2016); à habilidade passante utilizando o ensaio do Anel-J e o ensaio da caixa L, ABNT NBR 15823-3 (2010) e ABNT NBR 15823-4 (2010) respectivamente; à viscosidade aparente medida no  $t_{500}$ , durante o ensaio de espalhamento e no funil V, ABNT NBR 15823-2 (2010) e a ABNT NBR 15823-5 (2010) respectivamente; à resistência à segregação, ABNT NBR 15823-6 (2010) e o teor de ar em concreto fresco, ABNT NBR NM 47 (2002), apresentados na Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22 - Resultados e classificação dos concretos conforme ABNT NBR 15823-1 (2010).

Concreto	Propriedade / Classificação										Aceitação			
	Espalhamento ( <i>slump flow</i> ) (mm)		Índice de estabilidade visual	Viscosidade aparente		Habilidade passante		Resistência à segregação						
				$t_{500}$ (seg)	Funil V (seg)	Anel J (mm)	Caixa L HP ( $H_2/H_1$ )	Coluna de Segregação SR (%)						
CAA-SF-0	730	SF2	IEV 1	2:41	VS2	11:65	VF2	10,0	PJ1	1,00	PL2	17	SR1	sim
CAA-FI-10	764	SF3	IEV 1	2:53	VS2	8:75	VF1	47,5	PJ2	0,96	PL2	19	SR1	sim
CAA-FI-20	744	SF2	IEV 0	2:54	VS2	14:28	VF2	42,5	PJ2	0,96	PL2	19	SR1	sim
CAA-FI-30	714	SF2	IEV 0	2:34	VS2	8:06	VF1	32,0	PJ2	0,91	PL2	14	SR2	sim
CAA-FI-40	726	SF2	IEV 0	2:25	VS2	12:13	VF2	50,0	PJ2	0,84	PL2	10	SR2	sim
CAA-RM-10	703	SF2	IEV 0	2:44	VS2	9:25	VF2	30,5	PJ2	0,98	PL2	7	SR2	sim
CAA-RM-20	708	SF2	IEV 0	3:60	VS2	15:69	VF2	20,7	PJ1	0,95	PL2	3	SR2	sim
CAA-RM-30	675	SF2	IEV 0	2:59	VS2	13:91	VF2	48,0	PJ2	0,84	PL2	1	SR2	sim
CAA-RM-40	675	SF2	IEV 0	3:85	VS2	9:13	VF2	42,8	PJ2	0,84	PL2	-3	Nula	sim
CAA-FO-10	715	SF2	IEV 0	2:81	VS2	14:00	VF2	47,5	PJ2	0,90	PL2	8	SR2	sim
CAA-FO-20	723	SF2	IEV 0	3:28	VS2	13:13	VF2	45,0	PJ2	0,92	PL2	4	SR2	sim
CAA-FO-30	688	SF2	IEV 0	4:56	VS2	19:88	VF2	32,5	PJ2	0,80	PL2	-1	Nula	sim
CAA-FO-40	705	SF2	IEV 0	3:56	VS2	10:93	VF2	22,5	PJ1	0,80	PL2	2	SR2	sim
CAA-ES-10	623	SF1	IEV 0	5:54	VS2	14:90	VF2	152,5	-	0,40	-	-7	Nula	não
CAA-CE-10	618	SF1	IEV 0	6:50	VS2	15:43	VF2	247,5	-	0	-	2	SR2	não

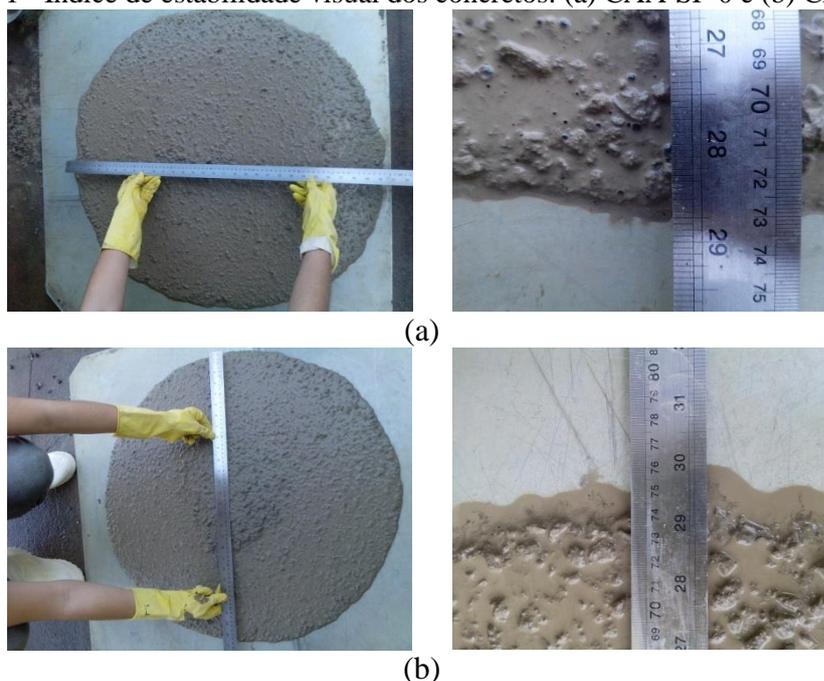
Fonte: Próprio autor.

Segundo a ABNT NBR 15823-1 (2010), a aceitação do CAA no estado fresco é baseada, no mínimo, na comprovação das propriedades de fluidez/espalhamento, viscosidade aparente e habilidade passante. Recomenda-se no projeto 18:300.03-001/2 de revisão da ABNT NBR 15823-2 (2010), apresentado por Barbosa (2016) que o índice de estabilidade visual também seja requisito para aceitação.

Verifica-se na Tabela 22 que dos quinze tipos de concretos produzidos, treze são aceitáveis quanto aos requisitos de autoadensabilidade, estabelecidos na ABNT NBR 15823-1 (2010). Dentre estes, doze concretos são classificados, quanto ao espalhamento, como SF2, sendo recomendado para a maioria das aplicações correntes. Apenas o CAA-FI-10 foi classificado como SF3. Segundo essa mesma norma, em concretos da classe SF3 se obtém melhor qualidade de acabamento da superfície, porém é mais difícil controlar a resistência à segregação do que em concretos da classe SF2.

Quanto ao índice de estabilidade visual, na Tabela 22, segue a classificação quanto à avaliação qualitativa dos quinze concretos. No CAA-FI-10 após o espalhamento na placa houve leve evidência de segregação e exsudação e no CAA-SF-0 observou-se uma leve exsudação em torno de seu espalhamento, Figura 4-1, classificando os dois concretos como estáveis (IEV 1). Os demais concretos foram classificados como altamente estáveis e sem evidência de exsudação (IEV 0).

Figura 4-1 - Índice de estabilidade visual dos concretos: (a) CAA-SF-0 e (b) CAA-FI-10.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados e classificações quanto à viscosidade aparente dos concretos, observados na Tabela 22, demonstram que treze tipos de concretos são classificados simultaneamente como VS2 e VF2. A ABNT NBR 15823-1 (2010) considera os concretos com essas classificações como tixotrópicos, gerando menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação, sendo recomendados para a maioria das aplicações.

Os resultados apresentados na Tabela 22 quanto à habilidade passante, ensaio do anel J, demonstram que a maioria dos concretos (67 %) são classificados como PJ2. O CAA-ES-10 e o CAA-CE-10, não apresentam classificação, devido aos valores encontrados nos ensaios serem superiores aos definidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010). Como a caixa L utilizada nos ensaios possuía três barras de aço, todos os concretos foram classificados como PL2, exceto o CAA-ES-10 e o CAA-CE-10, os quais não atingiram o valor de HP igual a 0,80, definido como mínimo para a razão entre as alturas da superfície de concreto nas extremidades da câmara horizontal.

A resistência à segregação do concreto foi determinada, segundo a ABNT NBR 15823-6 (2010), em função da diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo da porção de concreto retirada da base ( $m_B$ ) e do topo ( $m_T$ ) da coluna de segregação. Quanto menor a diferença entre a ( $m_T$ ) e ( $m_B$ ), maior é a resistência à segregação do concreto. Na Tabela 22 verifica-se que, em três tipos de concretos (CAA-ES-10, CAA-FO-30 e CAA-RM-40), a resistência à segregação foi considerada nula/zero, ou seja, durante a realização do ensaio, a massa de agregado graúdo ( $m_T$ ) foi maior que a massa do agregado graúdo ( $m_B$ ). Os outros doze tipos de concretos apresentaram diferença entre ( $m_T$ ) e ( $m_B$ ) em conformidade com os valores recomendados pela norma ABNT NBR 15823-1 (2010), demonstrando a capacidade de permanecer homogêneo durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento. Entre todos os tipos de adições minerais o fíler calcário apresentou menor resistência à segregação quando utilizado no concreto.

Segundo a ABNT NBR 15823-1 (2010), a classificação do CAA, quanto à resistência à segregação, é particularmente importante em concretos autoadensáveis de maior fluidez e baixa viscosidade. Esta propriedade é utilizada também para definir sua aplicação, sugerindo a distância a ser percorrida pelo concreto nas fôrmas e o espaçamento entre as armaduras a ser obedecido, evitando assim a segregação dinâmica e estática, respectivamente durante e após o lançamento.

Em especial, observa-se na Tabela 22 que o concreto tipo CAA-FI-10, possui classificações SF3 (maior fluidez), VF1 (baixa viscosidade) e SR1 (baixa resistência à segregação), além da classificação quanto ao índice de estabilidade visual igual à IEV 1 o qual demonstra que houve uma leve evidência de segregação dinâmica e exsudação. A classificação SR1, com o valor de 19 %, apresenta um valor muito próximo do limite máximo de 20 %, recomendado pela ABNT NBR 15823-1 (2010), aumentando a possibilidade de ocorrência de segregação no concreto. Portanto, para o teor de 10 % de substituição do cimento por fíler calcário haverá uma maior dificuldade em controlar a resistência à segregação deste concreto. Foi verificado também que, com o aumento do teor de fíler calcário houve um aumento na resistência à segregação do concreto, tornando o concreto mais coeso.

Os ensaios foram realizados em um ambiente, com temperaturas entre 25 °C e 26 °C e umidade relativa do ar de aproximadamente 53 %. Foi possível observar que o tempo de manutenção da consistência e da autoadensabilidade dos concretos é definido, em razão das propriedades do aditivo superplastificante. Neste caso o tempo de utilização observado para o aditivo variou entre 45 e 50 minutos, após o seu acréscimo na mistura dos concretos. Após esse tempo, verificando a impossibilidade de execução dos ensaios, devido à alteração das propriedades do concreto, este era descartado.

Mendes (2016) também verificou nos testes com um tipo de superplastificante, o fato de não considerar mais repetições por ensaio, visto que mais repetições poderiam comprometer a avaliação da autoadensabilidade dos concretos, estabelecendo um período aproximado de 50 minutos para realização dos testes.

Na Figura 4-2 é apresentada uma demonstração de todos os ensaios realizados com o CAA para um melhor entendimento.

Figura 4-2 - Ensaio para o CAA em (a) espalhamento,  $t_{500}$  e o índice de estabilidade visual (b) funil V, (c) anel J, (d) caixa L, (e) coluna de segregação.

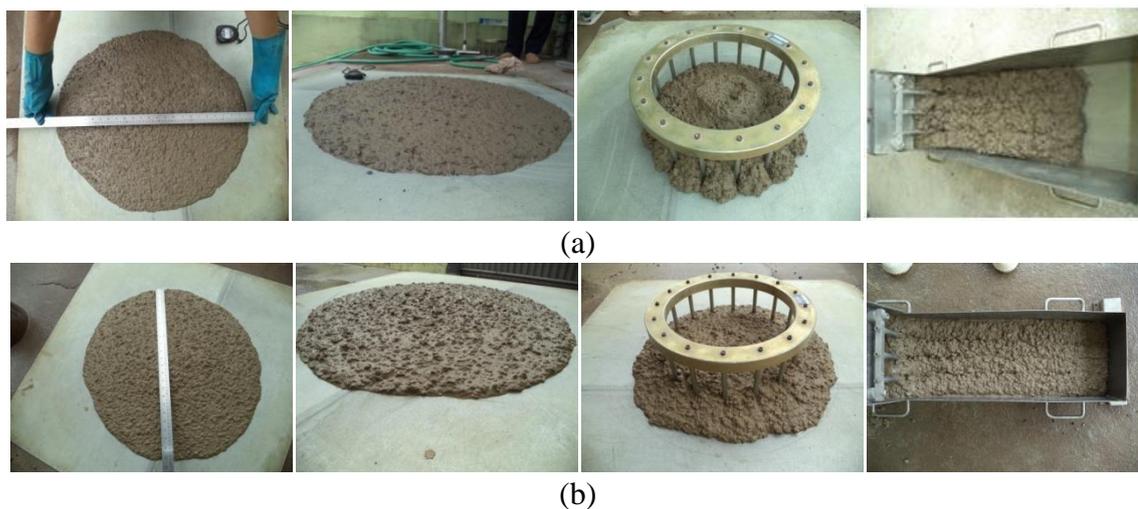


Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 22 verifica-se que os resultados dos concretos CAA-ES-10 e CAA-CE-10 não cumpriram os requisitos da ABNT NBR 15823-1 (2010) quanto à habilidade passante. Observa-se na Figura 4-3 que os ensaios de espalhamento (*slump flow*),  $t_{500}$ , caixa L e anel J, realizados nos referidos concretos, apresentaram menor fluidez, maior coesão, maior viscosidade e dificuldade de passagem por obstáculos.

Após análise dos resultados do CAA-ES-10 e CAA-CE-10, quanto ao não atendimento aos critérios de autoadensabilidade previstos na ABNT NBR 15823-1 (2010), decidiu-se por não produzir os demais concretos previstos para as substituições de 20, 30 e 40 %, em massa de cimento por estéril de fosfato e cinza de eucalipto.

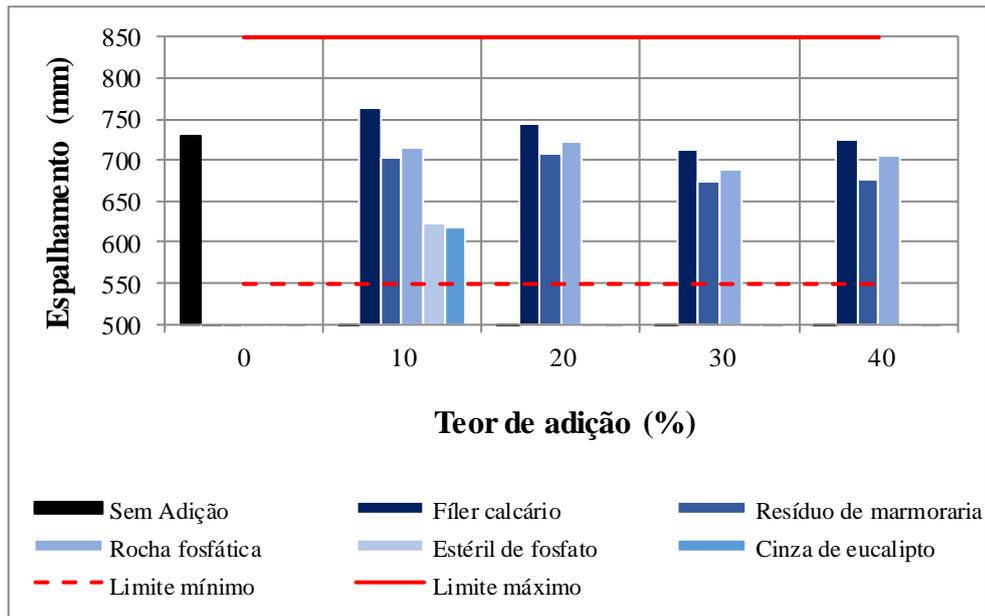
Figura 4-3 -Ensaio de espalhamento,  $t_{500}$ , índice de estabilidade visual, anel J e caixa L, em: (a) CAA-CE-10 e (b) CAA-ES-10.



Fonte: Próprio autor.

Com os resultados dos ensaios foram construídos gráficos para comparação das propriedades de autoadensabilidade dos concretos em relação ao tipo e o teor de adição substituída. Na Figura 4-4 a Figura 4-8, a seguir, são apresentados e discutidos os resultados de cada ensaio realizado no estado fresco, iniciando pelo espalhamento dos concretos com diferentes tipos e teores de adições na Figura 4-4.

Figura 4-4 - Ensaio de espalhamento dos concretos com diferentes tipos e teores de adições.



Fonte: Próprio autor.

Com relação à fluidez dos concretos, a ABNT NBR 15823-1 (2010) classifica o CAA conforme o diâmetro de espalhamento (*slump flow*), podendo variar entre 550 a 850 mm, conforme a fluidez. No ensaio de espalhamento, Figura 4-4, todos os tipos de CAA apresentaram resultados dentro deste intervalo, em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela referida norma.

Dentre os concretos produzidos, o fíler calcário em todos os teores apresentou maiores valores de espalhamento, em relação às outras adições minerais. Em relação ao concreto sem adição, o concreto contendo fíler calcário apresentou maior fluidez para os teores de substituição de 10 e 20 %, e uma semelhança para os teores de 30 e 40 %.

As partículas do fíler calcário e da rocha fosfática possuem maiores tamanhos que os demais tipos de adição, portanto, conforme Gomes e Barros (2009) necessitam de menor dosagem de aditivo superplastificante para manter sua fluidez. Com o aumento dos teores de substituição do cimento (10 a 40 %), a dosagem do aditivo superplastificante diminuiu 21 %, justificando a semelhança na fluidez dos concretos com maiores teores de adições.

Verifica-se assim, que para as misturas com utilização de fíler calcário e rocha fosfática, há uma variação pouco expressiva na medida do espalhamento mesmo com o aumento nos teores de adições minerais, quando comparado ao concreto sem adição.

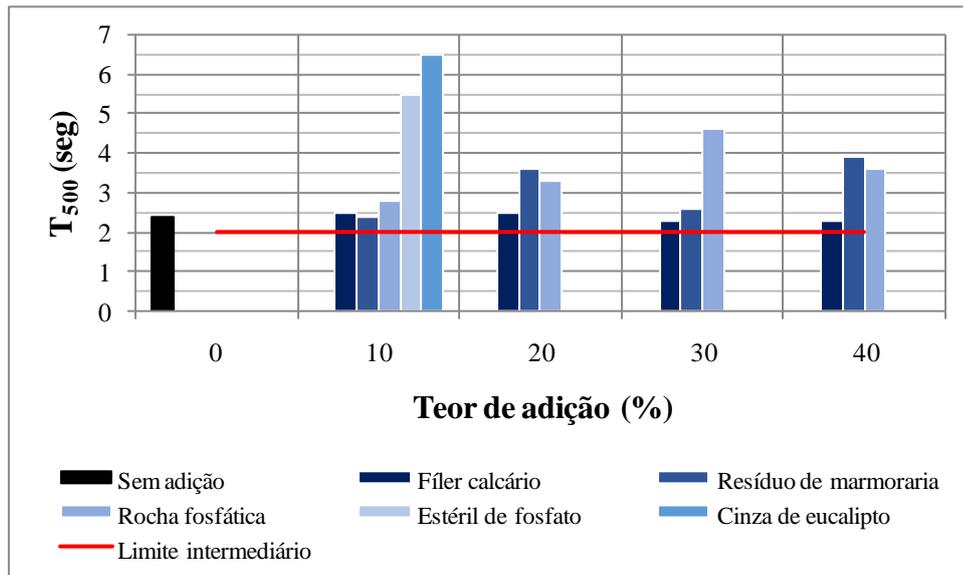
O concreto com resíduo de marmoraria apresentou uma diminuição pouco expressiva no espalhamento a partir de 30 % de substituição, mantendo sua classificação SF2, segundo a ABNT NBR 15823-1 (2010). Ao comparar os concretos produzidos com o resíduo de marmoraria, fíler calcário e a rocha fosfática, verifica-se um menor espalhamento para a adição de resíduo de marmoraria. Essa redução ocorre devido à maior finura das suas partículas, deixando o concreto mais consistente e menos fluído, podendo necessitar de maior dosagem de aditivo para manter seu espalhamento.

Conforme verificado na Figura 4-4 os concretos com estéril de fosfato e cinza de eucalipto, apresentaram menor fluidez, quando comparados aos demais concretos. Esses resultados ocorreram devido à finura do estéril de fosfato e da cinza de eucalipto e, conseqüentemente maior área superficial, aumentando a demanda de água necessária para a molhagem de todas as partículas do concreto, conforme explicado por Neville e Brooks (2013). Os autores afirmam também que partículas muito finas como: argilas, siltes e pó de britagem, quando utilizadas em concretos, podem aumentar a demanda de água, afetando negativamente a resistência do concreto ao intemperismo e à proteção das armaduras. Verifica-se com os ensaios de caracterização mineralógica e composição química do estéril de fosfato sua semelhança com alguns tipos de minerais argilosos, justificando assim os resultados encontrados para o CAA-ES-10.

Ban e Ramli (2012) confirmam em seus estudos, que na produção da argamassa, ao substituir o cimento por cinza de madeira, nos teores de 0, 5 e 10 %, ocorreu uma diminuição na sua fluidez e consistência, para a dosagem de aditivo superplastificante e relação água/cimento constantes. Para os teores de 15, 20 e 25 %, foram necessárias dosagens mais elevadas de aditivo superplastificante para manter o espalhamento das misturas, sem alterar a relação água/cimento. Estas observações podem ser justificadas devido à maior superfície específica da cinza de madeira quando comparada ao cimento Portland, à elevada irregularidade na forma das partículas das cinzas de madeira e a sua natureza porosa, resultados equivalentes foram encontrados para o CAA-CE-10. (CHEAH; RAMLI, 2011).

Na Figura 4-5 são apresentados os resultados para o ensaio do  $t_{500}$  em concretos com diferentes tipos e teores de adições.

Figura 4-5–Ensaio do  $t_{500}$  dos concretos com diferentes tipos e teores de adições.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2010), quanto à viscosidade plástica deve-se realizar o ensaio do  $t_{500}$ , medindo o tempo necessário para que o concreto atinja a marca de 500 mm ao espalhar sobre a placa de base. Todos os concretos ensaiados estão em conformidade com a referida norma e foram classificados como VS2, pois atingiram um tempo superior a 2 segundos. Quanto maior o tempo de escoamento do concreto, maior será a sua viscosidade.

Observa-se na Figura 4-5 que os concretos com fíler calcário apresentam valores para o  $t_{500}$  entre 2 e 3 segundos para todos os teores de substituição. Esse resultado é justificado devido à redução do consumo de aditivo superplastificante, em relação ao aumento da incorporação de adição no concreto e o melhor empacotamento, garantindo o adequado arranjo das partículas e distribuição da água, proporcionando ao concreto menor viscosidade e maior fluidez em menor tempo.

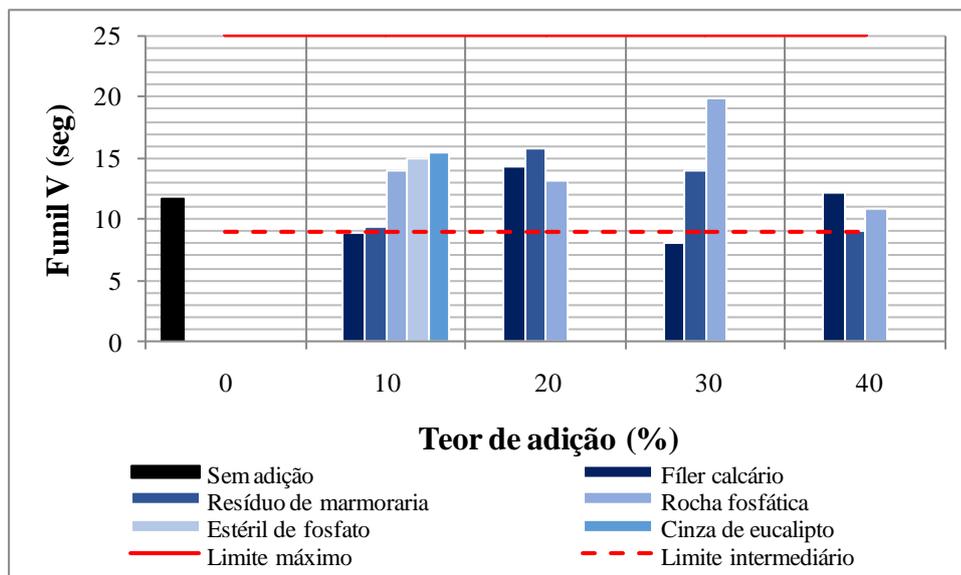
Para os concretos com resíduo de marmoraria e rocha fosfática verifica-se que o aumento do teor de adição aumenta o tempo de escoamento. Até 10 % de adição estes possuem propriedades semelhantes ao concreto com fíler calcário e o CAA-SF-0, mas para dosagens superiores os concretos com resíduo de marmoraria e rocha fosfática são considerados autoadensáveis de maior viscosidade que o concreto com fíler calcário e o CAA-SF-0.

Os concretos com adição de 10 % de estéril de fosfato e cinza de eucalipto possuem maior viscosidade e maior coesão que os demais tipos de concretos, devido ao lento escoamento durante o ensaio do  $t_{500}$ . Comportamento já esperado devido ao menor diâmetro de

espalhamento verificado na Figura 4-4.

Na Figura 4-6 são observados os resultados para o ensaio do funil V em concretos com diferentes tipos e teores de adições.

Figura 4-6 - Ensaio do funil V dos concretos com diferentes tipos e teores de adições.



Fonte: Próprio autor.

Os concretos podem ser classificados, quanto à viscosidade, de acordo com o tempo de escoamento da mistura no ensaio do funil V. Com base nos parâmetros definidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010) e a Figura 4-6, todos os concretos apresentaram resultados satisfatórios, ou seja, abaixo do limite máximo de 25 segundos.

Os ensaios realizados no  $t_{500}$  e no funil V classificam o CAA quanto à viscosidade, no entanto, o ensaio do  $t_{500}$  classifica o concreto em situações de fluxo livre e o funil V em fluxo confinado. A correlação entre os resultados apresentados na Figura 4-5 e Figura 4-6 é verdadeira, os gráficos são semelhantes, mas devido ao confinamento o concreto necessita de maior tempo para escoar do que em fluxo livre.

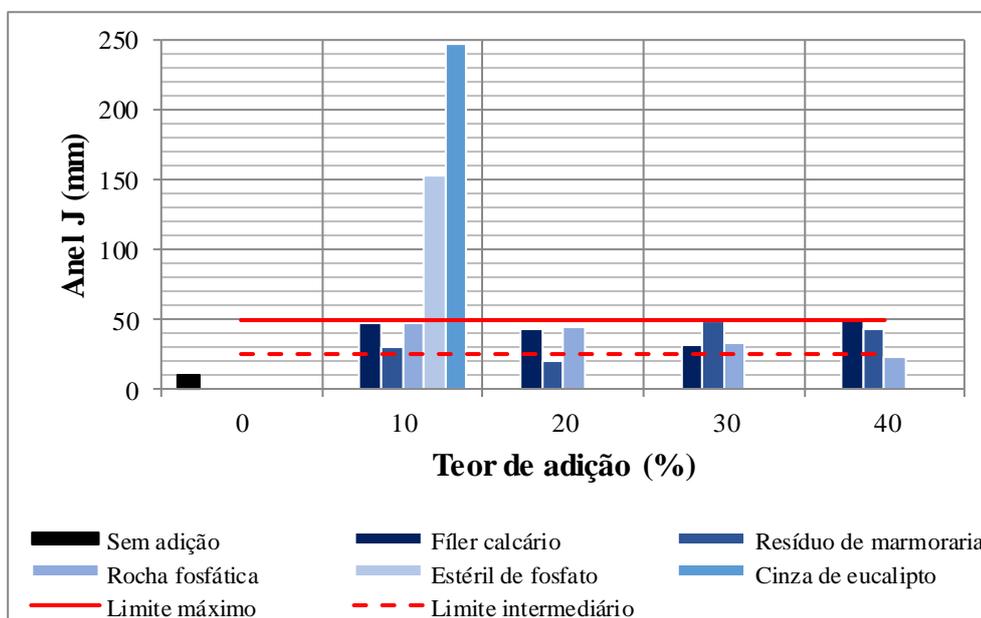
Os resultados encontrados no ensaio do funil V confirmam as observações realizadas nos ensaios do  $t_{500}$  e de espalhamento, assim, os concretos sem adição e com adições de fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática apresentam maior fluidez e menor viscosidade e coesão.

Observa-se que no ensaio do funil V, em fluxo confinado, os concretos com estéril de fosfato e cinza de eucalipto apresentam-se menos viscosos do que no ensaio do  $t_{500}$ , em fluxo livre. Essa

observação é feita ao se comparar o tempo de escoamento de todos os concretos, com mesmo teor de substituição, nos dois ensaios. No  $t_{500}$  o CAA-ES-10 e o CAA-CE-10 apresentaram uma variação de tempo aproximadamente três vezes superior em comparação aos demais concretos, já no funil V verifica-se uma variação de aproximadamente duas vezes. Como a viscosidade possui relação com o tempo, o concreto com menor tempo de escoamento possui menor viscosidade.

Os resultados para o ensaio do anel J em concretos com diferentes tipos e teores de adições podem ser verificados na Figura 4-7.

Figura 4-7–Ensaio do anel J dos concretos com diferentes tipos e teores de adições.



Fonte: Próprio autor.

O ensaio do anel J fez a verificação da habilidade passante, nas misturas de CAA, conforme os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010). Os resultados obtidos foram satisfatórios para os concretos sem adição e com adição de fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática. Observa-se na Figura 4-7 que esses concretos apresentaram a diferença entre o diâmetro médio de espalhamento sem o anel J e com o anel J de 16 barras de aço, abaixo do limite máximo de 50 mm.

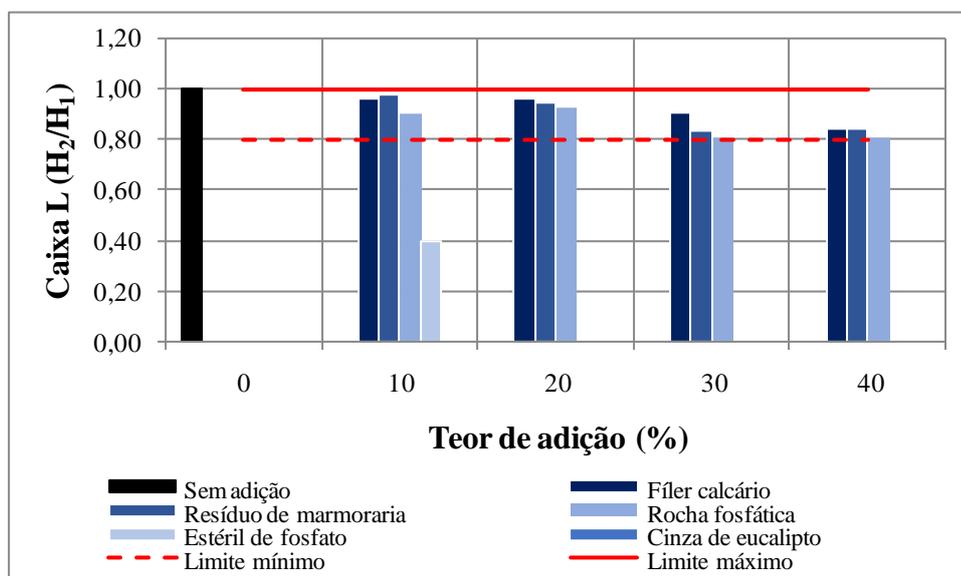
Os resultados demonstram que os concretos sem adição e com adição de fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática a capacidade de preenchimento, fluidez, resistência à segregação dinâmica e passagem por obstáculos, em fluxo livre, não foi prejudicada com o aumento dos teores das adições até 40 % de substituição. Conforme já observados nos ensaios

de espalhamento,  $t_{500}$  e funil V, estes concretos apresentam alta fluidez, moderada coesão e baixa viscosidade.

Os concretos contendo estéril de fosfato e cinza de eucalipto não podem ser classificados como CAA, Figura 4-7, de acordo com os resultados obtidos pelo anel J. Conforme analisado anteriormente, nos ensaios de espalhamento e  $t_{500}$ , devido à maior finura destes resíduos, os concretos apresentam menor fluidez, maior coesão e maior viscosidade prejudicando, assim, a passagem por obstáculos e a capacidade de preenchimento.

Observa-se na Figura 4-8 os resultados para o ensaio da caixa L em concretos com diferentes tipos e teores de adições.

Figura 4-8–Ensaio da caixa L dos concretos com diferentes tipos e teores de adições.



Fonte: Próprio autor.

O ensaio com a caixa L verifica o CAA quanto à coesão e a habilidade de passagem por obstáculos, porém sob fluxo de escoamento confinado. A norma ABNT NBR 15823-1 (2010) estabelece o valor mínimo de 0,80 para a razão  $H_2/H_1$  obtido durante o ensaio. Os concretos sem adição e com adição de fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática apresentaram resultados satisfatórios com o aumento do teor de substituição, como pode ser verificado na Figura 4-8, sendo classificados como CAA.

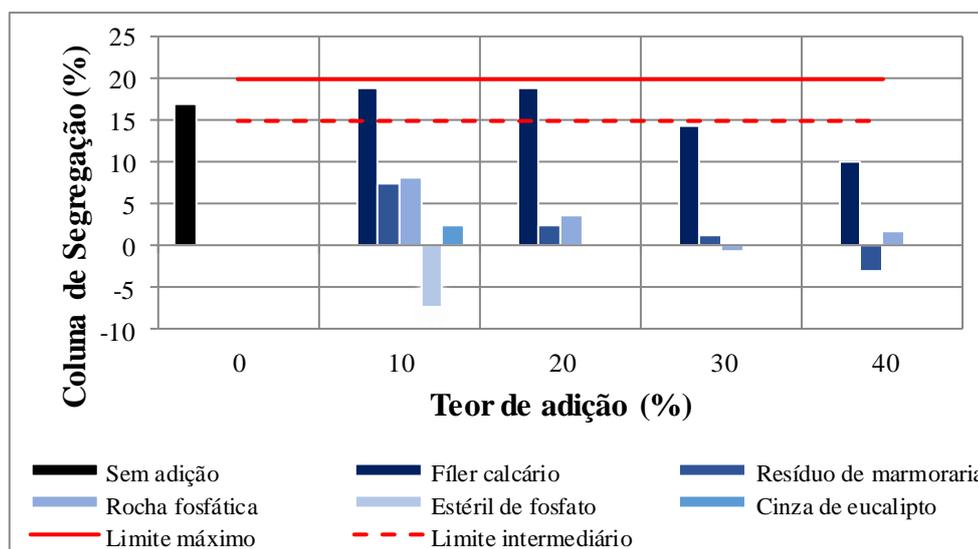
Verifica-se que o aumento do teor de adição até 40 % diminui a fluidez, aumenta a viscosidade e coesão da mistura, mas assim como no ensaio do anel J, essas mudanças não comprometem

as propriedades de autoadensabilidade dos concretos, apenas altera as classificações dos concretos de acordo com a norma e as recomendações quanto à aplicação.

Os concretos com 10 % de estéril de fosfato e cinza de eucalipto não apresentaram resultados satisfatórios, devido a sua maior coesão e viscosidade os concretos não conseguiram escoar totalmente entre as barras, não preenchendo a câmara horizontal da caixa L. Percebem-se, como nos demais ensaios realizados que quanto mais fina for a adição, maior será a viscosidade do concreto e menor a fluidez.

Na Figura 4.9 são verificados os resultados para o ensaio na coluna de segregação em concretos com diferentes tipos e teores de adições.

Figura 4-9 - Ensaio na coluna de segregação dos concretos com diferentes tipos e teores de adições.



Fonte: Próprio autor.

A resistência à segregação é medida pela diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo encontrado na base e no topo da coluna de segregação. Conforme os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010) todos os concretos atingiram resultados satisfatórios, ou seja, abaixo de 20 %.

Como já observado anteriormente quanto, mais fina for a adição, maior será a viscosidade e coesão e maior será a resistência à segregação da mistura. Na Figura 4.9 foi verificado que o CAA com filer calcário, em todos os teores de substituição, apresenta maior risco de segregação em relação aos demais concretos, isso pode ser justificado devido as suas partículas possuírem maior tamanho que as demais adições, produzindo concretos com maior fluidez e mais baixa viscosidade. Resultado contrário pode ser identificado no concreto com resíduo de marmoraria,

pois devido a sua elevada finura em relação às demais adições, em todos os teores de substituição, houve aumento na resistência à segregação. Com a elevação do teor de adições nos concretos obteve-se um aumento na resistência à segregação.

Os concretos com estéril de fosfato e cinza de eucalipto, devido à alta viscosidade e baixa fluidez apresentaram-se muito resistentes à segregação, para o teor de 10 % de substituição de cimento.

Após análise de todos os resultados apresentados no estado fresco, verifica-se que os concretos sem adição e com adições de filer calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática, satisfazem os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010) e confirmam as expectativas quanto à produção de concretos sustentáveis.

A produção de concretos com relação  $a/(c+f)$  fixado em 0,39, teor de aditivo superplastificante fixado em 1,2 % em relação ao consumo de cimento e a substituição de 10 a 40 % de cimento por adições minerais, apresentou uma diminuição no consumo de cimento, consequentemente, no consumo de aditivo superplastificante e ainda utilizou resíduos e minerais, encontrados na região do estudo.

A utilização destas adições em grande quantidade, até 40 %, não apresentou prejuízos à capacidade dos concretos de fluir e se autoadensar, preenchendo as fôrmas, passando por obstáculos, mantendo-se coeso e sem segregação, durante a mistura, transporte, lançamento e ao permanecer em repouso dentro das fôrmas.

As propriedades do CAA no estado fresco sofrem variações com os diferentes tipos e teores de adições minerais utilizados, não inviabilizando seu uso, apenas alterando a classificação do CAA e recomendações quanto o local de aplicação estabelecidos na ABNT NBR 15823-1 (2010).

Os concretos produzidos com 10 % de substituição de cimento por estéril de fosfato e cinza de eucalipto não podem ser classificados como autoadensáveis, pois segundo a ABNT NBR 15823-1 (2010), a aceitação do CAA no estado fresco deve ser baseada no mínimo na comprovação das propriedades de fluidez, viscosidade plástica aparente e habilidade passante. Este último requisito não foi atendido para o traço calculado e a porcentagem de substituição das adições.

Para o cálculo da dosagem das misturas adotou-se o valor de 2,0 %, para o teor de ar aprisionado no concreto fresco. Após confecção dos concretos com diferentes teores e tipos de adições foi realizado, para cada mistura, o ensaio de determinação do teor de ar aparente ( $A_1$ ) do concreto no estado fresco, descrito na ABNT NBR NM 47 (2002), conforme Figura 4-10.

Figura 4-10 - Determinação do teor de ar incorporado no concreto no estado fresco.



Fonte: Próprio autor.

Com a realização do ensaio foi possível determinar os teores de ar aparente ( $A_1$ ), conforme Tabela 23, para cada amostra de CAA, confirmando o teor adotado para dosagem em 2,0 %, devido à pequena variação entre os resultados.

Tabela 23 - Teor de ar aparente ( $A_1$ ) para cada tipo de concreto no estado fresco.

<b>Concreto</b>	<b>Teor de ar aparente (%)</b>
CAA-SF-0	2,1
CAA-FI-10	2,0
CAA-FI-20	2,0
CAA-FI-30	2,1
CAA-FI-40	2,0
CAA-RM-10	1,9
CAA-RM-20	1,8
CAA-RM-30	1,8
CAA-RM-40	2,0
CAA-FO-10	2,1
CAA-FO-20	2,0
CAA-FO-30	2,0
CAA-FO-40	2,1
CAA-ES-10	1,8
CAA-CE-10	1,8

Fonte: Próprio autor.

Conforme Neville (2016) os vazios no concreto são constituídos tanto por bolhas de ar aprisionado quanto por espaços originados, após o excesso de água ter sido removido. A vibração do concreto, durante o lançamento na fôrma, expulsa a maior parte do ar aprisionado, com o propósito de obter um concreto com maior massa específica possível. Dentre as propriedades do CAA está a capacidade de expulsar o ar aprisionado sem necessidade de vibração, mas, é praticamente impossível retirar todo o ar do concreto. A presença de vazios no concreto causa uma grande redução em sua resistência, como exemplo, um teor de vazios de 2 % pode resultar em uma diminuição da resistência superior a 10 %. O empacotamento das partículas reduz o volume de ar aprisionado no concreto e aumenta a sua resistência.

## 4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item são apresentados e analisados os resultados dos ensaios nos concretos autoadensáveis no estado endurecido quanto às propriedades de: resistência à compressão, ABNT NBR 5739 (2007), resistência à tração por compressão diametral, ABNT NBR 7222 (2011), o módulo de elasticidade à compressão, ABNT NBR 8522 (2008) e massa específica, absorção de água e índice de vazios, ABNT NBR 9778 (2005). Os resultados foram apresentados na forma de gráficos para comparação entre os tipos de concretos e as propriedades analisadas e em forma de tabelas no APÊNDICE A.

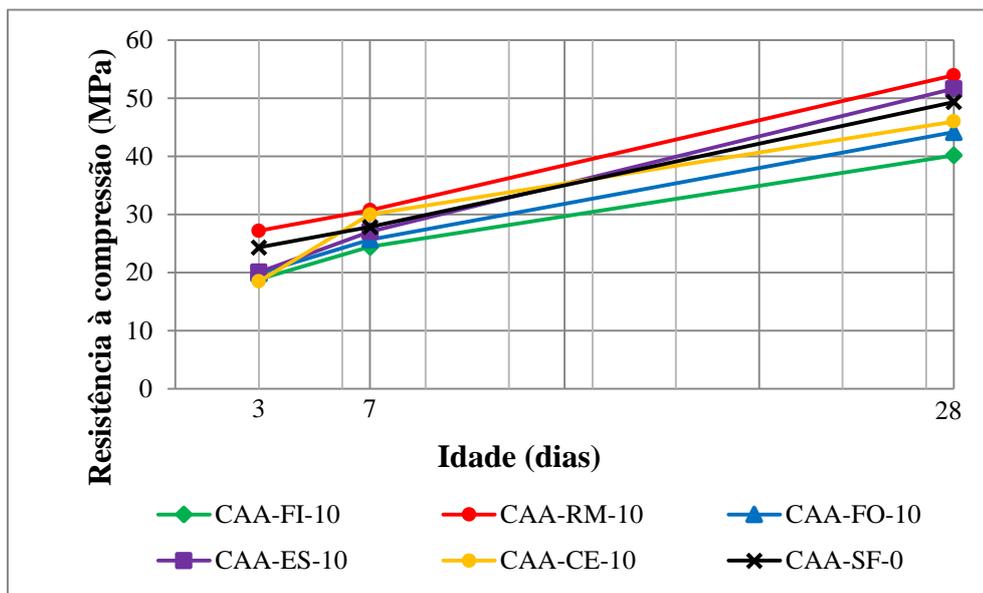
### 4.2.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão dos concretos foi realizado conforme a ABNT NBR 5739 (2007) para as idades de 3, 7 e 28 dias, os resultados são calculados pela média de dois corpos de prova, para cada idade. Foram construídos gráficos para comparação dos resultados entre concretos com o mesmo teor de substituição e diferentes tipos de adições, entre concretos com o mesmo tipo de adição e diferentes teores de substituição e a resistência à compressão dos concretos para diferentes consumos de cimento.

#### 4.2.1.1 *Concretos com mesmo teor de substituição e diferentes tipos de adições*

Na Figura 4-11 são apresentados os resultados médios para a resistência à compressão dos concretos, sem adição mineral e das misturas contendo adições de fíler calcário, resíduo de marmoraria, rocha fosfática, estéril de fosfato e cinza de eucalipto, em 10 % de substituição ao cimento, em massa, nas idades estudadas.

Figura 4-11 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 10 %.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se no gráfico da Figura 4-11 que em todos os concretos houve o acréscimo na resistência à compressão, com a evolução da idade, como esperado. Aos 28 dias, o concreto produzido sem adições, CAA-SF-0, apresentou resistência à compressão de 49 MPa. Em relação ao CAA-SF-0 o concreto com resíduo de marmoraria, CAA-RM-10, apresentou resultado 9 % superior; o concreto com estéril de fosfato, CAA-ES-10, 5 % superior; o concreto com rocha fosfática, CAA-FO-10, apresentou resultado 10% inferior e o concreto com cinza de eucalipto, CAA-CE-10, 6 % inferior. O menor resultado ocorreu para o concreto com fíler calcário, apresentando 40 MPa.

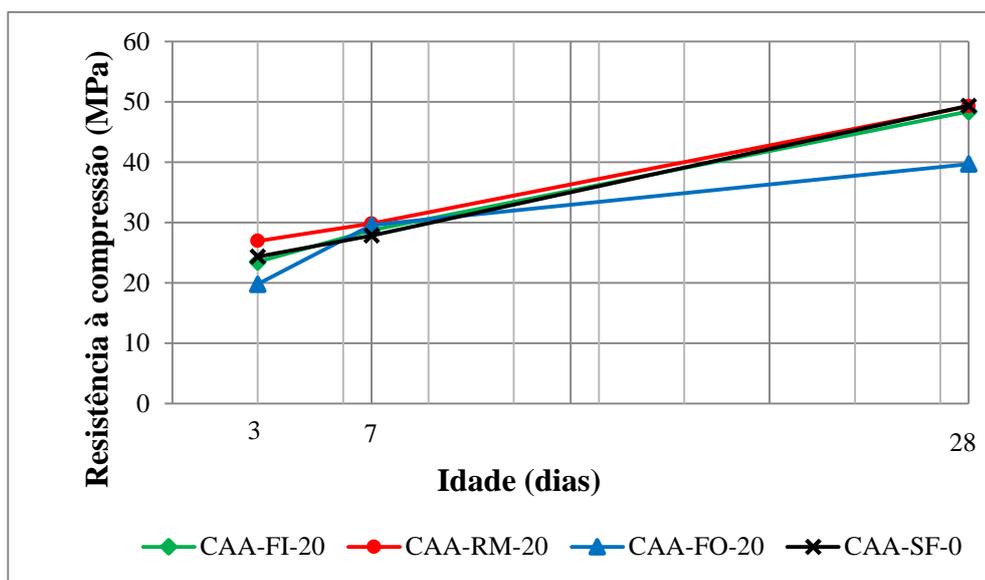
Os concretos produzidos com substituição de 10 % do consumo de cimento por estéril de fosfato e cinza de eucalipto, apesar de não atender os requisitos de autoadensabilidade para o CAA apresentou resistências semelhantes ao concreto sem adições. O uso destes materiais no concreto é muito viável quanto à sustentabilidade.

A cinza de eucalipto é considerada um resíduo e apesar do seu reaproveitamento parcial, como corretivo para alguns tipos de solo, a maior parte da cinza produzida nas indústrias da região do estudo não apresenta destinação apropriada e é depositada de forma irregular na natureza. O estéril de fosfato por se tratar de um tipo de minério encontrado em camadas superiores à rocha fosfática, sua extração é obrigatória para exploração do material das camadas inferiores

apresentando sérios problemas ambientais, pois todo material é retirado e depositado como resíduos nas proximidades das jazidas, sem reaproveitamento adequado.

Na Figura 4-12 foram comparados os resultados para a resistência à compressão dos concretos sem adição e com 20 % de substituição de cimento por adições minerais, nas idades estudadas. Para o estéril de fosfato e a cinza de eucalipto não foram realizados os demais ensaios devido a não conformidade em relação a autoadensabilidade.

Figura 4-12 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 20 %.



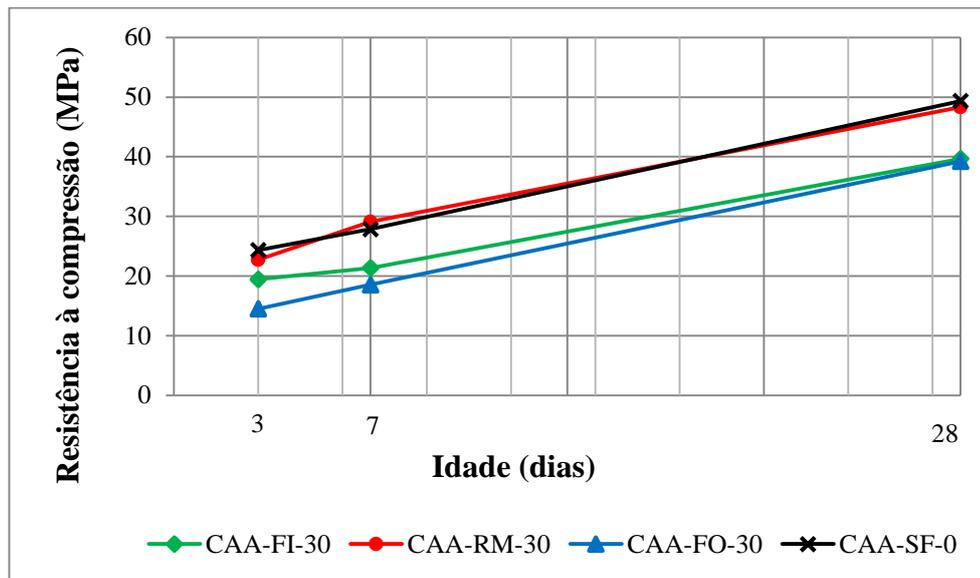
Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Figura 4-12 que a utilização de adições minerais nos concretos é viável, para o teor de substituição de 20 % de fíler calcário e resíduo de marmoraria, sem prejuízos à resistência à compressão e com resultados semelhantes ao concreto sem adições de 49 MPa, aos 28 dias.

Conforme a Figura 4-12, aos 28 dias, somente o CAA-FO-20 obteve a resistência à compressão inferior ao CAA-SF-0, em 20 %. Apesar da queda, o resultado é muito promissor, uma vez que foi possível produzir um concreto com boa resistência, classificado pela ABNT NBR 8953 (2015) como C40, com uma redução significativa do consumo de cimento.

Na Figura 4-13 são apresentados os resultados para a resistência à compressão dos concretos sem adições e com 30 % de substituição de cimento por fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática.

Figura 4-13 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 30 %.



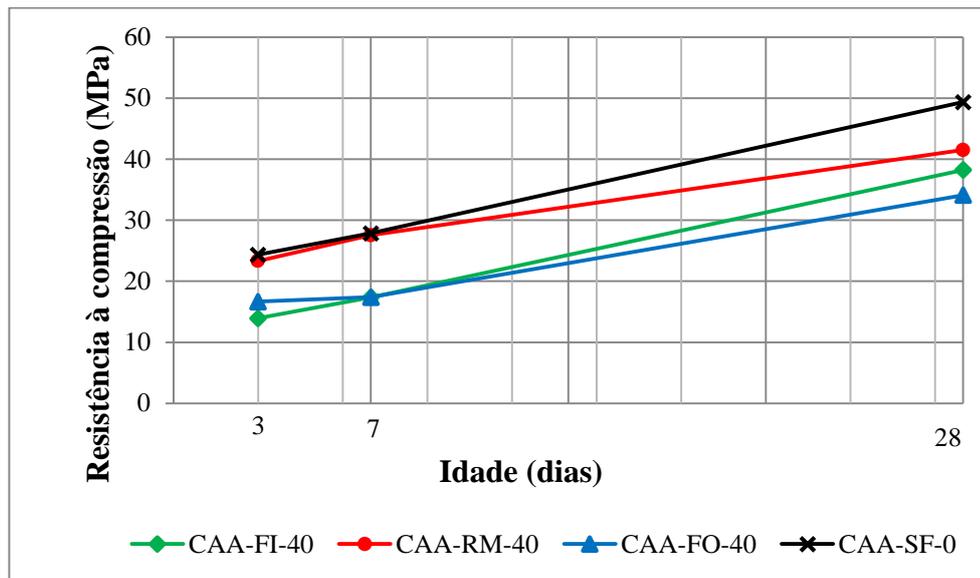
Fonte: Próprio autor.

Os resultados encontrados para o concreto com 30 % de substituição de cimento por resíduo de marmoraria, Figura 4-13, foram muito satisfatórios, pois houve uma redução muito alta no consumo de cimento e mesmo assim, o concreto obteve comportamento semelhante ao CAA-SF-0, sem prejuízo para resistência à compressão.

Verifica-se na Figura 4-13, que as adições de fíler calcário e rocha fosfática apresentaram resultados similares, obtendo resistências à compressão 20 % inferior à mistura sem adição, CAA-SF-0. O concreto CAA-FO-30, mesmo diminuindo 30 % do consumo do cimento, manteve a resistência de 40 MPa, obtida para o CAA-FO-20, na Figura 4-12. A utilização dessas adições apresentaram resultados muito satisfatórios tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Observa-se no gráfico da Figura 4-14 os resultados para a resistência à compressão dos concretos sem adições e com 40 % de substituição de cimento por fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática, nas idades estudadas.

Figura 4-14 - Resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 40 %.



Fonte: Próprio autor.

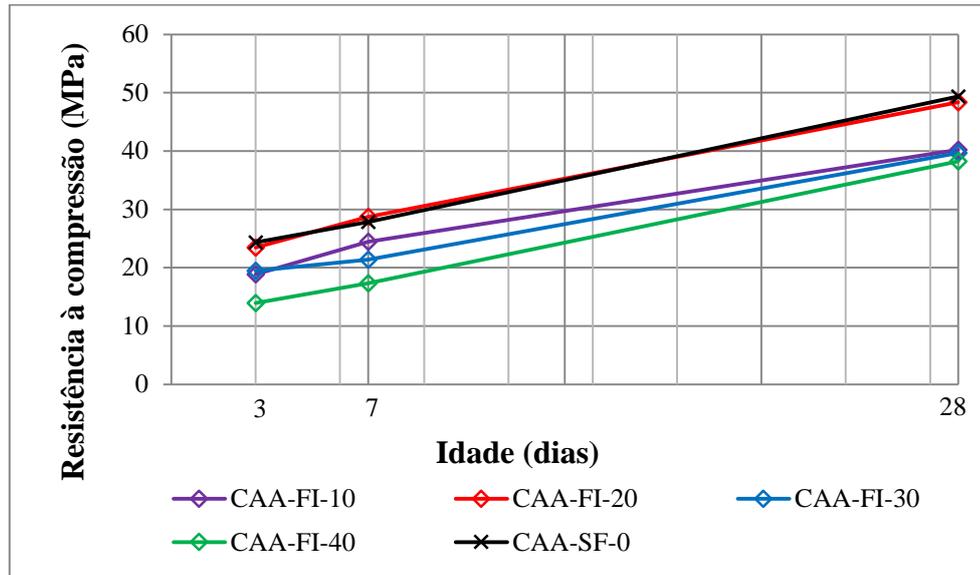
Todos os concretos apresentaram aumento na resistência à compressão ao longo do tempo. Nota-se, na Figura 4-14 que ao substituir 40 % do consumo de cimento por adições os resultados foram muito satisfatórios tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Todos os concretos com adições sofreram uma pequena queda na resistência à compressão, aos 28 dias, em comparação ao CAA-SF-0, com 49 MPa. O CAA-RM-40 apresentou um resultado 16 % inferior ao CAA-SF-0 e para o concreto com fíler calcário houve uma queda de 23 % na resistência. O menor resultado foi identificado para a rocha fosfática, com 34 MPa, aos 28 dias.

A utilização de fíler calcário e rocha fosfática para produção de CAA, atendeu todos os requisitos de autoadensabilidade no estado fresco. No estado endurecido, houve uma redução na resistência à compressão com o aumento dos teores de substituição do cimento, mas atingindo resultados muito satisfatórios, as reduções chegaram a apenas 30 % na resistência à compressão para um teor de até 40 % de substituições do cimento.

#### 4.2.1.2 Concretos com mesmo tipo de adição e diferentes teores de substituição

Na Figura 4-15 são observados os resultados para a resistência à compressão dos concretos com substituição de cimento por fíler calcário, nos teores de 0 a 40 %, nas idades estudadas.

Figura 4-15 - Resistência à compressão para o CAA com fíler calcário de 0 a 40 %.



Fonte: Próprio autor.

Verifica-se na Figura 4-15, que o CAA-FI-20 apresentou semelhança ao CAA-SF-0 em seus resultados de resistência à compressão, para todas as idades analisadas, ou seja, dentre as proporções de fíler calcário estudadas, o teor de 20 % é o mais recomendado para esta dosagem de CAA.

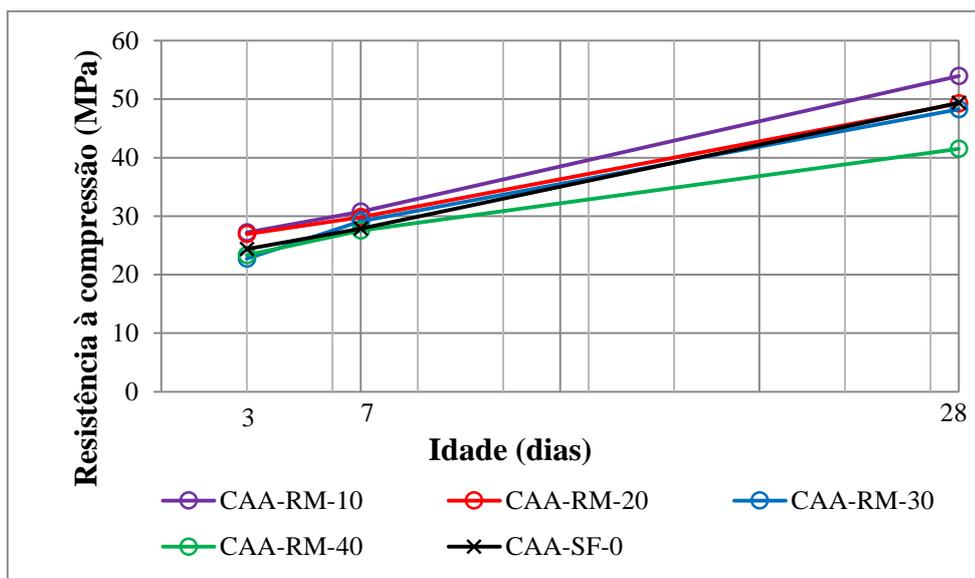
Demais concretos apresentaram uma pequena queda na resistência à compressão, atingindo, aos 28 dias, 80 % da resistência encontrada para o CAA-SF-0, mas não se verifica uma variação significativa para os teores de 10, 30 e 40 %, aos 28 dias, apresentando uma resistência próxima a 40 MPa. Portanto, exceto para o teor de 20 % de fíler calcário, pode-se substituir 40 % de cimento, para esta dosagem de CAA e obter resistência à compressão semelhante a 10 e 30 %. Vale ressaltar, que o CAA no estado fresco, para os diferentes teores de fíler calcário, não apresentam variações significativas nos parâmetros de autoadensabilidade.

O fíler calcário apresenta em sua composição química um teor de 97 % de óxido de cálcio, com sua estrutura na forma cristalina, ou seja, não possui efeito químico, somente físico. Devido à finura do fíler calcário, ocorre melhor distribuição de suas partículas na mistura, e preenchimento dos vazios, aumentando a massa específica dos concretos. O fíler calcário pode auxiliar também na dispersão dos grãos de clínquer dentro do concreto, promovendo uma aceleração na hidratação do cimento, além do refinamento da estrutura dos poros e consequentemente um ganho na resistência à compressão. O fíler calcário é considerado um

resíduo da britagem de rochas, sendo utilizado na região de estudo, prioritariamente, para misturas de concreto asfáltico, como material de enchimento.

Os resultados para a resistência à compressão dos concretos com substituição de cimento por resíduo de marmoraria, nos teores de 0 a 40 %, nas idades estudadas, estão demonstrados na Figura 4-16.

Figura 4-16 - Resistência à compressão para o CAA com RM de 0 a 40 %.



Fonte: Próprio autor.

O resíduo de marmoraria é muito promissor para a fabricação de CAA, pois além de satisfazer aos requisitos exigidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010), não apresenta prejuízo à resistência à compressão do concreto, mesmo ao se retirar 30 % do cimento utilizado na mistura. Para o teor de 40 % de substituição ao consumo de cimento, o CAA consegue atingir 85 % da resistência à compressão do concreto com consumo integral de cimento, sem adições minerais e ainda atende a norma de autoadensabilidade.

Dentre as adições minerais utilizadas nessa pesquisa, o resíduo de marmoraria apresentou os melhores resultados tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, ou seja, é possível reduzir o consumo de cimento em elevados teores, na fabricação de CAA, sem prejudicar a resistência à compressão.

Quanto aos benefícios ao meio ambiente, a redução no uso do cimento evita a emissão de gases poluentes na atmosfera, gerados durante o seu processo de fabricação. Ao utilizar o resíduo de

marmoraria, destina-se corretamente um material com ótimas propriedades para o concreto e que seria descartado de forma não controlada no meio ambiente.

Quanto aos custos, nesta pesquisa, todo o resíduo de marmoraria foi seco em estufa, destorroado e peneirado, porém para o uso na produção de concreto, pode-se utilizá-lo com a consistência de lama, realizando o desconto no consumo de água da mistura, não havendo necessidade de beneficiamento do material. Na região do estudo, esse material não tem valor econômico e não é comercializado, aumentando ainda mais o interesse pelo uso desse resíduo.

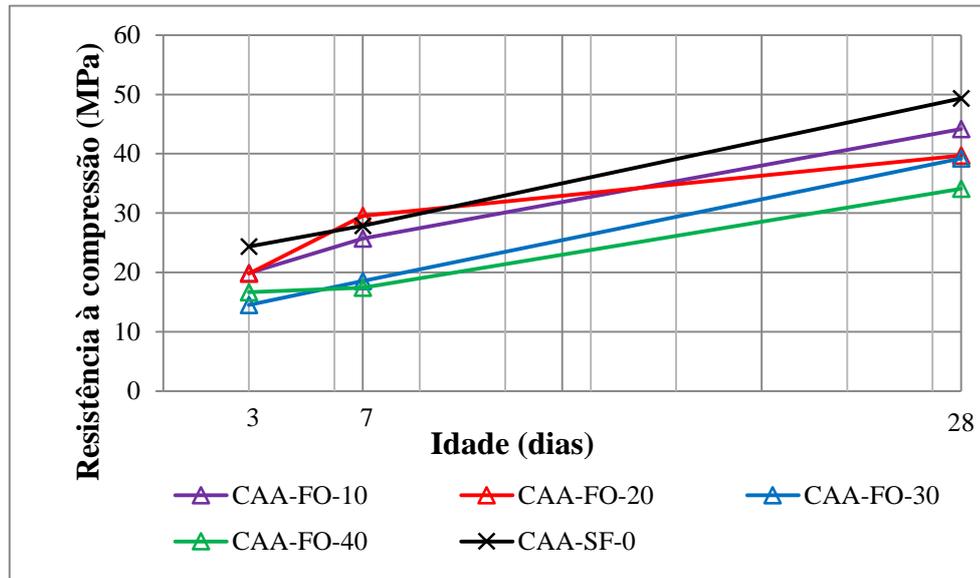
As contribuições para a autoadensabilidade e resistência à compressão dos concretos produzidos com resíduo de marmoraria, podem ser explicadas devido as suas propriedades físicas e mineralógicas.

O resíduo de marmoraria apresenta elevada finura, pois 94 % dos seus grãos são passantes na peneira de abertura 0,075 mm. Conforme Neville e Brooks (2013) e Tutikian e Dal Molin (2015) a finura proporciona efeitos benéficos nas propriedades do concreto, tais como: a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade, a exsudação e segregação, além de atuar como pontos de nucleação para os produtos de hidratação dos cimentos e alteração da microestrutura da zona de transição, dispersando a água retida sob os agregados, aumentando o desempenho mecânico e a durabilidade do concreto.

A composição mineralógica do resíduo de marmoraria é composta basicamente por 62 % de rochas originadas do quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). O quartzo na forma de pó tem sido comumente utilizado em concretos para aumento da densidade e resistência mecânica.

Na Figura 4-17 foram apresentados os resultados para a resistência à compressão dos concretos com substituição de cimento por rocha fosfática, nos teores de 0 a 40 %, para as idades estudadas.

Figura 4-17 - Resistência à compressão para o CAA com rocha fosfática de 0 a 40 %.



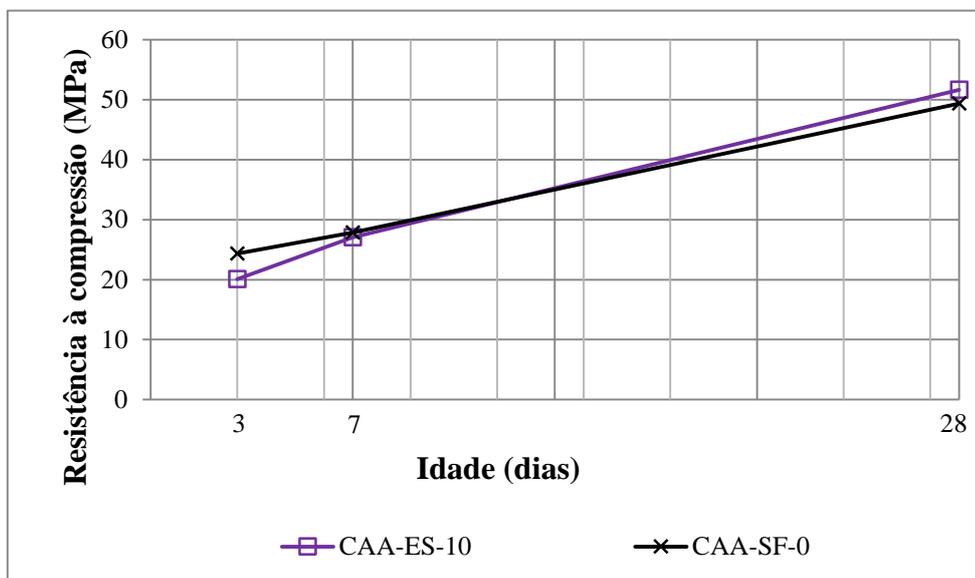
Fonte: Próprio autor.

Os concretos produzidos com rocha fosfática apresentaram resultados muito satisfatórios quanto à autoadensabilidade e quanto à resistência à compressão. A substituição de 10 % de cimento, por rocha fosfática indicou resultados muito próximos do concreto sem adição, CAA-SF-0, reduzindo apenas 10 % na resistência à compressão. Ao substituir 40 % de cimento Portland, a resistência à compressão alcançou 70 % em relação ao concreto sem adições minerais e ainda se mantém autoadensável. Observa-se que é possível produzir CAA alcançando resistências de 35 a 45 MPa, com substituição do cimento por rocha fosfática, nos teores de 10 a 40 %.

O uso da rocha fosfática é justificado devido a sua grande disponibilidade na região do estudo, como uma alternativa, para evitar a busca por minerais em locais distantes. A rocha fosfática em sua composição mineralógica e química é composta basicamente por calcário 48 %, quartzo 17 % e fosfato 25 %, como a estrutura desses compostos é cristalina, não há desenvolvimento de reações químicas para hidratação, seus benefícios são verificados pelo preenchimento dos vazios.

Os resultados da resistência à compressão do concreto, produzido com substituição de cimento por estéril de fosfato, apenas nos teores de 0 e 10 %, nas idades estudadas, estão apresentados na Figura 4-18.

Figura 4-18 - Resistência à compressão para o CAA com estéril de fosfato de 0 a 10 %. - Resistência à compressão para o CAA com estéril de fosfato de 0 a 10 %.



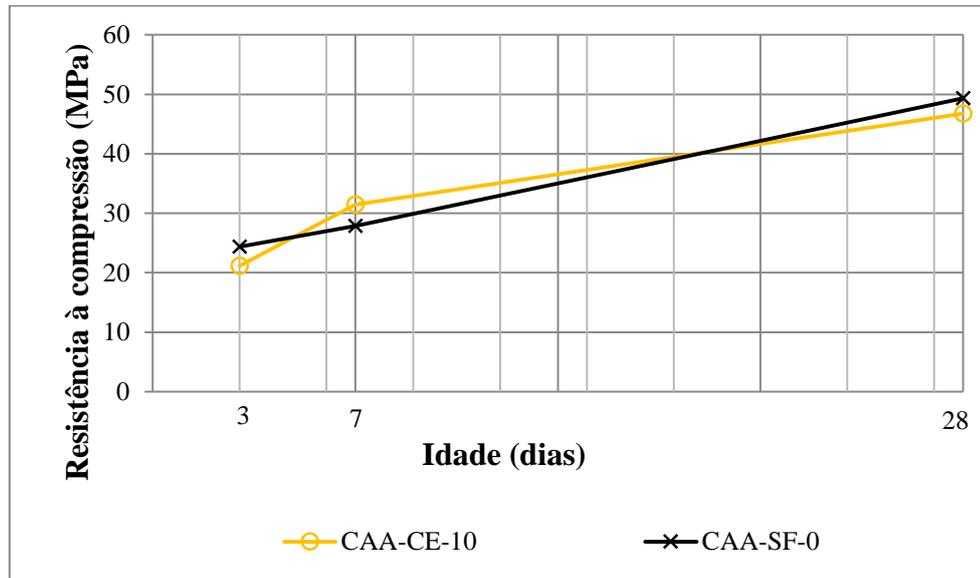
Fonte: Próprio autor.

O concreto com estéril de fosfato apesar de não atender os critérios exigidos quanto à habilidade passante, na ABNT NBR 15823-1 (2010), obteve excelentes resultados quanto à resistência à compressão. Ao substituir o teor de 10 % do consumo de cimento por estéril de fosfato houve uma elevação na resistência à compressão do concreto de 5 % em relação ao concreto sem adição.

O estéril de fosfato apresenta em sua composição mineralógica e química somente fases cristalinas, não reativas, composta basicamente por sílica, ferro e alumínio, sendo possível identificar semelhanças desse material com as argilas. A granulometria do estéril de fosfato apresenta elevada finura, assim, o uso desse material aumenta a demanda de água no concreto para molhagem das suas partículas, não sendo possível atender aos requisitos de autoadensabilidade do concreto. Quanto aos efeitos físicos a finura deste material colabora para um aumento da resistência à compressão do concreto.

Na Figura 4-19 são comparados os resultados para a resistência à compressão do concreto com substituição de cimento por cinza de eucalipto, apenas nos teores de 0 e 10 %, para as idades estudadas.

Figura 4-19 - Resistência à compressão para o CAA com cinza de eucalipto de 0 a 10 %. - Resistência à compressão para o CAA com cinza de eucalipto de 0 a 10 %.



Fonte: Próprio autor.

Devido ao não atendimento aos requisitos exigidos pela ABNT NBR 15823-1 (2010) quanto à habilidade passante, não foram realizados os ensaios para os demais teores de substituição previstos na metodologia. Portanto, a cinza de eucalipto para esta dosagem não pode ser utilizada para fabricação do CAA. No entanto, a substituição de 10 % do consumo de cimento por cinza de eucalipto apresentou resistência à compressão semelhante ao concreto sem adições, CAA-SF-0, em todas as idades estudadas, apresentando uma boa opção para aplicação em concretos convencionais.

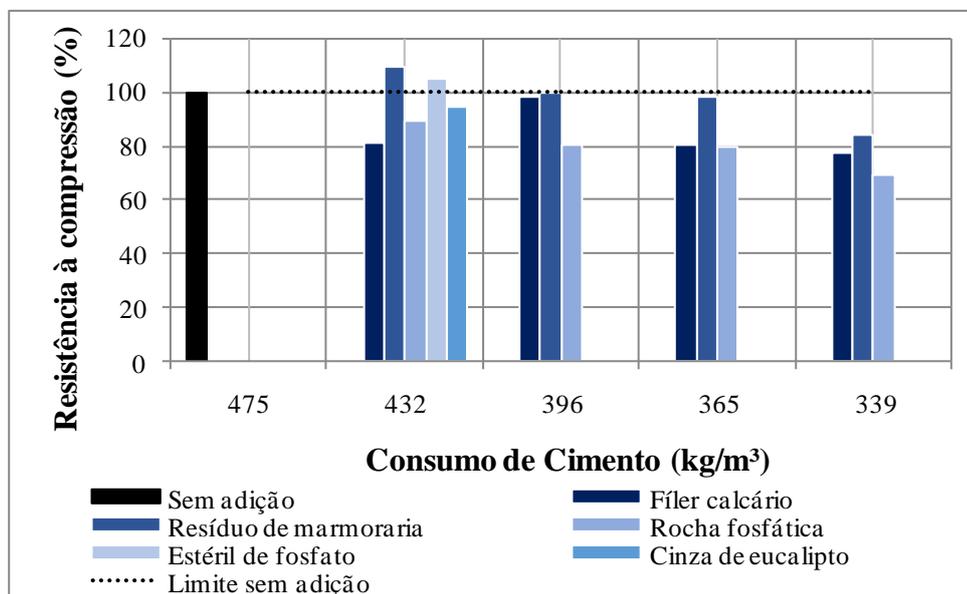
O uso da cinza de eucalipto apresenta como principais vantagens: a redução na utilização do cimento no concreto, cuja fabricação além de muito dispendiosa, emite gases poluentes para a atmosfera; e a destinação sustentável da cinza de eucalipto, evitando o descarte de forma irregular na natureza. A cinza de eucalipto é composta, majoritariamente por 70 % de óxido de cálcio e 11 % de óxido de potássio, apresentando sua estrutura química cristalina, podendo contribuir com seu efeito físico e o empacotamento das partículas.

#### 4.2.1.3 *Resumo da resistência à compressão dos concretos para diferentes consumos de cimento*

Na Figura 4-20 foi apresentado o resumo dos resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos autoadensáveis em relação ao consumo de cimento. Os resultados foram

comparados entre os concretos sem e com substituições do consumo de cimento por adições minerais.

Figura 4-20 - Resistência à compressão em relação ao consumo de cimento.



Fonte: Próprio autor.

O valor limite da resistência à compressão foi estabelecido na Figura 4-20, para o concreto com maior consumo de cimento entre os demais, sendo de 475 kg/m³ e sem adições. Observa-se que a diminuição no consumo de cimento, devido à substituição por adições, apresenta resultados expressivos, quanto à resistência à compressão, em relação ao tipo e o teor de adição mineral utilizado.

Com a redução do consumo de cimento de 475 kg/m³ para 432 kg/m³ e substituição deste valor por diferentes tipos de adições, o CAA com fíler calcário apresentou o menor resultado quanto à resistência à compressão entre os demais concretos; já o resíduo de marmoraria e o estéril de fosfato apresentaram resultados superiores ao concreto sem adição, em 9% e 5%, respectivamente.

Quando o consumo de cimento foi reduzido de 475 kg/m³ para 396 kg/m³ e substituído o cimento por adições, os concretos com fíler calcário e resíduo de marmoraria obtiveram valores semelhantes ao concreto sem adição, apresentando ótimos resultados para uma redução considerável de cimento.

Na redução do consumo de cimento de 475 kg/m³ para 365 kg/m³ observa-se que o concreto com substituição de resíduo de marmoraria apresenta resultados semelhantes ao concreto sem

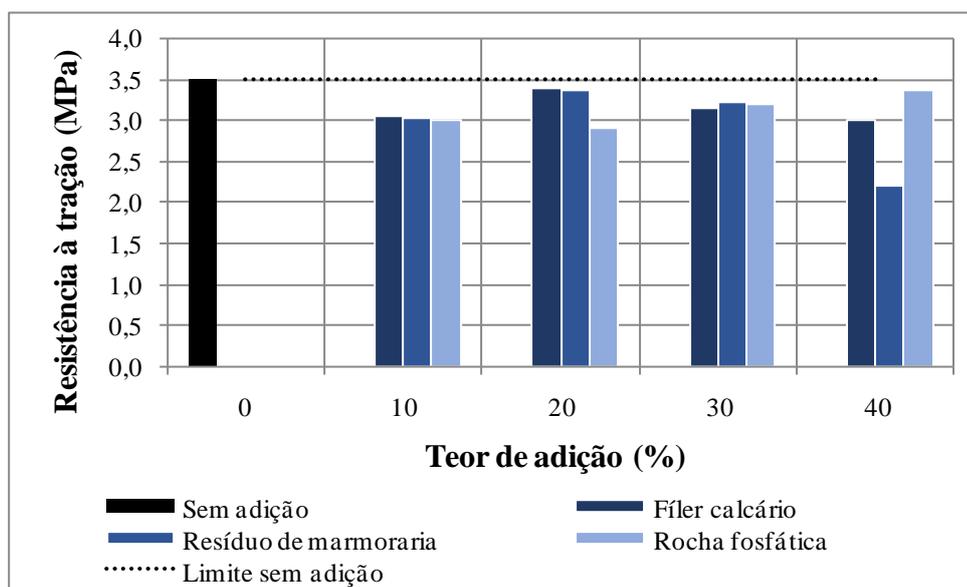
adições. Para os concretos com substituição de fíler calcário e rocha fosfática houve uma queda em relação ao concreto sem adições, mas vale lembrar que foi retirado o cimento Portland, material reativo e responsável pela resistência à compressão e acrescentado adições minerais que apresentam somente efeitos físicos no concreto.

A redução de 475 kg/m<sup>3</sup> para 339 kg/m<sup>3</sup> no consumo de cimento e substituição por adições minerais, apresentou redução na resistência à compressão dos concretos, mas obteve resultados muito satisfatórios, atingindo aproximadamente 80 % da resistência à compressão do concreto sem adições.

#### 4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Neste item são apresentados os resultados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados, aos 28 dias, conforme a ABNT NBR 7222 (2011). Os resultados foram organizados na Figura 4-21.

Figura 4-21 - Resistência à tração para os CAA com adições nos teores de 0 e 40 %, aos 28 dias.



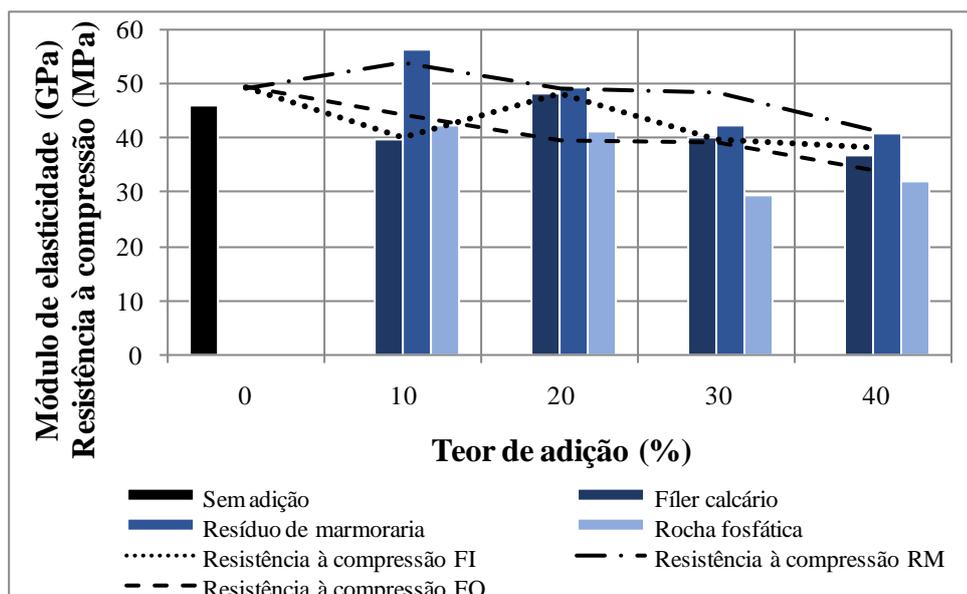
Fonte: Próprio autor.

Para análise dos resultados apresentados na Figura 4-21 foi estabelecido o valor limite para a resistência à tração do concreto sem adições, devido à utilização do maior consumo de cimento entre os demais tipos de concreto, 475 kg/m<sup>3</sup>. Verifica-se, quanto à resistência à tração, que a substituição do consumo de cimento por adições minerais apresenta resultados satisfatórios, pois foi possível reduzir o consumo de cimento em teores de 10 a 40 % e manter os resultados com média geral de 88 % da resistência à tração do concreto sem adição.

### 4.2.3 Módulo de elasticidade à compressão

Os resultados do módulo de elasticidade à compressão dos concretos, ensaiados aos 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 8522 (2008), foram apresentados na Figura 4-22, juntamente com a resistência à compressão.

Figura 4-22 - Módulo de elasticidade e resistência à compressão para os CAA com adições nos teores de 0 e 40 %, aos 28 dias.



Fonte: Próprio autor.

Para comparação da influência dos tipos de adições e seus teores nos concretos autoadensáveis, foi representado na Figura 4-22 tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão dos concretos. Esse ensaio foi executado somente para os concretos que apresentaram resultados satisfatórios quanto aos critérios de autoadensabilidade de acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2010).

Comparando os resultados para o módulo de elasticidade com os resultados de resistência à compressão observa-se a mesma tendência de comportamento. O concreto com fíler calcário apresenta melhor resultado para o teor de 20 % de substituição ao cimento e para os demais teores, apresentam resultados abaixo do concreto sem adição, com valores em média 39 GPa, sem variação significativa. O concreto com resíduo de marmoraria possui melhor resultado para os teores de 10 % e 20 % de substituição e para 30 % e 40 % demonstra resultados abaixo do concreto sem adição, mesmo com alto teor de redução do cimento ainda mostram valores acima de 40 GPa. A rocha fosfática possui todos os resultados abaixo do concreto sem adição, mas para os concretos com 10 % e 20 % atingiram valores acima de 40 GPa.

Ao analisar os gráficos da Figura 4-22 observa-se que os resultados do módulo de elasticidade diminuem com o aumento do teor de adições minerais no concreto, esse comportamento também foi observado por outros autores. Rezende (2016) verificaram um menor valor para o módulo de elasticidade de um CAA em comparação a um CCV, devido à redução da granulometria dos agregados e ao incremento de materiais pulverulentos, adições minerais, na produção do CAA.

Observa-se que é possível utilizar o fíler calcário, o resíduo de marmoraria e a rocha fosfática como adições minerais em CAA. O uso dessas adições apresenta desempenhos satisfatórios quanto aos ensaios de autoadensabilidade, ABNT NBR 15823-1 (2010) e ainda é capaz de obter bons resultados quanto à resistência à compressão e o módulo de elasticidade reduzindo o teor de cimento em até 40 % de substituição.

#### 4.2.4 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

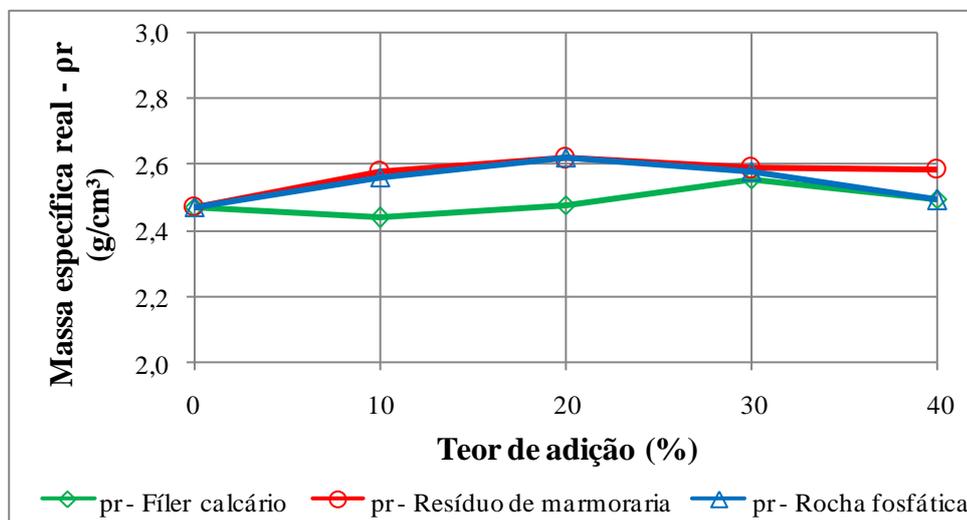
Para determinar os efeitos da substituição de cimento, por diferentes tipos de adições, nas propriedades do CAA de massa específica, absorção de água e índice de vazios, segundo a ABNT NBR 9778 (2005), foram utilizados os corpos de prova, rompidos após o ensaio de tração por compressão diametral, aos 28 dias. Na Tabela 24 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 24 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios em corpos de prova de CAA, aos 28 dias de idade, conforme a ABNT NBR 9778 (2005).

Concreto	Massa da amostra			Massa específica			Absorção (%)	Índice de vazios (%)
	M <sub>s</sub> (g)	M <sub>sat</sub> (g)	M <sub>i</sub> (g)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>sat</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>r</sub> (g/cm <sup>3</sup> )		
CAA-SF-0	3522,9	3711,4	2097,9	2,18	2,30	2,47	5,4	11,7
CAA-FI-10	3576,3	3749,1	2110,3	2,18	2,29	2,44	4,8	10,5
CAA-FI-20	3497,1	3668,0	2087,5	2,21	2,32	2,48	4,9	10,8
CAA-FI-30	3483,5	3667,4	2122,0	2,25	2,37	2,56	5,3	11,9
CAA-FI-40	3552,8	3734,5	2130,4	2,21	2,33	2,50	5,1	11,3
CAA-RM-10	3520,9	3667,2	2156,5	2,33	2,43	2,58	4,2	9,7
CAA-RM-20	3540,3	3678,7	2190,0	2,38	2,47	2,62	3,9	9,3
CAA-RM-30	3498,6	3613,1	2147,9	2,39	2,47	2,59	3,3	7,8
CAA-RM-40	3507,0	3665,2	2151,2	2,32	2,42	2,59	4,5	10,5
CAA-FO-10	3565,0	3749,7	2175,2	2,26	2,38	2,57	5,2	11,7
CAA-FO-20	3494,0	3659,4	2163,4	2,34	2,45	2,63	4,7	11,1
CAA-FO-30	3545,4	3713,6	2172,6	2,30	2,41	2,58	4,7	10,9
CAA-FO-40	3524,6	3753,5	2111,6	2,15	2,29	2,49	6,5	13,9

A partir dos resultados apresentados na Tabela 24, foram construídas as curvas representadas na Figura 4-23 com a relação das massas específicas e dos teores de adições.

Figura 4-23 - Massa específica para os CAA com adições nos teores de 0 a 40 %.



Fonte: Próprio autor.

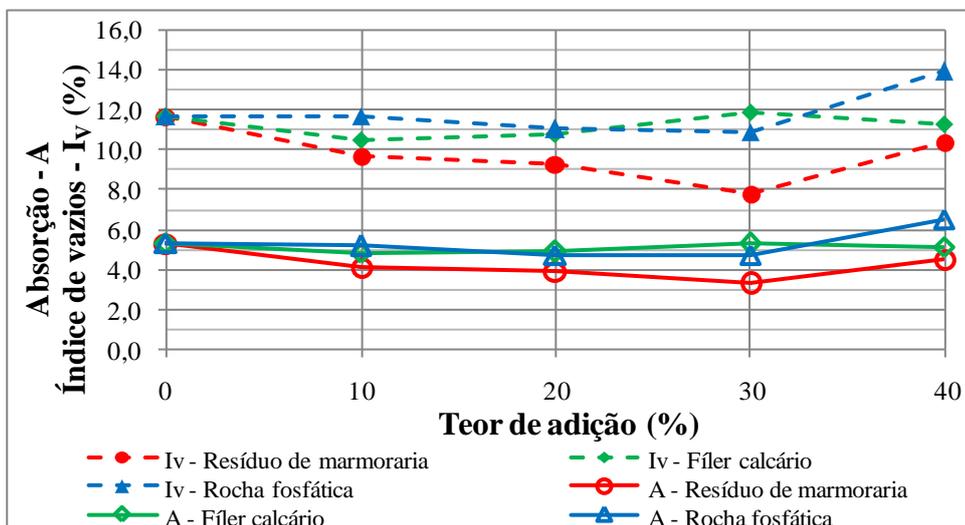
As massas específicas dos concretos, para todos os teores e tipos de adições, Figura 4-23, apresentaram pequenos intervalos de variação, entre 2,4 g/cm<sup>3</sup> e 2,6 g/cm<sup>3</sup>. Para montagem das curvas foi adotado, como ponto de partida, a massa específica do CAA sem adição com o valor de 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Os concretos com adição de fíler calcário, em todos os teores, apresentaram resultados semelhantes ao concreto sem adição.

O CAA com resíduo de marmoraria, em todos os teores de substituição, demonstrou massa específica mais elevada, em torno de 5 % superior ao concreto sem adições. Os concretos com rocha fosfática apresentou semelhanças com os concretos de resíduos de marmoraria, com maiores resultados para os teores de 10 %, 20 % e 30 % de substituição, aos 40 % houve um decréscimo na massa específica.

O estudo da massa específica, do índice de vazios e da absorção do concreto no estado endurecido, é muito importante para auxílio na verificação da eficiência do esqueleto granular. A utilização de partículas mais finas no CAA proporciona adequado empacotamento dos grãos, com melhores resultados nos ensaios no estado fresco e resistência mecânica do concreto no estado endurecido, além do refinamento da estrutura dos poros e preenchimento dos vazios. Assim, quanto menor o índice de vazios maior será a massa específica do material e menor será sua absorção, conseqüentemente, maior a resistência à compressão e durabilidade deste concreto.

Na Figura 4-24 são apresentados os resultados com a influência na absorção (A) e no índice de vazios ( $I_v$ ) devido à substituição do cimento por diferentes teores de adições, 0 a 40 %, nos concretos autoadensáveis.

Figura 4-24 - Absorção (A) e índice de vazios ( $I_v$ ) para os CAA com adições nos teores de 0 a 40 %.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que as curvas representadas na Figura 4-24, para os teores de 10 a 40 % de substituição do cimento por adições, apresentaram para a absorção e o índice de vazios resultados semelhantes em relação ao concreto sem adições.

Com relação a Figura 4-23 e a Figura 4-24 verifica-se que a absorção e o índice de vazios são inversamente proporcionais a massa específica dos concretos, no estado endurecido. O CAA com fíler calcário apresentou resultados, para a absorção e o índice de vazios, com pouca variação em relação ao concreto sem adição, além de certa uniformidade na curva de massa específica.

Para o resíduo de marmoraria verifica-se, com a elevação do teor de adição, o aumento da massa específica, reduzindo assim, a absorção e o índice de vazios. Os resultados da Figura 4-24, mostram que o resíduo de marmoraria possui resultados muito satisfatórios, proporcionando menores valores entre os demais tipos de adição. Pode-se realizar a correlação entre a massa específica e a resistência à compressão, aos 28 dias, sendo que quanto maior a massa específica maior será a resistência à compressão, devido ao menor índice de vazios, proporcionando assim, elevada durabilidade aos concretos com resíduo de marmoraria.

O concreto com rocha fosfática apresenta pouca variação na absorção e no índice de vazios, nos teores de 10, 20 e 30 %, em relação ao CAA sem adição. Em 40 % de substituição verifica-se uma elevação de 21 % na absorção e 19 % no índice de vazios em relação ao CAA sem adição. Logo, o concreto pode ser considerado mais poroso em relação ao demais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa avaliou a viabilidade técnica da produção de um CAA sem adições minerais (referência), e outros cinco tipos de concretos utilizando como adições minerais o fíler calcário, o resíduo de marmoraria, a rocha fosfática, o estéril de fosfato e a cinza de eucalipto, em quatro teores de substituição ao cimento Portland (10, 20, 30 e 40 %).

Conclui-se após análises, que o uso de fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática como adições minerais na produção de CAA, em substituição ao cimento, para os teores adotados, apresenta viabilidade técnica e sustentável. Os concretos estudados além de atender as propriedades de autoadensabilidade, resistência mecânica e características físicas, contribuem com o meio ambiente ao utilizar resíduos industriais e adições minerais disponíveis localmente. Assim, consegue-se reduzir a emissão dos gases do efeito estufa gerados durante as fases de extração, produção e transporte de novos materiais, além de evitar a contaminação do solo e da água com o descarte inadequado dos resíduos gerados.

As adições minerais de estéril de fosfato e cinza de eucalipto não atenderam os requisitos de autoadensabilidade sequer para o menor teor estudado (10 %). Para 10 % de substituição essas adições se mostram como uma alternativa para utilização apenas em CCV, devido a melhoria das propriedades mecânicas apresentadas, a disponibilidade na região do estudo e a vantagem de aproveitamento de materiais que são descartados de forma não controlada no meio ambiente.

A produção de CAA com substituição do consumo de cimento de 475 kg/m<sup>3</sup> para 339 kg/m<sup>3</sup>, por fíler calcário, resíduo de marmoraria e rocha fosfática, atendeu aos requisitos da ABNT NBR 15823-1 (2010), quanto às propriedades de: espalhamento, índice de estabilidade visual, viscosidade aparente, resistência à segregação e habilidade passante, confirmando as expectativas quanto à produção de CAA sustentável. Os diferentes tipos e teores das adições utilizadas modificam as propriedades do CAA no estado fresco, mas não inviabilizam sua aplicação, apenas alteram as classificações por norma.

Os concretos produzidos com substituição do consumo de cimento de 475 kg/m<sup>3</sup> para 432 kg/m<sup>3</sup>, por estéril de fosfato e cinza de eucalipto no teor de 10 %, atenderam aos requisitos da ABNT NBR 15823-1 (2010), quanto às propriedades de: espalhamento, índice de estabilidade visual, viscosidade aparente e resistência à segregação, exceto quanto à habilidade passante. A habilidade passante é uma das principais propriedades do CAA e um parâmetro obrigatório para

sua aceitação. Portanto, os concretos produzidos com estéril de fosfato e cinza de eucalipto não foram aceitos quanto aos critérios de autoadensabilidade, no teor estudado.

Dentre os concretos autoadensáveis o concreto com filer calcário apresentou propriedades satisfatórias quanto à autoadensabilidade, foi identificado nestes concretos: alta estabilidade, maior fluidez, baixa viscosidade e baixa resistência à segregação. Somente para 10 % de substituição houve uma pequena evidência de segregação e exsudação, aumentando a possibilidade de ocorrência de segregação no concreto durante o seu lançamento nas fôrmas. Portanto, antes do lançamento deve ser definido adequadamente a distância a ser percorrida por esse concreto nas fôrmas e o espaçamento entre as armaduras.

Nos concretos com utilização de resíduo de marmoraria identificaram-se melhores propriedades de autoadensabilidade e resistência mecânica, para todos os teores de substituição, apresentando alta estabilidade, menor fluidez, maior viscosidade, maior coesão e maior resistência à segregação. Com o aumento do teor das adições houve uma diminuição na fluidez e na habilidade passante, não prejudicando as propriedades nem alterando as classificações conforme a norma.

Os concretos com adição de rochas fosfáticas apresentaram diferentes propriedades de acordo com as porcentagens de substituição. Para os teores de 10 e 20 %, foi identificada nos concretos alta estabilidade, maior fluidez, maior viscosidade e coesão, maior habilidade passante e maior resistência à segregação. Para os teores de 30 e 40 %, diferencia-se a moderada viscosidade e coesão e a menor habilidade passante, ou seja, o aumento do teor de adição e diminuição do consumo de superplastificante, mantém algumas propriedades (fluidez e resistência à segregação) e altera outras (viscosidade, coesão e habilidade passante). Todos os resultados foram satisfatórios quanto às propriedades de autoadensabilidade.

Os concretos com estéril de fosfato e cinza de eucalipto apresentaram semelhanças em suas propriedades para a substituição de 10 % de cimento, sendo observada alta estabilidade, menor fluidez, maior viscosidade e coesão, ausência de habilidade passante e maior resistência à segregação.

O ensaio realizado para avaliação da viscosidade aparente no funil V e no  $t_{500}$  possui boa correlação nos tempos encontrados, diferenciando apenas no critério de confinamento, o qual aumenta o tempo do funil V. O anel J assim como a caixa L, avalia a habilidade passante dos concretos, esses ensaios também apresentam equivalência nos resultados.

A resistência à compressão atingida pelo concreto referência foi de 49 MPa, aos 28 dias. Observa-se que mesmo com a substituição do cimento por diferentes tipos de adições e em diversos teores, os resultados obtidos foram semelhantes ao concreto de referência. Para o fíler calcário o teor de 20 %, apresentou resistência à compressão de 48 MPa; para o resíduo de marmoraria, os teores de 10 %, 20 % e 30 %, obtiveram respectivamente, 54 MPa, 49 MPa e 48 MPa e a rocha fosfática, com 10 % de substituição atingiu 44 MPa.

Os concretos com 10 % de substituição de cimento, em massa, por estéril de fosfato e cinza de eucalipto atingiram resistências à compressão de, respectivamente, 47 MPa e 52 MPa, aos 28 dias.

A resistência à tração dos concretos autoadensáveis apresentou resultados satisfatórios, pois foi possível reduzir o consumo de cimento, em teores de 10 a 40 %, atingindo resultados com 88 % da resistência à tração do concreto de referência.

Os resultados do módulo de elasticidade e resistência à compressão possuem semelhança no comportamento. Os teores mais adequados das adições no CAA, são verificados com 20 % de fíler calcário, 10 %, 20 % e 30 % de resíduo de marmoraria e 10 % de rocha fosfática.

As massas específicas dos concretos, para todos os teores e tipos de adições, apresentaram pequenos intervalos de variação, entre 2,4 g/cm<sup>3</sup> e 2,6 g/cm<sup>3</sup>. O CAA com resíduo de marmoraria, em todos os teores de substituição, demonstrou massa específica superior ao concreto sem adições, reduzindo assim, a absorção e o índice de vazios destes concretos.

## 5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Sugere-se o estudo das propriedades de durabilidade e microestruturais dos concretos com o intuito de investigar a zona de transição entre a pasta e o agregado e a influência das adições minerais.

## REFERÊNCIAS

- ADEKUNLE, S.; AHMAD, S.; Maslehuddin, M; Al-Gahtani, H. J. Properties of SCC prepared using natural pozzolana and industrial wastes as mineral fillers. *Cement And Concrete Composites*, [s.l.], v. 62, p. 125-133, set. 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.06.001>>. Acesso em: 23 dez. 2016.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. O desafio da sustentabilidade na construção civil. São Paulo: Blucher, 2014. 141 p. (Série Sustentabilidade).
- ALECRIM, S. Fósforo, fosfato e superfosfatos. Mogi das Cruzes: Universidade de Mogi das Cruzes, 2010. 28 p.
- ALTOUBAT, S. et al. Restrained shrinkage behavior of Self-Compacting Concrete containing ground-granulated blast-furnace slag. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 129, p.98-105, dez. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.115>> Acesso em: 27 dez. 2016.
- ALVES, L. S. Influência da adição de fibras de celulose (papel kraft) nas características dos blocos de concreto não estrutural. 2016. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M16-03A-Lilian-Alves.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2016.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 237R-07: Self-Consolidating Concrete. 2007.
- APOLINÁRIO, E. C. de A. Influência da adição do resíduo proveniente do corte de mármore e granito (RCMG) nas propriedades de argamassas de cimento Portland. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador/ BA, 2014.
- ARAÚJO, J. G. Influência das adições minerais e de finos de pedreira nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto-adensável. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA DE CONCRETO – ABCIC. Anuário da ABCIC 2015. São Paulo, 2015. 92 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Guia Básico de utilização do cimento Portland. 9. ed. rev. atual. por Arnaldo Forti Battagin e Hugo da Costa Rodrigues Filho. São Paulo, 2016. 40 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. Imprensa. Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto, ago.2013. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto>>. Acesso em: 2 abr. 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland Composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: Concreto auto-adensável: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: Concreto auto-adensável: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-3: Concreto auto-adensável: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-4: Concreto auto-adensável: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-5: Concreto auto-adensável: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-6: Concreto auto-adensável: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7225 - Cancelada: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: Agregado - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 11-2: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria Parte 2: Método ABNT. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 16: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 22: Cimento Portland com adições de materiais pozzolânicos - Análise química - Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados: Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 47: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

BAN, C. C.; RAMLI, M. The Implementation of Wood Waste Ash as a Partial Cement Replacement Material in the Production of Structural Grade Concrete and Mortar: an overview Resources, Conservation and Recycling, v. 55, n. 7, p.669-685, 2011.

BARBHUIYA, S. Effects of fly ash and dolomite powder on the properties of self-compacting concrete. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 25, n. 8, p.3301-3305, ago. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.018>>.

BARBOSA, M. P. Desenvolvimento normativo do concreto autoadensável - a NBR 15823 revisada. Belo Horizonte, MG, 2016. 48 slides, color. III Seminário sobre pesquisas e obras em concreto autoadensável – 58°CBC. Disponível em: <<http://ibracon.org.br/eventos/58cbc/Palestras/04MonicaBarbosa.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2016.

BARROS, Pedro Gustavo dos Santos. Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto autoadensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito. 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/390>>. Acesso em: 09 fev. 2016.

BLEICHER, L.; SASAKI, J.M. Difração de raios-X em cristais. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, UFC, 2000. 19p. (Notas de Aula).

BONEN, D.; SHAH, S. P. Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete. Progress In Structural Engineering And Materials, [s.l.], v. 7, n. 1, p.14-26, jan. 2005. Wiley-Blackwell. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/pse.186>> Acesso em: 27 dez. 2016.

BOUZOUBAA, N.; LACHEMI, M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash Preliminary results. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 31, p. 413-420, mai. 2001. Elsevier Ltd. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00504-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00504-4)>. Acesso em: 23 dez. 2016.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Coordenadora Marina Marques Dalla Costa et al.; Equipe Técnica por Carlos Antônio Gonçalves de Jesus et al. Anuário Mineral Estadual - Minas Gerais. Brasília: DNPM, 2017. 119 p.: il. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/anuario-mineral-estadual/mg20102014>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

BRASIL<sup>a</sup>. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 292 p. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/balanco-energetico-nacional> >. Acesso em: 17 abr. 2017.

BRASIL<sup>b</sup>. Departamento Nacional de Produção Mineral. Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves. Sumário Mineral - 2015. Brasília: DNPM, 2016. v. 35.135 p.: il. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015/view> >. Acesso em: 21 mar. 2017.

BRASIL<sup>c</sup>. Departamento Nacional de Produção Mineral. INFORME MINERAL: 1º/2016. Brasília: DNPM, 2016. 14 p. Disponível em: <[http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe\\_mineral\\_2\\_2016/view](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe_mineral_2_2016/view)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

BRASIL. K. R. S. Ministério de Minas e Energia. Biomassa. Itajubá: FAPEPE, 2007. 36 p. (Série Energias Renováveis). Disponível em: <[file:///D:/Meus Documentos/Downloads/cartilhas-energias-renovaveis-biomassa.pdf](file:///D:/Meus%20Documentos/Downloads/cartilhas-energias-renovaveis-biomassa.pdf)>. Acesso em: 19 abr. 2017.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 35, n. 11, p.2116-2136, nov. 2005. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.002>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

CAVALCANTI, D. J. H. Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Estrutural, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=34212](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=34212)>. Acesso em: 06 maio 2016.

CHEAH, C. B.; RAMLI, M. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview.

Resources, Conservation & Recycling, [s.l.], v. 55, p. 669-685. fev. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

CHEAH, C. B.; RAMLI, M.. Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 30, p. 320-329, mai. 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.009>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

CHULA, A. M. D. Caracterização mineralógica do minério fosfático da Mina de Tapira - MG. 2004. 322 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8DVH86>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas. Brasília / DF: Ministério do Meio Ambiente, 2014. 111 p.

DACZKO, J. A. Self-Consolidating Concrete Applying What We Know. Nova Iorque. Spon Press, 2012.

DEHWAH, H.A.F.. Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 26, n. 1, p.547-551, jan. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.056>. .> Acesso em: 27 dez. 2016.

DHAHEER, M. S. A.; KULASEGARAM, S.; KARIHALOO, B. L..Simulation of self-compacting concrete flow in the J-ring test using smoothed particle hydrodynamics (SPH). Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 89, p.27-34, nov. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.07.016>. .> Acesso em: 27 dez. 2016.

DINAKAR, P.; BABU, K.G.; SANTHANAM, M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 30, n. 10, p.880-886, nov. 2008. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.011>. .> Acesso em: 27 dez. 2016.

DOMONE, P.L. A Review of the Hardened Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. In: Science Direct, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 2 abr. 2016

ELINWA, A. U.; EJEH, S. P.; MAMUDA, A. M.. Assessing of the fresh concrete properties of self-compacting concrete containing sawdust ash. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 55, v. 22, p. 1178-1182. jun. 2008. Elsevier BV. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.02.004>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

ETIEGNI, L., CAMPBELL, A.G. Physical and chemical characteristics of wood ash. Bioresource Technology, [s.l.], v. 37, n. 2, p. 173-178, 1991. Elsevier BV. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90207-Z](https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90207-Z)> Acesso em: 17 abr. 2017.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. Londres: EFNARC, mai. 2005. 63p. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICAL AND CONCRETE SYSTEMS - EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Londres: EFNARC, fev. 2002. 32p. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

FELEKOGU, B. et al. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 36, p. 1719-1726, set. 2006. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

FOCHS, R. G. Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável. 2011. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Escola de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto: Resíduos Minerais. Eucalyptus Online Book. São Paulo, v. 25, n. 5, out. 2011. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25\\_ResiduosMinerais.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25_ResiduosMinerais.pdf)>. Acesso em 19 abr. 2017.

GOBBI, A. Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares. 2014. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <<http://www.prppg.ufpr.br/ppgecc/wp-content/uploads/2016/files/dissertacoes/d0210.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. São Paulo: PINI, 2009. 165p.

HAFID, H. et al. Effect of particle morphological parameters on sand grains packing properties and rheology of model mortars. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 80, p.44-51, fev. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.002>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

J.MENDO CONSULTORIA<sup>a</sup>. Ministério de Minas e Energia. Perfil do Fosfato. Belo Horizonte: MME, 2009. 55 p. Disponível em: <[http://www.jmendo.com.br/wp-content/uploads/2011/08/P29\\_RT53\\_Perfil\\_do\\_Fosfato.pdf](http://www.jmendo.com.br/wp-content/uploads/2011/08/P29_RT53_Perfil_do_Fosfato.pdf)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

J.MENDO CONSULTORIA<sup>b</sup>. Ministério de Minas e Energia. Perfil de brita para construção civil. Belo Horizonte: MME, 2009. 30 p. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22\\_RT30\\_Perfil\\_de\\_brita\\_para\\_construcao\\_civil.pdf/01c75ac7-eed2-4d85-a127-3ecddecb2a31](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/01c75ac7-eed2-4d85-a127-3ecddecb2a31)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

J.MENDO CONSULTORIA<sup>c</sup>. Ministério de Minas e Energia. Perfil do calcário. Belo Horizonte: MME, 2009. 56 p. Disponível em:

<[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P27\\_RT38\\_Perfil\\_do\\_Calcário.pdf/461b5021-2a80-4b1c-9c90-5ebfc243fb50](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P27_RT38_Perfil_do_Calcário.pdf/461b5021-2a80-4b1c-9c90-5ebfc243fb50)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

J.MENDO CONSULTORIA<sup>d</sup>. Ministério de Minas e Energia. Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento. Belo Horizonte: MME, 2009. 101 p. Disponível em: <[http://www.jmendo.com.br/wp-content/uploads/2011/08/P23\\_RT33\\_Perfil\\_de\\_Rochas\\_Ornamentais\\_e\\_de\\_Revestimento.pdf](http://www.jmendo.com.br/wp-content/uploads/2011/08/P23_RT33_Perfil_de_Rochas_Ornamentais_e_de_Revestimento.pdf)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

KHRAPKO, M. Self Compacting Concrete – a Solution for Technology Hungry Concrete Construction. In: IPENZ, VISION 20/20, 2007, Auckland, New Zealand. Disponível em: <<http://www.cbecon.co.nz/paper.php>>. Acesso em: 25mar. 2016

KUMAYAMA, R. Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore para produção de concreto autoadensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de Poliestireno Expandido (EPS). 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia - Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/111145>>. Acesso em: 09 fev. 2016.

LISBÔA, E. M. Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas. 2004. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil., Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004. Disponível em: <[http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes\\_arquivos/Dissertacoes/EdvaldoMonteiroLisboa.pdf](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec/dissertacoes_arquivos/Dissertacoes/EdvaldoMonteiroLisboa.pdf)>. Acesso em: 17 jul. 2016.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.; GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. Enciclopédia Multimídia de Minerais. Rio Claro, SP. 2003. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/museudpm>> Acesso em: 25 jan. 2017.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003, 311 páginas.

MENDES, M. V. A. da S. Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis. 2016. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília / DF, 2016.

MENOSSE, R. T. Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 782.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. Construction

And Building Materials, [s.l.], v. 49, p.84-92, dez. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.107>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

NEHDI, M.; PARDHAN, M.; KOSHOWSKI, S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 34, n. 11, p.2103-2112, nov. 2004. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.018>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

NEVILLE, A. M. BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto; tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto; tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.

NGO, H. et al. Advanced online water content measurement for self-compacting concrete production in ready-mixed concrete plants. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 112, p.570-580, jun. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.158>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

OUCHI, M. et al. APPLICATIONS OF SELF-COMPACTING CONCRETE IN JAPAN, EUROPE AND THE UNITED STATES. International Sorption Heat Pump Conference, U.s.a, p.1-20, jan. 2003.

PANESAR, D. K.; SHINDMAN, B. The effect of segregation on transport and durability properties of self consolidating concrete. Cement And Concrete Research, [s.l.], v. 42, n. 2, p.252-264, fev. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.011>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

PARRA, C.; VALCUENDE, M.; GÓMEZ, F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 25, n. 1, p.201-207, jan. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

PINHEIRO, D. G. L. Avaliação da atividade pozolânica de cinzas de casca de arroz (CCA) com diferentes teores de sílica amorfa. 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M16-19A-Divino-Pinheiro.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

PIOVEZAM, I. A. R.; MELEIRO, L. P.; ISA, M. M. Resistência à compressão do concreto autoadensável: influência da atividade pozolânica do calcário e do basalto. Ciência & Engenharia, Uberlândia, v. 15, n. 1/2, p. 95-100. 12/2006. Bimestral. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/536>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. – 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RAJAMMA, R.; BALL, R. J.; TARELHO, L. A.C.; ALLEN, G. C.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials.

Journal of Hazardous Materials, [s.l.], v. 172, p. 1049-1060. dez. 2009. Elsevier BV. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

RAMPAZZO, L. Metodologia Científica: para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação. 3ª edição. São Paulo: Edições Loyola, 2005, 141 páginas.

RANJBAR, N. et al. Durability and mechanical properties of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash. Journal Of Cleaner Production, [s.l.], v. 112, p.723-730, jan. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.033>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

RECENA, F. A. P. Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland. 2. ed. rev. ampl. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2011. p. 128. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=IMcGDikhWXAC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=IMcGDikhWXAC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 3 mar. 2016.

RÊGO, J. H. Silva. As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos da microestrutura das pastas. 2004. 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/teses/D04-9A-João-Rêgo.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2016.

RESENDE, D. S. de. Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar. 2013. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Rede Temática em Engenharia de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <[http://www.redemat.ufop.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=973:estudo-do-efeito-da-incorporacao-de-cinzas-de-cavaco-de-eucalipto-como-material-cimenticio-suplementar&catid=73:2013&Itemid=71](http://www.redemat.ufop.br/index.php?option=com_content&view=article&id=973:estudo-do-efeito-da-incorporacao-de-cinzas-de-cavaco-de-eucalipto-como-material-cimenticio-suplementar&catid=73:2013&Itemid=71)>. Acesso em: 09 fev. 2016.

RESENDE, D. R. de; VIEIRA, S. P. Efeitos da substituição de fíler calcário por rocha fosfática na obtenção de concreto autoadensável. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

REZENDE, F. G. de. Influência dos materiais nas propriedades do concreto autoadensável. 2016. 62 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília / DF, 2016.

RILEM. RILEM Technical Committee 174 – SCC. Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art Report of - RILEM TC 174-SCC. Materials and Structures, p.168, 2000.

RILEM. RILEM Technical Committee 288 – MPS. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art. Materials and Structures, p.286, 2014.

ROCHA, E. G. A. Os Resíduos Sólidos de Construção e Demolição: gerenciamento, quantificação e caracterização. Um estudo de caso no Distrito Federal. 2006. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em:

<<http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M06-2A-Eider-Rocha.pdf>>.  
Acesso em: 23 dez. 2016.

SABET, F.; LIBRE, N. A.; SHEKARCHI, M. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 44, p.175-184, jul. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.069>.> Acesso em: 27 dez. 2016.

SADEK, D. M.; EL-ATTAR, M. M.; ALI, H. A.. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 121, p.19-32, maio 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.044>.> Acesso em: 27 dez. 2016.

SALOMOM, K. R.; TIAGO FILHO, G. L. Biomassa. Itajubá, MG: FAPEPE, 2007. 36 p. (Série Energias Renováveis). Disponível em: <<http://cerpch.unifei.edu.br/wp-content/uploads/cartilhas/cartilhas-energias-renovaveis-biomassa.pdf>> Acesso em: 19 abr. 2017.

SANTANA, W. M. S. Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* com enfoque energético. 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009. Disponível em: <<http://www.prgp.ufla.br/ct-madeira/wp-content/uploads/2012/07/Dissertação-MICHELLE-FINAL.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

SU, N.; HSU, K.; CHAI, H. A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement And Concrete Research*, [s.l.], v. 31, n. 12, p.1799-1807, dez. 2001. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00566-x](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00566-x).> Acesso em: 27 dez. 2016.

SU, N.; MIAO, B.. A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content. *Cement And Concrete Composites*, [s.l.], v. 25, p. 215-222, fev. 2003. Elsevier Ltd. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00013-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00013-6)>. Acesso em: 23 dez. 2017.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 130, p.32-40, jan. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.033>.> Acesso em: 27 dez. 2016.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Utilization of coal- and biomass-fired ash in the production of self-consolidating concrete: a literature review. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 100, p.59-76, ago. 2015. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.038>.> Acesso em: 27 dez. 2016.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Utilization of limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete incorporating high volumes of untreated rice husk ash as fine aggregate. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 38, p.455-464, jan. 2013. Elsevier

BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.016>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

SUA-IAM, G.; SOKRAI, P.; MAKUL, N. Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 125, p.1028-1034, out. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.002>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

TATTERSALL, G.H. *Workability and Quality Control of Concrete*. 1. ed. London: E&FN SPON,1991.

TOPÇU, I. B.; UYGUNOGLU, T. Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 24, n. 7, p.1286-1295, jul. 2010. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.007>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

TUTIKIAN, B. ALENCAR, R; BATTAGIN, I. L. S. GIL, A. RISSARDI, C. Novas normas brasileiras para controle e aceitação do concreto autoadensável. *Concreto & Construções*, São Paulo: IBRACON, v. 84, ano XLIV , p.60-67, out. - dez. 2016. Trimestral.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. *Concreto Autoadensável*. 2. ed. São Paulo: PINI, 2015. 144p.

UDOEYO, F. F.; DASHIBIL, P. U. Sawdust Ash as Concrete Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s.l.], v. 14, n. 2, p. 173-176. abr. 2002. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:2\(173\)#sthash.R86faoGR.dpuf](http://dx.doi.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(173)#sthash.R86faoGR.dpuf)>. Acesso em: 17 abr. 2017.

UDOEYO, F.F.; INYANG, H.; YOUNG, D.T.; OPARADU, E.E. Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, [s.l.], v. 18, n. 4, p.605-611. ago. 2006. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:4\(605\)](http://dx.doi.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(605)) - See more at: [http://ascelibrary.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:4\(605\)#sthash.OphkdIIE.dpuf](http://ascelibrary.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(605)#sthash.OphkdIIE.dpuf)>. Acesso em: 17 abr. 2017.

UYGUNOGLU, T.; TOPÇU, I. B.; CELIK, A. G.. Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 84, p.691-700, dez. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.019>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

UYSAL, M.; YILMAZ, K.. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement And Concrete Composites*, [s.l.], v. 33, n. 7, p.771-776, ago. 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005>. > Acesso em: 27 dez. 2016.

VASCONCELLOS, C. B. et al. O aproveitamento da cinza de caldeira na construção civil. *Vértices*, Campos dos Goytacazes/ RJ, v. 6, n. 1, p.131-148, jan. - abr. 2004. Trimestral.

VASCONCELLOS, C. B.; LEAL, C. L. D; FRANÇA, M. P.; CASTRO, P. F. O aproveitamento da cinza de caldeira na construção civil. *Vértices*, Campos dos Goytacazes, RJ, v. 6, n. 1, p.131-148, jan - abr. 2004. Trimestral. Disponível em: <<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20040007>>. Acesso em: 09 fev. 2016.

VASCONCELLOS, L. A. OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO DE FOSFATO DE CÁLCIO COM FIBRAS DE PLGA E ALGINATO DE SÓDIO. 2012. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/75909>>. Acesso em: 25 jan. 2017.

VASKE, N. R. Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto. 2012. 325 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/75712>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

WALLEVIK, Ó. H.; NÍELSSON, I. Proceedings Pro033:3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. 2003. Disponível em: <[http://www.rilem.org/gene/main.php?base=05&id\\_publication=38](http://www.rilem.org/gene/main.php?base=05&id_publication=38)>. Acesso em: 02 abr. 2016.

YAZICI, H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 22, p. 456-462, abr. 2008. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002>>. Acesso em: 23 dez. 2017.

ZHANG, J.; AN, X.; NIE, D. Effect of fine aggregate characteristics on the thresholds of self-compacting paste rheological properties. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 116, p.355-365, jul. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.069>. .> Acesso em: 27 dez. 2016.

Zhu, W.; Gibbs, J.C. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement And Concrete Research*, [s.l.], v. 35, p.1457-1462, ago. 2005. Elsevier BV. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/248357762\\_Use\\_of\\_different\\_limestone\\_and\\_chalk\\_powder\\_in\\_self-compacting\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/248357762_Use_of_different_limestone_and_chalk_powder_in_self-compacting_concrete) > Acesso em: 27 dez. 2016.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS NO ESTADO ENDURECIDO

### A.1 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - ABNT NBR 5739 (2007)

Tipo de adição	Nomenclatura do corpo de prova	Teor de adição (%)	Propriedade / Método de ensaio / Idade																	
			Resistência à compressão				Média	Desvio padrão	Resistência à compressão				Média	Desvio padrão	Resistência à compressão				Média	Desvio padrão
			NBR 5739 (2007)						NBR 5739 (2007)						NBR 5739 (2007)					
			3 dias						7 dias						28 dias					
Sem adição	CAA-SF-0	0	22,3	26,4			24,4	2,9	28,5	27,2			27,9	0,9	48,0	50,7			49,4	1,9
Fíler calcário	CAA-FI-10	10	17,6	20,1			18,9	1,8	23,4	25,6	24,4		24,5	1,1	39,1	41,3			40,2	1,6
	CAA-FI-20	20	22,8	20,3	27,3		23,5	3,5	26,5	27,1	32,6		28,7	3,4	45,7	51,1			48,4	3,8
	CAA-FI-30	30	19,6	19,7			19,7	0,1	19,9	22,2	22,0		21,4	1,3	40,4	38,9			39,7	1,1
	CAA-FI-40	40	13,9	13,4	14,5		13,9	0,6	17,3	18,2			17,8	0,6	39,2	37,3			38,3	1,3
Resíduo de marmoraria	CAA-RM-10	10	28,6	20,8	25,7		25,0	3,9	31,7	30,5	30,0		30,7	0,9	52,5	52,2	55,6	55,8	54,0	1,9
	CAA-RM-20	20	26,2	30,1	25,7	25,8	27,0	2,1	31,0	28,6	29,9		29,8	1,2	47,7	49,0	51,1		49,3	1,7
	CAA-RM-30	30	23,0	21,1	22,6	24,0	22,7	1,2	28,0	27,9	31,4		29,1	2,0	52,8	47,0	45,1		48,3	4,0
	CAA-RM-40	40	23,0	21,1	22,8	25,7	23,2	1,9	27,7	24,7	30,2		27,5	2,8	44,7	40,3	39,2	41,3	41,4	2,4
Rocha fosfática	CAA-FO-10	10	20,6	22,4	16,7		19,9	2,9	27,3	24,1			25,7	2,3	40,4	47,3	48,9	42,7	44,8	4,0
	CAA-FO-20	20	18,9	19,1	20,3	20,8	19,8	0,9	29,7	30,6	28,6	29,3	29,6	0,8	34,1	41,1	42,0	41,3	39,6	3,7
	CAA-FO-30	30	14,4	14,0	15,3	14,2	14,5	0,6	17,5	17,7	19,6	19,4	18,6	1,1	44,6	44,5	44,2	31,2	41,1	6,6
	CAA-FO-40	40	16,7	16,4	16,9		16,7	0,3	18,2	16,6			17,4	1,1	31,9	35,4	35,0		34,1	1,9
Estéril de fosfato	CAA-ES-10	10	17,7	22,1	20,5		20,1	2,2	24,7	27,4	29,1		27,1	2,2	53,7	49,6			51,7	2,9
Cinza de eucalipto	CAA-CE-10	10	18,5	25,1	19,9		21,2	3,5	31,9	30,0	32,5		31,5	1,3	47,5	46,0			46,8	1,1

A.2 - MÓDULO DE ELASTICIDADE - ABNT NBR 8522 (2008)

Tipo de adição	Nomenclatura do corpo de prova	Teor de adição (%)	Propriedade / Método de ensaio / Idade				
			Módulo de elasticidade			Média	Desvio padrão
			NBR 8522 (2008)				
			28				
Sem adição	CAA-SF-0	0	42,0	45,7	50,4	46,0	4,2
Fíler calcário	CAA-FI-10	10	42,2	35,9	41,0	39,7	3,3
	CAA-FI-20	20	47,0	49,8	47,6	48,1	1,5
	CAA-FI-30	30	40,8	40,6	39,1	40,2	0,9
	CAA-FI-40	40	35,0	38,1	37,5	36,9	1,6
Resíduo de marmoraria	CAA-RM-10	10	58,2	58,4	52,5	56,4	3,4
	CAA-RM-20	20	49,3	47,8	51,2	49,4	1,7
	CAA-RM-30	30	44,0	43,7	39,6	42,4	2,5
	CAA-RM-40	40	41,6	36,7	44,1	40,8	3,8
Rocha fosfática	CAA-FO-10	10	43,4	42,9	40,8	42,4	1,4
	CAA-FO-20	20	39,6	44,7	39,2	41,2	3,1
	CAA-FO-30	30	30,0	29,1	29,6	29,6	0,5
	CAA-FO-40	40	34,2	30,9	31,0	32,0	1,9
Estéril de fosfato	CAA-ES-10	10					
Cinza de eucalipto	CAA-CE-10	10					

A.3 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - ABNT NBR 7222 (2011)

Tipo de adição	Nomenclatura do corpo de prova	Teor de adição (%)	Propriedade / Método de ensaio / Idade				
			Resistência à tração por compressão diametral			Média	Desvio padrão
			NBR 7222 (2011)				
			28				
Sem adição	CAA-SF-0	0	3,7	3,3		3,5	0,3
Fíler calcário	CAA-FI-10	10	2,9	3,2		3,1	0,2
	CAA-FI-20	20	3,6	3,2		3,4	0,3
	CAA-FI-30	30	3,4	2,9		3,2	0,4
	CAA-FI-40	40	3,1	2,9		3,0	0,1
Resíduo de marmoraria	CAA-RM-10	10	3,1	3,6	2,4	3,0	0,6
	CAA-RM-20	20	3,6	3,8	2,7	3,4	0,6
	CAA-RM-30	30	3,9	2,6	3,2	3,2	0,7
	CAA-RM-40	40	2,2	2,2	2,2	2,2	0,0
Rocha fosfática	CAA-FO-10	10	3,2	2,8		3,0	0,3
	CAA-FO-20	20	2,8	2,5	3,4	2,9	0,5
	CAA-FO-30	30	3,3	3,0	3,3	3,2	0,2
	CAA-FO-40	40	3,5	3,5	3,1	3,4	0,2
Estéril de fosfato	CAA-ES-10	10					
Cinza de eucalipto	CAA-CE-10	10					