

**INFLUÊNCIA DO EMPREGO DE RESÍDUO DA BRITAGEM DE  
GRANITO E DE CINZA DA CASCA DE ARROZ NAS PROPRIEDADES  
REOLÓGICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO**

**LAURA MONTEIRO SOARES CRESPO DE ALVARENGA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE- UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES- RJ  
JANEIRO - 2016**

**INFLUÊNCIA DO EMPREGO DE RESÍDUO DA BRITAGEM DE  
GRANITO E DE CINZA DA CASCA DE ARROZ NAS PROPRIEDADES  
REOLÓGICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO**

**LAURA MONTEIRO SOARES CRESPO DE ALVARENGA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Guilherme Chagas Cordeiro

CAMPOS DOS GOYTACAZES- RJ

JANEIRO - 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

34/2016

Alvarenga, Laura

Monteiro Soares Crespo de

Influência do emprego de resíduo da britagem de granito e de cinza da casca de arroz nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto / Laura Monteiro Soares Crespo de Alvarenga. – Campos dos Goytacazes, 2016.

xii, 99 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2016.

Orientador: Guilherme Chagas Cordeiro.

Área de concentração: Materiais e tecnologias não convencionais.

Bibliografia: f. 94 a 99.

1. CONCRETO 2. AGREGADOS (MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO)  
3. REOLOGIA I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de  
Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD

620.136

**INFLUÊNCIA DO EMPREGO DE RESÍDUO DA BRITAGEM DE  
GRANITO E DE CINZA DA CASCA DE ARROZ NAS PROPRIEDADES  
REOLÓGICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO**

**LAURA MONTEIRO SOARES CRESPO DE ALVARENGA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Aprovada em 21 de janeiro de 2016.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Reila Vargas Velasco, D.Sc., UFRJ

---

Prof<sup>a</sup>. Camila Aparecida Abelha Rocha, D.Sc., UENF

---

Prof. Gustavo de Castro Xavier, D.Sc., UENF

---

Prof. Guilherme Chagas Cordeiro, D.Sc., UENF

## **Agradecimentos**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por ter me permitido finalizar este trabalho, do qual pensei inúmeras vezes em desistir, dado o peso de tudo que o envolveu.

Agradeço aos meus amigos Ana Paula, Fernando e Caroline que estiveram ao meu lado desde o início de tudo.

Agradeço aos demais amigos que me deram apoio mesmo estando fisicamente mais distantes: Amanda, Thiago e Jullian.

Agradeço à Camila, por ter me ajudado bastante na parte final do trabalho e também por ter concordado em participar da banca, assim como os professores Reila e Gustavo.

Agradeço também aos meus familiares e ao professor Guilherme.

Agradeço especialmente ao meu irmão Bernardo e ao meu noivo Fabricio, porque sem a força braçal desses homens nunca teria conseguido produzir os concretos e também não teria o afeto e compreensão que tive para manter o equilíbrio emocional durante todo o tempo do trabalho.

Laura Crespo.

## Resumo

A presente pesquisa de mestrado apresentou por objetivo principal a avaliação da influência do emprego da areia da britagem de granito (ABG) e de cinza da casca do arroz (CCA) nas propriedades reológicas e mecânicas de concretos. A CCA substituiu parcialmente o cimento Portland no teor de 20%, em volume. A ABG, por sua vez, substituiu parcialmente o agregado natural (areia quartzosa de rio) nos teores de 10, 30 e 50%, em volume. O teor de cinza foi definido previamente por meio de testes em pastas, com substituições de 10, 15 e 20%, em volume, do cimento. Os resultados mostraram que não houve diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) entre os valores de resistência à compressão das diferentes pastas. Desta forma, optou-se pelo teor de 20% de CCA, que apresentou propriedades reológicas mais adequadas ao emprego em concreto. Em seguida, argamassas foram produzidas com 20% de CCA em substituição ao cimento e teores variáveis (10, 30 e 50%, em volume) de substituição de areia natural por ABG. Nesse caso, também não houve diferenças significativas entre os valores de resistência à compressão das argamassas contendo ABG, em relação à argamassa de referência. Os mesmos teores de substituição de cimento e areia por CCA e ABG, respectivamente, previamente avaliados nas argamassas, foram utilizados em concretos, que foram avaliados em ensaios reológicos, físicos e mecânicos. Os resultados indicaram a possibilidade de emprego de 50% de substituição de areia natural por ABG e de 20% de cimento por CCA sem alterações expressivas na reologia e nas propriedades mecânicas de um concreto de 50 MPa de resistência aos 28 dias de cura.

## **Abstract**

This master research had as the main objective to evaluate the influence of using of crushed granite sand (ABG) and rice husk ash (CCA) on the rheological and mechanical properties of concrete. The CCA was used as partial replacement of Portland cement in 20% by volume. The natural sand was replaced by 10, 30 and 50% (by volume) of ABG. The ash content was previously determined based on experimental tests in cement-based pastes containing 10, 15 and 20% of CCA. The results showed no significant differences ( $p < 0.05$ ) in compressive strength values of the different pastes. Thus, the 20% CCA was selected to be used in concrete due to more adequate rheological properties. Then, mortars were produced with 20% RHA and different ABG contents (10, 30 and 50% by volume). In this case, there were no significant differences in compressive strength of all mortars containing ABG in comparison with reference mortar. Same cement and sand replacement contents of the mortars were used in concrete mixtures, which were evaluated in rheological, physical and mechanical tests. The results indicated the possibility of using 50% ABG and 20% CCA with no significant changes in rheology and mechanical properties of 50 MPa-strength concrete after 28 days of curing.

# Índice

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de símbolos, siglas e abreviaturas.....	14
1. Introdução.....	17
1.1. Objetivos.....	20
1.1 Justificativas.....	20
2. Revisão Bibliográfica.....	22
2.1 Adições minerais.....	22
2.2 Agregados naturais e artificiais.....	27
2.3 Reologia de sistemas cimentícios.....	31
3. Programa Experimental.....	38
3.1 Caracterização dos materiais.....	38
3.1.1 Cimento Portland.....	38
3.1.2 Cinza da casca do arroz.....	39
3.1.3 Agregados.....	42
3.1.4 Aditivo superplastificante.....	50
3.1.5 Água.....	50
3.2 Ensaio em pastas.....	50
3.3 Ensaio em argamassas.....	58
3.4 Ensaio em concretos.....	63
3.4.1 Dosagem.....	63
3.4.2 Procedimento de mistura e caracterização no estado fresco.....	65
3.4.3 Caracterização no estado endurecido.....	70
4. Resultados.....	73
1.1. Propriedades das pastas.....	73
1.2. Propriedades das argamassas.....	79

1.3. Propriedades dos concretos .....	82
5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....	92
Referências .....	95

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Microscopia eletrônica de varredura da cinza da casca do arroz com destaque para a superfície específica extremamente elevada (ampliação de 400 X; CORDEIRO, 2006).....	18
Figura 2.1: Aspecto dos diferentes agregados utilizados por DONZA <i>et al.</i> (2002): areia natural (a), granito (b), calcário (c) e dolomito (d). ....	29
Figura 2.2: Representação gráfica do Modelo de Bingham. ....	32
Figura 3.1: Difratoograma de raios X da CCA. ....	40
Figura 3.2: Composição granulométrica da CCA. ....	41
Figura 3.3: Valores de condutividade elétrica da solução de hidróxido de cálcio e CCA durante os primeiros vinte minutos de ensaio.....	42
Figura 3.4: Planta de britagem da Pedreira Itaoca (a) detalhes do britador com suas correias transportadoras (b) e do sistema de peneiramento (c). ....	43
Figura 3.5: Pilha alongada utilizada para o quartejamento da ABG.....	44
Figura 3.6: Composição granulométrica dos agregados. ....	45
Figura 3.7: Areia natural (a), areia de britagem (b), imagem bicolor da areia natural (c) e imagem bicolor da areia de britagem (d).....	46
Figura 3.8: Cilindro padrão do ensaio de compacidade por vibração e adensamento (a) e aspecto da brita (b), do resíduo de britagem (c) e da areia (d), após término do ensaio.....	49
Figura 3.9: Misturador de bancada (a), misturador em operação (b), aparato para o ensaio de Kantro (c) e medição do espalhamento da pasta (d). ....	52
Figura 3.10: Viscosímetro Brookfield modelo DV3TRV.....	53
Figura 3.11: Curvas representativas da evolução da tensão de cisalhamento em pastas de cimento para hastes tipo cilindros concêntricos e Vane (velocidade de rotação de 0,01 rad/s e $a/c = 0,30$ ) - adaptado de Saak <i>et al.</i> (2001). ....	54
Figura 3.12: Programação empregada para as pastas. ....	55
Figura 3.13: Moldes de PVC (a), moldes preenchidos com pasta (b) e corpos de prova em cura (c). ....	57
Figura 3.14: Vista frontal da máquina universal de testes do LECIV/UENF (a), corpo de prova a ser rompido com destaque para a rótula de aço (b), corpo de prova em processo de ruptura (c). ....	58

Figura 3.15: Aparato para ensaio de espalhamento na mesa de consistência normal (a) e medição do espalhamento de uma das argamassas da primeira etapa (b).....	59
Figura 3.16: Vista superior de uma das argamassas da segunda etapa após espalhamento (a) e detalhe da mesma argamassa (b).....	60
Figura 3.17: Aspecto físico das argamassas logo após moldagem.....	61
Figura 3.18: Processo de preparação de amostra (a) e detalhe do maquinário de preparação (b).....	62
Figura 3.19: Corpo de prova de argamassa em compressão. ....	63
Figura 3.20: Detalhe interno do misturador (a) e aspecto final do concreto recém-misturado após retirada do misturador (b). ....	66
Figura 3.21: Ensaio de abatimento do tronco de cone em um dos concretos (a) e corpos de prova recém-moldados (b).....	67
Figura 3.22: Corpos de prova em cura.....	67
Figura 3.23: Reômetro BTRHEOM do Labest/COPPE/UFRJ. ....	68
Figura 3.24: Mistura na betoneira (a) dentro do reômetro (b) e dentro do aparato para ensaio de ar incorporado (c). ....	69
Figura 3.25: Ensaio de resistência à compressão (a), de resistência à tração por compressão diametral (b) e índices físicos (c). ....	70
Figura 4.1: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da primeira etapa aos 10 min.....	74
Figura 4.2: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da primeira etapa aos 30 min.....	75
Figura 4.3: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da segunda etapa aos 10 min.....	77
Figura 4.4: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da segunda etapa aos 30 min.....	78
Figura 4.5: Resistências médias das diferentes misturas de pastas da segunda etapa. ....	79
Figura 4.6: Resistências médias das diferentes misturas de argamassas da segunda etapa. ....	81
Figura 4.7: Valores de reologia e curvas de ajuste (Modelo Herschel-Bulkley) das misturas C-REF, C-ABG-50 e C-ABG-50SC.....	82
Figura 4.8: Valores de reologia e curvas de ajuste (Modelo Herschel-Bulkley) das misturas C-REF, C-ABG-10, C-ABG-30 e C-ABG-50. ....	84

Figura 4.9: Resistências médias das misturas iniciais de concretos. ....	87
Figura 4.10: Resistências médias dos demais concretos.....	88
Figura 4.11: Curvas típicas tensão <i>versus</i> deformação dos diferentes concretos.....	89
Figura 4.12: Resistências médias à tração por compressão diametral dos diferentes concretos.....	90
Figura 4.13: Aspecto interno de um dos concretos após ruptura por compressão (a), detalhe do cone formado após essa ruptura (b), aspecto interno do mesmo concreto (c) e fratura formada após ensaio de tração por compressão diametral em um dos concretos (d). ....	91

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Proporções das misturas (adaptado de MEMON <i>et al.</i> , 2011). .....	25
Tabela 2.2: Detalhes das misturas de CAA's (adaptado de SAFIUDDIN <i>et al.</i> , 2012). .....	27
Tabela 3.1: Composição de óxidos e perda ao fogo do CP V ARI. ....	38
Tabela 3.2: Composição de óxidos e perda ao fogo da CCA.....	40
Tabela 3.3: Parâmetros de forma da areia natural e da ABG segundo o programa Image J. ....	47
Tabela 3.4: Dosagens das pastas da primeira etapa. ....	50
Tabela 3.5: Dosagens das pastas da segunda etapa. ....	51
Tabela 3.6: Dosagens das argamassas da primeira etapa. ....	59
Tabela 3.7: Dosagens das argamassas da segunda etapa. ....	60
Tabela 3.8: Dosagens dos diferentes concretos. ....	65
Tabela 4.1: Dosagens e espalhamentos das pastas da primeira etapa. ....	73
Tabela 4.2: Dosagens e espalhamentos das pastas da segunda etapa. ....	74
Tabela 4.3: Propriedades reológicas das pastas da primeira etapa.....	76
Tabela 4.4: Propriedades reológicas das pastas da segunda etapa. ....	78
Tabela 4.5: Dosagens e espalhamentos das argamassas da primeira etapa. ....	80
Tabela 4.6: Dosagens e espalhamentos das argamassas da segunda etapa. ....	81
Tabela 4.7: Propriedades dos concretos C-REF, C-ABG-50 e C-ABG-50SC no estado fresco.....	83
Tabela 4.8: Propriedades dos concretos C-REF, C-ABG-10, C-ABG-30 e C-ABG-50 no estado fresco.....	85
Tabela 4.9: Índices físicos dos diferentes concretos. ....	86
Tabela 4.10: Propriedades mecânicas dos diferentes concretos. ....	86

## **Lista de símbolos, siglas e abreviaturas**

ACI: *American Concrete Institute*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

ABG: Areia de britagem de granito

A-REF: argamassa contendo cinza da casca do arroz, sem qualquer teor de areia de britagem de granito e consistência fixa

A-ABG-10: argamassa contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 10% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e consistência fixa

A-ABG-30: argamassa contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 30% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e consistência fixa

A-ABG-50: argamassa contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 50% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e consistência fixa

A-ABG-10SC: argamassa contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 10% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e teor de superplastificante idêntico ao da argamassa A-REF

A-ABG-30SC: argamassa contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 30% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e teor de superplastificante idêntico ao da argamassa A-REF

A-ABG-50SC: argamassa contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 50% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e teor de superplastificante idêntico ao da argamassa A-REF

BS: *British Standard*

CP V ARI: Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial

CCA: Cinza da casca do arroz

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CAA: Concreto autoadensável

C-REF: concreto contendo cinza da casca do arroz sem qualquer teor de areia de britagem de granito e consistência fixa

C-ABG-10: concreto contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 10% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e consistência fixa

C-ABG-30: concreto contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 30% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e consistência fixa

C-ABG-50: concreto contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 50% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e consistência fixa

C-ABG-50SC: concreto contendo cinza da casca do arroz, com substituição de 50% em volume do agregado miúdo natural por areia de britagem de granito e teor de superplastificante idêntico ao concreto C-REF

SiO<sub>2</sub>: dióxido de silício

Ca(OH)<sub>2</sub>: hidróxido de cálcio

m<sub>sat</sub>: massa da amostra saturada

m<sub>s</sub>: massa da amostra seca

m<sub>sub</sub>: massa da amostra submersa

MEC: Método do Empacotamento Compressível

CaO: óxido de cálcio

K<sub>2</sub>O: óxido de potássio

TiO<sub>2</sub>: óxido de titânio

P-REF: pasta sem qualquer substituição de cimento Portland por cinza da casca do arroz e com consistência fixa

P-CCA-10: pasta com substituição de 10% de cimento Portland em volume por cinza da casca do arroz e com consistência fixa

P-CCA-15: pasta com substituição de 15% de cimento Portland em volume por cinza da casca do arroz e com consistência fixa

P-CCA-20: pasta com substituição de 20% de cimento Portland em volume por cinza da casca do arroz e com consistência fixa

P-CCA-10SC: pasta com substituição de 10% de cimento Portland em volume por cinza da casca do arroz e teor de superplastificante idêntico ao da pasta P-REF

P-CCA-15SC: pasta com substituição de 15% de cimento Portland em volume por cinza da casca do arroz e teor de superplastificante idêntico ao da pasta P-REF

P-CCA-20SC: pasta com substituição de 20% de cimento Portland em volume por cinza da casca do arroz e teor de superplastificante idêntico ao da pasta P-REF

a/c: relação água/ cimento

a/mc: relação água/ material cimentício

C-S-H: silicato de cálcio hidratado, composto de estequiometria variável

SO<sub>3</sub>: sulfato

$\tau_0$ : tensão cisalhante inicial de escoamento

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: trióxido de alumínio

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: trióxido de ferro

$\mu$ : viscosidade plástica

# 1. Introdução

Nos dias atuais, a carência por matérias-primas naturais e o grande apelo de toda a sociedade pelo emprego de tecnologias ambientalmente amigáveis têm gerado uma grande mudança em muitos setores da economia global, inclusive o da construção civil. Novos materiais e novas tecnologias têm sido utilizados tanto em concretos convencionais como em produtos cimentícios de elevada trabalhabilidade. Estes últimos têm apresentado intensa demanda da construção civil por apresentarem grande trabalhabilidade e pouco risco de segregação, como os concretos mais fluidos e os concretos autoadensáveis, por sua facilidade de manuseio e simplificação de processos como o bombeamento e o adensamento.

Para obtenção dessas misturas de maior trabalhabilidade, a pesquisa científica tem se dedicado expressivamente para aprimorar métodos de dosagem já existentes e também criar novos métodos que considerem o efeito peculiar de novos materiais, como cinzas agroindustriais e areias artificiais, sobre a mistura cimentícia em todos os seus estados.

Particularmente, o emprego de subprodutos agroindustriais, como a cinza da casca do arroz (CCA), como material suplementar ao cimento Portland é um tema bastante atual e de grande relevância nas pesquisas a respeito de sistemas cimentícios (CORDEIRO *et al.*, 2009; MEMON *et al.*, 2011; SAFIUDDIN *et al.*, 2011; LE, 2014). Igualmente, tem merecido destaque as pesquisas envolvendo a substituição de agregados naturais, como a areia quartzosa de rio, por areias artificiais, como a areia de britagem, em concretos, argamassas e pastas cimentícias (DONZA *et al.*, 2002; WESTERHOLM, 2006; RAMAN *et al.*, 2011).

Em ambos os casos, a incorporação desses subprodutos visa não somente vantagens técnicas, como o aumento ou manutenção da resistência mecânica e durabilidade desses sistemas, mas também vantagens ambientais, por conta do aproveitamento de resíduos de processos industriais e/ou agroindustriais e eventualmente econômicas, pela redução do custo do produto final (BINICI *et al.*, 2008; CORDEIRO *et al.*, 2010; HEBHOUB *et al.*, 2011).

A presença desses materiais suplementares causa ainda, uma elevação no teor de finos e conseqüentemente na demanda d'água das misturas, pela adição de

partículas mais finas que o cimento Portland, como é o caso da CCA. Esse fenômeno acarreta em uma mudança no comportamento reológico da mistura, caracterizada principalmente, pelo aumento da viscosidade plástica. O aumento da demanda d'água, em princípio, parece uma grande desvantagem para a produção de concretos, pois uma maior demanda implica em uma diminuição da resistência mecânica. Entretanto, o aumento da viscosidade plástica pode ser interessante, no caso de concretos mais fluidos, como foram os produzidos nesse trabalho, e também os autoadensáveis, uma vez que todos esses apresentam tendência à segregação. O aumento da viscosidade, nesse caso, diminuiria esta tendência. A CCA é uma das pozolanas que mais aumentam a demanda d'água numa mistura cimentícia, por sua elevadíssima superfície específica (ZHANG *et al.*, 1996; GANESAN *et al.*, 2007; MEMON *et al.*, 2011; SAFIUDDIN *et al.*, 2011 ) e estrutura celular (Figura 1.1).

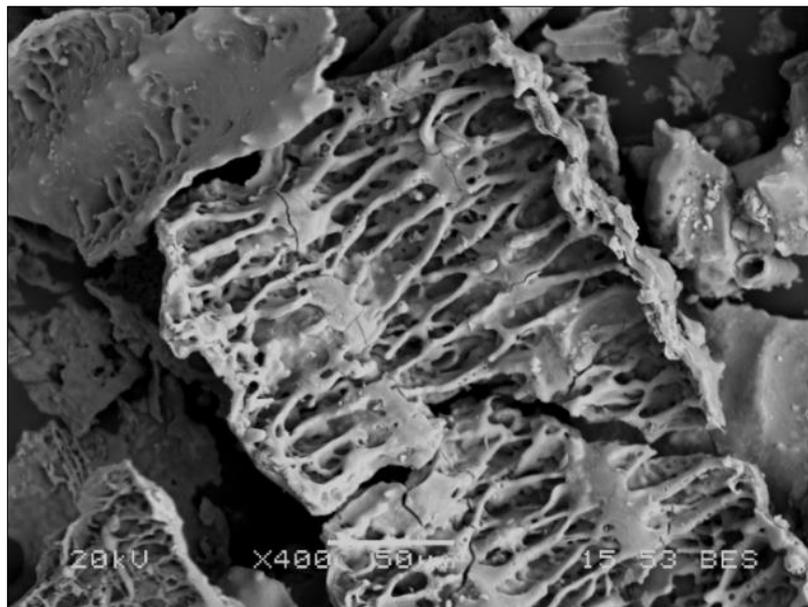


Figura 1.1: Microscopia eletrônica de varredura da cinza da casca do arroz com destaque para a superfície específica extremamente elevada (ampliação de 400 X; CORDEIRO, 2006).

Embora a ação da CCA como pozolana já seja um mecanismo consagrado e bastante divulgado na literatura, nesse trabalho tem-se também grande interesse, principalmente, na forma como esta cinza pode causar alterações nas propriedades reológicas dos sistemas cimentícios. A presença de areias artificiais em concretos,

todavia, sem que haja a formação de uma zona pasta-agregado mais densa, como a que pode ser obtida pelo emprego de uma pozolana como a CCA, pode comprometer em certo ponto algumas de suas propriedades no estado endurecido, como a resistência à compressão. Nesse caso, o emprego desta cinza poderia garantir também a manutenção destas propriedades (RAMAN *et al.*, 2011).

No tocante à areia de britagem, diz-se que esta corresponde ao resíduo oriundo do processo de beneficiamento de rochas para a produção de agregados graúdos. Essa areia também é conhecida como “finos de britagem”, “areia de brita”, “areia de pedra britada” ou ainda “pó de pedra” e a maior parte de seus grãos é menor que a malha de 4,8 mm (GONÇALVES, 2005). Essa areia é utilizada principalmente na construção de pavimentos asfálticos e em geral, corresponde a menos de 1% da produção total de agregados (HO *et al.*, 2002). Especificamente nesse trabalho, optou-se pelo uso do termo “areia de britagem”, como referência ao agregado miúdo produzido da britagem do granito da Pedreira Itaoca, localizada na cidade de Campos dos Goytacazes, e o qual foi empregado.

Os produtos cimentícios contendo o resíduo de britagem, em geral, requerem maior teor de aditivo superplastificante para que obtenham a mesma fluidez de um concreto comum (DONZA *et al.*, 2002). No entanto, as pesquisas que abordam o emprego desses agregados, como substituição parcial aos agregados naturais, tem concordado que essa substituição possibilita a obtenção de produtos cimentícios que atendem aos requisitos de desempenho de diversas normas, para diversos fins, e pode, inclusive, ser benéfica para a resistência mecânica desses produtos (DONZA *et al.*, 2002; BINICI *et al.*, 2008; HEBHOUB *et al.*, 2011). Além disso, recentemente, em locais onde a areia natural de rio já não se encontra em quantidades tão abundantes, o interesse por esse tipo de agregado como alternativa a essa areia tem aumentado (RAMAN *et al.*, 2011). Alguns países como a Espanha, França, Argélia e Argentina tem experimentado, ultimamente, uma grande redução na disponibilidade de areia natural. Nesses mesmos países, entretanto, a quantidade de resíduo de britagem disponível é bastante grande (MENADI *et al.*, 2009). Em muitos casos, a insuficiência desses agregados naturais em alguns locais leva à importação, gerando elevados custos, por conta de operações de transporte. A ocorrência de tragédias como a recente ruptura da barragem de rejeitos de mineração de Fundão no distrito de Mariana - MG, lançando cerca de 50 milhões de

metros cúbicos de lama na região, também compromete a utilização dos recursos naturais de um rio, nesse caso o Rio Doce. A presença dessa gigantesca quantidade de lama vem causando assoreamento ou acúmulo de sedimentos na calha desse rio, impossibilitando a extração de areia por um período de tempo indeterminado.

## **1.1. Objetivos**

O objetivo principal dessa dissertação é avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland e do agregado miúdo natural (areia quartzosa de rio) por uma CCA e pela areia de britagem de granito (ABG) de uma unidade de britagem, respectivamente, nas propriedades reológicas e mecânicas de concretos.

Para tal, os seguintes objetivos específicos foram realizados:

- produção de pastas com cimento Portland e com cimento e CCA em teores de 10, 15 e 20% de cinza, em volume, para avaliação do efeito da cinza na reologia e propriedades mecânicas das pastas, com faixa de espalhamento no cone de Kantro de  $120 \pm 10$  mm;
- produção de argamassas com 20% de CCA e ABG em teores de 0, 10, 30 e 50%, em volume, para avaliação do efeito da cinza e do resíduo conjuntamente, na reologia e propriedades mecânicas das argamassas, com faixa de espalhamento na mesa de consistência normal de  $250 \pm 10$  mm; e:
- produção de concretos com 20% de CCA e ABG em teores de 0, 10, 30 e 50%, em volume, para avaliação do efeito da cinza e do resíduo conjuntamente, na reologia e propriedades mecânicas de um concreto dosado para uma resistência à compressão, aos 28 dias, de 50 MPa e uma faixa de abatimento do tronco de cone Abrams de  $200 \pm 20$  mm.

## **1.1 Justificativas**

Considerando a grande produção da casca do arroz, em todo o Brasil, o caráter altamente pozolânico da cinza que pode ser obtida a partir desse subproduto, e principalmente a elevada superfície específica desse material, que

gera mudanças expressivas na reologia de sistemas cimentícios, optou-se pelo uso da mesma também nos concretos que serão produzidos nesse trabalho.

O uso da areia de britagem, por sua vez, também é justificável, em misturas de concretos pela atual escassez de agregados naturais em vários países, conforme já apontado. Também no Brasil, tem havido uma crescente demanda por agregados, principalmente na região Sudeste, com a implantação de novas obras públicas.

Dessa forma, é possível que seja dado um destino nobre a todos esses materiais, evitando-se que sejam dispostos diretamente no ambiente. Assim, espera-se que esse trabalho seja mais uma contribuição e incentivo ao uso da CCA e da areia de britagem na obtenção de produtos cimentícios com desempenhos tecnológicos diferenciados.

## 2. Revisão Bibliográfica

Nesta seção são apresentados alguns conceitos de termos importantes, que frequentemente aparecerão na dissertação, bem como uma revisão preliminar sobre o emprego de CCA e de resíduos de britagem em sistemas cimentícios, ilustrado por alguns trabalhos científicos acerca do tema.

### 2.1 Adições minerais

Adições minerais são materiais utilizados em conjunto com o cimento Portland a fim de proporcionar um desempenho tecnológico diferenciado a produtos cimentícios. As pozolanas, portanto, estão incluídas nesta classe de materiais. De acordo com o ACI CT-13 (2013), o termo pozolana refere-se ao material natural ou artificial, silicoso ou silico-aluminoso que, estando numa forma finamente cominuída e em presença de umidade, reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ), a temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentícias.

Dentre as adições minerais conhecidas pode-se destacar as mais comumente empregadas em conjunto com o cimento Portland, a saber: sílica ativa, CCA, argilas calcinadas, escória granulada de alto-forno e cinza volante. Também as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e do capim-elefante vêm apresentando bons resultados para esse emprego, como confirmado por boa parte das pesquisas na área (CORDEIRO, 2006; GANESAN *et al.*, 2007; CHUSILP *et al.*, 2009; SALES, 2012).

O arroz é um importante insumo agrícola gerado no Brasil e no mundo. No Brasil, destaca-se a região Sul, como a maior produtora desse insumo. Segundo dados da CONAB (2015), o Brasil produziu 12,54 milhões de toneladas de arroz na safra 2014/15. Já a casca é o subproduto gerado na produção e beneficiamento do arroz e é composta por cerca de 15-20% de sílica (ISMAIL e WALIUDDIN, 1996). Por meio de queima controlada é possível que esta sílica adquira um caráter pozolânico (JAMES e SUBBA RAO, 1986).

A aplicação da CCA como pozolana em sistemas cimentícios, pelo princípio da atividade pozolânica, visa a geração de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), nas misturas, adicionais aos produzidos na hidratação do cimento devido à reação da sílica amorfa, presente na cinza, com a portlandita ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ), resultante do

processo de hidratação do cimento. Como esse último, é um composto que pouco contribui para a resistência do produto cimentício e é facilmente solubilizado e lixiviado pela água (NEVILLE, 1997), o consumo desse composto através da reação pozolânica e consequente geração de novos silicatos de cálcio hidratados é bastante interessante para a produção de produtos cimentícios de alto desempenho, uma vez que a maior presença do composto C-S-H cria uma estrutura mais resistente e estável.

Além disso, o emprego de adições minerais pode minimizar impactos ambientais por conta do aproveitamento de resíduos, maior preservação de jazidas de argila e calcário, amplamente utilizados na produção de cimento Portland, e redução nas emissões de gás carbônico e outros gases intensificadores do efeito estufa, gerados durante a fabricação do cimento Portland, além das vantagens técnicas e em alguns casos econômicas (CORDEIRO, 2006).

Cordeiro *et al.* (2009) investigaram a influência da substituição parcial do cimento por uma CCA com alto teor de carbono nas propriedades mecânicas e reológicas e na durabilidade de concretos de alto desempenho. Para tal, foram produzidos quatro tipos de concreto: com 0, 10, 15 e 20% de CCA, em substituição parcial, da massa de cimento. Além disso, investigou-se também a influência do tempo de moagem da cinza, na distribuição granulométrica, superfície específica e índice de atividade pozolânica, a fim de potencializar seu desempenho. Após os testes de moagem, optou-se pela cinza moída por 120 min, para a produção dos concretos, por ter apresentado o melhor índice de atividade pozolânica. A análise dos concretos no estado fresco, pelo ensaio do abatimento do tronco de cone, demonstrou ter havido uma importante queda na trabalhabilidade, conforme aumentava-se o teor de CCA. Para a faixa de abatimento estabelecida no trabalho, que foi de  $150 \pm 20$  mm, somente a mistura com 0% de CCA atendeu à faixa, enquanto que as demais apresentaram valores entre 100 e 20 mm de abatimento, sendo o valor de 20 mm, correspondente à mistura com 20% de CCA. Essa queda na trabalhabilidade foi explicada pelo estudo, por conta da elevadíssima superfície específica da cinza, aumentando a demanda d'água e também por conta de seu alto teor de carbono. Vale ressaltar que esses valores foram obtidos enquanto as misturas ainda não haviam sido corrigidas pelo teor adequado de aditivo superplastificante. Uma vez corrigidas, as misturas foram então ensaiadas no

reômetro BTRHEOM (DE LARRARD *et al.*, 1997). Nesse ensaio, o Modelo de Bingham mostrou-se bastante satisfatório para a descrição do comportamento reológico das misturas, com valores de  $R^2$  maiores que 96%. A análise dos parâmetros de Bingham, tensão inicial de escoamento ( $\tau_0$ ) e viscosidade plástica ( $\mu$ ), concluiu que a CCA proporcionou uma queda nos valores desses dois parâmetros, em relação à mistura com 0% de cinza. Para a viscosidade plástica, entretanto, esta queda ocorreu em menores proporções. Já a comparação somente entre as misturas contendo a cinza, revelou não ter havido diferenças expressivas nos valores de ambos os parâmetros. A correção adequada da consistência pelo aditivo superplastificante, nesse caso, proporcionou melhora nas propriedades reológicas das misturas contendo a cinza, quando comparadas à mistura sem cinza. Esse comportamento, segundo o estudo, foi atribuído à presença de partículas ultrafinas e das taxas pasta-agregado, ligeiramente mais altas, que tenderam a reduzir o intertravamento das partículas e a fricção interna. A análise das propriedades no estado endurecido, por sua vez, demonstrou que a cinza ou manteve ou gerou acréscimo na resistência à compressão dos concretos, sendo que a substituição no teor de 20% foi a que apresentou um desempenho superior em todas as idades estudadas. A resistência à tração e o módulo de elasticidade aos 28 dias, por suas vezes, não sofreram mudanças significativas em seus valores, mesmo com a presença da cinza.

Memon *et al.* (2011) trataram da produção de concretos autoadensáveis (CAA's) contendo CCA como agente modificador de viscosidade, objetivando uma redução no custo de produção desses concretos pela incorporação de um resíduo agroindustrial para aumento da viscosidade das misturas. A cinza foi empregada como substituição parcial do cimento Portland, em massa, e as principais variáveis investigadas foram: o teor de CCA, o teor de superplastificante e a relação água/material cimentício ( $a/mc$ ). Os parâmetros mantidos constantes foram as quantidades de cimento, de água e de agregados graúdos e miúdos. A Tabela 2.1 mostra as quantidades dos constituintes das 9 misturas produzidas nesse estudo. A sigla CC refere-se aos concretos de referência (sem CCA), ou concretos-controle, conforme a terminologia do estudo. As siglas 5R e 10R referem-se aos concretos contendo CCA em teores de 5 e 10%, respectivamente, da massa de cimento das misturas. Os números ao lado dessas siglas indicam os teores de aditivo

superplastificante (Sikament NN) em porcentagem da massa total de material cimentício da mistura. Os concretos-controle foram produzidos com um aditivo químico modificador de viscosidade, o Viscocrete-1, empregado em um teor de 2% da massa total de material cimentício.

Tabela 2.1: Proporções das misturas (adaptado de MEMON *et al.*, 2011).

Mistura	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	CCA (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	Sikament NN (%)	Viscocrete-1 (%)	a/mc
CC3,5	200	500	0	875	750	3,5	2	0,4
CC4	200	500	0	875	750	4	2	0,4
CC4,5	200	500	0	875	750	4,5	2	0,4
5R3,5	200	500	25	875	750	3,5	-	0,38
5R4	200	500	25	875	750	4	-	0,38
5R4,5	200	500	25	875	750	4,5	-	0,38
10R3,5	200	500	50	875	750	3,5	-	0,36
10R4	200	500	50	875	750	4	-	0,36
10R4,5	200	500	50	875	750	4,5	-	0,36

Os resultados dos ensaios no estado fresco mostraram que o espalhamento no abatimento, por exemplo, atingiu valores entre 595-795 mm para todas as misturas, exceto para a mistura 10R3,5. Essa faixa está de acordo com o recomendado para concretos autoadensáveis, segundo a norma observada pelo estudo (*Specifications and Guidelines for Self Compacting Concrete* - EFNARC). Os ensaios de caixa “L”, funil “V” e funil “V” para  $T_{5 \text{ min}}$  também indicaram um comportamento adequado dos concretos para que fossem classificados como autoadensáveis, novamente com exceção da mistura 10R3,5, que não alcançou nenhum dos requisitos para esta classificação, por conter um alto teor de CCA, quando comparado ao baixo teor de superplastificante presente, havendo desta forma, um aumento excessivo da viscosidade. No estado endurecido, os concretos contendo CCA e teores adequados do superplastificante apresentaram em geral, resistência à compressão e densidade superiores aos concretos-controle, por conta do melhor empacotamento das partículas e da reação pozolânica da cinza, proporcionando ainda um refinamento do tamanho dos poros e consequente diminuição na absorção de água desses concretos. Quanto ao aspecto de custos, o estudo revelou que o valor necessário para produção de um CAA é 42,47% menor, do que para um concreto convencional, sem essa cinza. Dessa forma, concluiu-se que essa aplicação é viável para redução de custos, além da já citada vantagem ambiental, até certo ponto, pelo aproveitamento desse resíduo.

Safiuddin *et al.* (2011) investigaram a trabalhabilidade de várias misturas de argamassas componentes de CAA's incorporando CCA, quanto a aspectos de: dosagem do aditivo redutor de água, teor de CCA e relação a/mc. Para a análise do grau de fluidez das argamassas, empregou-se um tronco de cone semelhante ao tronco do ensaio de abatimento para concretos, porém numa versão menor. O minicone foi então apoiado em uma placa de acrílico e preenchido com uma única camada de argamassa, sem qualquer compactação. Feito isso, o minicone foi levantado verticalmente e a argamassa então fluiu livremente sobre a placa. Os resultados observados indicaram um aumento no valor do espalhamento das argamassas à medida que se aumentava o teor de aditivo, por conta de sua ação dispersante. Além disso, após o alcance do ponto de saturação do aditivo o aumento dos espalhamentos não foi tão expressivo e sempre ocorria exsudação. Quanto à relação a/mc, observou-se que à medida que se aumentava esta relação, os espalhamentos diminuían seus valores, por conta do menor volume de pasta e maior volume de agregado miúdo, dificultando a dispersão das partículas desse último. Já quanto ao teor de CCA nas misturas, constatou-se uma queda nos valores dos espalhamentos conforme esse era aumentado. Isso foi devido a maior fração de pasta na mistura e ao aumento da superfície específica, principalmente para os teores de CCA acima de 15%, reduzindo a quantidade de água livre da mistura.

Safiuddin *et al.* (2012) também trataram do emprego da CCA em substituição parcial ao cimento Portland, para a produção de CAA's em teores de 0-30%. Os ensaios no estado fresco buscaram revelar os efeitos da variação do teor da cinza e da relação a/mc nas propriedades desses concretos nesse estado. A Tabela 2.2 mostra as proporções das misturas produzidas nesse estudo, onde o número ao lado da letra C refere-se à relação a/mc e o outro número ao lado da sigla CCA indica a porcentagem de substituição do cimento pela cinza, em massa. Os aditivos químicos também foram dosados em porcentagem da massa total de material cimentício das misturas.

Tabela 2.2: Proporções das misturas de CAA's (adaptado de SAFIUDDIN *et al.*, 2012).

Tipo de concreto	a/m c	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	CCA (kg/m <sup>3</sup> )	Água	Aditivo redutor de água (%)	Aditivo inc. de ar (%)
C30CCA0	0,30	846,3	842,2	492,7	0	147,8	0,875	0,026
C30CCA15	0,30	829,9	825,8	418,8	73,9	147,8	1,75	0,047
C30CCA20	0,30	824,4	820,3	394,2	98,5	147,8	2,10	0,056
C35CCA0	0,35	876,1	871,8	422,3	0	147,8	0,70	0,020
C35CCA5	0,35	871,4	867,1	401,2	21,1	147,8	0,875	0,025
C35CCA10	0,35	866,7	862,4	380,1	42,2	147,8	1,05	0,035
C35CCA15	0,35	862,0	857,8	359,0	63,3	147,8	1,40	0,045
C35CCA20	0,35	857,3	853,1	337,8	84,5	147,8	1,75	0,054
C35CCA25	0,35	852,6	848,4	316,7	105,6	147,8	2,10	0,070
C35CCA30	0,35	847,9	843,7	295,6	126,7	147,8	2,45	0,080
C40CCA0	0,40	898,4	894,0	369,5	0	147,8	0,60	0,011
C40CCA15	0,40	886,0	881,7	314,1	55,4	147,8	1,00	0,040
C40CCA20	0,40	881,9	877,6	295,6	73,9	147,8	1,20	0,051

Os resultados dos ensaios realizados apontaram que as habilidades passante e de preenchimento das misturas em geral aumentaram, para relações a/mc menores e teores de CCA até 15%, por conta do teor mais reduzido de agregados nestas misturas e um maior volume de pasta. O tempo de escoamento no ensaio do abatimento do tronco de cone invertido, por sua vez, aumentou para as misturas com relação a/mc mais baixas e teores de CCA mais altos. Isso é atribuído à maior superfície específica da pasta cimentícia, nesses casos, por conta da presença de partículas mais finas que o cimento, representadas pela cinza, com tamanho médio de partícula de 6 µm. A faixa de substituição do cimento pela cinza entre 0-15% foi considerada satisfatória, pelo estudo, para que não houvesse nenhum prejuízo à resistência à segregação dos concretos. Com isso, e ainda com os resultados dos ensaios para avaliação da massa unitária e teor de ar dos concretos, a faixa de CCA de 10-15% foi considerada ótima, segundo o estudo, para substituição parcial do cimento em CAA's.

## 2.2 Agregados naturais e artificiais

De acordo com o ACI CT-13 (2013), agregados são materiais granulares, tais como areia, pedregulho, rocha britada ou concreto britado usados em misturas cimentícias para a produção de concretos e argamassas. Os agregados representam a maior parte da constituição dos concretos, cerca de 60 a 70% do volume desses, e exercem influência na trabalhabilidade, durabilidade, resistência,

propriedades térmicas e densidade do concreto endurecido (ACI CT-13, 2013). Percebe-se que esta definição engloba ambos os tipos de agregados: os naturais e os advindos de processos industriais, também denominados artificiais, como o concreto britado ou resíduo de construção e demolição (RCD) e a rocha britada.

A norma brasileira NBR NM 248 (2003) estabelece a peneira da série normal de 4,8 mm como limite para a divisão dos agregados entre grãos e miúdos, sendo os primeiros, aqueles cujos grãos ficam retidos nessa peneira, mas passam pela peneira de 152 mm e os últimos, aqueles cujos grãos passam pela peneira 4,8 mm, mas ficam retidos na peneira de 0,075 mm. As partículas passantes na peneira 0,075 mm são classificadas como materiais pulverulentos (pó), ou ainda argilas e siltes. Agregados como areias naturais e pedregulhos podem conter siltes e argilas, enquanto que, agregados de rochas britadas podem conter pó do processo de britagem. O pó presente nesses agregados é tipicamente mais grosso e contém menores quantidades de minerais argilosos do que os finos siltosos e argilosos presentes nos agregados naturais. Dessa forma, maiores teores de finos são frequentemente permitidos para materiais britados (SIMS e BROWN, 1997).

Em geral, a qualidade do agregado artificial é inferior à do agregado natural. Sua densidade é menor e sua capacidade de absorver água é bastante grande quando comparada ao agregado natural. Como resultado, é necessária uma dosagem cuidadosa dos constituintes do produto cimentício para obtenção dos requisitos técnicos desejados (BAIRAGI *et al.*, 1990).

Donza *et al.* (2002) desenvolveram um estudo para investigar a influência da forma e textura dos agregados miúdos nas propriedades de concretos de alta resistência, nos estados fresco e endurecido, sendo que dois aspectos específicos foram analisados: o desempenho de areias britadas em relação às areias naturais e o efeito da origem mineralógica destas areias. O agregado grão utilizado em todos os concretos foi granito britado com tamanho máximo de partícula de 16 mm. Os agregados miúdos utilizados foram de quatro diferentes tipos (Figura 2.1), porém com módulos de finura semelhantes.

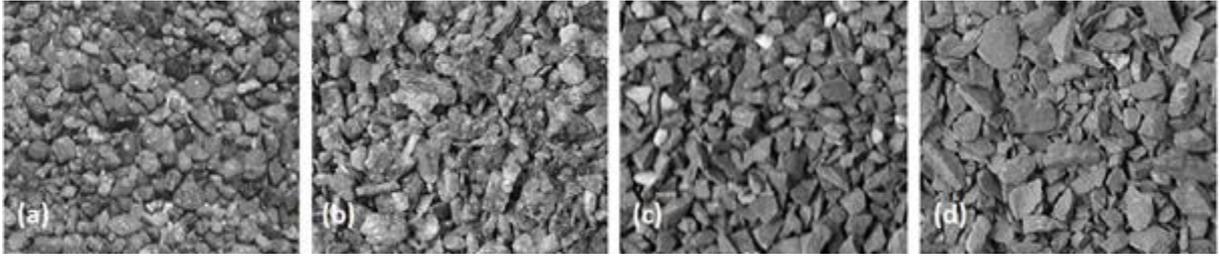


Figura 2.1: Aspecto dos diferentes agregados utilizados por DONZA *et al.* (2002): areia natural (a), granito (b), calcário (c) e dolomito (d).

Em todos os agregados miúdos empregados, neste caso, o teor de pó presente foi maior que o limite de 7% proposto pela norma ASTM C 33 (2013) e menor que o limite de 16% proposto pela norma BS 882 (1992). A areia quartzosa natural de rio foi utilizada para os concretos de referência. Por meio dos ensaios no estado fresco, observou-se que os concretos contendo areia natural e aqueles contendo partículas de granito apresentaram altos valores de abatimento (170-180 mm) e bom acabamento, embora os concretos com granito tenham necessitado de maior teor de aditivo superplastificante para isso. Os concretos contendo partículas de dolomita apresentaram desempenho ruim no estado fresco, com baixo valor de abatimento e nenhuma trabalhabilidade. Isso foi devido à forma mais alongada das partículas de dolomita, que aumentou o teor de vazios na mistura, quando comparada às misturas dos concretos contendo rocha calcária e partículas de granito. No estado endurecido, os concretos contendo partículas de granito apresentaram bom desempenho no ensaio de resistência à compressão, tendo sido, inclusive, comparável ao dos concretos contendo areia natural. Isso foi justificado pela textura mais áspera das partículas de granito, em relação à areia natural, que melhora a interligação entre os agregados e a pasta, potencializando a resistência dessa zona de transição. Dessa forma, com esse estudo, os autores concluíram que é viável a produção de concretos de alta resistência empregando-se partículas de granito e de rocha calcária como agregados miúdos, ao invés da areia natural. As partículas de granito, em especial, demonstraram serem as mais vantajosas para esse propósito.

Binici *et al.* (2008), por sua vez, desenvolveram um estudo a fim de constatar até que ponto o uso de uma combinação de mármore, granito e escória granulada de alto-forno poderia ser uma substituição viável para o agregado convencional e

obtiveram resultados satisfatórios. Durante o estudo, amostras de concretos foram confeccionadas, utilizando-se granito e mármore como agregados graúdos e areia de rio e escória de alto-forno como agregados miúdos. Através dos testes no estado fresco, observou-se, em geral, uma redução nos tempos de início e fim de pega nos concretos contendo mármore e escória e granito e escória. As amostras confeccionadas com granito e escória apresentaram maior demanda pelo aditivo superplastificante, para uma mesma faixa de abatimento, quando comparadas às demais amostras (com mármore e escória, mármore e areia natural e granito e areia natural), por conta do efeito de densificação da interface pasta-agregado. Esse efeito, por sua vez, foi devido à presença das minúsculas partículas de escória, possibilitando o desenvolvimento de uma quantidade adicional do gel de C-S-H. Esse mesmo princípio explicou a queda no teor de ar incorporado e no valor do abatimento, observado para todas as amostras contendo a escória.

Na pesquisa de Raman *et al.* (2011), de forma semelhante ao que foi feito na presente dissertação, investigou-se a possibilidade do emprego do resíduo de britagem de granito em substituição parcial, em massa, a areia natural em concretos de alta resistência, contendo CCA, como substituição parcial ao cimento no teor de 10%, também em massa. Para isso, num estágio inicial, duas classes de concretos foram produzidas: com resistências à compressão esperadas de 60 e 70 MPa, aos 28 dias de cura. Para cada uma destas classes foram produzidos concretos de referência, sem qualquer substituição de cimento por cinza ou de areia por resíduo, denominados pelo estudo como OPC, concretos com 10% de CCA, em massa, e nenhum resíduo de britagem, denominados RHA10 e concretos com 10% de CCA, em massa, e contendo 10, 20, 30 e 40% de resíduo, também em massa, denominados como RHAQ10, RHAQ20, RHAQ30 e RHAQ40, respectivamente. No estado fresco, uma análise dos concretos contendo cinza e resíduo, por meio do ensaio do abatimento do tronco de cone, onde se fixou o valor mínimo de 150 mm de abatimento para todas as misturas, revelou certa queda na trabalhabilidade dos concretos de ambas as classes com a inclusão da cinza e depois também à medida que se aumentava o teor de resíduo de britagem de granito. Esta queda foi explicada pelo maior teor de finos, presente no resíduo, causando aumento na superfície específica das misturas e por consequência na demanda d'água. No estado endurecido, foi observada certa queda na resistência à compressão dos concretos e também no módulo de elasticidade dinâmico dos mesmos, em relação

ao concreto de referência, à medida que o teor de resíduo era aumentado. Isso foi explicado, segundo o estudo, pelo alto teor de partículas de formato laminar, e, portanto, menos resistentes, que eventualmente é encontrado nesses resíduos. Somado a isso, algumas propriedades dos concretos, também são muito sensíveis à qualidade dos agregados empregados. Com esses resultados, o estudo tomou a mistura RHAQ20 para uma análise mais detalhada, por considerar que esta foi a única mistura contendo o resíduo que não apresentou diferenças tão expressivas em relação à referência tanto nas propriedades no estado fresco quanto no estado endurecido. Além disso, foram feitas algumas comparações desta mistura, com uma nova mistura, produzida na fase final da pesquisa, denominada QD20, a qual continha 20% de resíduo de britagem, em massa e nenhum teor de CCA. Desta forma, o estudo concluiu que apesar dos efeitos negativos que podem ser ocasionados pela presença do resíduo de britagem, esses efeitos podem ser amenizados até certo ponto por meio de uma dosagem cuidadosa do aditivo superplastificante e também pela inclusão de uma adição mineral com forte caráter pozolânico, como é o caso da CCA. O uso desses materiais torna assim possível que o resíduo de britagem seja uma opção ao uso do agregado miúdo natural.

### **2.3 Reologia de sistemas cimentícios**

A reologia é descrita como o estudo do fluxo e deformação dos materiais quando esses são submetidos a certa tensão ou solicitação externa. No caso de materiais cimentícios, este estudo não é tão simples, uma vez que o processo de hidratação se inicia tão logo o cimento e a água são misturados (ROUSSEL, 2006). Para esses materiais, a reologia é basicamente definida por dois parâmetros: a tensão cisalhante inicial de escoamento ( $\tau_0$ ) e a viscosidade plástica ( $\mu$ ). O primeiro deles é descrito, na maioria dos trabalhos envolvendo materiais cimentícios (BARNES e NGUYEN, 2001; SAAK *et al.*, 2001; BENAICHA *et al.*, 2015; CELIK e CANAKCI, 2015), como a mínima tensão que deve ser aplicada a um fluido para que seja capaz de iniciar um escoamento. O segundo, por sua vez, é caracterizado como sendo o coeficiente de resistência desse fluido à continuidade do escoamento. Desse modo, quanto maior é esse coeficiente, mais difícil é o escoamento do fluido, ou mais viscoso ele é.

Dentre os modelos matemáticos que buscam descrever o comportamento reológico de sistemas cimentícios, destaca-se o modelo de Bingham.

O Modelo de Bingham (Figura 2.2) é em geral empregado para descrição do comportamento reológico de misturas cimentícias comuns e caracteriza-se pela relação linear entre a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) e a taxa de deformação de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ).

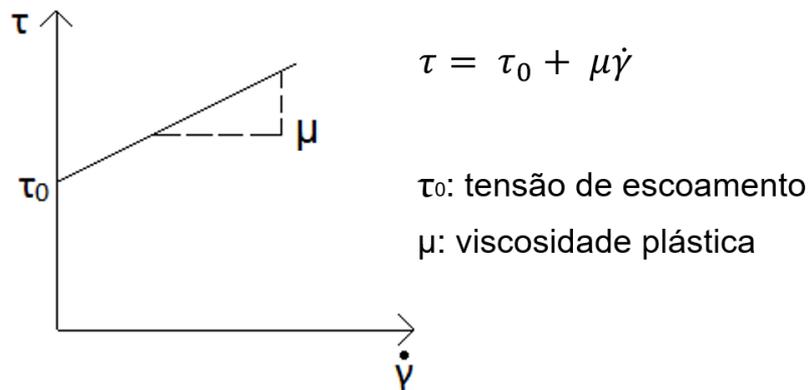


Figura 2.2: Representação gráfica do Modelo de Bingham.

Outro modelo que merece destaque, especialmente no caso de concretos com alta trabalhabilidade e baixo valor de tensão de escoamento, é o Modelo Herschel-Bulkley. Esse modelo é caracterizado por três parâmetros: a tensão de escoamento ( $\tau'_0$ ), a consistência ( $K$ ) e o expoente  $n$  que relaciona, no caso de cisalhamento simples, a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) com a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) pelas Equações 2.1 e 2.2 (NGUYEN *et al.*, 2006).

$$\dot{\gamma} = 0, \text{ se } \tau < \tau'_0 \quad (\text{Equação 2.1})$$

$$\tau = \tau'_0 + K\dot{\gamma}^n, \text{ se } \tau \geq \tau'_0 \quad (\text{Equação 2.2})$$

Quando o valor de  $n$  é igual a um, esse modelo é reduzido ao Modelo de Bingham. Esse último, entretanto, pode subestimar ou até mesmo fornecer valores

negativos da tensão de escoamento no caso de concretos muito fluidos, onde então o Modelo Herschel-Bulkley é mais apropriado (DE LARRARD *et al.*, 1998).

No estudo de De Larrard *et al.* (1996), foram deduzidas expressões para os parâmetros  $\tau_0$  e  $\mu$  através de ensaios no reômetro BTRHEOM (DE LARRARD *et al.*, 1997), o qual também foi utilizado para a caracterização reológica dos concretos desse trabalho. O ensaio nesse reômetro possibilita a obtenção de uma série de valores de torque medidos para diferentes velocidades de rotação pré-estabelecidas (CORDEIRO, 2006). Correlacionando-se esses valores de torque ( $\Gamma$ ) com as velocidades angulares ( $\Omega$ ) através da Equação 2.3, calculam-se os valores de  $\tau_0$  e  $\mu$  pelas Equações 2.4 e 2.5, respectivamente.

$$\Gamma = \Gamma_0 + \frac{\partial \Gamma}{\partial \Omega} \Omega \quad (\text{Equação 2.3})$$

$$\tau_0 = \frac{3\Gamma_0}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$\mu = \frac{2h \frac{\partial \Gamma}{\partial \Omega}}{\pi(R_2^4 - R_1^4)} \quad (\text{Equação 2.5})$$

considerando:

$\Gamma_0$ : coeficiente linear da Equação 2.3;

$\partial \Gamma / \partial \Omega$ : coeficiente angular da Equação 2.3;

$R_2$ : raio externo do reômetro (120 mm);

$R_1$ : raio interno do reômetro (20 mm);

$h$ : altura do reômetro (100 mm).

De Larrard *et al.* (1998) deduziram expressões para os parâmetros  $\tau'_0$  e  $K$ , também através de ensaios no reômetro BTRHEOM. Neste estudo, assim como em algumas outras literaturas, os parâmetros  $K$  e  $n$  são denominados  $a$  e  $b$ ,

respectivamente. A Equação 2.6, proposta em De Larrard *et al.* (1998), busca correlacionar os parâmetros do modelo com parâmetros numéricos equivalentes:

$$\Gamma = \Gamma_0 + AN^b \quad (\text{Equação 2.6})$$

Nesta equação,  $\Gamma$  é o torque medido (valor da pasta cimentícia menos a contribuição do reômetro vazio- De Larrard *et al.* (1996)),  $N$  é a velocidade de rotação do reômetro (rev/s) e  $\Gamma_0$ ,  $A$  e  $b$  são parâmetros numéricos dados pelo Método dos Mínimos Quadrados. De posse desses valores, é possível a obtenção do parâmetro  $\tau'_0$ , através da Equação 2.7 e do parâmetro  $a$  através da Equação 2.8.

$$\tau'_0 = \frac{3\Gamma_0}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (\text{Equação 2.7})$$

$$a = 0,9 \frac{(b+3)}{(2\pi)^{b+1}} \frac{h^b}{(R_2^{b+3} - R_1^{b+3})} A \quad (\text{Equação 2.8})$$

Outra proposta desse trabalho foi correlacionar também os dois modelos discutidos, devido a não-linearidade do Modelo Herschel-Bulkley. Para tal, faz-se a determinação de uma viscosidade plástica equivalente ( $\mu'$ ) através da Equação 2.9, onde  $\dot{\gamma}_{m\acute{a}x}$  representa a máxima taxa de deformação empregada no ensaio.

$$\mu' = \frac{3a}{b+2} \dot{\gamma}_{m\acute{a}x}^{b-1} \quad (\text{Equação 2.9})$$

Cordeiro *et al.* (2012) empregaram o reômetro BTRHEOM para a caracterização no estado fresco de concretos de duas classes de resistência (25 e 60 MPa) contendo uma cinza da casca do arroz com alto teor de carbono, como substituição parcial ao cimento, em um teor de 20% em massa. Ensaio iniciais de abatimento do tronco de cone demonstraram que, para que todos os concretos do

trabalho, que também inclui o emprego da cinza do bagaço de cana (CBCA), alcançassem a mesma faixa de abatimento estabelecida ( $150 \pm 20$  mm), foi necessário um teor bem maior de aditivo superplastificante, para os concretos contendo CCA em relação aos demais, por conta da presença de partículas ultrafinas nesta cinza, aumentando a absorção de água da mistura. Para os ensaios no reômetro, assumiu-se que os concretos no estado fresco apresentavam comportamento de um fluido de Bingham, o que foi considerado posteriormente como uma boa hipótese. Desse ensaio, observou-se uma queda no valor da tensão inicial de escoamento ( $\tau_0$ ) dos concretos com CCA em relação aos concretos de referência (sem qualquer cinza), o que é explicado, segundo o estudo, pelo efeito de lubrificação proporcionado pelo superplastificante. Quanto à viscosidade plástica, houve aumentos nesses valores para os concretos contendo CCA em relação aos concretos de referência, porém tais aumentos não foram considerados expressivos. O estudo apontou também vantagens do emprego da CCA no que concerne às propriedades do concreto no estado endurecido como resistência à compressão e distribuição da rede de poros, reforçando a viabilidade do emprego desta cinza, por sua elevada atividade pozolânica e pela pouca influência exercida por esta nas propriedades reológicas dos concretos, quando do emprego de dosagens adequadas de aditivos do tipo plastificantes/ superplastificantes.

Benaicha *et al.* (2015) avaliaram o efeito de adições minerais como a sílica ativa e o fíler calcário na reologia de pastas cimentícias, utilizando um método alternativo para esta avaliação, denominado como “cone de Marsh acoplado a um canal horizontal em acrílico”. Para uma verificação dos resultados obtidos através do método alternativo, o estudo fez ainda uma determinação mais exata dos parâmetros reológicos com o auxílio de um reômetro Brookfield com haste do tipo Vane medindo 30 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro (relativo à circunferência circunscrita às palhetas). Esse tamanho de haste foi escolhido por abranger uma maior faixa de velocidades. A velocidade estabelecida pelo estudo foi constante e igual a 0,2 rpm, aplicada durante 100 segundos, com coleta linear dos dados. Tal velocidade, ainda segundo o estudo, foi aplicada, por corresponder a um regime de fluxo sob ação exclusiva da gravidade e sem riscos de segregação da mistura. É importante destacar que todas as pastas produzidas no trabalho apresentaram comportamento de fluidos de Bingham. A pesquisa concluiu ainda que

o método alternativo, proposto para avaliação da reologia das pastas, apresentou boa correlação com os dados obtidos no reômetro.

Lomboy *et al.* (2014) investigaram o comportamento reológico de argamassas e concretos autoadensáveis, de consistência normal e um terceiro tipo denominado pelo estudo como “autoadensável semi-fluido”, com um espalhamento no abatimento em torno de 300 mm. Na análise dos concretos, foi empregado um reômetro IBB com rotor em forma de “H” e foi empregado o seguinte histórico de carregamento: pré-cisalhamento de 0,2 rev/s por 25 s, seguido de mais 25 s de repouso; depois um aumento contínuo da velocidade de 0 a 1 rev/s em 100 s, seguido de um retorno à velocidade 0, também em 100 s. Os testes foram realizados a cada 15 minutos numa mesma amostra até que fossem completados 120 minutos após o término das misturas. No caso das argamassas, empregou-se um reômetro *Brookfield* e uma haste do tipo Vane com as mesmas dimensões de Benaicha *et al.* (2015). O carregamento por sua vez, foi de dois tipos: um com pré-cisalhamento e outro sem. O primeiro iniciou-se com uma rotação da haste de 0 a 0,2 s<sup>-1</sup> em 180 s, seguida de manutenção em 0,2 s<sup>-1</sup> por 60 s; na sequência, aumentou-se a rotação de 0,2 até 100 s<sup>-1</sup> em 60 s e logo depois reduziu-se novamente a 0 s<sup>-1</sup> nos 60 s seguintes. Já no segundo carregamento, a haste começou sua rotação partindo do repouso até 100 s<sup>-1</sup> em 60 s e depois reduziu sua rotação a 0 s<sup>-1</sup> nos 60 s seguintes. Para ambos os históricos de carregamento nas argamassas os ensaios foram conduzidos a cada 15 minutos até que fossem totalizados 90 minutos. Por fim, a pesquisa concluiu que, para todos os concretos há um aumento na tensão de escoamento de acordo com o momento em que o teste é realizado, por conta da evolução da hidratação. A viscosidade plástica, porém, e a tixotropia não apresentaram mudanças significativas com o tempo. Os valores da tixotropia, no caso das argamassas pré-cisalhadas foram menores do que para as argamassas que não foram pré-cisalhadas, por conta do desarranjo da estrutura parcialmente hidratada de partículas cimentícias. Em todos os casos, a tixotropia aumenta com o tempo e as taxas de aumento são semelhantes independentemente de ter havido ou não um pré-cisalhamento.

Considerando as vantagens técnicas do emprego da CCA e da ABG em produtos cimentícios, conforme apresentado nas pesquisas citadas e também o atual quadro de escassez de matérias-primas naturais, reforçando a necessidade da

busca por fontes alternativas, planejou-se o programa experimental desse trabalho, apresentado na próxima seção.

### 3. Programa Experimental

Nesta seção são apresentados os aspectos que foram levados em consideração quando da definição das proporções das misturas cimentícias e dos ensaios para caracterização dos materiais.

#### 3.1 Caracterização dos materiais

##### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento empregado nesse trabalho foi um de alta resistência inicial, CP V ARI da empresa Holcim, cujo percentual de óxidos e perda ao fogo (NBR NM 18, 2012) encontram-se na Tabela 3.1. Os percentuais foram determinados por espectroscopia de raios X em equipamento Shimadzu EDX- 720 com tubo de 3 kW e alvo de ródio. Esse cimento apresenta um máximo de 10% de fíler calcário, de acordo com a NBR 5733/1991. A caracterização desse material também incluiu os ensaios de massa específica (NBR NM 23, 2001), finura Blaine e compactidade por demanda d'água (DE LARRARD, 1999). A massa específica obtida para esse cimento foi igual a 3,10 g/cm<sup>3</sup>, a compactidade foi de 0,5353 e a finura foi igual a 473 m<sup>2</sup>/kg.

Tabela 3.1: Composição de óxidos e perda ao fogo do CP V ARI.

Óxido	Massa (%)
CaO	74,4
SiO <sub>2</sub>	13,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,0
SO <sub>3</sub>	3,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3
K <sub>2</sub> O	1,1
MnO	0,1
Perda ao fogo	1,6

O ensaio de compactidade experimental por demanda d'água fornece um dado fundamental para a dosagem de concretos segundo o Método do Empacotamento Compressível (DE LARRARD, 1999). Nesse ensaio, foi utilizada uma massa de 350 g de cimento. O ensaio consistiu em acrescentar água, gradativamente, à massa de cimento, dentro de uma argamassadeira com

capacidade para 2 L. A água foi acrescentada, até que a mistura atingisse certa fase física, denominada como fase capilar (DE LARRARD, 1999), onde todos os vazios da mesma são preenchidos pela água. O início desta fase é chamado ponto de demanda d'água e caracteriza-se fisicamente por um grau de fluidez da mistura em que esta não adere às paredes da cuba da argamassadeira. A determinação desse ponto é dada pela Equação 3.1. Ao fim desse ensaio, foi obtido o valor de compacidade de 0,5353 para o cimento.

$$c = \frac{1}{1 + \delta \left( \frac{m_a}{m} \right)} \quad (\text{Equação 3.1})$$

considerando:

c: compacidade experimental;

$\delta$ : massa específica do material ensaiado;

$m_a$ : massa de água;

m: massa de material empregada.

### **3.1.2 Cinza da casca do arroz**

A cinza da casca do arroz empregada nesse trabalho foi a cinza Silcca Nobre, obtida junto à Geradora de Energia Elétrica de Alegrete (GEEA), localizada na cidade de Alegrete no estado do Rio Grande do Sul. A Tabela 3.2 apresenta os percentuais de óxidos, presentes nesta cinza, que foram obtidos por espectroscopia de raios X. Dentre os óxidos, destaca-se o SiO<sub>2</sub>, cujo percentual ultrapassa 90%. Destaca-se também o caráter totalmente amorfo desse composto, indicado no difratograma de raios X da Figura 3.1, obtido através de ensaio em um difratômetro Bruker D8 Focus com tubo de Cu-K $\alpha$  (40 kV/40 mA), coleta entre 8 e 60° (2 $\theta$ ), velocidade do goniômetro de 0,02°/passo e tempo de contagem de 1 s por passo. O único pico cristalino observado, nesse caso, correspondeu à cristobalita, cuja presença é comum nesse tipo de cinza, indicando que a temperatura de queima pode ter ultrapassado os 800°C (CORDEIRO *et al.*, 2009). A massa específica obtida para a cinza foi de 2,09 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 3.2: Composição de óxidos e perda ao fogo da CCA.

Óxido	Massa (%)
SiO <sub>2</sub>	91,9
K <sub>2</sub> O	2,2
SO <sub>3</sub>	1,4
CaO	0,8
MnO	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1
Perda ao fogo	3,3

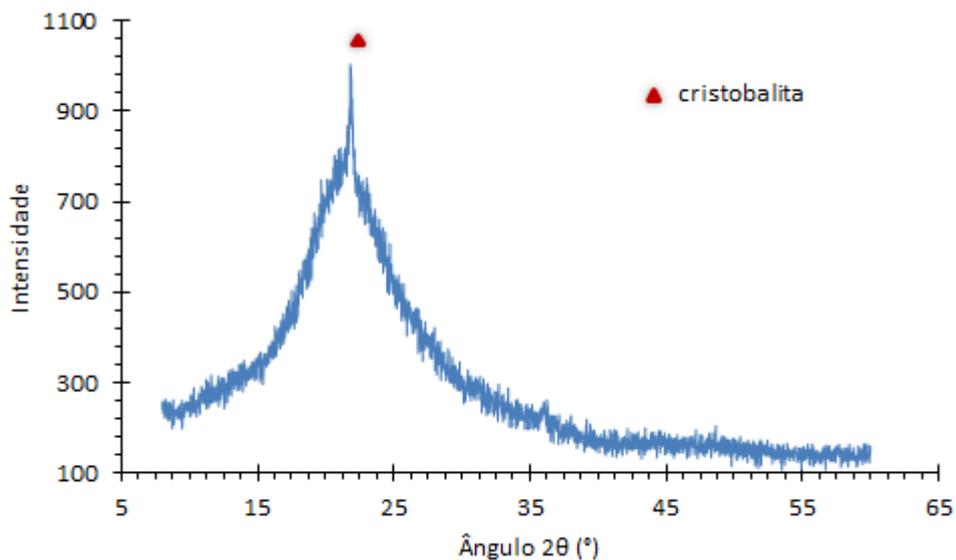


Figura 3.1: Difratograma de raios X da CCA.

A Figura 3.2 mostra a composição granulométrica da CCA, obtida através de ensaio em um granulômetro a laser Mastersizer 2000 (Malvern) com amostra dispersa em água deionizada, tempo de dispersão de 15 minutos, velocidade de 2000 rpm e aproximação por Fraunhofer. É possível observar que a cinza apresentou um D<sub>50</sub> menor que 15 µm com todas as suas partículas com tamanho inferior a 100 µm, aproximadamente.

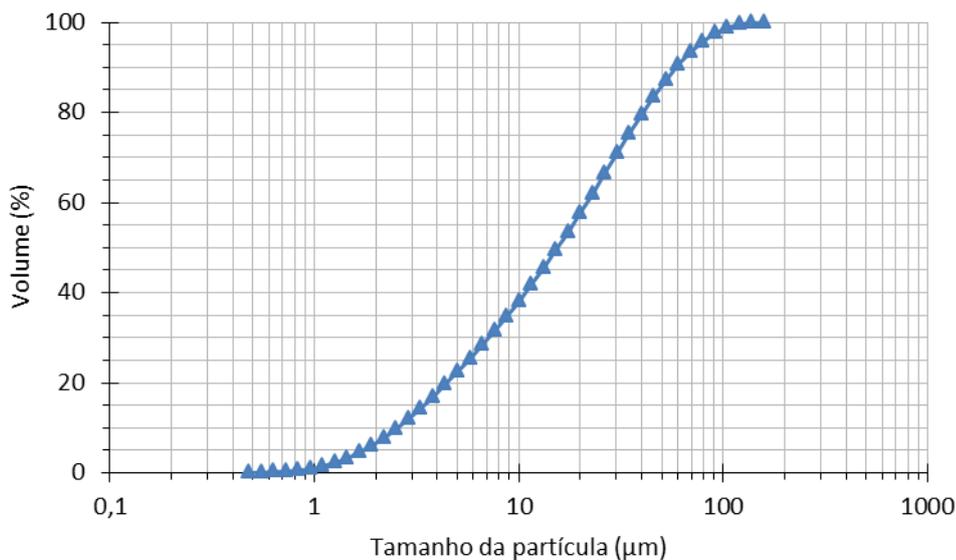


Figura 3.2: Composição granulométrica da CCA.

O caráter pozolânico da CCA foi avaliado em ensaio de condutividade elétrica conhecido como Ensaio de Lúxan (LÚXAN *et al.*, 1989). Esse ensaio foi realizado colocando-se uma amostra de 1,75 g do material em estudo numa solução saturada de  $\text{Ca}[\text{OH}]_2$  sob agitação constante, sendo especificamente 0,0987 g do hidróxido em 70 g de água deionizada a 40°C. A partir daí as leituras de condutividade elétrica da solução, medidas por meio de um condutímetro, foram monitoradas até 20 minutos, sendo que a diferença de condutividade representativa foi obtida aos 2 minutos. O resultado, ilustrado na Figura 3.3, mostra que a cinza apresenta uma variação de condutividade ( $\Delta C$ ) de 0,56 mS/cm aos 2 min, o que a classifica como uma cinza de média pozolanicidade ( $0,4 < \Delta C < 1,2$ ), segundo o critério de Lúxan *et al.* (1989).

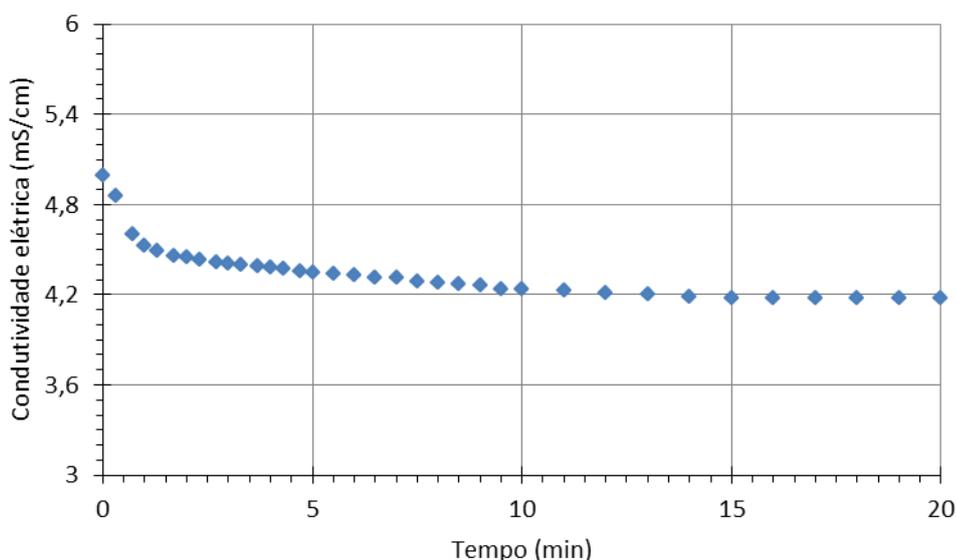


Figura 3.3: Valores de condutividade elétrica da solução de hidróxido de cálcio e CCA durante os primeiros vinte minutos de ensaio.

O ensaio de compacidade experimental no caso da CCA, por sua vez, foi realizado de forma idêntica a do cimento, porém com o emprego de 200 g de cinza, para manutenção do volume de pasta aproximadamente constante. O valor de compacidade obtido nesse caso, foi de 0,4519.

### 3.1.3 Agregados

Nesse trabalho, foram empregados areia quartzosa advinda do rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes e obtida junto ao Areal Anastácia, e uma areia oriunda da britagem de granito como agregados miúdos e como agregado graúdo, brita de dimensão máxima 9,5 mm (brita “0”) também de origem granítica. Essa última, assim como a areia de britagem, também foi obtida junto à Pedreira Itaoca em Campos dos Goytacazes (Figura 3.4).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4: Planta de britagem da Pedreira Itaoca (a) detalhes do britador com suas correias transportadoras (b) e do sistema de peneiramento (c).

Após a coleta, os agregados foram dispostos em pilhas, conforme a Figura 3.5, para que fossem quarteados e na sequência, caracterizados.



Figura 3.5: Pilha alongada utilizada para o quartejamento da ABG.

A Figura 3.6 mostra a composição granulométrica desses agregados, os quais também foram caracterizados pelos ensaios de massa específica (NBR NM 52, 2009 e NBR NM 53, 2009) e compacidade por vibração e adensamento (DE LARRARD, 1999). As massas específicas obtidas foram 2,64, 2,66 e 2,67 g/cm<sup>3</sup> para a ABG, a areia natural e a brita, respectivamente. Destaca-se da Figura 3.6 a grande proximidade entre as granulometrias das duas areias. Os módulos de finura, por suas vezes, foram de 2,67, 2,51 e 6,43 para a ABG, a areia natural e a brita, respectivamente.

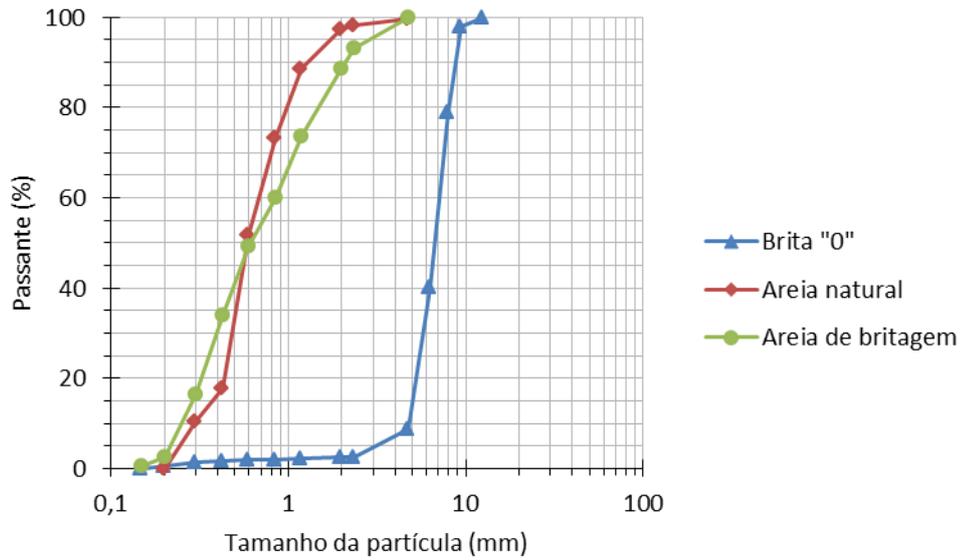


Figura 3.6: Composição granulométrica dos agregados.

A Figura 3.7 mostra os dois agregados miúdos utilizados nessa pesquisa e suas correspondentes imagens obtidas através de um programa de processamento de imagens, o Image J, que também foi utilizado por Goldoni *et al.* (2015). Os grãos mostrados pertencem à faixa passante na malha de 4,8 mm e retida na de 2,4 mm.

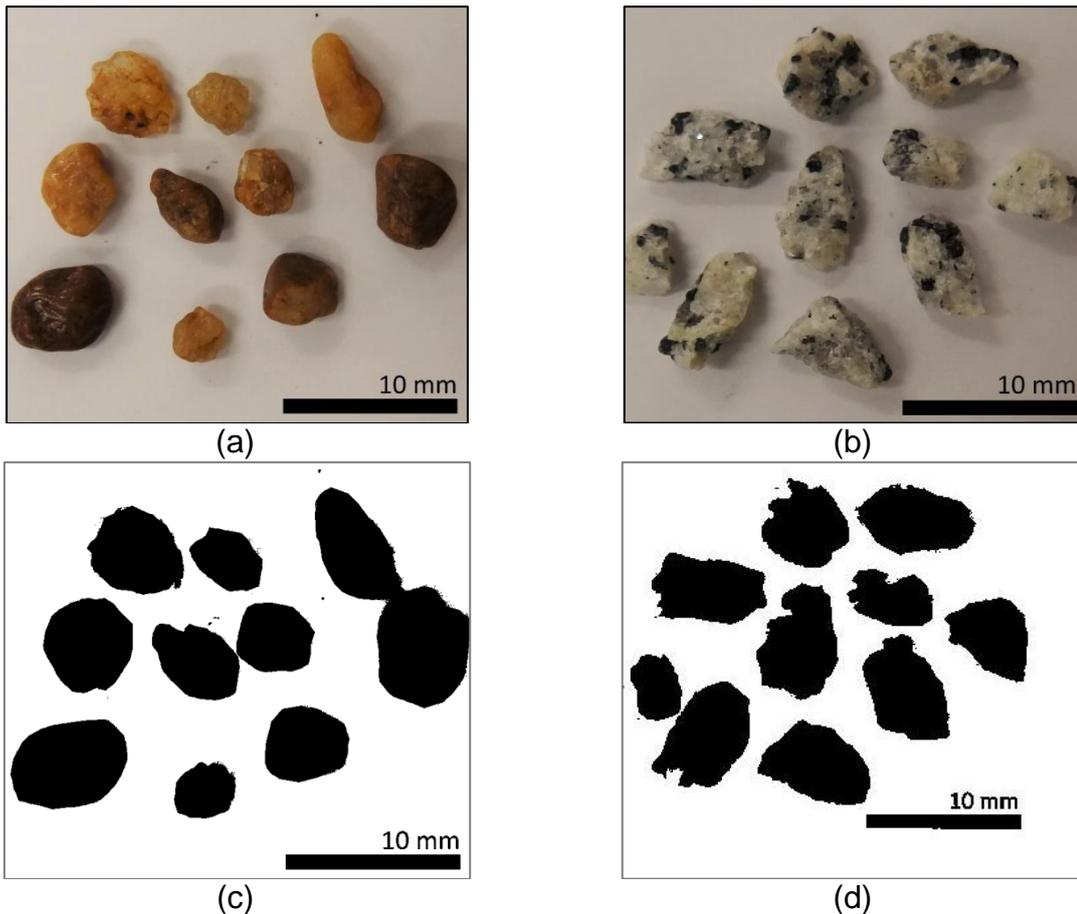


Figura 3.7: Areia natural (a), areia de britagem (b), imagem bicolor da areia natural (c) e imagem bicolor da areia de britagem (d).

O programa Image J transforma a imagem original num desenho de duas cores (desenho binário) para tornar possível a obtenção de parâmetros como área, maior dimensão do grão, diâmetro de Feret, dentre outros. Com a obtenção desses parâmetros, é possível determinar características adimensionais de forma dos grãos como esfericidade e arredondamento, dados pela Equações 3.2 e 3.3, respectivamente:

$$E = \frac{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}}{D_c} \quad \text{(Equação 3.2)}$$

considerando:

E: esfericidade;

A: área da projeção do grão medida diretamente na imagem bidimensional da projeção do grão;

$D_c$ : diâmetro de Feret.

$$A_r = \frac{4A_p}{\pi D_c^2} \quad (\text{Equação 3.3})$$

considerando:

$A_r$ : arredondamento;

$A_p$ : área da projeção do grão medida diretamente na imagem do grão.

Os valores dos parâmetros geométricos foram obtidos para 30 partículas de cada agregado e encontram-se na Tabela 3.3. Neste caso, observa-se a forma mais angulosa dos grãos da ABG em comparação com os grãos da areia natural, caracterizada pelos menores valores médios de esfericidade e arredondamento desse tipo de areia. É possível observar ainda, pelas imagens, a superfície mais lisa dos grãos de areia natural (Figura 3.7a), em comparação com os da ABG, de superfície mais irregular (Figura 3.7b). Esse aspecto da ABG é natural por conta do próprio processo de britagem (WESTERHOLM, 2006; CORTES *et al.*, 2008) e corrobora o efeito de perda de trabalhabilidade dos concretos (item 4.3).

Tabela 3.3: Parâmetros de forma da areia natural e da ABG segundo o programa Image J.

Parâmetro		Areia natural	ABG
Esfericidade	Valor médio	0,83	0,66
	Desvio-padrão	0,06	0,07
	Coefficiente de variação	7,4%	10,5%
Arredondamento	Valor médio	0,68	0,44
	Desvio-padrão	0,10	0,09
	Coefficiente de variação	15,0%	20,0%

A compacidade dos agregados miúdos e graúdo, por sua vez, foi determinada através de ensaio proposto por De Larrard (1999) com adaptações de Silva (2004), que considera o emprego da vibração e do adensamento/compressão. Dessa forma, os três tipos de agregados desse trabalho, em massas de 3,0 kg para a areia natural e a de britagem e 7,5 kg para a brita, foram colocados em um cilindro metálico (Figura 3.8) com dimensões de 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura, preenchendo-o de modo a formar um volume padrão de material. Feito isso, um pistão que exerce 10 kPa de pressão foi colocado dentro do cilindro e este foi submetido a uma vibração com frequência de 68 Hz por 3 minutos, em uma mesa vibratória. Finalizado esse tempo, a altura final da camada de material compactado ( $h_c$ ) foi determinada e a compacidade pode, então, ser calculada pela Equação 3.4.

$$c = \frac{m}{A_e h_c \delta} \quad \text{(Equação 3.4)}$$

considerando:

m: massa de material empregada;

$A_e$ : área do cilindro do ensaio;

$\delta$ : massa específica do material ensaiado;

c: compacidade.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.8: Cilindro padrão do ensaio de compacidade por vibração e adensamento (a) e aspecto da brita (b), do resíduo de britagem (c) e da areia (d), após término do ensaio.

No caso dos agregados desse trabalho, os valores de compacidade foram 0,53, 0,67 e 0,66 para a brita, a areia de britagem e a areia natural, respectivamente. Observou-se, portanto, um ligeiro aumento no valor da compacidade para a areia de britagem em relação à areia natural, indicando com isso, um possível melhor empacotamento de suas partículas. O agregado graúdo, por sua vez, apresentou o menor valor de compacidade.

### 3.1.4 Aditivo superplastificante

Um aditivo do tipo superplastificante à base de éter policarboxilato (BASF Glenium 51), com teor de sólidos de 32,6%, em massa, foi utilizado na pesquisa.

### 3.1.5 Água

A água utilizada na confecção de todos os produtos cimentícios desse trabalho foi proveniente da empresa Águas do Paraíba, que abastece a cidade de Campos dos Goytacazes. Antes do emprego, porém, esta água passou por processo de deionização.

## 3.2 Ensaio em pastas

As pastas produzidas nesse trabalho apresentaram teores de 10, 15 e 20% de CCA em volume, além da pasta de referência (P-REF), sem cinza. A relação água/material cimentício (a/mc) foi mantida constante no valor de 0,45 para todas as misturas. Na primeira etapa da produção de pastas, manteve-se fixo o teor de aditivo superplastificante utilizado na P-REF, para as demais pastas contendo CCA. Isso foi feito para que fosse possível a obtenção de uma análise sobre o efeito isolado da CCA na reologia das mesmas. A Tabela 3.4 mostra as dosagens dessas pastas cujos valores de espalhamento médio foram medidos através do ensaio de Kantro ou miniabatimento (Figura 3.9), que buscou avaliar a consistência das pastas. As pastas com CCA foram denominadas de P-CCA-xSC, onde “x” indica o percentual de cimento que foi substituído pela CCA.

Tabela 3.4: Dosagens das pastas da primeira etapa.

Pasta	% CCA	SP* (%)	a/mc
P-REF	-	0,063	0,45
P-CCA-10SC	10	0,063	0,45
P-CCA-15SC	15	0,063	0,45
P-CCA-20SC	20	0,063	0,45

\* % de sólidos em relação ao total de cimento ou cimento e CCA.

A Tabela 3.5, por sua vez, mostra as dosagens das pastas da segunda etapa, onde o teor de aditivo superplastificante foi variado, a fim de sempre se obter um espalhamento das pastas na faixa de  $120 \pm 10$  mm, no ensaio de Kantro. Neste caso, as pastas foram denominadas de P-CCA-x, onde “x” indica o teor de CCA.

Tabela 3.5: Dosagens das pastas da segunda etapa.

Pasta	% CCA	SP* (%)	a/mc
P-REF	-	0,063	0,45
P-CCA-10	10	0,067	0,45
P-CCA-15	15	0,071	0,45
P-CCA-20	20	0,076	0,45

\* % de sólidos em relação ao total de cimento ou cimento e CCA.

Para o procedimento de mistura, foi utilizado um misturador de bancada IKA EUROSTAR (Figura 3.9), com haste em forma de âncora e capaz de atingir velocidades na faixa de 50-2000 rpm, ao misturar. Uma vez que todo o material cimentício já havia sido colocado num béquer plástico contendo a água e o superplastificante necessários, misturou-se esses três componentes manualmente, por 1 min, com o auxílio de um bastão de vidro. Após isso, contabilizou-se um tempo de 1 min e 30 s para que o béquer fosse posicionado no misturador e este fosse ligado. Feito isso, aumentou-se gradativamente a velocidade de mistura até que fossem atingidas 300 rpm, que foi a velocidade escolhida, sob a qual a mistura deveria ser submetida por 1 min e 30 s. Na sequência, desligou-se o misturador para um intervalo de 1 min e 30 s, durante o qual, retirou-se, com uma espátula, a pasta que ficou aderida às paredes do recipiente. Transcorrido esse tempo, tornou-se a submeter a pasta a mais 1 min e 30 s de mistura a 300 rpm. Esses parâmetros de mistura foram adotados em função da pequena quantidade de cimento necessária para o volume em questão (máximo de 400 g para a pasta de referência). O ensaio de Kantro, por sua vez, foi realizado num tempo máximo de até 30 s após o fim do processo de mistura de cada pasta. O tronco de cone de Kantro utilizado para o ensaio possuía diâmetro superior, inferior e altura de 19, 35 e 60 mm, respectivamente.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.9: Misturador de bancada (a), misturador em operação (b), aparato para o ensaio de Kanro (c) e medição do espalhamento da pasta (d).

A fim de avaliar mais precisamente a influência da presença da CCA nas pastas, foram feitos ensaios em um viscosímetro Brookfield modelo DV3TRV (Figura 3.10), equipado com o programa computacional RHEOCALCT e com emprego de haste em forma de cruz, tipo Vane, para determinação dos já citados parâmetros  $\tau_0$  e  $\mu$ . O funcionamento de todos os viscosímetros da linha DV3T baseia-se na rotação de uma haste, a qual é imersa no fluido em estudo, por meio de uma mola calibrada.



Figura 3.10: Viscosímetro Brookfield modelo DV3TRV.

A resistência que o fluido apresenta ao movimento da haste é medida pela deflexão da mola, que por sua vez, é medida por um transdutor rotativo. O modelo DV3TRV é capaz de medir um torque máximo de até 0,7187 mN.m. O emprego de uma haste do tipo Vane, ou do método Vane, segundo Barnes e Nguyen (2001), é vantajoso pela simplicidade de fabricação e limpeza destas hastes e acima de tudo pela grande minimização ou mesmo eliminação dos efeitos de escorregamento do fluido pela superfície da haste (*wall-slip effects*). Esses efeitos normalmente ocorrem em hastes do tipo cilindros concêntricos, por conta de um deslocamento das partículas de cimento, no caso de misturas cimentícias, para longe das paredes suaves do cilindro, criando uma camada lubrificante, rica em água, que facilita o fluxo e não representa o que de fato ocorre com a pasta (BARNES, 1995). A utilização da haste do tipo Vane é bastante frequente também em pesquisas com dispersões coloidais inorgânicas e alguns tipos de alimentos.

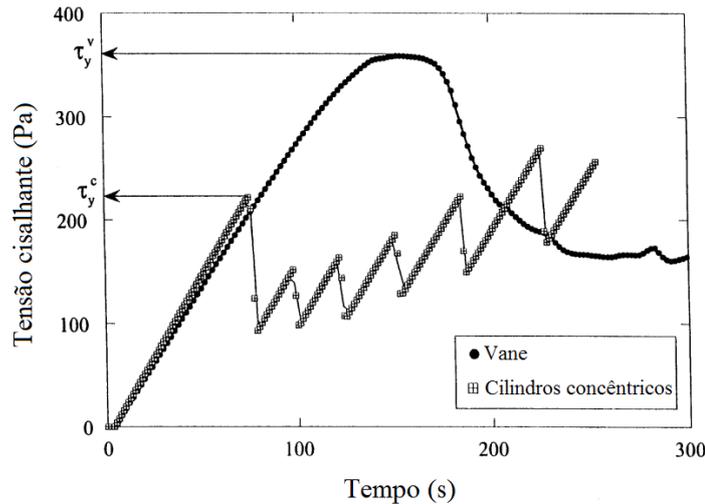


Figura 3.11: Curvas representativas da evolução da tensão de cisalhamento em pastas de cimento para hastes tipo cilindros concêntricos e Vane (velocidade de rotação de 0,01 rad/s e  $a/c = 0,30$ ) - adaptado de Saak *et al.* (2001).

A Figura 3.11 mostra duas curvas com evoluções típicas da tensão de cisalhamento em ensaios em viscosímetros com o emprego de hastes do tipo Vane e do tipo cilindros concêntricos. Neste caso, destaca-se a diferença entre os valores da tensão de pico ou tensão de escoamento para as duas hastes. Observa-se que inicialmente a tensão se desenvolve na amostra para os dois casos (trecho linear das curvas), porém em certo ponto a tensão sofre uma queda instantânea no caso da haste dos cilindros, por conta da formação de uma camada escorregadia. A haste move-se então suavemente até que sua rotação sofra a resistência das partículas de cimento e a tensão volte então a se desenvolver até que o escorregamento ocorra novamente. Esse ciclo contínuo gera a formação de uma curva do tipo “dente de serra” (SAAK *et al.*, 2001).

Para a análise das pastas desse trabalho, no referido viscosímetro, optou-se por uma metodologia bastante próxima a de Lomboy *et al.* (2014), que se encontra simplificada esquematizada na Figura 3.12.

A programação consistiu, inicialmente, em levar a mistura a uma taxa de cisalhamento de  $0,2 \text{ s}^{-1}$ , partindo do repouso, em 180 s. Em seguida, manteve-se esta mesma taxa por 60 s e logo, aumentou-se gradativamente, até que fosse atingido o valor de  $48 \text{ s}^{-1}$  em 60 s. Após isso, a taxa foi diminuída até  $0 \text{ s}^{-1}$ , na mesma proporção do aumento, também em 60 s. Esse tipo de programação é

denominada pelo manual do fabricante do viscosímetro como “rampa sobe-desce” e mostra como a viscosidade da mistura pode variar com a taxa de cisalhamento/velocidade e com o tempo. Nesse trabalho, além das rampas, optou-se também pela execução de um trecho de pré-cisalhamento, antes das rampas, exatamente como o que se encontra em Lomboy *et al.* (2014). Esse pré-cisalhamento contribui para garantir ainda mais a igualdade entre os históricos de carregamento das diferentes misturas (WILLIAMS *et al.*, 1999; FERRARIS *et al.*, 2001).

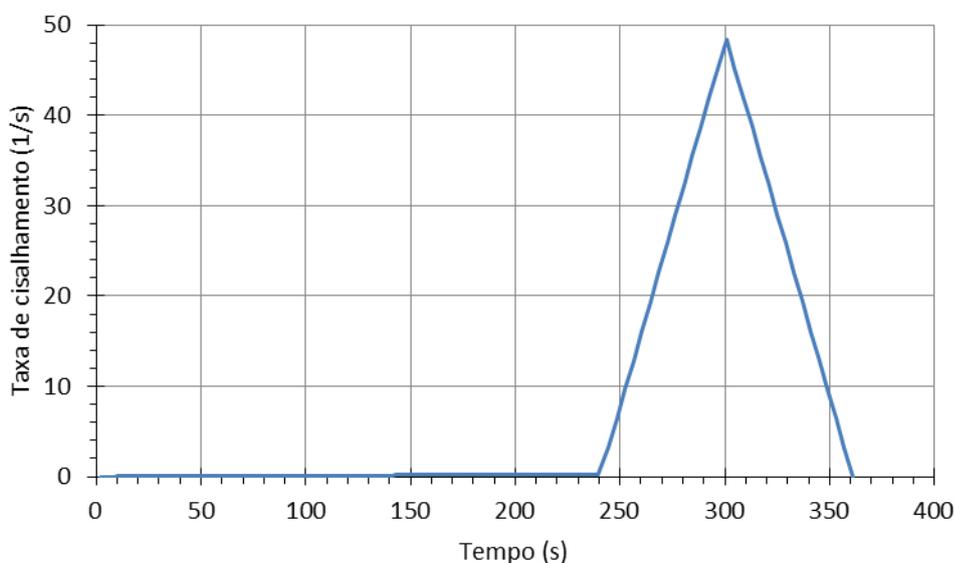


Figura 3.12: Programação empregada para as pastas.

A palheta utilizada, nesse caso, foi a V-73, que tem dimensões de 2,53 cm de comprimento e 1,27 cm de diâmetro. No caso das palhetas do tipo Vane, o diâmetro é referente a uma circunferência circunscrita à palheta. Durante os ensaios a palheta sempre era imersa no fluido até atingir sua marcação primária, para garantir uma correta determinação das tensões. A opção por esta palheta foi por ter sido essa a que melhor atendeu à faixa de torque recomendada pelo fabricante do viscosímetro (10-100%). O recipiente utilizado durante os ensaios, por sua vez, foi um recipiente com 600 ml de capacidade, onde foram ensaiados volumes de 500 ml de mistura. Essa característica do recipiente também é uma recomendação do fabricante.

Outro fator importante, para garantia de maior acurácia das medições é a temperatura do ambiente onde é realizado o ensaio. Nesse caso, manteve-se a

temperatura do ambiente em  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  e também monitorou-se a temperatura das misturas diretamente através de um medidor de temperatura.

Nesse trabalho, o estudo reológico das pastas foi realizado nas duas etapas mencionadas: a primeira, que buscou analisar o efeito da CCA isoladamente e a segunda, que buscou observar o efeito do superplastificante nas misturas. Em ambas as etapas, as misturas foram ensaiadas em dois tempos a partir do contato do cimento e da CCA com a água, a saber: 10 e 30 min. A realização do ensaio em dois tempos teve como objetivo a verificação de possíveis mudanças no comportamento reológico das misturas de acordo com esse fator.

Além disso, todas as pastas foram analisadas como fluidos de Herschel-Bulkley, por ter sido este o modelo que garantiu as mais altas correlações com os dados experimentais (valores de  $R^2$  entre 0,9957 e 0,9999). Neste caso, os parâmetros  $\tau'_0$ ,  $K$  e  $n$  foram obtidos diretamente com o auxílio do programa Origin Pro 8, onde escolheu-se uma função do tipo potência ( $y = a + bx^c$ ) para ajuste das várias curvas experimentais.

Para uma avaliação sob o ponto de vista de resistência à compressão das pastas, procedeu-se à moldagem de alguns corpos de prova com as pastas de mesma consistência. A moldagem foi executada imediatamente após o ensaio de Kantro em moldes cilíndricos de PVC com 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura (Figura 3.13). Após preencher cada molde, misturou-se a pasta dentro do mesmo, manualmente, por 1 min com um bastão de vidro. Depois de preenchidos todos os moldes, estes foram colocados num recipiente fechado, com uma fina lâmina d'água, num ambiente com temperatura de  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ . O desmolde foi feito após 24 h e os corpos de prova foram então, imersos num novo recipiente, contendo água saturada com hidróxido de cálcio (Figura 3.13), sob a mesma temperatura citada, permanecendo em cura até que completassem as idades de 7 e 28 dias.

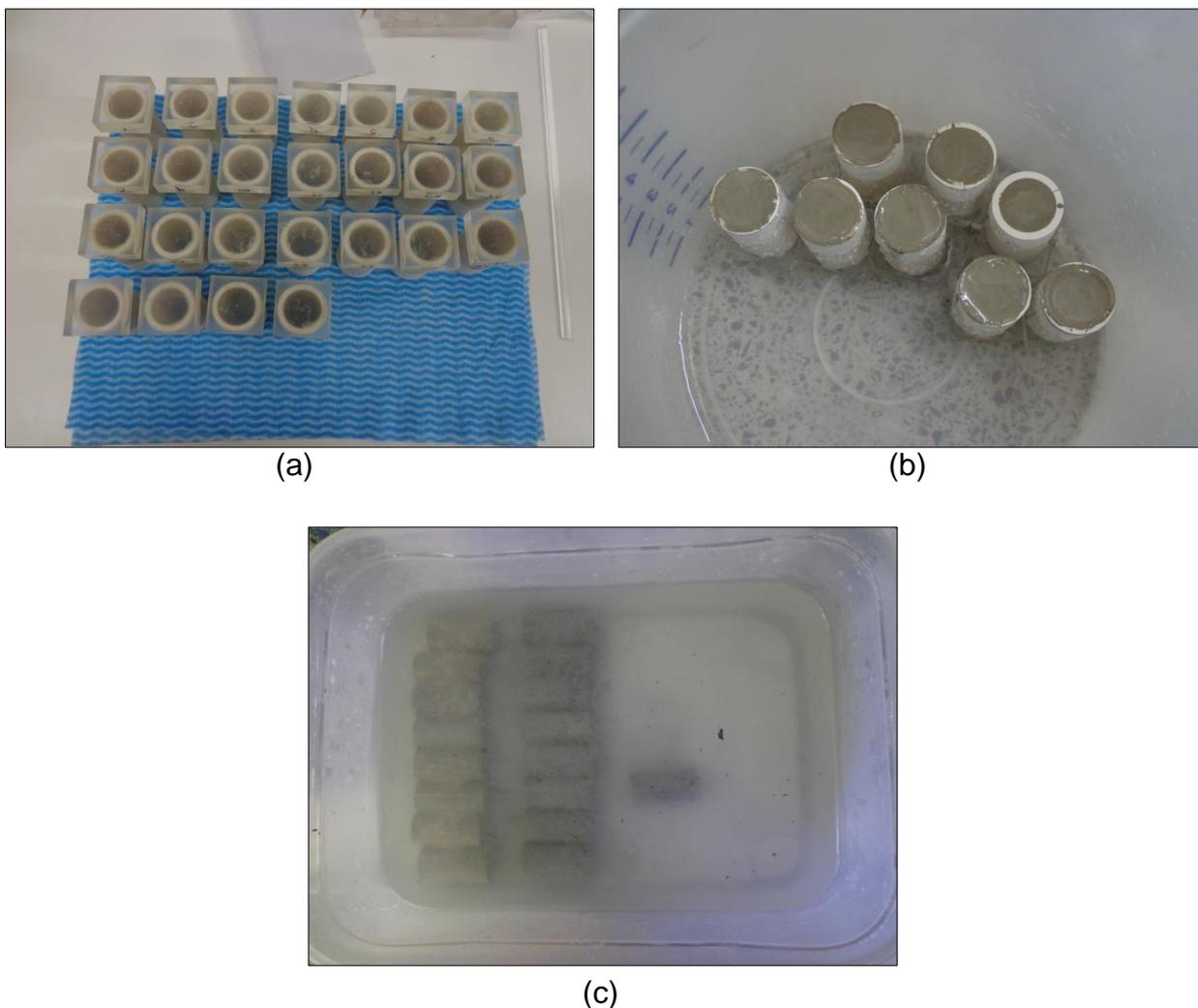


Figura 3.13: Moldes de PVC (a), moldes preenchidos com pasta (b) e corpos de prova em cura (c).

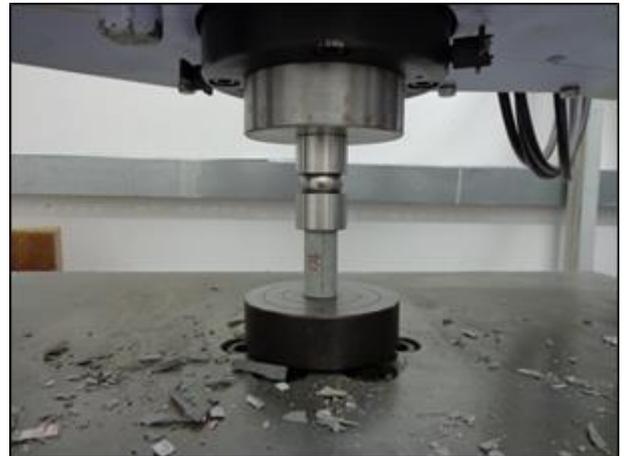
Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu UH-F 500 kNI (Figura 3.14a). Os corpos de prova tiveram suas faces previamente niveladas por meio de um disco de metal duro em um torno mecânico, a fim de garantir a planicidade e o paralelismo. Além disso, também foi utilizada uma rótula de aço (Figura 3.14b e c), sobre cada um deles. Para o ensaio, foi empregada uma velocidade de 0,5 mm/min. Os resultados de compressão foram validados estatisticamente por meio de uma Análise de Variância dos dados obtidos (quatro amostras por mistura), através do programa computacional Origin Pro 8, onde empregou-se o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade e considerou-se o experimento como um delineamento inteiramente casualizado (DIC).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.14: Vista frontal da máquina universal de testes do LECIV/UENF (a), corpo de prova a ser rompido com destaque para a rótula de aço (b), corpo de prova em processo de ruptura (c).

### 3.3 Ensaios em argamassas

Os ensaios em argamassas foram realizados para uma avaliação do efeito da substituição da areia por ABG sem a presença de agregado graúdo. Nas duas etapas da produção de argamassas, estas apresentaram teores de 10, 30 e 50% da ABG em relação ao volume total de agregado miúdo, além da argamassa de referência (A-REF), que foi confeccionada apenas com areia quartzosa como agregado miúdo. No caso desta substituição, quase não haveria diferença, se fosse feita em massa, por conta dos valores das massas específicas de ambos os agregados, possuírem valores bastante próximos. Contudo, optou-se pela

substituição em volume para que o volume de pasta nas misturas fosse mantido constante. Na primeira etapa, entretanto, o teor de aditivo superplastificante empregado nas argamassas contendo a ABG foi o mesmo da argamassa A-REF (Tabela 3.6), para que fosse possível analisar o efeito da ABG nessas misturas, no tocante a trabalhabilidade medida através do espalhamento na mesa de consistência normal (NBR NM 43, 2003), cujo aparato é mostrado na Figura 3.15. Esse ensaio foi realizado num tempo máximo de até 3 min após o fim do processo de mistura de cada argamassa. As argamassas dessa etapa foram denominadas A-ABG-xSC, onde x indica o percentual de areia natural que foi substituída por ABG.

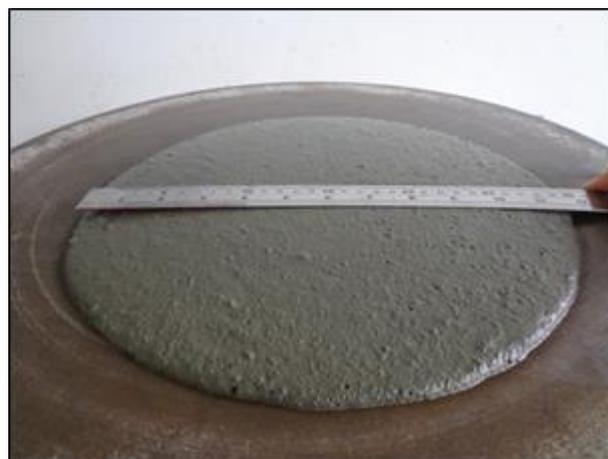
Tabela 3.6: Dosagens das argamassas da primeira etapa.

Argamassa	% CCA	% ABG	SP* (%)	a/mc
A-REF	20	-	1,150	0,45
A-ABG-10SC	20	10	1,150	0,45
A-ABG-30SC	20	30	1,150	0,45
A-ABG-50SC	20	50	1,150	0,45

\* % de sólidos em relação ao total de cimento e CCA.



(a)



(b)

Figura 3.15: Aparato para ensaio de espalhamento na mesa de consistência normal (a) e medição do espalhamento de uma das argamassas da primeira etapa (b).

Na segunda etapa, por sua vez, variou-se o teor de aditivo superplastificante (Tabela 3.7) de modo que, todas as argamassas apresentassem sempre a mesma consistência no ensaio de espalhamento citado. A faixa de espalhamento estabelecida, nesse caso, foi de  $250 \pm 10$  mm (Figura 3.16). Todas as argamassas com ABG e faixa de espalhamento constante foram denominadas A-ABG-x, onde x é o teor de ABG utilizado em relação ao volume total de agregado miúdo.

Tabela 3.7: Dosagens das argamassas da segunda etapa.

Argamassa	% CCA	% ABG	SP* (%)	a/mc
A-REF	20	-	1,150	0,45
A-ABG-10	20	10	1,131	0,45
A-ABG-30	20	30	0,700	0,45
A-ABG-50	20	50	0,550	0,45

\* % de sólidos em relação ao total de cimento e CCA.

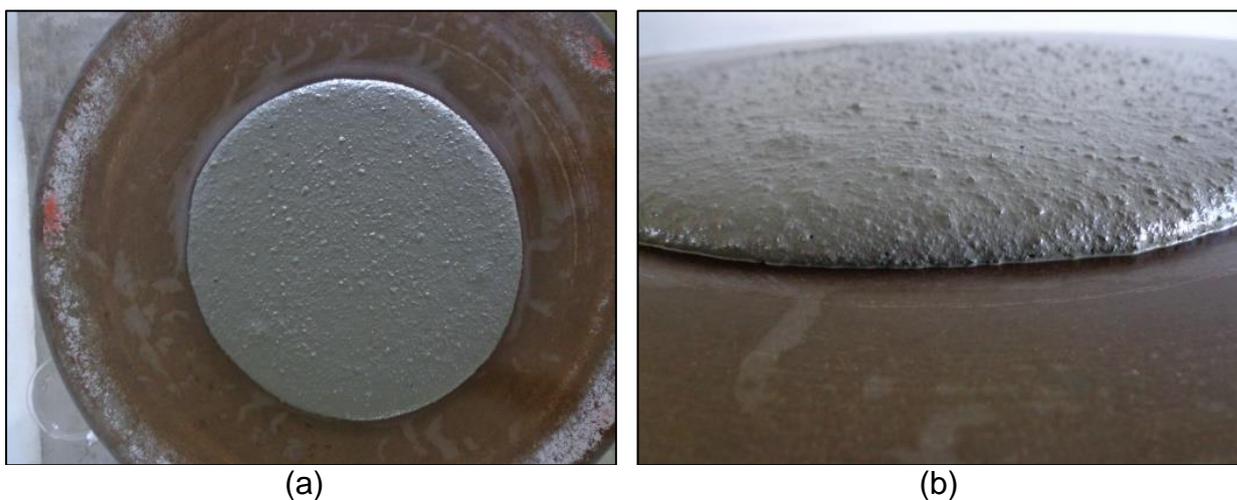


Figura 3.16: Vista superior de uma das argamassas da segunda etapa após espalhamento (a) e detalhe da mesma argamassa (b).

O teor de CCA empregado em todas as argamassas foi de 20%, por não ter sido observada diferença significativa da resistência entre nenhum dos três teores de cinza e a referência, no caso dos testes em pastas, conforme mostrado no item 4.1. Além disso, a diferença não muito expressiva no aumento dos parâmetros  $\tau_0$  e  $\mu$  para os teores de 15 e 20% de CCA também contribuiu para reforçar a opção por esse teor de cinza. A relação a/mc também foi mantida fixa, nesse caso, no valor de

0,45. A relação cimento-agregado miúdo, por sua vez, também foi mantida constante, na razão de 1 para 3.

O procedimento de mistura das argamassas iniciou-se com a colocação de toda a água da mistura, já contendo o superplastificante necessário, dentro da cuba da argamassadeira e logo em seguida, a colocação do cimento, já previamente misturado com a CCA, dentro da cuba por 30 s. Feito isso, ligou-se a argamassadeira na velocidade 1 (lenta), para que esses materiais fossem misturados por 30 s. Depois, adicionou-se a mistura de agregados miúdos (areia natural mais ABG), também durante 30 s, mantendo-se a velocidade lenta. Uma vez finalizada a colocação do agregado miúdo, manteve-se ainda a mistura na velocidade lenta, por mais 30 s, e depois passou-se para a velocidade 2 (alta), por 3 min. Após esse tempo, a mistura foi deixada em repouso por 1 min e por fim misturou-se por mais 1 min na velocidade alta.

Também com o propósito de analisar o desempenho das argamassas sob o ensaio de resistência à compressão, foram moldados alguns corpos de prova, com as argamassas de mesma consistência, em moldes metálicos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 3.17). Os moldes foram preenchidos com as misturas até metade da altura e em seguida vibrados numa mesa vibratória por 30 s. Depois, foram preenchidos por completo e novamente vibrados pelo mesmo tempo.



Figura 3.17: Aspecto físico das argamassas logo após moldagem.

O desmolde foi feito após 24 h e as argamassas foram imersas em um recipiente contendo água saturada com hidróxido de cálcio, em temperatura ambiente, permanecendo assim até que completassem as idades de 7 e 28 dias, quando foram então rompidas, na mesma máquina onde foram ensaiadas as pastas, também a uma velocidade de 0,5 mm/min (Figura 3.19). A preparação das faces dos corpos de prova para os ensaios de resistência, nesse caso, foi feita no Laboratório de Preparação e Faceamento de Amostras, que é parte do Laboratório de Estruturas e Materiais (Labest) da COPPE/UFRJ (Figura 3.18). Para uma validação estatística dos dados de compressão obtidos, empregou-se uma análise idêntica a realizada para as pastas.



(a)



(b)

Figura 3.18: Processo de preparação de amostra (a) e detalhe do maquinário de preparação (b).



Figura 3.19: Corpo de prova de argamassa em compressão.

### **3.4 Ensaios em concretos**

Uma vez finalizados os testes em pastas e argamassas e analisados os resultados obtidos a partir destes, foram produzidos e ensaiados os concretos, do mesmo modo das argamassas, sendo uma mistura de referência, contendo o teor fixo de 20% de CCA, em volume, porém sem qualquer ABG, e outras três misturas, contendo 10, 30 e 50% da ABG, também em volume e mais o teor fixo de CCA, já citado. A repetição dos teores da ABG, nesse caso, buscou avaliar o comportamento desta com a cinza, em um novo sistema, onde também há a presença do agregado graúdo, como é o concreto.

#### **3.4.1 Dosagem**

A dosagem dos constituintes dos concretos desse trabalho foi feita no programa BetonLab Pro3 (SEDRAN e DE LARRARD, 2000), cujos fundamentos são baseados no Método do Empacotamento Compressível- MEC, que foi desenvolvido por De Larrard, 1999. O concreto de referência (C-REF) foi dosado para uma resistência à compressão, aos 28 dias de idade, em torno de 50 MPa, faixa de abatimento de  $200 \pm 20$  mm (NBR NM 67, 1998), após 10 minutos do término da

mistura e uma relação a/mc constante e igual a 0,44. Detalhes sobre a dosagem utilizando o MEC podem ser obtidos em Silva (2004). Os procedimentos utilizados na presente pesquisa foram os mesmos estabelecidos por Barroso (2012), que também utilizou um CP V, aditivo superplastificante Glenium 51 e agregados do município de Campos dos Goytacazes em sua pesquisa.

O valor de resistência adotado nesse trabalho está em consonância com as obras de grande porte em andamento na região Norte Fluminense, como o Porto do Açú e o Estaleiro de Barra do Furado. A Tabela 3.8 mostra as dosagens dos concretos produzidos nesse trabalho. Novamente variou-se o teor de aditivo superplastificante, de modo sempre se obter um abatimento na faixa citada. Inicialmente, foram produzidas três misturas, a saber: C-REF, sem qualquer teor de ABG, e duas misturas com 50% de ABG, sendo a primeira com o mesmo teor de aditivo superplastificante da C-REF (C-ABG-50SC) e a segunda com a mesma faixa de abatimento da C-REF ( $200 \pm 20$  mm). Essa mistura foi denominada C-ABG-50. Na sequência, foram produzidas também misturas com 10 e 30% de ABG e mesma consistência da mistura C-REF, denominadas C-ABG-10 e C-ABG-30, respectivamente. Essas últimas foram produzidas com o objetivo de comparar a mistura de Referência também com misturas contendo teores menores de ABG.

No caso dos concretos, ao contrário das argamassas, para que essa condição sempre fosse atendida, foi necessário aumentar a quantidade de aditivo superplastificante à medida que se aumentava o teor de resíduo de britagem nas misturas. Esse aumento na demanda d'água e, conseqüentemente, de superplastificante, como foi neste caso, também foi observado nos trabalhos de Donza *et al.* (2002) e Binici *et al.* (2008).

Tabela 3.8: Dosagens dos diferentes concretos.

Mistura	Materiais							
	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Cinza (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	ABG (kg/m <sup>3</sup> )	Brita (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	SP* (%)
<b>C-REF</b>	409	69	719	-	905	209	2,405	0,161
<b>C-ABG-10</b>	409	69	647	71	905	209	2,539	0,170
<b>C-ABG-30</b>	409	69	503	214	905	208	2,868	0,192
<b>C-ABG-50</b>	409	69	359	357	905	208	3,466	0,232
<b>C-ABG-50SC</b>	409	69	359	357	905	209	2,405	0,161

\* % de sólidos em relação ao total de cimento e CCA.

### 3.4.2 Procedimento de mistura e caracterização no estado fresco

Os concretos desse trabalho foram misturados em um misturador planetário, previamente umedecido, com capacidade para 120 L (Figura 3.20). O processo de mistura deu-se da seguinte forma: primeiramente, colocou-se a brita “0” e os materiais cimentícios, cimento e cinza, já previamente misturados dentro do misturador e então este foi ligado por 30 s (mistura a seco); em seguida adicionou-se 60% do total de água a esta mistura e todo o superplastificante necessário, dissolvido em parte da água; a partir daí, misturou-se tudo por 1 min; na sequência adicionou-se todo o agregado miúdo e o restante da água e misturou-se por mais 3 min; após esse tempo, fez-se um intervalo de 1 min, para que fosse possível retirar o excesso de mistura aderido às paredes da máquina; e logo após esta retirada, misturou-se tudo novamente por mais 1 min. Para que o concreto fosse retirado do misturador, puxou-se a alavanca de abertura, mantendo-o ligado.



(a) (b)  
Figura 3.20: Detalhe interno do misturador (a) e aspecto final do concreto recém-misturado após retirada do misturador (b).

Após a retirada do concreto do misturador, cobriu-se o concreto com um tecido úmido e aguardou-se 10 min para que então fosse realizado o ensaio de abatimento (Figura 3.21a). Uma vez atendida a faixa estabelecida para esse ensaio, procedeu-se à moldagem de corpos de prova de 7,5 cm de diâmetro por 15,0 cm de altura e de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura (Figura 3.21b). A moldagem por sua vez, deu-se da seguinte forma: primeiramente preencheu-se cada um dos moldes com a mistura até metade do volume e, logo em seguida, foram vibrados na mesa vibratória por 30 s. Por fim, completou-se o volume dos moldes e estes foram novamente vibrados por mais 30 s.



(a)



(b)

Figura 3.21: Ensaio de abatimento do tronco de cone em um dos concretos (a) e corpos de prova recém-moldados (b).

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos ao ar livre, cobertos por uma manta úmida por 24 h, quando foram então desmoldados e imersos numa caixa contendo água saturada com cal (Figura 3.22), permanecendo em cura até que completassem as idades de 8 e 28 dias.



Figura 3.22: Corpos de prova em cura.

A preparação das amostras de concreto para os ensaios de resistência foi realizada com o desbaste das faces em torno mecânico.

Para uma caracterização mais precisa dos concretos, com determinação dos parâmetros tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e viscosidade plástica ( $\mu$ ), foram feitos

ensaios no reômetro BTRHEOM (HU e DE LARRARD, 1996), pertencente ao Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, mostrado na Figura 3.23. Nesse reômetro, o anel de concreto formado dentro do equipamento, em torno de um eixo vertical, é cisalhado entre duas seções horizontais paralelas, onde a inferior é fixada por um sistema de palhetas e a superior é capaz de girar, sendo também conduzida por um sistema de palhetas conectadas com o eixo do motor (HU e DE LARRARD, 1996). Para garantir que o equipamento permaneça estanque durante todo o ensaio, são aplicadas fitas adesivas ou selos, entre as partes. O atrito causado por esses selos é calculado primeiramente na presença de água e depois subtraído dos valores dos ensaios em concretos, para que sejam obtidos valores de torque referentes somente às misturas em estudo.

Os parâmetros  $\Gamma_0$ ,  $A$  e  $b$ , necessários para a obtenção dos ajustes das curvas segundo o Modelo Herschel-Bulkley, o qual foi empregado nesse trabalho, foram determinados pelo programa ADHEREO, que é parte integrante do reômetro BTRHEOM. O programa utiliza o Método dos Mínimos Quadrados para esta determinação, conforme já mencionado anteriormente.



Figura 3.23: Reômetro BTRHEOM do Labest/COPPE/UFRJ.

Os ensaios, para todos os concretos, foram realizados após 10 min do contato da água com os materiais cimentícios. As velocidades angulares empregadas variaram na faixa entre 0,8 e 0,2 rev/s, nesta ordem. O procedimento de mistura dos concretos para os ensaios no reômetro foi idêntico ao adotado para as moldagens (Figura 3.24a e b). A fim de determinar também a massa específica no estado fresco e o teor de ar incorporado às misturas foram realizados os ensaios de massa específica (NBR 9833, 2009) e teor de ar incorporado (NBR NM 47, 2002), cujo equipamento é mostrado na Figura 3.24.



(a)



(b)

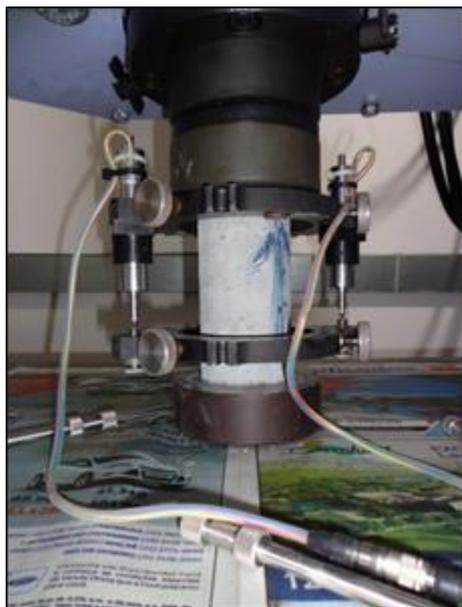


(c)

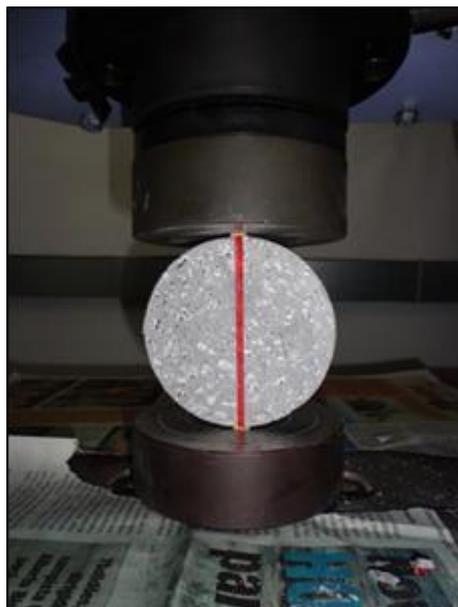
Figura 3.24: Mistura na betoneira (a) dentro do reômetro (b) e dentro do aparato para ensaio de ar incorporado (c).

### 3.4.3 Caracterização no estado endurecido

No estado endurecido, os concretos desse trabalho foram caracterizados por meio de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e índices físicos (Figura 3.25).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.25: Ensaio de resistência à compressão (a), de resistência à tração por compressão diametral (b) e índices físicos (c).

Os índices físicos das amostras (NBR 9778, 2009) foram determinados aos 28 dias e compreendem a massa específica aparente, a porosidade aparente e a

absorção d'água. Para determinação das massas das amostras submersas e saturadas com superfície seca, estas amostras foram retiradas do ambiente de cura, após 28 dias, lavadas em água corrente e em seguida imersas em água deionizada por 4 dias. Após isso as massas destas amostras foram determinadas, sendo as massas das amostras submersas determinadas através de uma balança hidrostática. Feito isso, as amostras foram secas em estufa a  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  por uma semana e depois tiveram suas massas novamente determinadas. As Equações 3.5, 3.6 e 3.7 foram utilizadas para o cálculo da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água, respectivamente:

$$\delta = \frac{m_s}{m_s - m_{sub}} \quad (\text{Equação 3.5})$$

$$P = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_{sub}} \quad (\text{Equação 3.6})$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (\text{Equação 3.7})$$

considerando:

$m_s$ : massa da amostra seca;

$m_{sat}$ : massa da amostra saturada;

$m_{sub}$ : massa da amostra submersa.

A resistência à compressão dos cilindros de concreto (NBR 5739, 2007) foi determinada aos 8 e 28 dias com determinação do módulo de elasticidade das amostras aos 28 dias (NBR 8522, 2008), com o auxílio de um LVDT (*linear variable differential transformer*) que é um sensor para medição de deslocamentos lineares. Para esse ensaio empregou-se a mesma máquina universal já citada para os ensaios em pastas e argamassas, novamente a uma velocidade de 0,5 mm/min. A Equação 3.8 mostra como foram calculados os valores de módulo de elasticidade.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (\text{Equação 3.8})$$

considerando:

$\sigma_1$ : tensão correspondente a uma deformação em torno de 50  $\mu\varepsilon$ ;

$\sigma_2$ : tensão correspondente a 40% da tensão máxima;

$\varepsilon_1$ : deformação em torno de 50  $\mu\varepsilon$ ;

$\varepsilon_2$ : deformação correspondente à tensão  $\sigma_2$ .

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ou Ensaio Brasileiro, normalizado pela NBR 7222 (2011), por sua vez, foi realizado aos 30 dias. A Equação 3.9 foi empregada para o cálculo dos valores de resistência à tração.

$$\sigma_t = \frac{2F_t}{\pi\varphi L} \quad (\text{Equação 3.9})$$

considerando:

$F_t$ : força de ruptura;

$\varphi$ : diâmetro médio do corpo de prova;

L: espessura média do corpo de prova.

Para uma validação estatística de todos os dados obtidos dos ensaios no estado endurecido dos concretos, novamente empregou-se a mesma Análise de Variância, ao nível de 5% de probabilidade, já mencionada para as pastas e argamassas.

## 4. Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios para determinação dos parâmetros reológicos dos sistemas cimentícios produzidos e das propriedades no estado endurecido.

### 4.1. Propriedades das pastas

Os resultados de espalhamento do minicone de Kantro, observados na Tabela 4.1 indicaram uma sensível diminuição na trabalhabilidade das pastas da primeira etapa, com o aumento do teor de CCA utilizado. Ressalta-se que a primeira etapa de produção das pastas foi aquela em que o teor de superplastificante empregado na P-REF foi mantido fixo também para as pastas contendo CCA, a fim de avaliar a influência isolada dessa cinza nas propriedades reológicas das pastas. Este fenômeno de queda na trabalhabilidade com o aumento do teor de CCA nas misturas também foi observado por Ganesan *et al.* (2008), Raman *et al.* (2011), Safiuddin *et al.* (2011) e Celik e Canakci (2015). Tal queda foi devido à elevada superfície específica da CCA, a qual acarretou numa maior demanda de água nas misturas. Os resultados confirmam a necessidade de uma dosagem adequada de superplastificante para manutenção do espalhamento em uma faixa constante, como pode ser observado na Tabela 4.2, que trata das pastas da segunda etapa, onde o teor de superplastificante foi variado a fim de manter a mesma consistência para todas as pastas.

Tabela 4.1: Dosagens e espalhamentos das pastas da primeira etapa.

Pasta	% CCA	SP* (%)	a/mc	Espalhamento médio (mm)
P-REF	-	0,063	0,45	115
P-CCA-10SC	10	0,063	0,45	112
P-CCA-15SC	15	0,063	0,45	102
P-CCA-20SC	20	0,063	0,45	90

\* % de sólidos em relação ao total de cimento ou cimento e CCA.

Tabela 4.2: Dosagens e espalhamentos das pastas da segunda etapa.

Pasta	% CCA	SP* (%)	a/mc	Espalhamento médio (mm)
P-REF	-	0,063	0,45	115
P-CCA-10	10	0,067	0,45	114
P-CCA-15	15	0,071	0,45	113
P-CCA-20	20	0,076	0,45	112

\* % de sólidos em relação ao total de cimento ou cimento e CCA.

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 mostram as curvas de reologia para as pastas da primeira etapa nos tempos de 10 e 30 min, após as misturas dos materiais, respectivamente. Os ajustes das curvas, também exibidos nas Figuras, foram obtidos segundo o Modelo Herschel-Bulkley, o qual apresentou excelente correlação com os dados experimentais (valores de  $R^2$  entre 0,9957 e 0,9999). A partir dos resultados é possível confirmar o incremento na viscosidade plástica aparente das pastas, caracterizado pelo afastamento entre a curva da pasta P-REF e as curvas das pastas contendo a CCA.

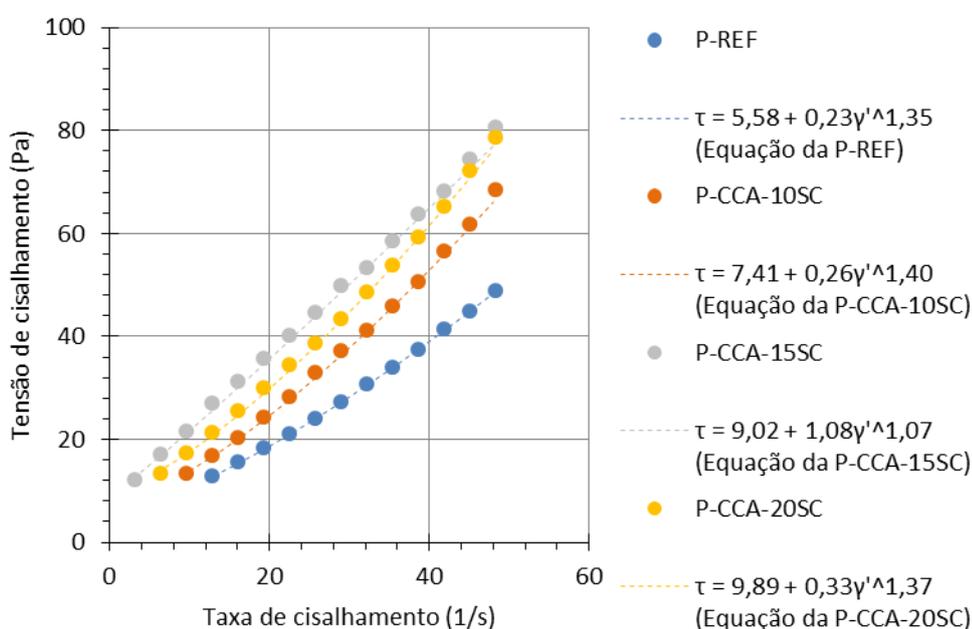


Figura 4.1: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da primeira etapa aos 10 min.

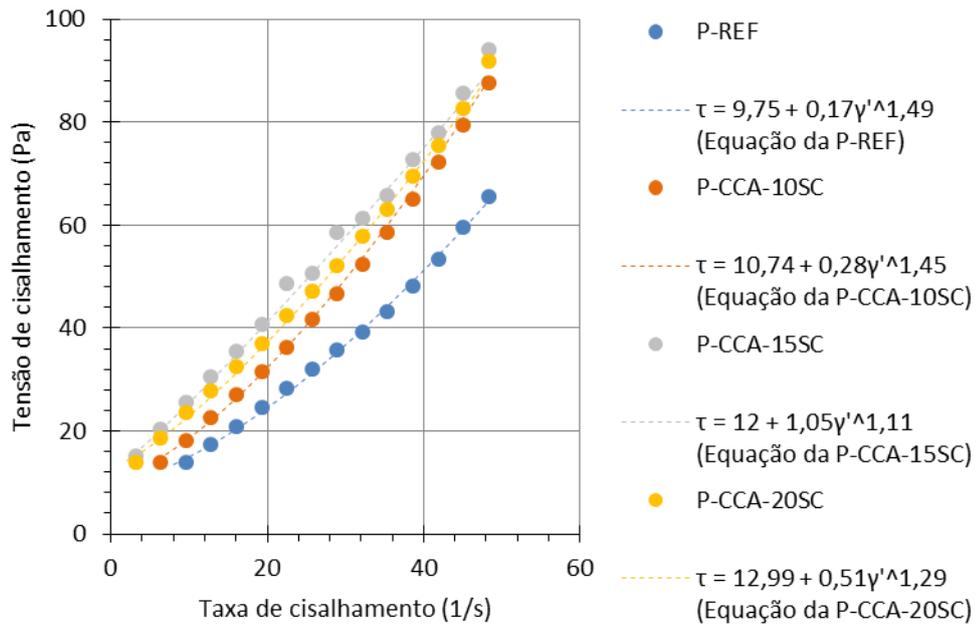


Figura 4.2: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da primeira etapa aos 30 min.

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros reológicos das pastas da primeira etapa obtidos a partir do modelo de Herschel-Bulkley, onde foi possível observar que os teores de 15 e 20% de CCA foram os que mais provocaram aumentos nos valores da tensão de escoamento, viscosidade aparente e no parâmetro  $K$  das pastas, nos dois tempos analisados, em relação à pasta P-REF. Este fenômeno foi devido a maior superfície específica destas misturas sólidas (maiores teores de cinza). A viscosidade aparente foi calculada através da Equação 4.1 proposta por De Larrard (1999):

$$\mu = \frac{\tau_0 + K\dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde:

$\dot{\gamma}$ : taxa de cisalhamento média empregada durante os ensaios; neste caso tomou-se o valor de  $24 \text{ s}^{-1}$ , para efeito de cálculos.

Tabela 4.3: Propriedades reológicas das pastas da primeira etapa.

Pasta	$\tau'_0$ (Pa)	$K$	$n$	$\mu$ (Pa.s)	$R^2$
P-REF (10 min)	5,58	0,23	1,35	0,93	0,9999
P-REF (30 min)	9,75	0,17	1,49	1,21	0,9976
P-CCA-10SC (10 min)	7,41	0,26	1,40	1,24	0,9992
P-CCA-10SC (30 min)	10,74	0,28	1,45	1,62	0,9992
P-CCA-15SC (10 min)	9,02	1,08	1,07	1,72	0,9985
P-CCA-15SC (30 min)	12,00	1,05	1,11	1,99	0,9957
P-CCA-20SC (10 min)	9,89	0,33	1,37	1,48	0,9992
P-CCA-20SC (30 min)	12,99	0,51	1,29	1,82	0,9978

A Figura 4.3 e a Figura 4.4, por outro lado, mostram as curvas de reologia para as pastas da segunda etapa nos tempos de 10 e 30 min, respectivamente. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros reológicos das pastas da segunda etapa também obtidos a partir do modelo de Herschel-Bulkley. Nessa segunda etapa, novamente houve aumentos nos valores da tensão de escoamento, viscosidade aparente e também no parâmetro  $K$ , das pastas contendo cinza em relação à pasta P-REF. Desta vez, entretanto, tais aumentos foram menos expressivos. Isto deve-se, à presença do superplastificante em dosagens adequadas para a manutenção da consistência, que, desta forma, age de forma a controlar o aumento do valor da tensão de escoamento e também da viscosidade plástica aparente, caracterizada pela maior proximidade entre as curvas da pasta P-REF e das curvas das pastas contendo a CCA, nos dois tempos. A proximidade é maior principalmente entre as pastas contendo a CCA, confirmando o efeito de aumento de viscosidade plástica aparente, mesmo com uma dosagem adequada do superplastificante de modo a garantir uma consistência fixa e pré-estabelecida, inclusive para essas pastas. O fenômeno de aumento de viscosidade, ocasionado pela presença da CCA também foi observado por Laskar e Talukdar (2008) e Celik e Canakci (2015). Em Ferraris *et al.* (2001) o efeito da sílica ativa na reologia de pastas e concretos de alto desempenho foi avaliado e constatando-se também um notável prejuízo às propriedades reológicas das misturas.

O aspecto das curvas de reologia das pastas conjuntamente com os valores obtidos para as tensões de escoamento, indicaram certa restrição para o ensaio do minicone de Kantro, para pastas com CCA e baixas relações  $a/mc$  (abaixo de 0,5), demonstrando que, ensaios dessa natureza fornecem apenas uma ideia geral a

respeito da reologia desses produtos cimentícios (FERRARIS *et al.*, 2001; LASKAR e TALUKDAR, 2008). O aumento nos valores da tensão de escoamento no tempo, comparando-se cada pasta com si própria, por sua vez, é nítido para todas as pastas de ambas as etapas, por conta da evolução nas reações de hidratação do cimento.

Além disso, observou-se também que todas as misturas apresentaram valores de  $n$  maiores que 1 e, por esta razão, são denominadas fluidos dilatantes, ou seja, há nestas misturas a ocorrência de um aumento na viscosidade plástica aparente como reação a um aumento na taxa de cisalhamento.

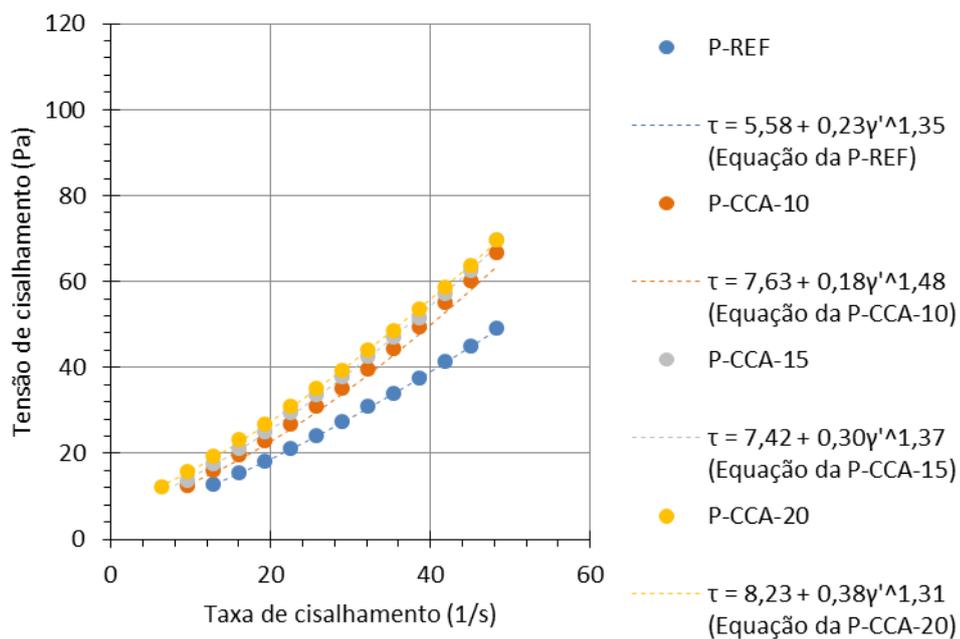


Figura 4.3: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da segunda etapa aos 10 min.

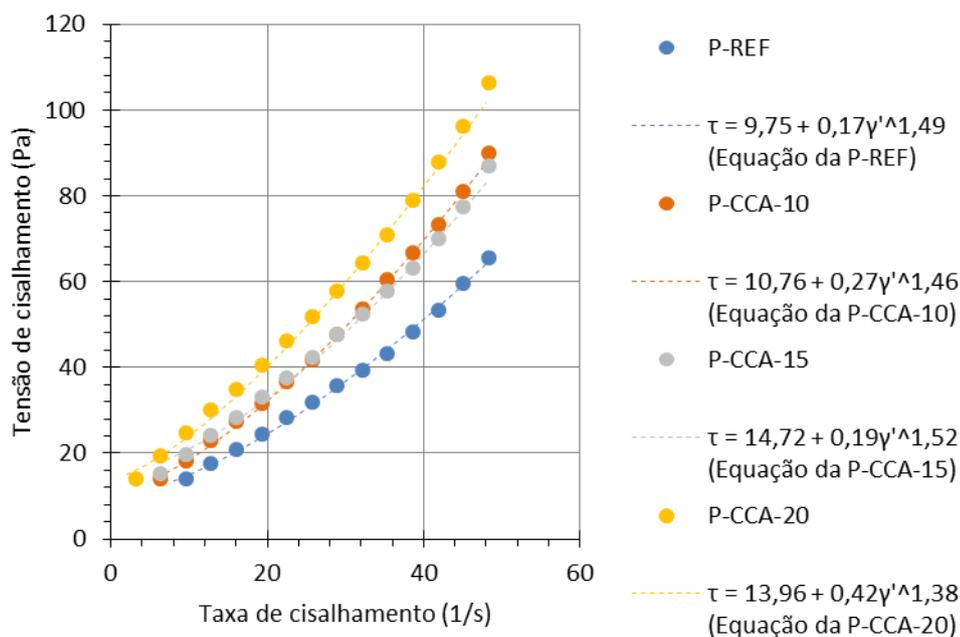


Figura 4.4: Curvas experimentais dos ensaios no viscosímetro e funções de ajuste para as pastas da segunda etapa aos 30 min.

Tabela 4.4: Propriedades reológicas das pastas da segunda etapa.

Pasta	$\tau'_0$ (Pa)	$K$	$n$	$\mu$ (Pa.s)	$R^2$
P-REF (10 min)	5,58	0,23	1,35	0,93	0,9999
P-REF (30 min)	9,75	0,17	1,49	1,21	0,9976
P-CCA-10 (10 min)	7,63	0,11	1,57	1,14	0,9998
P-CCA-10 (30 min)	10,76	0,52	1,25	1,61	0,9993
P-CCA-15 (10 min)	7,42	0,30	1,37	1,28	0,9989
P-CCA-15 (30 min)	14,72	0,19	1,52	1,60	0,9973
P-CCA-20 (10 min)	8,23	0,38	1,31	1,36	0,9997
P-CCA-20 (30 min)	13,96	0,42	1,38	1,99	0,9978

A Figura 4.5 mostra os valores médios de resistência à compressão, aos 7 e 28 dias das diferentes pastas produzidas na segunda etapa. Constatou-se que não houve, nesse caso, alteração significativa da resistência média para nenhum dos três teores de substituição do cimento por cinza, em relação à pasta P-REF, em nenhuma das idades avaliadas, de acordo com a Análise de Variância ao nível de 5% de probabilidade. A variação média de resistência das pastas contendo cinza em relação à pasta P-REF foi cerca de 2 e 3% aos 7 e 28 dias, respectivamente. Esta variação ligeiramente mais alta aos 28 dias deve-se à maior intensidade da atividade

pozolânica da CCA que é mais frequente em idades mais avançadas. O aumento de resistência entre 7 e 28 dias, por sua vez, foi cerca de 23, 22, 24 e 26% para as pastas P-REF, P-CCA-10, P-CCA-15 e P-CCA-20, respectivamente, caracterizando, portanto, uma evolução de resistência bastante semelhante entre as pastas.

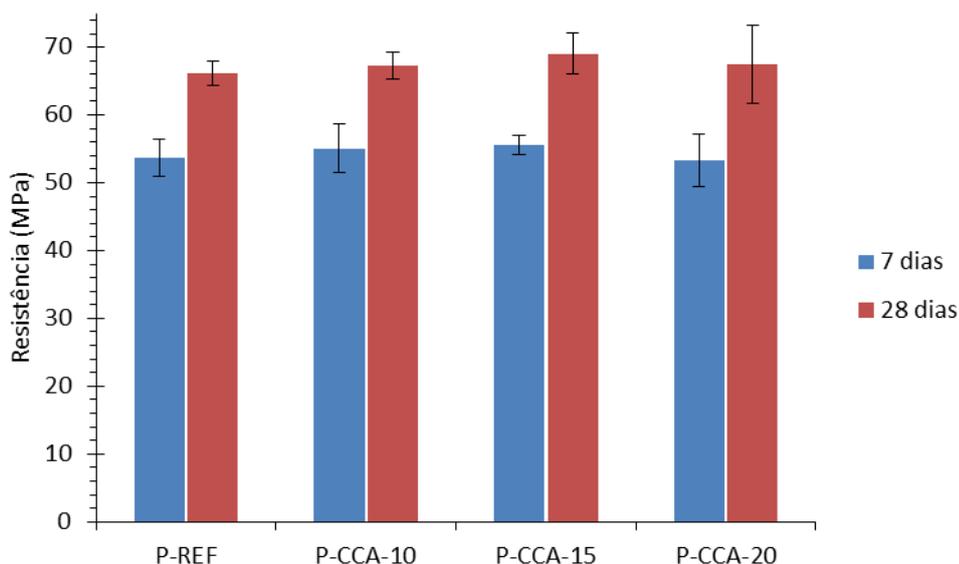


Figura 4.5: Resistências médias das diferentes misturas de pastas da segunda etapa.

De acordo com os dados obtidos, foi possível optar-se pelo teor de 20% de CCA para substituição de cimento nas argamassas, como já citado, pois foi o teor que proporcionou o maior aumento nas propriedades reológicas das pastas, além de não ter propiciado mudanças expressivas na resistência à compressão nas duas idades avaliadas. Esse resultado é condizente com o ensaio de condutividade elétrica, também citado anteriormente, que classificou a cinza em estudo como um material de média pozolanicidade, assemelhando-se, por exemplo, à cinza volante e à cinza do bagaço de cana.

## 4.2. Propriedades das argamassas

Assim como nas pastas, nas argamassas, também foi possível perceber certa diminuição na trabalhabilidade, tanto nas argamassas de mesma consistência

quanto nas argamassas contendo um teor fixo de superplastificante. Entretanto, nesse caso, essa diminuição ocorreu à medida que o teor de ABG das misturas foi diminuído, uma vez que o teor de CCA foi mantido fixo. Esse fato é explicado pela própria natureza do ensaio de espalhamento em mesa, o qual está muito mais relacionado à tensão de escoamento do que à viscosidade plástica (TANIGAWA e MORI, 1989; SENFF *et al.*, 2009), além de ser este um ensaio que apresenta maior dinamismo em comparação com outros ensaios como o minicone e o abatimento do tronco de cone. Dessa forma, a maior presença de finos e a superfície mais áspera que geralmente são observadas nessas areias elevam a superfície específica da pasta fazendo com que atinjam um espalhamento um pouco maior sob uma mesma tensão. No caso das argamassas da primeira etapa, observou-se um notável aumento no espalhamento daquelas que continham a ABG em relação à argamassa A-REF. Esse aumento foi além da faixa inicialmente estabelecida de  $250 \pm 10$  mm, confirmando o efeito do aumento de fluidez, no caso do ensaio de espalhamento em mesa das argamassas, o qual foi proporcionado pelo aumento no teor de ABG (Tabela 4.5). Os aumentos nos valores de espalhamento das argamassas contendo a ABG em relação à argamassa A-REF, nesse caso, foram em torno de 20, 24 e 21%, para as misturas A-ABG-10, A-ABG-30 e A-ABG-50, respectivamente.

Tabela 4.5: Dosagens e espalhamentos das argamassas da primeira etapa.

Argamassa	% CCA	% ABG	SP* (%)	a/mc	Espalhamento médio (mm)
A-REF	20	-	1,150	0,45	240
A-ABG-10SC	20	10	1,150	0,45	288
A-ABG-30SC	20	30	1,150	0,45	298
A-ABG-50SC	20	50	1,150	0,45	290

\* % de sólidos em relação ao total de cimento e CCA.

A Tabela 4.6, por sua vez, mostra os espalhamentos das argamassas da segunda etapa, na qual o teor de superplastificante foi variado a fim de que todas as misturas apresentassem sempre a mesma consistência. O aumento máximo do espalhamento, em relação à A-REF, neste caso, foi de cerca de 7%. A diminuição na demanda do aditivo superplastificante para manutenção da consistência com o aumento no teor de ABG revelou uma característica interessante das argamassas contendo teores mais altos desta areia.

Tabela 4.6: Dosagens e espalhamentos das argamassas da segunda etapa.

Argamassa	% CCA	% ABG	SP* (%)	a/m <sub>c</sub>	Espalhamento médio (mm)
A-REF	20	-	1,150	0,45	240
A-ABG-10	20	10	1,131	0,45	249
A-ABG-30	20	30	0,700	0,45	258
A-ABG-50	20	50	0,550	0,45	250

\* % de sólidos em relação ao total de cimento e CCA.

A Figura 4.6 mostra os valores médios de resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, das diferentes argamassas produzidas na segunda etapa. Nesse caso, observou-se que também não houve diferença significativa entre as resistências médias das diferentes misturas quando comparadas à A-REF, em nenhuma das duas idades avaliadas. Isso demonstra que para todos os teores de ABG analisados, a presença dessa areia não promoveu qualquer mudança expressiva de resistência, no caso das argamassas. A variação média de resistência das argamassas contendo ABG em relação à argamassa A-REF foi cerca de 5 e 12% aos 7 e 28 dias, respectivamente. O aumento de resistência entre 7 e 28 dias, por sua vez, foi cerca de 44, 30, 29 e 22% para as argamassas A-REF, A-ABG-10, A-ABG-30 e A-ABG-50, respectivamente.

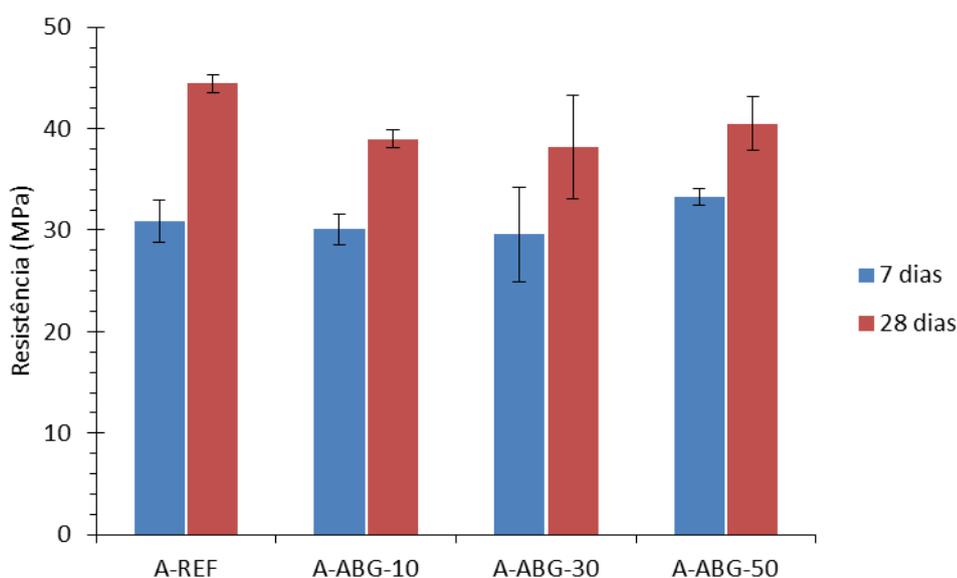


Figura 4.6: Resistências médias das diferentes misturas de argamassas da segunda etapa.

### 4.3. Propriedades dos concretos

A Figura 4.7 mostra as curvas obtidas nos ensaios de reologia no reômetro BTRHEOM, onde são destacadas a mistura C-REF, a mistura C-ABG-50 e essa mesma mistura contendo o teor de superplastificante usado na C-REF (C-ABG-50SC). Nessa Figura é possível observar que a curva da mistura C-ABG-50SC se distancia expressivamente das demais, desde seu início, (aumento do torque). Isso evidencia a queda de trabalhabilidade do concreto devido a substituição de areia natural por ABG e a importância do efeito do superplastificante para que as misturas contendo ABG apresentem um comportamento comparável ao da mistura C-REF. A mistura C-ABG-50, por sua vez, apresentou maior proximidade da mistura C-REF, por ter sido confeccionada com um teor diferenciado de superplastificante (cerca de 44% a mais que a mistura C-REF). Destaca-se ainda a elevada correlação entre os valores do ensaio e as curvas de ajuste (valores de  $R^2$  maiores que 0,99).

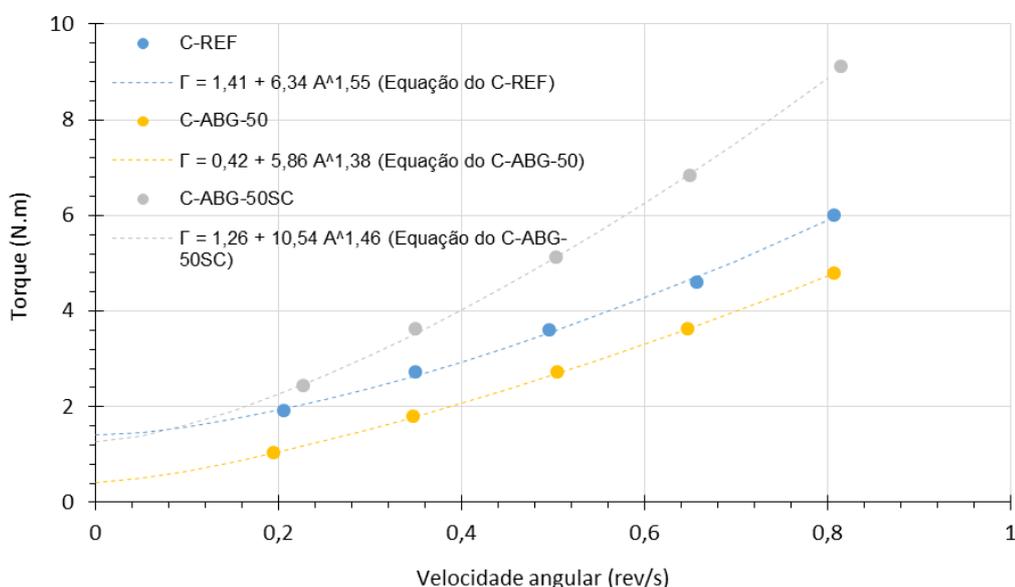


Figura 4.7: Valores de reologia e curvas de ajuste (Modelo Herschel-Bulkley) das misturas C-REF, C-ABG-50 e C-ABG-50SC.

A Tabela 4.7 mostra os parâmetros  $\tau'_0$  e  $\mu'$ , os valores de  $a$  e  $b$ , utilizados no cálculo desses parâmetros no Modelo Herschel-Bulkley e outras propriedades no

estado fresco como abatimento, massa específica (NBR 9833, 2009) e teor de ar incorporado (NBR NM 47, 2002), para as misturas.

Observa-se, neste caso, que a tensão inicial da mistura C-ABG-50 apresentou um valor notavelmente menor que a mistura C-REF. A queda percentual, nesse caso, foi cerca de 70%. A mistura C-ABG-50SC, ao contrário, apresentou um valor de tensão bem mais próximo ao valor da mistura C-REF (queda de cerca de somente 10%). Este valor, contudo, também foi menor que o valor da mistura C-REF. A viscosidade plástica, por sua vez, também apresentou queda para a mistura C-ABG-50, porém em menor proporção (em torno de 2%). A mistura C-ABG-50SC, por sua vez, ilustrou o efeito da ABG, isoladamente, na reologia, com um valor de viscosidade significativamente maior do que a mistura C-REF (cerca de 71% maior). Esses dados confirmam, mais uma vez, a importância da correção feita pelo aditivo superplastificante nas misturas contendo a ABG para a manutenção ou ainda eventual melhora das propriedades reológicas destas (WESTERHOLM, 2006).

Da Tabela 4.7, destaca-se também a notável queda no valor do abatimento para a mistura C-ABG-50SC (cerca de 40%) em relação à mistura C-REF. Esse valor de abatimento (120 mm), entretanto, ainda pode ser considerado adequado para operações de concretagem, em geral, como bombeamento, lançamento, adensamento e acabamento da mistura. Os valores do teor de ar aprisionado, para as misturas contendo ABG não apresentaram grandes mudanças em relação à mistura C-REF, mesmo com o maior teor de superplastificante da mistura C-ABG-50. Esses valores foram em torno de 2,6%.

Tabela 4.7: Propriedades dos concretos C-REF, C-ABG-50 e C-ABG-50SC no estado fresco.

Mistura	Abatimento (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)	$\tau'_0$ (Pa)	$a$	$b$	$\mu'$ (Pa.s)	R <sup>2</sup>
C-REF	200	2,23	2,5	391	104	1,55	236	0,9988
C-ABG-50	204	2,27	2,6	117	131	1,38	230	1,0000
C-ABG-50SC	120	2,27	2,7	350	204	1,46	404	0,9997

A Figura 4.8 mostra as curvas de reologia para as misturas C-REF, C-ABG-50 e também para as misturas C-ABG-10 e C-ABG-30 também com ajustes segundo o

Modelo Herschel-Bulkley. Observa-se, neste caso, que todas as misturas contendo a ABG, apresentaram tendências similares à observada para a C-REF, com valores de torque ligeiramente menores, gerados por elas.

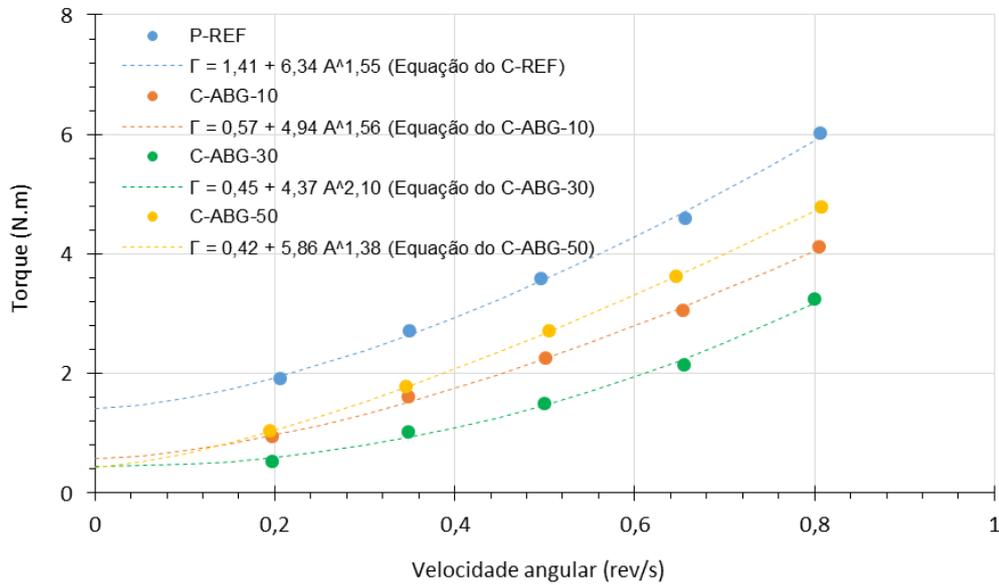


Figura 4.8: Valores de reologia e curvas de ajuste (Modelo Herschel-Bulkley) das misturas C-REF, C-ABG-10, C-ABG-30 e C-ABG-50.

A Tabela 4.8 mostra os parâmetros  $\tau'_0$  e  $\mu'$  e os valores de  $a$  e  $b$  das misturas com a mesma faixa de abatimento do tronco de cone (C-REF, C-ABG-10, C-ABG-30 e C-ABG-50). Observa-se, que as tensões iniciais das misturas contendo a ABG (exceto a mistura C-ABG-50SC) apresentaram valores notavelmente menores que a mistura C-REF e bastante próximos entre si, devido ao efeito de lubrificação do superplastificante. A queda máxima percentual, nesse caso, foi cerca de 70%, como já mencionado, referente à mistura C-ABG-50. A viscosidade plástica, por sua vez, também apresentou queda para as misturas contendo a ABG, porém em menores proporções (até cerca de 41%, no máximo, para a mistura C-ABG-30). Os teores de ar incorporado dessas misturas também não apresentaram grandes variações em relação à mistura C-REF. Nesse caso, todos os valores encontraram-se abaixo de 3,5%.

Tabela 4.8: Propriedades dos concretos C-REF, C-ABG-10, C-ABG-30 e C-ABG-50 no estado fresco.

Mistura	Abatimento (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)	$\tau'_0$ (Pa)	$a$	$b$	$\mu'$ (Pa.s)	R <sup>2</sup>
C-REF	200	2,23	2,5	391	104	1,55	236	0,9988
C-ABG-10	220	2,24	3,3	158	80	1,56	184	0,9992
C-ABG-30	215	2,26	2,6	125	27	2,10	139	0,9966
C-ABG-50	204	2,27	2,6	117	131	1,38	230	1,0000

Estabelecendo-se uma comparação entre o comportamento reológico das pastas da segunda campanha e o dos concretos com faixa fixa de consistência, é possível perceber que a CCA isoladamente, causa um efeito natural, ainda que pequeno, de aumento na viscosidade das misturas, mesmo que estas apresentem a mesma consistência. Quando essa cinza se encontra em presença de um agregado como a ABG, entretanto, esse efeito é atenuado e até mesmo anulado, como é possível perceber na Tabela 4.8 pela diminuição nos valores de  $\mu'$  para as misturas contendo essa areia. Nas argamassas, esse efeito de maior trabalhabilidade foi ainda mais notável. A forma mais angulosa e superfície mais áspera dos grãos de ABG (item 3.1.3) causou, neste caso, um aumento na fricção interna entre as partículas com conseqüente aumento na absorção de água e na viscosidade plástica. A dosagem adequada do superplastificante, entretanto, foi capaz de se sobrepor ao efeito negativo de perda de trabalhabilidade inicialmente ocasionado pela presença do ABG nos concretos.

A Tabela 4.9 resume os índices físicos dos diversos concretos produzidos. Observa-se, que os valores de massa específica aparente dos concretos contendo ABG não apresentaram diferenças notáveis em relação ao valor obtido para a mistura C-REF. A mesma afirmação pode ser feita para os valores de porosidade aparente e absorção d'água, que se mantiveram abaixo de 12 e 5%, respectivamente. Destacam-se ainda, os menores valores destas duas últimas propriedades para as misturas contendo ABG.

Tabela 4.9: Índices físicos dos diferentes concretos.

Mistura	Massa específica aparente média (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade aparente média (%)	Absorção d'água média (%)
C-REF	2,48	11,15	5,05
C-ABG-10	2,46	10,45	4,75
C-ABG-30	2,44	9,15	4,14
C-ABG-50	2,45	7,70	3,41

A Tabela 4.10 resume as propriedades mecânicas dos diversos concretos produzidos enquanto a Figura 4.9 mostra os valores médios de resistência à compressão aos 8 e 28 dias dos primeiros concretos produzidos. A análise de variância aplicada apontou que as misturas C-ABG-50 e C-ABG-50SC apresentaram um acréscimo significativo de resistência em relação à mistura C-REF, aos 28 dias. Esse fato ilustra o efeito benéfico da incorporação desse teor de ABG no aumento da resistência mecânica de concretos. Neste caso, mesmo empregando-se, na mistura C-ABG-50SC, um teor de superplastificante cerca de 31% menor do que o necessário para que essa mesma mistura apresentasse uma faixa de abatimento igual a da mistura C-REF, ainda assim essa mistura apresentou uma boa trabalhabilidade (abatimento de 120 mm). Este fato foi determinante para a manutenção da resistência. O aumento da resistência à compressão de concretos contendo ABG também foi observado por Donza *et al.* (2002) e Binici *et al.* (2008). Esse aumento de resistência observado nos concretos com 50% de ABG condiz com os menores valores de porosidade aparente e absorção d'água apresentados pela mistura C- ABG-50.

Tabela 4.10: Propriedades mecânicas dos diferentes concretos.

Mistura	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Resistência média à tração (MPa)
C-REF	53,80	23,90	3,81
C-ABG-10	51,62	22,95	3,58
C-ABG-30	52,85	23,69	3,06
C-ABG-50	58,02	24,24	3,81

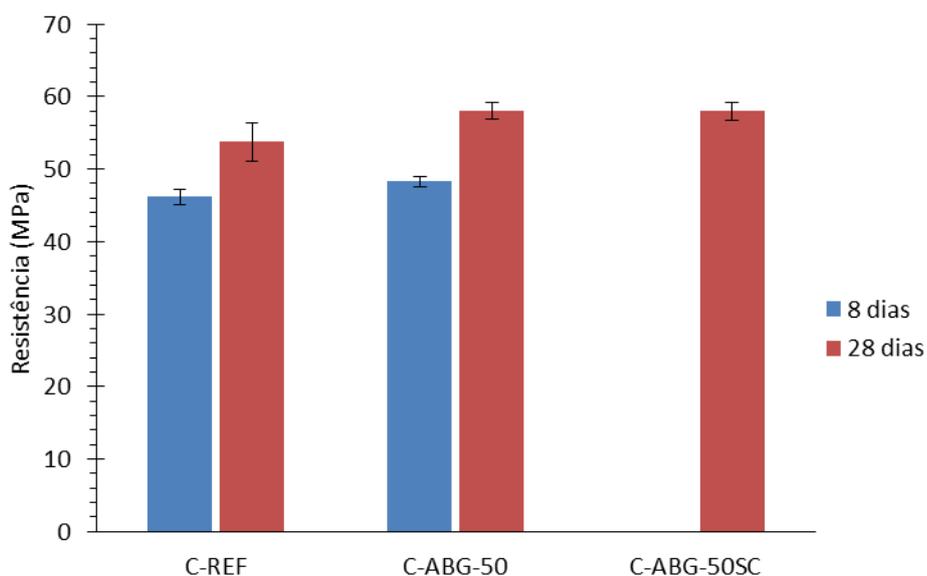


Figura 4.9: Resistências médias das misturas iniciais de concretos.

A Figura 4.10 mostra os valores médios de resistência à compressão, aos 8 e 28 dias dos demais concretos produzidos, incluindo novamente a mistura C-ABG-50. A análise de variância aplicada apontou, nesse caso, que não houve diferença significativa entre os valores de resistência das misturas C-ABG-10 e C-ABG-30 em relação à C-REF em nenhuma das duas idades avaliadas. É interessante destacar que os teores de 10 e 30% de ABG, nesse trabalho, não foram suficientes para promover esse aumento de resistência. Vale ressaltar, entretanto, que tais teores também não promoveram nenhuma queda nos valores de resistência de suas respectivas misturas. Binici *et al.* (2008) constataram que a resistência à compressão é fortemente influenciada pelo teor desse tipo de agregado, quando de seu emprego.

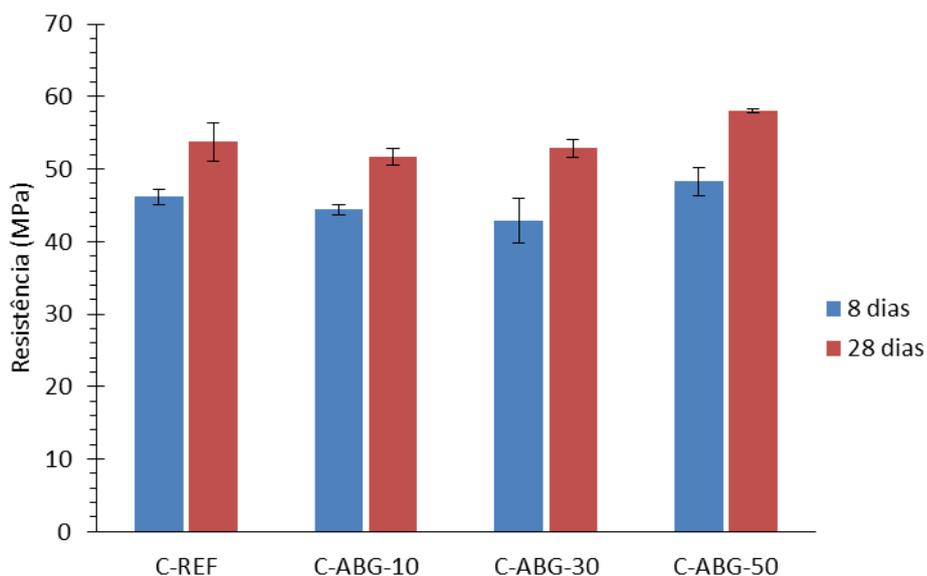


Figura 4.10: Resistências médias dos demais concretos.

A Figura 4.11 mostra as curvas tensão *versus* deformação específica dos diversos concretos produzidos, de onde foram obtidos os módulos de elasticidade (Tabela 4.10) que foram calculados de acordo com a NBR 8522 (2008). No que tange a esses módulos, a análise de variância empregada também não apontou diferenças significativas entre os diversos valores das misturas contendo a ABG, em relação à mistura C-REF. Isso demonstra que a presença da ABG não exerceu influência sobre essa propriedade. Destaca-se que o módulo de elasticidade é uma importante propriedade do concreto para fins estruturais e, neste caso, a presença da ABG em qualquer dos três teores não prejudicaria o concreto se fosse empregado com esta finalidade.

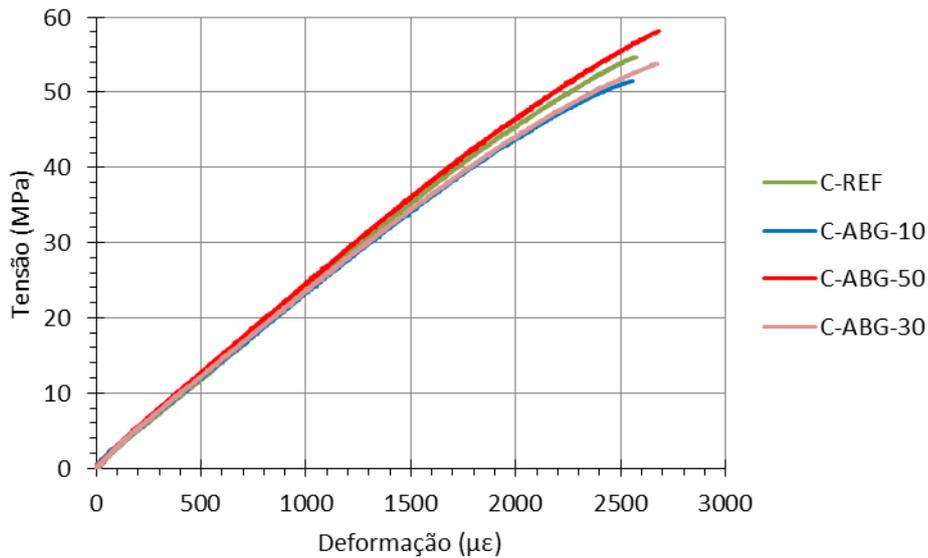


Figura 4.11: Curvas típicas tensão *versus* deformação dos diferentes concretos.

A Figura 4.12 mostra as resistências médias à tração por compressão diametral dos concretos, aos 30 dias. Também nesse ensaio, não foram constatadas diferenças significativas entre os valores médios de resistência à tração das misturas contendo a ABG quando comparadas à mistura de Referência. Tal fato demonstra que a presença da ABG também não exerceu influência sobre essa propriedade. A Figura 4.13 mostra o aspecto de alguns dos concretos após as rupturas por compressão e tração, onde destaca-se a uniformidade na distribuição dos agregados dentro das misturas, sinalizando a ausência de indícios de segregação.

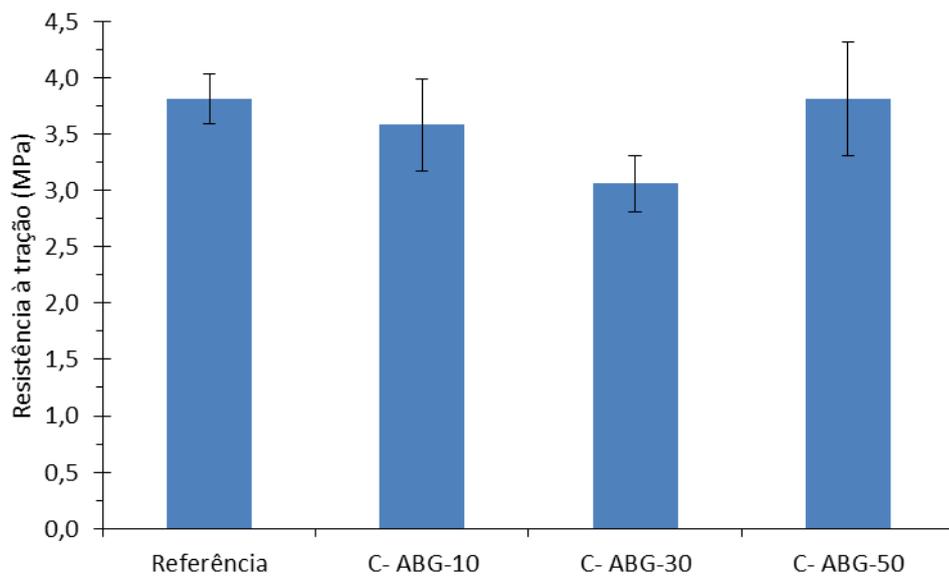


Figura 4.12: Resistências médias à tração por compressão diametral dos diferentes concretos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.13: Aspecto interno de um dos concretos após ruptura por compressão (a), detalhe do cone formado após essa ruptura (b), aspecto interno do mesmo concreto (c) e fratura formada após ensaio de tração por compressão diametral em um dos concretos (d).

## 5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

De acordo com os resultados apresentados nesse trabalho, as seguintes conclusões podem ser inferidas:

- A ABG apresenta, em geral, partículas mais angulosas e de texturas mais irregulares que a areia quartzosa natural de rio. Este fato é devido ao próprio processo de britagem e esta característica tende a causar alterações nas propriedades reológicas e mecânicas de produtos cimentícios contendo este tipo de areia. As alterações nestas propriedades relacionam-se fortemente ainda com o teor empregado desta areia e com o seu teor de finos;

- A inserção da CCA, num teor de até 20%, em volume, e na ausência de uma dosagem adequada de um aditivo químico redutor de água (plastificante ou superplastificante) para manter certa consistência para uma mistura cimentícia, tende a elevar notavelmente a viscosidade plástica aparente desta mistura e também sua tensão inicial de escoamento. Com o tempo, entretanto, o aumento na tensão de escoamento pela presença da cinza, tende a tornar-se menos expressivo, principalmente quando há a presença de uma dosagem adequada de superplastificante, de modo a controlar estes parâmetros. Esta afirmação não é válida, contudo, para a viscosidade plástica aparente, pois esta última tende somente a aumentar, tanto com a presença da CCA, como com o tempo;

- O ensaio do minicone de Kantro, bem como os demais ensaios desta natureza (mesa de consistência normal e abatimento do tronco de cone), fornecem apenas uma ideia geral a respeito da trabalhabilidade de produtos cimentícios contendo CCA e ABG e ainda com baixas relações  $a/mc$ ;

- A CCA empregada neste trabalho é uma cinza de média pozolanicidade e que não gerou, portanto, nenhuma alteração significativa de resistência mecânica nas pastas produzidas. Além disso, essa cinza desempenhou um papel importante para evitar que houvesse qualquer indício de segregação nos produtos cimentícios avaliados;

- As argamassas, que foram confeccionadas com um teor fixo de CCA e teores variáveis de ABG, apresentaram um aumento de fluidez, à medida que o teor de ABG era aumentado. Este fato relaciona-se com a própria natureza do ensaio de

espalhamento em mesa, o qual é bem mais dinâmico, quando comparado aos ensaios do minicone em pastas e do abatimento do tronco de cone em concretos. Além disso, conforme já também mencionado, o ensaio de espalhamento em mesa, está muito mais relacionado à tensão de escoamento do que à viscosidade plástica, fazendo com que, dessa forma, a maior presença de finos e a superfície mais áspera que geralmente é observada na ABG, eleve a superfície específica da pasta fazendo com que estas argamassas atinjam um espalhamento um pouco maior sob uma mesma tensão;

- Os concretos contendo ABG, com exceção da mistura C-ABG-50SC, apresentaram melhoras tanto na tensão de escoamento, quanto na viscosidade plástica, quando comparados ao concreto C-REF, contendo somente a CCA como material suplementar. Isto demonstra um efeito benéfico da incorporação dessa areia. Para que isto ocorresse, no entanto, foram necessários maiores de teores de superplastificante, conforme aumentava-se o teor de ABG;

- O Modelo reológico de Herschel-Bulkley foi o que apresentou a melhor correlação com os comportamentos de todos os produtos cimentícios avaliados nesse trabalho;

- A presença da ABG conjuntamente com a CCA proporcionou um aumento significativo de resistência à compressão aos concretos C-ABG-50 e C-ABG-50SC, aos 28 dias. A mistura C-ABG-50SC demonstrou que a insuficiência na dosagem de superplastificante para a manutenção da trabalhabilidade pré-fixada, neste caso, não afetou negativamente a resistência. Outras propriedades dos concretos, como resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, entretanto, mantiveram-se inalteradas mesmo com a presença da ABG.

Os dados apresentados nesse trabalho fornecem uma ideia básica a respeito do comportamento reológico e mecânico de misturas cimentícias contendo ABG e CCA. Para uma ideia mais completa, todavia, são sugeridos mais estudos envolvendo a confecção de concretos e argamassas com teores de ABG superiores a 50%, avaliação da resistência à compressão em mais idades, estudo reológico conclusivo das argamassas e estudo de aspectos da hidratação e calorimetria dos produtos cimentícios contendo a ABG.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo da reologia das argamassas com ABG com emprego de viscosímetro Brookfield ou similar. Neste caso, talvez outro tipo de palheta possa ser utilizado;
- Avaliação da influência da ABG nas propriedades de concretos com valores de resistência à compressão diferentes do empregado na presente pesquisa;
- Avaliação da influência de amostras de ABG de diferentes fontes (tipos distintos de granitos) nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto;
- Avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade (ataque por sulfatos, penetração acelerada de íons cloro, ataque ácido e carbonatação, por exemplo) dos concretos estudados na presente pesquisa.

## Referências

- ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI Concrete Terminology* - 13, 2013. Disponível em: <http://www.concrete.org/>. Acesso em 24/02/2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard specification for concrete aggregates: ASTM C 33. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregados- determinação da composição granulométrica: NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregado graúdo- Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água: NBR NM 53. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregado miúdo- Determinação da massa específica e massa específica aparente: NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland- Análise química- Determinação de perda ao fogo: NBR NM 18. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland de alta resistência inicial: NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland- Determinação da pasta de consistência normal: NBR NM 43. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland e outros materiais em pó- Determinação da massa específica: NBR NM 23. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto- Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão: NBR 8522. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto- Determinação do teor de ar em concreto fresco- Método pressométrico: NBR NM 47. Rio de Janeiro, 2002.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto e argamassa- determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto- Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto fresco- Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico: NBR 9833. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Determinação da resistência à compressão: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1997.
- BAIRAGI N. K., VIDYADHARA H. S., RAVANDE K. "Mix design procedure for recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials*, v. 04, pp. 188-193. 1990.
- BARNES H. A. "A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers; its cause, character and cure". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 56, pp. 221-251. 1995.
- BARNES H. A., NGUYEN Q. D. "Rotating vane rheometry- a review". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 98, pp. 1-14. 2001.
- BARROSO R. T. "Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físicas e químicas". Dissertação de Mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil. 2012.
- BENAICHA M., JALBAUD O., ALAOUI A. H., BURTSHELL Y. "Marsh cone coupled to a plexiglas horizontal channel: Rheological characterization of cement grout". *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 45, pp. 126-134. 2015.
- BINICI H., SHAH T., AKSOGAN O., KAPLAN H. "Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates". *Journal of Materials Processing Technology*, v. 208, pp. 299-308. 2008.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION, Specification for aggregates from natural sources for concrete: BS 882. London, 1992.
- CELIK F., CANAKCI H. "An investigation of rheological properties of cement-based grout mixed with rice husk ash (RHA)". *Construction and Building Materials*, v. 91, pp. 187-194. 2015.
- CHUSILP N., JATURAPITAKKUL C., KIATTIKOMOL K. "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete". *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 3352-3358. 2009.

- CONAB, COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira- Grãos - V.2 Safra 2014/15. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_06\\_11\\_09\\_00\\_38\\_boletim\\_graos\\_junho\\_2015.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_06_11_09_00_38_boletim_graos_junho_2015.pdf). Acesso em 22/06/2015.
- CORDEIRO G. C. “Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos”. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2006.
- CORDEIRO G. C., TOLEDO FILHO R. D., FAIRBAIRN E. M. R. “Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete”. *Materials and Structures*, v. 42, pp. 983-992. 2009.
- CORDEIRO G. C., TOLEDO FILHO R. D., FAIRBAIRN E. M. R. “Cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar: material pozolânico de alto potencial para países tropicais”. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 3, pp. 50-67. 2010.
- CORDEIRO G. C., TOLEDO FILHO R. D., TAVARES L. M., FAIRBAIRN E. M. R. “Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultra-fine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes”. *Construction and Building Materials*, v. 29, pp. 641-646. 2012.
- CORTES D. D., KIM H. K., PALOMINO A. M., SANTAMARINA J. C. “Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands”. *Cement and Concrete Research*, v. 38, pp. 1142-1147. 2008.
- DE LARRARD F. “Concrete mixture proportioning: a scientific approach”. 1ª ed. London: E&FN Spon. 1999.
- DE LARRARD F., FERRARIS C. F., SEDRAN T. “Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material”. *Materials and Structures*, v. 31, pp. 494-498. 1998.
- DE LARRARD F., HU C., SEDRAN T., SZITKAR J. C., JOLY M., CLAUX F., DERKX F. “New rheometer for soft-to-fluid fresh concrete”. *ACI Materials Journal*, v. 9, n. 3, pp. 234-243. 1997.
- DONZA H., CABRERA O., IRASSAR E. F. “High-strength concrete with different fine aggregate”. *Cement and Concrete Research*, v. 32, pp. 1755-1761. 2002.
- FERRARIS C. F., OBLA K. H., HILL R. “The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete”. *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp. 245-255. 2001.
- GANESAN K., RAJAGOPAL K., THANGAVEL K. “Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material”. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, pp. 515-524. 2007.
- GANESAN K., RAJAGOPAL K., THANGAVEL K. “Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability

- properties of concrete". *Construction and Building Materials*, v. 22, pp. 1675-1683. 2008.
- GOLDONI A. G., PANDOLFO L. M., GOMES A. P., FOLLE D., MARTINS M. S., PANDOLFO A. "Avaliação de um método baseado em análise de imagens para obtenção de parâmetros de forma em grãos de areia de britagem". *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 08, pp. 577-590. 2015.
- GONÇALVES J. P., 2005, "Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial". Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- HEBHOUB H., AOUN H., BELACHIA M., HOUARI H., GHORBEL E. "Use of waste marble aggregates in concrete". *Construction and Building Materials*, v. 25, pp. 1167-1171. 2011.
- HEWLETT P. C. "Lea's Chemistry of Cement and Concrete". In: SIMS I., BROWN B. (Org.). "Concrete Aggregates". Nova York: Elsevier Science & Technology Books, 1997. pp. 907-1015.
- HO D. W. S., SHEINN A. M. M., NG C. C., TAM C. T. "The use of quarry dust for SCC applications". *Cement and Concrete Research*, v. 32, pp. 505-511. 2002.
- HU C., DE LARRARD F. "The rheology of fresh high-performance concrete". *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 2, pp. 283-294. 1996.
- ISMAIL M. S., WALIUDDIN A. M. "Effect of rice husk ash on high strength concrete". *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 7, pp. 521-526. 1996.
- JAMES J., RAO M. S. "Reactivity of rice husk ash". *Cement and Concrete Research*, v. 16, pp. 296-302. 1986.
- LASKAR A. I., TALUKDAR S. "Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending". *Construction and Building Materials*, v. 22, pp. 2345-2354. 2008.
- LE H. T. "Behaviour of rice husk ash in self compacting high performance concrete". Tese de PhD, Bauhaus-Universität Weimar. 2014.
- LOMBOY G. R., WANG X., WANG K. "Rheological behavior and formwork pressure of SCC, SFSCC and NC mixtures". *Cement and Concrete Composites*, v. 54, pp. 110-116. 2014.
- LÚXAN M. P., MADRUGA F., SAAVEDRA J. "Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement". *Cement and Concrete Research*, v. 19, pp. 63-68. 1989.

- MEMON S. A., SHAIKH M. A., AKBAR H. "Utilization of rice husk ash as viscosity modifying agent in self-compacting concrete". *Construction and Building Materials*, v. 25, pp. 1044-1048. 2011.
- MENADI B., KENAI S., KHATIB J., AÏT-MOKHTAR A. "Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand". *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 625-633. 2009.
- NEVILLE, A. M., 1997, *Propriedades do concreto*, 2ª edição, Editora PINI.
- NGUYEN V. H., RÉMOND S., GALLIAS J. L., BIGAS J.P., MULLER P. "Flow of Herschel-Bulkley fluids through the Marsh cone". *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 139, pp. 128-134. 2006.
- RAMAN S. N., NGO T., MENDIS P., MAHMUD H. B. "High-strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust as a partial substitute for sand". *Construction and Building Materials*, v. 25, pp. 3123-3130. 2011.
- ROUSSEL N. "A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications". *Cement and Concrete Research*, v. 36, pp. 1797-1806. 2006.
- SAAK A. W., JENNINGS H. M., SHAH S. P. "The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste". *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp. 205-212. 2001.
- SAFIUDDIN M., WEST J. S., SOUDKI K. A. "Flowing ability of the mortars formulated from self-compacting concretes incorporating rice husk ash". *Construction and Building Materials*, v. 25, pp. 973-978. 2011.
- SAFIUDDIN M., WEST J. S., SOUDKI K. A. "Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material". *Construction and Building Materials*, v. 30, pp. 833-842. 2012.
- SALES C. P. "Produção e caracterização de cinza de capim elefante com vistas à sua aplicação como pozolana". *Dissertação de Mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil. 2012.*
- SEDRAN T., DE LARRARD F. "BétonLabPro3- Logiciel de formulation de bétons". *École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, CD-ROM. 2000.*
- SENFF L., BARBETTA P. A., REPETTE W. L., HOTZA D., PAIVA H., FERREIRA V. M., LABRINCHA J. A. "Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments". *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 3107-3111. 2009.
- SILVA A. S. M. "Dosagem de concreto pelos métodos de Empacotamento Compressível e Aïtcin-Faury Modificado". *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. 2004.*

- TANIGAWA Y., MORI H. "Analytical study on deformation of fresh concrete". Journal of Engineering Mechanics, v. 115, pp. 493-508. 1989.
- WESTERHOLM M. "Rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate". Tese de Doutorado, Lulea University of Technology, Stockholm. 2006.
- WILLIAMS D. A., SAAK A. W., JENNINGS H. M. "The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste". Cement and Concrete Research, v. 29, pp. 1491-1496. 1999.
- ZHANG M. H., LASTRA R., MALHOTRA V. M. "Rice husk ash paste and concrete: some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste". Cement and Concrete Research, v. 26, pp. 963-977. 1996.