



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

HELOINA NOGUEIRA DA COSTA

CARACTERIZAÇÃO DE AREIAS DE BRITAGEM DE PEDREIRAS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE FORTALEZA E AVALIAÇÃO DA SUA APLICAÇÃO NO
CONCRETO

FORTALEZA-CE

2015

HELOINA NOGUEIRA DA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO DE AREIAS DE BRITAGEM DE PEDREIRAS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE FORTALEZA E AVALIAÇÃO DA SUA APLICAÇÃO NO
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA-CE

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- C872c Costa, Heloína Nogueira da.
Caracterização de areias de britagem de pedreiras da região metropolitana de Fortaleza e avaliação da sua aplicação no concreto / Heloína Nogueira da Costa. – 2015.
132 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Construção Civil.
Orientação: Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral.
1. Engenharia Estrutural. 2. Concreto – Propriedades. 3. Areia de britagem. Título.

HELOINA NOGUEIRA DA COSTA

CARACTERIZAÇÃO DE AREIAS DE BRITAGEM DE PEDREIRAS DA REGIÃO
METROPOLITANA DE FORTALEZA E AVALIAÇÃO DA SUA APLICAÇÃO NO
CONCRETO

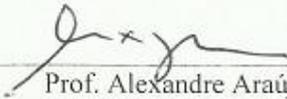
Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil: Estruturas e Construção Civil, da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Civil. Área de
Concentração: Construção Civil.

Aprovada em 25 /09 /2015.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, Dr. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Alexandre Araújo Bertini, Dr.
Universidade Federal do Ceará – UFC



Profa. Marlova Piva Kulakowski, Dra.
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

À Deus.

Aos meus familiares, em especial, à minha irmã Vanderlane (*in memoriam*), quem me ensinou as primeiras letras e versos.

AGRADECIMENTO

À Deus, pelo dom da vida.

À minha família, pelo apoio e compreensão.

Ao Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral, pela excelente orientação, por todo o conhecimento e experiências transmitidas, pela força e apoio nos momentos difíceis.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini e Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores do mestrado, em geral, por me proporcionarem enriquecimento intelectual.

Aos colegas e amigos Alexandre, Maurício, Joel, Diego, Elvis, Monyque, Daniel, Luis Felipe, Levi, Karlo, Átila e Davidson, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro.

Ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), pelo apoio financeiro.

À Vanessa Cavalcante do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), pelo suporte à pesquisa.

Ao SINDIBRITA e todas às pedreiras que disponibilizaram material para a pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas- GPMATE/UFC, pela disponibilização de infraestrutura para a execução dos experimentos.

Ao professor Aldo Almeida e toda sua equipe de técnicos e estagiários do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC.

Ao professor José Ramalho e toda a equipe do Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC).

A todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

É tempo de evoluir...

“É na crise que aflora o melhor de cada um”.

(Albert Einstein).

RESUMO

A areia natural utilizada na construção civil tem se tornado escassa devido ao esgotamento de reservas naturais e às restrições ambientais impostas pelos órgãos fiscalizadores. Por consequência, os preços desse insumo tendem a aumentar, onerando o consumidor final. Em busca de alternativas, sustentáveis e econômicas, propõe-se neste estudo caracterizar areias de britagem provenientes de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e avaliar sua aplicação, como agregado miúdo, em concreto convencional, em substituição à areia natural. O trabalho experimental está dividido em duas etapas. A primeira é a caracterização das propriedades físicas, químicas e petrográficas de oito tipos de areia de britagem da RMF, através dos ensaios de granulometria, massa específica, absorção de água, teor de material pulverulento, massa unitária, análise de forma dos grãos, reação álcali-agregado, análise petrográfica, espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). A segunda etapa é a avaliação das propriedades dos concretos produzidos com a incorporação de areia de britagem. Utilizou-se a ferramenta “planejamento de experimentos”. Classificou-se as areias de britagem em três grupos, sendo utilizada uma areia representante para cada grupo na produção dos concretos, onde se determinou dois fatores independentes (relação água/cimento e teor de substituição de areia de britagem) variando em três níveis cada. As variáveis de resposta analisadas foram: consumo de aditivo, resistência à compressão, resistência à tração diametral, retração por secagem, absorção de água, índices de vazios, massa específica e carbonatação natural. Os resultados apontam a viabilidade da utilização de areia de britagem em substituição à areia natural em concretos convencionais em até 75%, tendo em vista que a trabalhabilidade pode ser alcançada com a utilização de aditivos plastificantes, e de modo geral, observa-se um incremento na resistência à compressão, redução da absorção de água e índices de vazios, nas demais propriedades a incorporação de areia de britagem não produz efeitos significativos, portanto, sua utilização é considerado tecnicamente viável.

Palavras-chave: areia de britagem, concreto, propriedades.

ABSTRACT

The natural sand used in civil construction has become scarce due to the exhaustion of natural reserves and environmental constraints imposed by the regulatory agencies. Consequently, the prices of those inputs are likely to increase, burdening the consumer. In search of alternatives, sustainable and economical, this study proposes characterize crushed sand from quarries in the Fortaleza metropolitan region (RMF) and evaluate its implementation, as fine aggregate, in conventional concrete, as a replacement for natural sand. The experimental study is divided into two stages. The first one is the characterization of the physical, chemical and petrographical properties of eight kinds of crushed sand from RMF through the grading, density, water absorption, pulverulent material content, bulk density, grain shape analysis, alkali-aggregate reaction, petrographic analysis, X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and X-ray diffraction (XRD) tests. The second step is the properties evaluation of the concretes produced with crushed sand incorporation. The tool "design and analysis of experiments" was used. The crushed sands were rated into three groups and a representative sand for each group was used in the concrete production, where two independent factors (water/cement ratio and crushed sand replacement content) were determined by ranging in three levels each one of them. The measurement variables analyzed were the additive consumption, compressive strength, diametral tensile strength, shrinkage, water absorption, void ratios, density and natural carbonation. The results suggest the viability of using crushed sand to replace natural sand in conventional concrete by 75%, given that the workability can be achieved with the use of plasticizing additives, and in general, there is an increase in the compression resistance, reduced water absorption and void ratios, in other properties the crushed sand incorporation produces no significant effects, therefore their use is considered to be technically feasible.

Keywords: crushed sand, concrete, properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pilhas de estoque de areia de britagem em pedreiras da RMF	14
Figura 2 - Fratura na britagem.....	25
Figura 3 - Forma dos agregados	26
Figura 4 - Classificação do grau de esfericidade e arredondamento das partículas	27
Figura 5 - Diagrama esquemático geral de um processo de britagem.....	28
Figura 6 - Britador de mandíbulas (vista em corte).....	29
Figura 7 - Britador giratório cônico (vista em corte).....	30
Figura 8 - Britador de impacto horizontal (vista em corte).....	31
Figura 9 - Britador de impacto vertical (vista em corte).....	31
Figura 10 – Fluxograma do experimento	38
Figura 11 - Curva granulométrica da areia natural	40
Figura 12 - Curva granulométrica da pedra britada	41
Figura 13 - Localização das pedreiras no mapa da RMF.....	43
Figura 14 - Estoque de areias de britagem	44
Figura 15 - Corpos de prova moldados	52
Figura 16 - Corpos de provas prismáticos em cura em ambiente climatizado	52
Figura 17 - Corpos de prova de dimensões reduzidas	54
Figura 18 - Corpos de prova reduzidos.....	54
Figura 19 - Corpos de prova após a aspersão de fenolftaleína	55
Figura 20 - Distribuição granulométrica das areias de britagem.....	56
Figura 21 - Difratogramas de Raios X das areias de britagem.....	60
Figura 22- Microscopia ótica da areia A	63
Figura 23 - Microscopia da areia D	63
Figura 24 - Microscopia ótica das areias F e G com a presença de fenocristais no seio da matriz microcristalina	64
Figura 25 - Imagens geradas pelo AIMS por peneira	65
Figura 26 - Expansão das barras de argamassa	68
Figura 27 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias.....	75
Figura 28 - Comportamento da resistência à compressão dos concretos do grupo 3	77
Figura 29 - Comportamento da absorção de água dos concretos – grupo 2.....	84
Figura 30 – Comportamento do índice de vazios	87
Figura 31 - Comportamento da massa específica	89

Figura 32 - Retração por secagem dos concretos com relação água/cimento igual a 0,4	91
Figura 33 - Retração por secagem dos concretos com relação água/cimento igual a 0,5	91
Figura 34 - Retração por secagem dos concretos com relação água/cimento igual a 0,6	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II Z - 32	39
Tabela 2 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP V -ARI	39
Tabela 3 – Módulo de finura e dimensão máxima característica da areia natural.....	40
Tabela 4 - Propriedades físicas da areia natural	41
Tabela 5 – Módulo de finura e dimensão máxima característica	42
Tabela 6 - Propriedades físicas do agregado graúdo (pedra britada).....	42
Tabela 7 - Ensaio de caracterização das areias de britagem	45
Tabela 8 - Traços do projeto piloto.....	46
Tabela 9 - Grupos de areia de britagem classificados conforme o tipo de rocha, a dimensão máxima característica e o processo de britagem	48
Tabela 10 - Identificação dos traços produzidos	49
Tabela 11 – Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto	51
Tabela 12 - Ensaio realizado no concreto	53
Tabela 13 - Módulo de finura e Dimensão Máxima Característica.....	57
Tabela 14 - Ensaio de caracterização das areias de britagem	58
Tabela 15 - Composição química das areias de britagem	58
Tabela 16 - Concentração dos minerais nas areias de britagem	62
Tabela 17 - Classificação de forma 2D dos grãos das areias estudadas	65
Tabela 18 - Classificação de angularidade dos grãos das areias estudadas	67
Tabela 19 - Consumo de aditivo (Kg/m ³)	69
Tabela 20 - Análise de variância do consumo de aditivo - grupo 1.....	70
Tabela 21 - Análise de variância do consumo de aditivo - grupo 2.....	70
Tabela 22 - Análise de variância do consumo de aditivo - grupo 3.....	70
Tabela 23 - Resistência à compressão.....	72
Tabela 24 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias – grupo 1	73
Tabela 25 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias – grupo 2.....	73
Tabela 26 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias – grupo 3.....	73
Tabela 27 - Comparativo do desempenho da resistência à compressão aos 7 dias	75
Tabela 28 - Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias – grupo 1	76
Tabela 29 - Comparativo do desempenho da resistência à compressão – grupo 3	78
Tabela 30 - Resistência à tração diametral.....	80
Tabela 31 - Análise de variância da resistência à tração – grupo 1	80

Tabela 32 - Análise de variância da resistência à tração – grupo 2.....	81
Tabela 33 - Análise de variância da resistência à tração – grupo 3.....	81
Tabela 34 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica	82
Tabela 35 - Análise de variância da absorção de água – grupo 1.....	83
Tabela 36 - Análise de variância da absorção de água – grupo 2.....	83
Tabela 37 - Análise de variância da absorção de água – grupo 3.....	83
Tabela 38 – Comparativo do desempenho da absorção de água dos concretos – grupo 2	85
Tabela 39 - Análise de variância do índice de vazios – grupo 1	86
Tabela 40 - Análise de variância do índice de vazios – grupo 2	86
Tabela 41 - Análise de variância do índice de vazios – grupo 3	86
Tabela 42 – Comparativo do desempenho do índice de vazios.....	87
Tabela 43 - Análise de variância da massa específica – grupo 1.....	88
Tabela 44 - Análise de variância da massa específica – grupo 2.....	88
Tabela 45 - Análise de variância da massa específica – grupo 3.....	89
Tabela 46 - Desempenho do massa específica com.....	90
Tabela 47 - Análise de variância da retração por secagem – grupo 1	92
Tabela 48 - Análise de variância da retração por secagem – grupo 2	93
Tabela 49 - Análise de variância da retração por secagem – grupo 3	93
Tabela 50 - Profundidade da frente de carbonatação.....	94
Tabela 51 - Análise de variância da carbonatação – grupo 1	95
Tabela 52 - Análise de variância da carbonatação – grupo 2.....	95
Tabela 53 - Análise de variância da carbonatação – grupo 3.....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Identificação das amostras de areia de britagem.....	43
Quadro 2 - Tipos de britadores utilizados no beneficiamento das rochas.....	44
Quadro 3 - Classificação petrográfica das areias de britagem avaliadas	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	15
1.3	ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DA PESQUISA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	17
2.1.1	<i>Trabalhabilidade</i>	17
2.1.2	<i>Concreto no estado endurecido</i>	19
2.1.2.1	Resistência à compressão	19
2.1.2.2	Resistência à tração	20
2.1.2.3	Retração por secagem	21
2.1.2.4	Carbonatação	22
2.2	AGREGADO MIÚDO ORIUNDO DE BRITAGEM DE ROCHAS	23
2.2.1	<i>Processo de britagem das rochas</i>	27
2.2.2	<i>Reação álcali – agregado</i>	32
2.3	A INCORPORAÇÃO DE AREIA DE BRITAGEM EM CONCRETOS	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	MATERIAIS	38
3.1.1	<i>Caracterização dos materiais</i>	38
3.1.1.1	Cimento	38
3.1.1.2	Areia natural	40
3.1.1.3	Pedra britada	41
3.1.1.4	Aditivo	42
3.1.1.5	Água de amassamento	42
3.1.2	<i>Caracterização das areias de britagem</i>	42
3.2	MÉTODOS DE PESQUISA	45
3.2.1	<i>Projeto Piloto</i>	45
3.2.2	<i>Planejamento do experimento</i>	47

3.2.3	<i>Produção dos concretos</i>	50
3.2.4	<i>Ensaio realizado no concreto</i>	53
3.2.4.1	<i>Carbonatação Natural</i>	53
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	56
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AREIAS DE BRITAGEM	56
4.1.1	<i>Granulometria</i>	56
4.1.2	<i>Índices físicos</i>	57
4.1.3	<i>Fluorescência de Raios X</i>	58
4.1.4	<i>Difração de Raios X</i>	59
4.1.5	<i>Petrografia</i>	61
4.1.6	<i>Forma dos grãos</i>	64
4.1.7	<i>Reatividade álcali-agregado</i>	67
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO	68
4.2.1	<i>Consumo de aditivo (Kg/m³)</i>	68
4.2.2	<i>Resultados dos ensaios no concreto endurecido</i>	71
4.2.2.1	<i>Resistência à compressão</i>	71
4.2.2.2	<i>Resistência à tração</i>	79
4.2.2.3	<i>Absorção de água, índice de vazios e massa específica</i>	82
4.2.2.4	<i>Retração por secagem</i>	90
4.2.2.5	<i>Carbonatação natural</i>	94
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	96
4.3.1	<i>Caracterização das areias de britagem</i>	96
4.3.2	<i>Consumo de aditivo (Kg/m³)</i>	97
4.3.3	<i>Concreto no estado endurecido</i>	99
5	CONCLUSÕES	102
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	103
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FORMA DOS GRÃOS	
	PELO AGGREGATE IMAGE MEASUREMENT SYSTEM (AIMS)	113
	REFERÊNCIAS	115

APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS AOS 28, 56 E 91 DIAS	116
ANEXO A – ANÁLISE DA FORMA DOS GRÃOS - GRÁFICOS GERADOS PELO AGGREGATE IMAGE MEASUREMENT SYSTEM (AIMS).....	120
1. Forma 2D	120
2. Angularidade	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Justificativa

A utilização de agregado miúdo proveniente de britagem de rochas tem crescido nos últimos anos na construção civil. A introdução de novos paradigmas de sustentabilidade no setor, a sua ampla disponibilidade e o aprimoramento nos processos de britagem de rochas tem promovido o maior interesse pelo aproveitamento total desse produto.

Países mais desenvolvidos fazem uso desse tipo de agregado há mais de 30 anos. Nos Estados Unidos, por exemplo, notifica-se a existência da “Associação Nacional de Pedra Britada”, que trata de aspectos técnicos relacionados a esse material. Em outros países, como Canadá e Israel, há registros de obras de grande porte realizadas com o uso de areia de britagem (DRAGO; VERNEY; PEREIRA, 2009).

Atualmente, a intensificação da produção e a sua incorporação em concretos e argamassas é uma tendência internacional, uma vez que, a areia natural tem se tornado escassa, fato observado em diversas regiões do planeta (CABRERA; ORTEGA; TRAVERSA, 2011; MENADI *et al.*, 2008; SHI-CONG; CHI-SUN, 2009; PARK, 2012).

O crescimento da utilização da areia de britagem, no Brasil, ocorre em função da redução da disponibilidade das jazidas de areia natural, uma vez que 90% desse material é obtido a partir da extração de leito de rio, no entanto, essa atividade está fortemente comprometida pelas restrições presentes e futuras estabelecidas por órgãos ambientais e pelo Ministério Público (AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, 2012). Tais medidas acompanham a tendência mundial de preservação dos recursos naturais e do meio ambiente. Os custos de obtenção da areia natural crescem com sua escassez, devido às grandes distâncias das jazidas, e dessa forma, a areia de britagem torna-se mais atrativa economicamente para o mercado consumidor, uma vez que sua produção pode ser realizada nos canteiros das pedreiras localizados mais próximos aos grandes centros urbanos (ALMEIDA; SILVA, 2005; GONÇALVES *et al.*, 2007).

O grande eixo produtor de areia de britagem ainda se concentra nas regiões Sul e Sudeste. Em 2012, o consumo de areia de britagem na Grande São Paulo já correspondia a 9% de toda a areia utilizada na construção civil. Em 2011, em Belo Horizonte, cerca de 10% de toda a demanda foi suprida por areia de britagem (REVISTA MANUTENÇÃO E TECNOLOGIA, 2012). Contudo, o cenário da cadeia de suprimentos de agregados para

construção civil de grandes metrópoles, como Porto Alegre, Recife, Fortaleza e Rio de Janeiro, aponta para uma crescente demanda futura.

Na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) também é observado o esgotamento das reservas de areia natural. Com isso, os maiores produtores de areia da RMF migraram para áreas de municípios vizinhos, com grande parte da produção de areia natural, atualmente, sendo extraída a mais de 100 km de distância de Fortaleza (CAVALCANTI; PARAHYBA, 2011). Por outro lado, nesta região estão em operação atualmente cerca de 14 unidades produtoras de pedra britada com formação litológica, em sua maioria, de rochas granitóide-migmatítico e gnaiss-migmatítico (BRANDÃO, 1995b). Entre as produtoras, 22% produzem mais de 500.000 toneladas/ano, 44% produzem entre 500.000 toneladas/ano e 200.000 toneladas/ano e 33% produzem abaixo de 200.000 toneladas/ano, conforme o Plano Nacional de Mineração do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2011).

A produção de areia de britagem é consequente do próprio processo de cominuição das rochas para obtenção de brita, contudo, na RMF a maioria das unidades produtoras, ainda não possui destinação definida para esse material, sendo utilizada basicamente como subproduto. Uma pequena parcela é absorvida pela construção de estradas, todavia, é registrado a geração de grandes estoques em pilhas nos pátios das pedreiras, conforme as Figuras 1-a e 1-b. Esse acúmulo excessivo pode alterar a paisagem e provocar impactos no meio ambiente, como por exemplo, a geração de poeira e quando carregados pela chuva, pode obstruir canais de drenagem e provocar o assoreamento de rios.

Figura 1 - Pilhas de estoque de areia de britagem em pedreiras da RMF

a) Pedreira em Pacatuba/Ce



b) Pedreira em Itaitinga/Ce



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos últimos 10 anos, as pedreiras da RMF têm investido nas plantas de produção, adquirindo equipamentos modernos e aprimorando o processo de britagem. Além da melhoria

da produtividade e diversificação dos produtos, também é visto como objetivo, a produção de areia de britagem com características adequadas para o uso em concretos e argamassas, no entanto, apenas duas unidades têm esse produto sendo utilizado no segmento. Uma delas fornece areia de britagem para uma indústria de concreto pré-moldado e a outra para uma construtora que utiliza em argamassas para assentamento de blocos estruturais, contudo, vale ressaltar que as empresas consumidoras pertencem ao mesmo grupo empresarial das pedreiras.

O mercado da construção civil da RMF surge como potencial consumidor desse produto em médio e longo prazo, tendo em vista o iminente aumento nos custos de aquisição de areia natural, devido à distante localização das jazidas. No entanto, a maioria das construtoras da região ainda não demonstram interesse em utilizar areia de britagem em substituição à areia natural em argamassas e concretos, principalmente, devido ao tradicionalismo, falta de esclarecimentos e estudos de viabilidade técnica. Com isso, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em parceria com a Universidade Federal do Ceará iniciou em 2013 o projeto de pesquisa intitulado “Caracterização da areia de britagem de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza e avaliação da sua aplicação em argamassas e concretos”, com o intuito de obter informações técnicas à respeito do uso desse material em compósitos cimentícios.

Dessa forma, o presente trabalho, que é parte do projeto acima mencionado, visa contribuir para o esclarecimento da influência da incorporação de areia de britagem em concretos convencionais, com resistência de até 55 MPa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização de areias de britagem provenientes de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza, em substituição à areia natural, na produção de concretos convencionais.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Realizar a caracterização física e química das areias de britagem;
- b) Avaliar o consumo de aditivo plastificante;
- c) Avaliar o comportamento de concretos com areia de britagem no estado endurecido.

1.3 Estrutura de apresentação da pesquisa

O capítulo 1 apresenta a contextualização e a justificativa do estudo da incorporação de areia de britagem no concreto em substituição à areia natural, citando o contexto regional e a necessidade de esclarecimentos para o tema, além dos objetivos geral e específicos da pesquisa.

O capítulo 2 trata do embasamento teórico, apresentando as principais definições sobre areia de britagem e seu processo produtivo, trabalhabilidade e propriedades do estado endurecido do concreto convencional de cimento Portland e as principais pesquisas sobre o emprego de areia de britagem no concreto.

O capítulo 3 discorre sobre os materiais utilizados na produção dos concretos e os ensaios de caracterização das areias de britagem, bem como explana sobre o planejamento do experimento e os métodos de ensaios para avaliação dos concretos produzidos.

O capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa, inicialmente, a caracterização física, química e mineralógica das areias de britagem, e na sequência, os resultados do consumo de aditivo plastificante e dos ensaios das propriedades do concreto endurecido, juntamente com a análise estatística dos dados. Por fim, a discussão dos resultados das características e propriedades testadas, tanto das areias de britagem como dos concretos produzidos com areia de britagem.

O capítulo 5 reúne as principais conclusões da pesquisa e incrementa com possibilidades de futuras pesquisas sobre o tema.

Ao final, são elencadas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa; os apêndices, contendo a metodologia para análise de forma dos grãos pelo *Aggregate Image Measurement (AIMS)* e os anexos, contendo os gráficos gerados pelo AIMS na análise de forma dos grãos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto de cimento Portland

Tradicionalmente, o concreto é conhecido como produto da mistura de cimento Portland, agregados e água. Nas últimas décadas, essa receita foi modificada pela adição de materiais orgânicos e inorgânicos, como aditivos, adições minerais e fibras. A incorporação de tais ingredientes abriu caminho para as inovações, como concreto autoadensável, concreto de alto desempenho, entre outros. Por outro lado, tornou o compósito concreto mais complexo com o incremento das interações entre as fases do clínquer, adições minerais e aditivos (STARK, 2011). No entanto, o escopo desta dissertação envolve somente as interações entre a pasta de cimento e os agregados, principais determinantes das propriedades do concreto convencional.

2.1.1 Trabalhabilidade

O estado fresco do concreto compreende o período que vai desde o contato do cimento com a água até o enrijecimento da pasta. Durante esse período, o material deve apresentar comportamento reológico que permita um adequado transporte, lançamento, adensamento e acabamento superficial.

As propriedades de longo prazo do concreto endurecido, como resistência, estabilidade dimensional e durabilidade, são bastante afetadas pelo adensamento, é de vital importância que o concreto apresente uma trabalhabilidade que possibilite alcançar o maior grau de adensamento possível (NEVILLE; BROOKS, 2013). A trabalhabilidade é uma propriedade de difícil medição, devido sua natureza composta e sua dependência do tipo de construção e manuseio (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo a ASTM C- 125:2006, a trabalhabilidade do concreto é a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade.

A trabalhabilidade contém dois componentes principais, a consistência, que descreve a facilidade do concreto escoar, e a coesão, que descreve a resistência à exsudação e à segregação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A consistência do concreto é uma das principais propriedades do estado fresco, que pode ser medida tanto em laboratórios quanto em canteiros de obras, pelo ensaio de abatimento do tronco de cone. No decorrer do tempo, o concreto

pode apresentar perda de consistência, processo relacionado com o esgotamento da água livre na pasta, principalmente pela a hidratação do cimento, evaporação e absorção de água pelos agregados (SAKOTA; RAVINA, 1998; ERDOGDU, 2005; ALHOZAIMY, 2009). Esses fatores são influenciados pelo consumo de água, consumo de cimento, aditivos químicos, adições minerais e as características dos agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A água é o principal fator que governa a trabalhabilidade. Um incremento da mesma produz uma mistura mais trabalhável, no entanto, pode reduzir a resistência, devido ao aumento da porosidade, e, ainda contribui para a exsudação e segregação, diminuindo a durabilidade da estrutura.

Os agregados miúdos também exercem forte influência na relação entre a demanda de água e a consistência, por meio do teor de finos e características de forma e textura (CABRERA; TAVERSA; ORTEGA, 2011). Quantidades moderadas de partículas abaixo de 75 μm , geralmente, apresentam efeitos positivos nas propriedades do concreto. Por outro lado, quando essas quantidades são elevadas, nota-se o aumento no consumo de água para manter a mesma trabalhabilidade, devido a maior área de superfície específica dessas partículas (ÇELIC; MARAR, 1995).

Um estudo realizado por Westerholm *et al.* (2008), sobre o efeito das partículas finas nas propriedades reológicas de argamassas e concretos, aponta que a tensão de escoamento das argamassas começa a aumentar linearmente para o total de finos acima de 16%, conseqüentemente, aumentando a demanda por água.

Para agregados miúdos britados, a viscosidade plástica é reduzida até uma certa quantidade de finos. Efeito similar foi observado no concreto. Esse fenômeno pode ser explicado pela fricção interna das partículas, com um reduzido conteúdo de finos, pois o espaço entre as partículas maiores de agregados não é preenchido, aumentando a fricção, com o conseqüente aumento da viscosidade. Aumentando-se o teor de finos até certo limite, preenche-se o espaço vazio, reduzindo a fricção interna e reduzindo a viscosidade. Quando o teor de finos é elevado ainda mais, ocorre o aumento da viscosidade, devido ao aumento da área de superfície específica. A magnitude do aumento da viscosidade, também dependerá da forma das partículas finas do agregado.

Os estudos de Kwan, Ng e Huen (2014) corroboram sobre o efeito dos finos no empacotamento das partículas. O experimento realizado pelos autores, utilizando diferentes tipos de agregados miúdos variando o teor de partículas finas ($< 75\mu\text{m}$), apontou a densidade de empacotamento ideal com o teor de 15% de finos, quando realizado o ensaio com a

presença de água, método que mais se aproxima do efeito real no concreto. Contudo, não é possível afirmar que o percentual ideal de finos para o empacotamento dos grãos de agregados será o mesmo para o desempenho geral do concreto, pois essa relação ainda não está bem definida.

A trabalhabilidade do concreto também sofre grande influência das características de forma e textura das partículas dos agregados. Quando comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas necessitam de mais pasta de cimento para produzir misturas de concreto trabalháveis e, portanto, o custo aumenta (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo os estudos de Esteves, Cachim e Ferreira (2010), as partículas abaixo de 1 mm exercem influência na fluidez das argamassas e concretos, através da área de superfície específica e pelos mecanismos de fixação de água. Por outro lado, partículas entre 1 mm e 2 mm influenciam a fluidez pelas forças de atrito no interior da pasta. Cabrera, Traversa e Ortega (2011) acrescentam que, quando o tamanho e a textura dessas partículas mudam, mudam-se também os pontos de contato entre elas. Desse modo, a forma e a textura superficial dos agregados miúdos são os principais responsáveis pela fricção interna em argamassas e concretos, e, portanto, provocando um aumento na demanda por água para produzir misturas plásticas.

2.1.2 Concreto no estado endurecido

2.1.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a propriedade mais apreciada entre as propriedades do concreto endurecido, devido à facilidade de execução do ensaio e à capacidade de relacionar os resultados com outras propriedades do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2014), é possível deduzir a partir de dados da resistência à compressão uma estimativa do módulo de elasticidade, da estanqueidade ou permeabilidade e da resistência às intempéries, incluindo águas agressivas.

Helene e Andrade (2010) apontam a relação água/cimento e o grau de hidratação dos componentes da pasta de cimento como os principais fatores de influência na resistência do concreto. A porosidade de cada fase da microestrutura do concreto (agregado, pasta de cimento e zona de transição) pode ser considerada um fator limitante da resistência. Considera-se a relação água/cimento um fator importante na determinação da porosidade da

matriz da pasta cimentícia e da zona de transição, porém, outros fatores como o adensamento, condições de cura, mineralogia e dimensão do agregado, tipos de aditivos e adições, condições de umidade e geometria do corpo de prova, tipo de tensão e velocidade de carregamento, também podem ter efeito importante na resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para alcançar melhores resultados de resistência deve-se reduzir a relação água/cimento, no entanto, outros fatores devem ser considerados, como o uso de aditivos plastificantes para garantir a trabalhabilidade da mistura e a adição de fíller para preenchimento dos espaços vazios da pasta. Sobretudo, verifica-se ganho de resistência quando há o proporcionamento adequado dos grãos, material cimentício, agregado miúdo e graúdo, com uma distribuição otimizada dos tamanhos das partículas, promovendo um melhor empacotamento, de modo a preencher os vazios e reduzir a demanda por água, e consequentemente, reduzir a porosidade da matriz (LI; KWAN, 2014).

De modo geral, para os concretos convencionais, a resistência à compressão é dada em função da porosidade da pasta de cimento hidratada e da zona de transição, que é relativamente mais fraca. Dessa forma, a relação água/cimento controla as propriedades mecânicas desses concretos para o mesmo grau de hidratação (DONZA; CABRERA; IRASSAR, 2002).

2.1.2.2 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto é inferior a sua resistência à compressão, desse modo, a maioria das estruturas de concreto armado é projetada para que o concreto resista às tensões de compressão, enquanto o aço resista às tensões de tração. Conforme Mehta e Monteiro (2014), as tensões de tração no concreto não podem ser completamente ignoradas, porque a fissuração do concreto frequentemente resulta de uma ruptura à tração causada por retração restringida. Também uma combinação de tensões de tração, compressão e cisalhamento, usualmente, determina a resistência quando o concreto é submetido a um carregamento à flexão.

A relação existente entre a resistência à compressão e a resistência à tração não é proporcional e depende do nível de resistência do concreto. Em geral, a resistência à tração é menor quanto maior for a resistência à compressão. Entretanto, existem vários fatores que afetam a relação entre as duas resistências, principalmente, os métodos de ensaios do concreto

à tração, a dimensão dos corpos de prova, a forma e a textura do agregado graúdo e a condição de umidade do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para a avaliação da resistência à tração em concretos convencionais, três métodos podem ser utilizados: o ensaio de tração direta e os métodos indiretos do ensaio de tração por compressão diametral e ensaio de tração na flexão. Devido à dificuldade de execução, o emprego do ensaio de tração direta é raro, portanto, os outros dois métodos de ensaios são fortemente empregados, pois é possível converter seus resultados para estimar a tração direta do concreto (CRAEYE *et al.*, 2014).

2.1.2.3 Retração por secagem

A retração por secagem pode ser definida como a variação volumétrica devido a secagem do concreto, sujeito a perda de água com o meio externo, com umidade inferior a 100%. A mudança de volume experimentada pelo concreto não é igual ao volume de água perdida.

A perda de água livre, que ocorre inicialmente, não provoca retração. Dessa forma, na medida em que a secagem do concreto continua, inicia-se a perda da água retida nos vazios capilares (< 50 nm), mantida por pressão hidrostática, em seguida, da água adsorvida, retida nas proximidades dos componentes sólidos da pasta, originando a retração irreversível, considerada a principal causa de retração por secagem. Em condições de secagem severas (umidade relativa da ordem de 11%), a água interlamelar também pode ser removida, causando retração entre as camadas de silicato de cálcio hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013).

A retração por secagem pode provocar fissuração no concreto deixando-o vulnerável à agentes agressivos do meio ambiente, o que pode reduzir sua durabilidade. A sua previsão e prevenção são importantes para a operação de estruturas de concreto no longo prazo, portanto, isto depende de vários parâmetros relacionados à composição do concreto, à qualidade de seus componentes, ao tamanho da amostra e às condições externas de conservação (BAL; BUYLE-BODIN, 2013). A porosidade do concreto desempenha um papel significativo no comportamento da retração, uma vez que a água se movimenta pelos vazios capilares até chegar na superfície. Geralmente, a pasta cimentícia experimenta maior retração, enquanto os agregados atuam restringindo a retração na pasta (IMAMOTO; ARAI, 2008).

Como a retração está associada à água retida nos poros de menores dimensões, alguns tipos de cimento e adições minerais podem promover o refinamento dos poros, portanto, aumentar a retração. No entanto, verifica-se a importância de outros parâmetros, como a ação de aditivos químicos, o proporcionamento dos materiais e principalmente a relação água/cimento, pois quanto maior a quantidade de água disponível no interior do concreto, maior retração ocorrerá (GÜNESEYISI; GESOGLU; OZBAY, 2010; ZHANG; ZAKARIA; HAMA, 2012). Conforme Zhang, Zakaria e Hama (2013), um dos principais fatores de influência na retração por secagem do concreto são os agregados graúdos e suas características, tais como porosidade, absorção e área de superfície específica, enquanto que os agregados miúdos têm efeito reduzido, contudo, se apresentam significativos na retração por secagem em argamassas.

2.1.2.4 Carbonatação

A carbonatação do concreto é um dos principais processos físico-químicos que pode limitar a vida útil de estruturas de concreto armado, devido a redução da proteção da armadura contra a corrosão. Esse processo é provocado pela reação entre o dióxido de carbono atmosférico (CO₂) e os hidratos do cimento, principalmente, o hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂, fazendo o pH da solução intersticial dos poros passar de valores em torno de 14, para valores na faixa de 9, portanto, reduzindo a alcalinidade do concreto (SAETTA; SCHREFLER; VITALIANI, 1995; STEFFENS; DINKER; AHRENS, 2002; PAULETTI, 2009). O processo de carbonatação é determinado, principalmente, pelo mecanismo de reação apresentado na Equação 1.



Resumidamente, o processo inicia-se com a difusão do dióxido de carbono atmosférico (CO₂) através da matriz do concreto insaturado e dissolve-se na água dos poros, reagindo com hidróxido de cálcio que está disponível, que em seguida é consumido, formando carbonato de cálcio e liberando água (MEIER *et al.*, 2007; PETER *et al.*, 2008).

Uma variedade de fatores afeta o processo de carbonatação, incluindo o teor de CO₂ no ar, temperatura, umidade e compacidade do concreto. Microfissuras ativas atuam como um caminho para a rápida penetração de CO₂ durante a carbonatação (FANG *et al.*,

2008). A porosidade da pasta cimentícia, o tipo de cimento e a composição mineral dos agregados também podem contribuir para a penetração do CO₂ (LEVY; HELENE, 2004).

A porosidade do concreto sofre influências, principalmente, da relação água/cimento e do grau de compactação, que está intimamente ligado à natureza das fases presentes, uma vez que o concreto é composto por uma fase granular (constituída de agregados) e uma fase ligante. Sua estrutura porosa depende do arranjo dos agregados e da estruturação da fase ligante (OLLIVIER; TORRENTI, 2014). Dessa maneira, uma redução no volume dos grandes vazios capilares diminuirá a permeabilidade, favorecendo o aumento da durabilidade do concreto. Isto é possível controlando a relação água/cimento, o consumo de cimento, o tamanho e a distribuição granulométrica dos agregados, assim como, realizando uma cura e adensamento apropriados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.2 Agregado miúdo oriundo de britagem de rochas

O agregado miúdo proveniente do processo de cominuição de rochas é denominado areia de britagem, conforme a ABNT NBR 9935:2011.

A utilização de areia de britagem em concretos e argamassas tem sido testada por diversos pesquisadores, como Gonçalves *et al.* (2007), Donza, Cabrera e Irassar (2002), Santos (2008), Menossi *et al.* (2010), Silva e Prudêncio Jr (2012), Bastos (2002), Buest Neto (2006), Rodolpho (2007), Zhang, Zacaria e Hama (2013), Park (2012), entre outros. Esses estudos apontam para a viabilidade do uso de areia de britagem em substituição à areia natural, tendo em vista que, as características e propriedades do material compósito vem atendendo aos requisitos técnicos necessários à segurança estrutural, além de aspectos ligados a sustentabilidade e economia. Algumas restrições são pontuadas no emprego da areia de britagem, sendo vinculadas às características de forma e textura dos grãos e ao seu elevado teor de material pulverulento. A não uniformidade dessas características é verificada entre diferentes regiões e entre diferentes unidades produtoras, uma vez que, são influenciadas pela composição mineralógica da rocha matriz e pelo processo produtivo utilizado por cada pedreira.

As rochas compõem três grandes grupos – rochas ígneas, rochas sedimentares e rochas metamórficas – cada qual contemplando uma imensa variedade de tipos possíveis de uso na construção civil (FRASCÁ, 2010). As rochas ígneas são formadas a partir do magma, material formado em altas temperaturas no interior da Terra, que constitui-se de uma fusão

silicatada, contendo gases e elementos voláteis. São exemplos de rochas ígneas: granito, riolito, sienito, basalto, andesito, gabro e piroxênio (ALMEIDA; LUZ, 2012). As rochas sedimentares são aquelas formadas por meio da erosão, transporte e deposição de sedimentos, derivados da desagregação e decomposição de rochas na superfície terrestre. São rochas sedimentares, os calcários, os dolomitos e os arenitos. As rochas metamórficas podem ser formadas a partir de rochas ígneas, sedimentares ou mesmo metamórficas, preexistentes, submetidas a novas condições de pressão e temperatura. Quartzitos e gnaisses são exemplos deste tipo de rocha (ALMEIDA; LUZ, 2012; FRASCÁ, 2010).

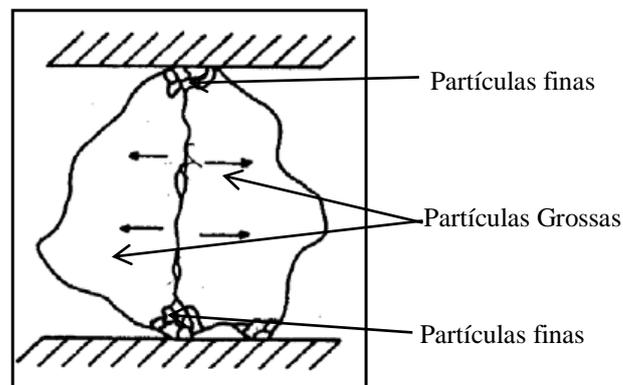
Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2012), a participação dos tipos de rochas utilizadas na produção de pedra britada no Brasil registra a seguinte distribuição: 85% granito e gnaiss; 10% calcário e dolomito e 5% basalto e diabásio. O tipo de rocha utilizada como agregado depende basicamente da disponibilidade local ou regional. Conforme Almeida e Luz (2012), os granitos e gnaisses são utilizados na maioria dos estados brasileiros, o basalto concentra-se nas regiões sul e sudeste, próximas a bacia do rio Paraná, e calcários e dolomitos nos estados de Minas Geras, Goiás, Bahia e no norte fluminense.

Algumas características dos agregados dependem exclusivamente da composição da rocha de origem, como a dureza, absorção de água, presença de contaminantes, entre outros. Por outro lado, as características como a distribuição de tamanhos, forma e textura podem ser controladas durante o processo produtivo (ALMEIDA *et al.*, 2004). Segundo Mehta e Monteiro (2014), as condicionantes das características dos agregados são: a microestrutura da rocha matriz e sua exposição prévia, portanto, o grau de intemperismo e o processo de fabricação. Dessa forma, as propriedades dos agregados podem ser divididas em: aquelas dependentes da porosidade e da composição química e mineralógica, como resistência e módulo de elasticidade; e aquelas dependentes das condições prévias e condições de produção, como tamanho, forma e a textura das partículas.

No processo de britagem, as configurações dos equipamentos podem ser ajustadas para obter melhores resultados, principalmente, quanto às condições de alimentação e abertura de descarga, que permitem a produção de partículas na faixa de tamanho desejada. Dessa forma, no processo de britagem é necessário considerar tanto as configurações dos equipamentos quanto as propriedades da rocha matriz. Geralmente, essas configurações estão voltadas para melhoramento da forma e distribuição do tamanho das partículas (BENGTSSON; SVEDENSTEN; EVERTSSON, 2009).

No processo de cominuição, os britadores quebram as rochas por meio da propagação da fratura em trincas ou defeitos preexistentes, produzidas pela aplicação de forças de compressão e cisalhamento (GUIMARÃES *et al.*, 2007). Quando partículas irregulares de rochas são sujeitas à quebra por compressão, os produtos se apresentam em duas faixas de tamanho: as partículas grossas, resultante da quebra induzida pela tensão, e as partículas finas, resultantes da quebra por compressão no local onde a carga é aplicada, conforme a Figura 2. Dessa forma, a quantidade de finos produzidos pode ser reduzida minimizando a área de aplicação da carga (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

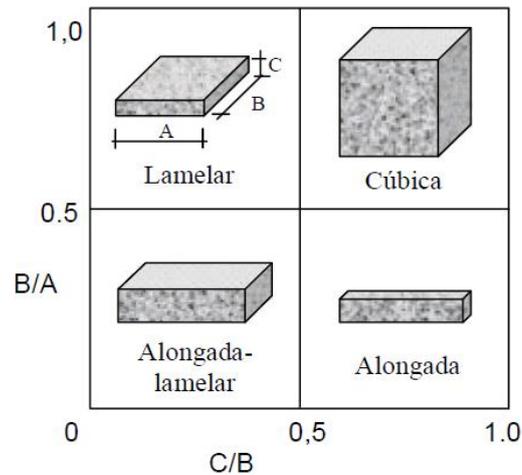
Figura 2 - Fratura na britagem



Fonte: Adaptado de Figueira, Luz e Almeida (2010).

As rochas ao serem britadas adquirem diferentes formas - cúbica, prismática, alongada e lamelar (Figura 3), refletindo as suas características petrológicas e petrográficas, assim como, o efeito do processo de cominuição. Conforme Figueira, Luz e Almeida (2010), na quebra por impacto, com esforços aplicados rapidamente, a partícula absorve mais energia do que a necessária para uma simples fratura e fragmenta-se principalmente por tensão, não havendo deformação, apresentando partículas de tamanho e forma semelhantes. Por outro lado, a quebra por atrito produz muito material fino, devido às interações partícula – partícula.

Figura 3 - Forma dos agregados



Fonte: Farias e Palmeira (2010).

Legenda: A - comprimento; B - largura; C - espessura.

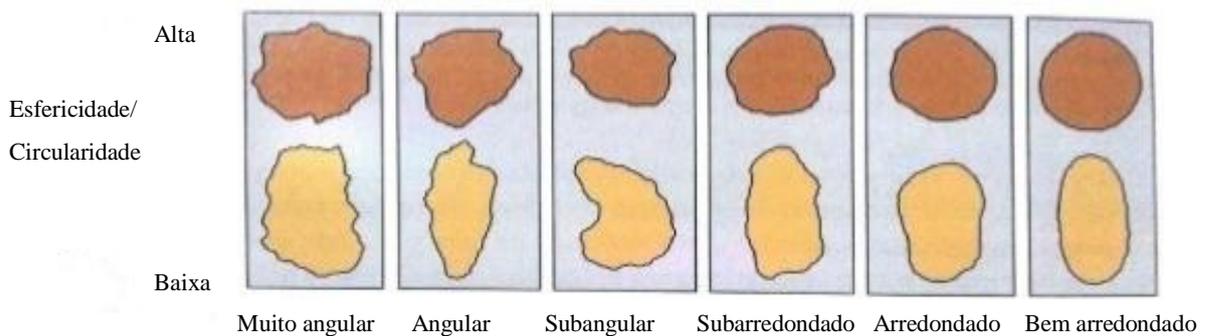
As rochas de maior dureza produzem curvas granulométricas mais grossas para as mesmas regulagens de equipamento (WEIDMANN, 2008). Segundo Farias e Palmeira (2010), rochas maciças, como o basalto, produzem britas de forma cúbica, enquanto rochas com estrutura xistosa, como é típico em rochas sedimentares e alguns tipos de rochas metamórficas, produzem fragmentos de formas alongadas e lamelares. Rochas ígneas intrusivas britadas, como granitos e gnaisses, geralmente, apresentam vértices e arestas bem definidas, sendo denominadas angulosas, assim como produzem partículas equidimensionais. Calcários laminados, arenitos e folhelhos tendem a produzir fragmentos alongados e achatados, especialmente quando a britagem é feita por britador de mandíbula (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Neville e Brooks (2013), a agudeza relativa e a angulosidade das arestas de uma partícula podem ser avaliadas pelo arredondamento, que no caso de agregados britados depende das características da rocha matriz, do tipo de britador e do grau de redução, isto é, a relação da dimensão do produto britado quando comparado a dimensão inicial. Ainda os mesmos autores informam que as partículas classificadas no grau anguloso apresentam poucas evidências de desgaste. Subanguloso apresenta algum desgaste com faces intactas. Subarredondado apresenta considerável desgaste com área reduzida. Arredondado possui quase todas as faces inexistentes e redonda não possui face original.

A esfericidade é um termo frequentemente confundido com o arredondamento, porém, a esfericidade avalia a equidimensionalidade das partículas. Embora uma partícula esférica seja perfeitamente arredondada, o grau de esfericidade de uma partícula só pode ser

corretamente mensurado comparando-se a área da mesma com uma esfera perfeita de mesmo volume. Como a análise tridimensional se torna mais complexa, a esfericidade pode ser avaliada no âmbito bidimensional, dessa forma, a comparação é realizada com um círculo perfeito, neste caso, esse parâmetro pode ser chamado de circularidade (RIBEIRO; BONETTI, 2013). A Figura 4 apresenta a classificação comumente empregada para o grau de arredondamento e grau de esfericidade das partículas de agregado miúdo, de acordo com a ABNT NBR 7389-1:2009.

Figura 4 - Classificação do grau de esfericidade e arredondamento das partículas



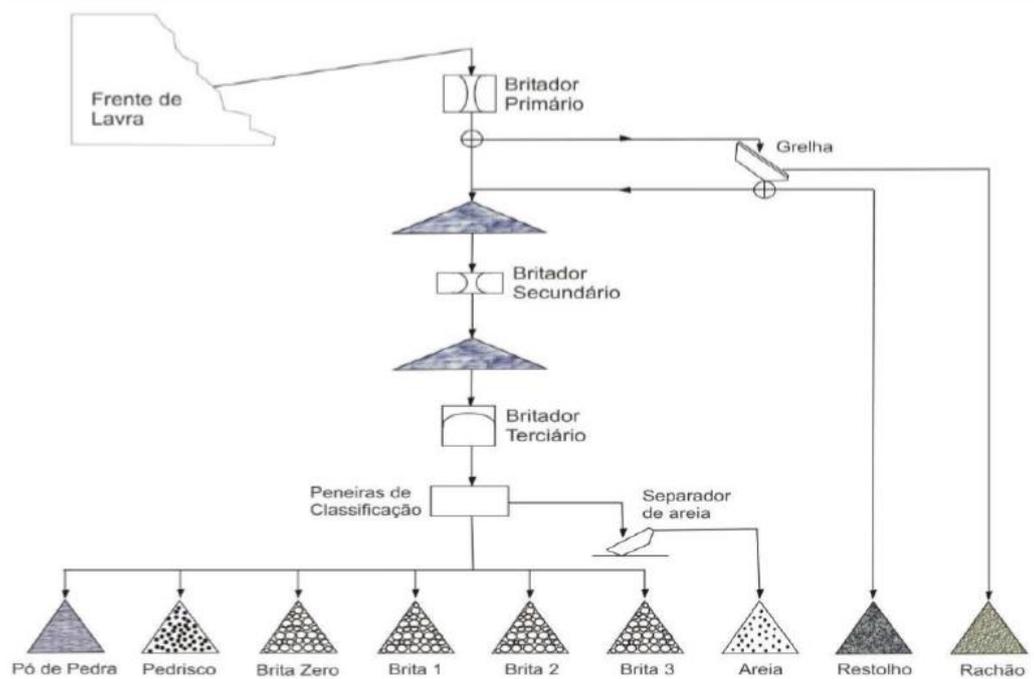
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7389-1:2009.

A textura superficial é definida por Mehta e Monteiro (2014), como o grau em que a superfície do agregado é lisa ou áspera. O seixo rolado pode ser considerado um agregado de textura lisa, enquanto as rochas britadas como o basalto, granito e calcário, apresentam textura áspera. Essa característica depende da dureza, tamanho do grão, porosidade da rocha matriz e a sua exposição às forças de atrito no processo de britagem.

2.2.1 Processo de britagem das rochas

O número de estágios no processo de britagem depende da dimensão da rocha a ser britada e da qualidade do produto final (ARNOLD, 2011). Normalmente, antes de iniciar a britagem das rochas, são realizadas as seguintes etapas: planejamento, locação e perfuração da rocha matriz; detonações; desmonte; carregamento e transporte até o britador primário (WEIDMANN, 2008). Na Figura 5 está apresentado o diagrama esquemático geral de um processo de britagem.

Figura 5 - Diagrama esquemático geral de um processo de britagem



Fonte: Cavalcanti e Parahyba(2012).

A rocha é submetida a sucessivos processos de fragmentação para reduzi-la a fragmentos de tamanhos adequados ao uso a que se destina. A geração de agregado miúdo de britagem, geralmente, é integrada à produção de agregado graúdo. O processo de produção envolve três ou quatro etapas, denominadas de britagem primária, secundária e terciária, que são comuns em plantas de britagem de agregados graúdos, como mostra a Figura 5. E quando o processo também tem o objetivo de melhorar as características da areia de britagem, tornando-a um coproduto, pode ocorrer a britagem quaternária. Essa etapa utiliza equipamentos para melhorar a forma e distribuição das partículas de areia, assim como controle dos finos, por classificação úmida ou a seco (CEPURITIS; JACOBSEN; ONELLA, 2015).

O conjunto de britagem é composto por vários elementos distintos: alimentador vibratório, britador primário, rebitadores, conjunto de peneiras e correias transportadoras. Na britagem primária, o material resultante do desmonte é descarregado pelos caminhões no alimentador vibratório, que por sua vez, alimenta o britador primário. É onde se inicia o processo de cominuição dos grãos. Sua principal função é a de reduzir o tamanho dos fragmentos oriundos do desmonte para que possam ser conduzidos por transportadora de correias aos estágios subsequentes da planta de britagem. Para a primeira britagem,

normalmente são empregados britadores de mandíbulas (CAVALCANTI; PARAHYBA, 2012; WEIDMANN, 2008).

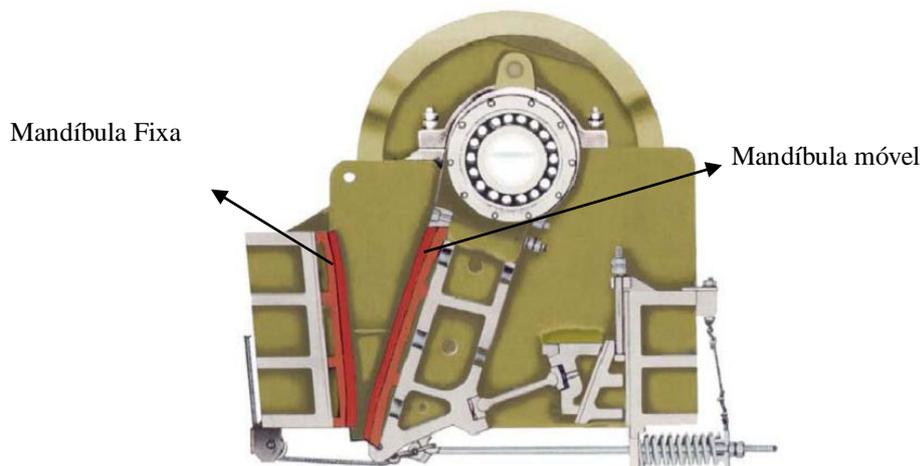
Nos estágios seguintes do processo de britagem têm-se os britadores intermediários que são responsáveis por reduzir o tamanho dos grãos até as granulometrias comercializadas no mercado (WEIDMANN, 2008). Nas britagens secundária e terciária, geralmente são utilizados britadores giratórios cônicos, que apresentam como principal vantagem a capacidade de limitar a quantidade de finos produzidos (CEPURITIS; JACOBSEN; ONELLA, 2015).

A seleção de britadores para uma planta de britagem é primariamente influenciada pelo formato do produto desejado, capacidade de aceitar a granulometria de alimentação, capital, custos de desgaste e distribuição granulométrica do produto. O melhor formato possível do produto pode ser obtido, sobretudo, pelo projeto da planta de britagem, de modo a ser utilizada de maneira otimizada (BERN, 1997).

Os principais tipos de britadores utilizados pelas pedreiras no Brasil são:

- Britadores de mandíbula, que trabalham através da quebra do material pela ação da força de compressão, onde a cominuição das rochas ocorre entre uma mandíbula fixa e uma móvel (Figura 6). A mandíbula móvel é presa a um eixo excêntrico que, quando rotacionado por uma polia, descreve movimentos de vai e vem esmagando a rocha contra a mandíbula fixa (METSO MINERALS, 2005). É bastante popular nas pedreiras, sendo utilizado principalmente como britador primário.

Figura 6 - Britador de mandíbulas (vista em corte)

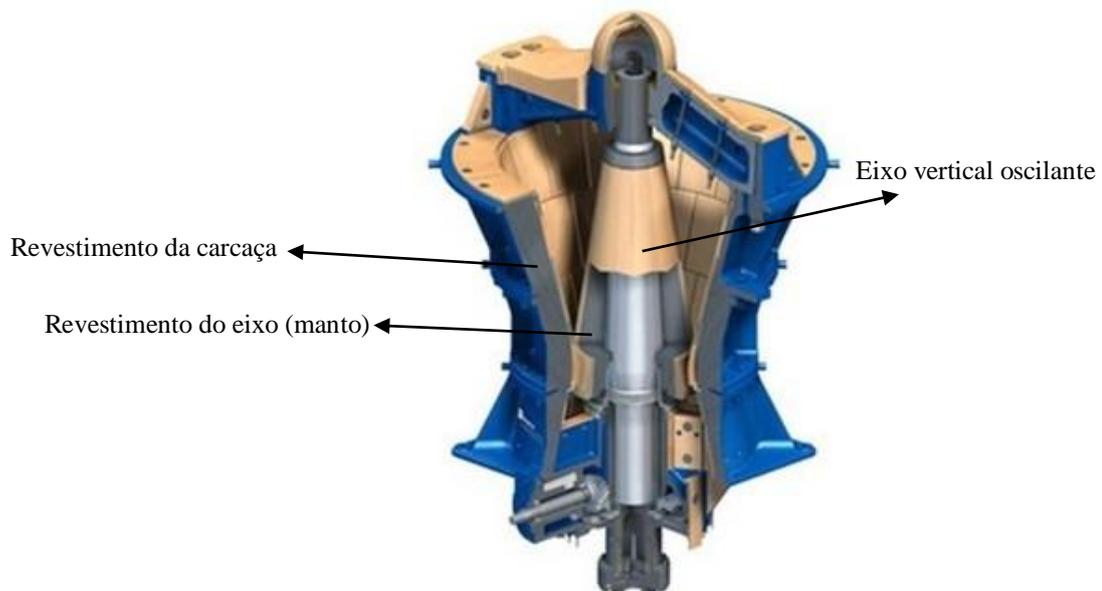


Fonte: Adaptado de Mesto Minerals (2005).

- Britadores giratórios cônicos, onde a redução do tamanho das partículas ocorre pela combinação de compressão e atrito (ARNOLD, 2011). Esses britadores possuem um eixo

vertical oscilante que, em movimentos circulares, hora se afasta, hora se aproxima da carcaça lateral do britador. A britagem propriamente dita ocorre por esmagamento da rocha entre os revestimentos do eixo (manto) e da carcaça ou entre as próprias partículas pressionadas (Figura 7). Nos britadores giratórios, o cone é longo e a boca aberta para cima, o que possibilita receber partículas de maior dimensão, tanto pode ser usado como britador primário como secundário. Quando a altura do cone é reduzida, garantindo um maior aproveitamento do volume da câmara, pode ser usado para britagem secundária e terciária (CHAVES; PERES, 2003). Segundo Bengtsson, Svedensten e Evertsson (2009), a grande vantagem do britador cônico é a limitação do teor de finos, enquanto que a principal desvantagem é a forma adquirida pelas partículas.

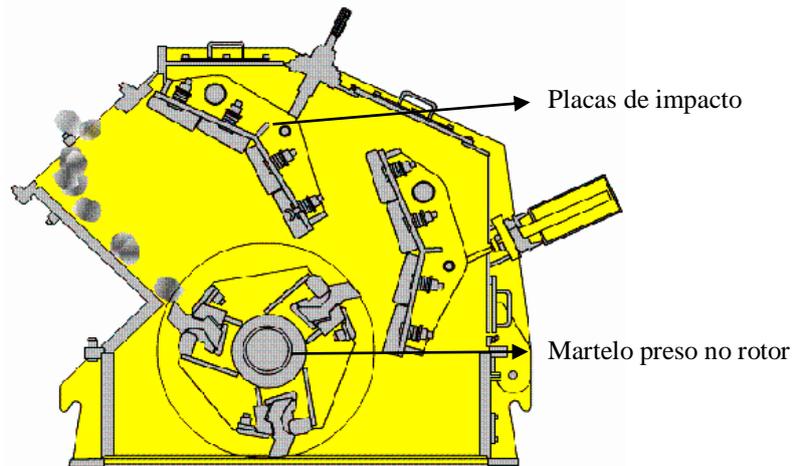
Figura 7 - Britador giratório cônico (vista em corte)



Fonte: Adaptado de Metso Minerals (2005).

- Britadores de impacto horizontal, onde são utilizados martelos ou barras de aço presos a um rotor para promover a quebra do material por impacto (Figura 8). As partículas colidem com as peças metálicas (placas de impacto) do britador e umas contra as outras, até que saem do equipamento através de uma grelha. Nesse tipo de britador, as partículas possuem maior redução, o que gera mais finos, e melhor formato (WEIDMANN, 2008).

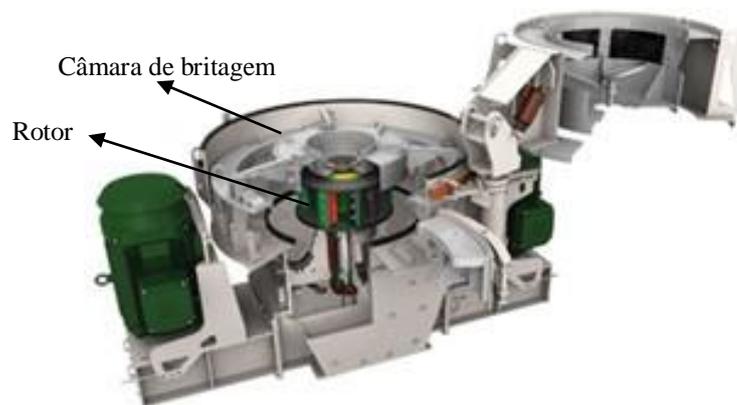
Figura 8 - Britador de impacto horizontal (vista em corte)



Fonte: Adaptado de Metso Minerals (2005).

- Britadores de impacto vertical ou Vertical Shaft Impact Crusher (VSI), que também são conhecidos como impactador de rocha contra rocha (Figura 9), onde um rotor montado em um eixo vertical gira em altas velocidades e arremessa o material para câmara de britagem, onde as partículas colidem umas contra as outras, ocorrendo a redução das partículas (METSO MINERALS, 2005). Esse tipo de britador produz partículas mais cúbicas em todas as frações de tamanho, por outro lado, produz uma maior quantidade de material fino que o britador cônico, devido as altas velocidades aplicadas no processo de cominuição (BENGTSSON; EVERTSSON, 2006).

Figura 9 - Britador de impacto vertical (vista em corte)



Fonte: Adaptado de Metso Minerals (2005).

Segundo Prudêncio Jr *et al.* (2013), a utilização de britadores de impacto vertical é mundialmente utilizada na produção de areia de britagem, tendo em vista, o melhoramento na forma das partículas que esse equipamento proporciona por meio do controle de variáveis, como velocidade do rotor e taxa de alimentação.

2.2.2 Reação álcali – agregado

Sabe-se que os agregados, tanto graúdo como miúdo, podem ser reativos com os hidróxidos alcalinos formados no processo de hidratação do cimento Portland no concreto, o que pode desencadear uma reação química prejudicial ao compósito, denominada reação álcali-agregado (RAA) (TIECHER *et al.*, 2012).

Os fatores condicionantes para a ocorrência de RAA são: alcalinidade suficiente elevada da solução intersticial; existência de agregados reativos; umidade elevada; temperatura elevada; granulometria e estrutura mineral presente no agregado desorganizada e instável (KRIVENKO *et al.*, 2014; ALMEIDA; SALES, 2014; KIHARA *et al.*, 2014). Dessa forma, a avaliação da reatividade das areias de britagem torna-se importante, uma vez que esse material é oriundo de diversos tipos de rochas, apresentando diferentes composições e formação geológica.

São conhecidos três tipos de reações álcali-agregado, sendo elas, reação álcali-sílica (RAS), reação álcali-silicato (RASS) e reação álcali-carbonato (RAC). Portanto, a reação álcali-sílica apresenta maiores índices de ocorrência no Brasil e em diversas partes do mundo. Essa reação é ocasionada pela interação entre os hidróxidos alcalinos do cimento, principalmente o potássio e o sódio, e certas formas de sílica reativa presente no agregado (equivalente alcalino), que são suscetíveis ao ataque dos íons alcalinos, o que pode ocasionar a dissolução do agregado (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2007).

A norma brasileira ABNT NBR 15577-1:2008 especifica os principais materiais reativos encontrados nas rochas que podem causar reação álcali-sílica, muitos deles diagnosticados como reativos em trabalhos experimentais em diferentes lugares do mundo (LOCATI; MARFIL; BALDO, 2010; MATHER, 1999; MICHEL; THIÉBAUT; WACKENHEIM, 2003; WAKIZAKA, 2000; MARINONI *et al.*, 2012; SACHLOVA, 2013; EGLINTON; HIGGINBOTTOM; PETTIFER, 1994), sendo estes, a opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico, assim como, a calcedônia, quartzo microcristalino e criptocristalino, quartzo granular com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato do grão.

A reação álcali-sílica em agregados é geralmente avaliada por testes laboratoriais normatizados, como o método acelerado para determinação da expansão em barras de argamassa, método da expansão em prismas de concreto, método químico, entre outros. A caracterização mineralógica das rochas componentes dos agregados pode ser realizada por

análise petrográfica em conjunto com técnicas complementares como a difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, análise térmico diferencial e espectrometria por energia dispersiva.

2.3 A incorporação de areia de britagem em concretos

O efeito da incorporação de areia de britagem em concretos e argamassas tem sido pesquisado em diversos lugares do mundo. A grande disponibilidade desse material, comparado à escassez crescente da areia natural, é a principal justificativa que leva ao aumento do interesse no desenvolvimento de pesquisas na área.

De modo geral, as diversas pesquisas apontam o aumento da resistência mecânica e a redução da trabalhabilidade quando utilizada areia de britagem em substituição total ou parcial à areia natural. Esses efeitos são causados por duas características peculiares das areias de britagem: o elevado teor de partículas abaixo de 75 µm e a forma dos grãos mais angulosos e alongados. A trabalhabilidade é reduzida devido ao efeito do maior atrito produzido pela forma dos grãos e a maior demanda de água devido à maior área de superfície específica do material fino. Por outro lado, a forma promove o melhor intertravamento das partículas e o teor de material fino, maior empacotamento granular, resultando no aumento da resistência do concreto (DONZA; CABRERA; IRASSAR, 2002; PARK, 2012; WESTERHOLM *et al.*, 2008; BENABED *et al.*, 2012; MENOSSI *et al.*, 2010; BUEST NETO, 2006; SHI-CONG; CHI-SUN, 2009; BEIXING; JILIANG; MINGKAI, 2009; RODOLPHO, 2007; CABRAL, K., 2007; ALMEIDA; SILVA, 2005; QUIROGA; FOWLER, 2003; CORTES *et al.*, 2008; NANTHAGOPALAN; SANTHANAN, 2011; LAGERBLAD; GRAM; WESTERHOLM, 2014).

Cabrera, Traversa e Ortega (2011) avaliaram a trabalhabilidade e demanda por água de concretos produzidos com areia de britagem de origem granítica possuindo grãos angulares e textura lisa, assim como, de concretos produzidos com areia de britagem de origem dolomítica com forma dos grãos alongada e textura rugosa, comparando-os com os concretos produzidos com areia natural. Também foi avaliada a eficiência do uso de aditivos químicos plastificantes, superplastificantes e incorporadores de ar. Verificou-se que sem o uso de aditivos para alcançar a trabalhabilidade estipulada, a demanda por água aumentou em torno de 45 Kg/m³ para os concretos com areia de britagem, verificou-se ainda que a forma e a textura das partículas dos agregados são determinantes para os efeitos dos aditivos, pois a

eficiência é menor para os concretos com areia de britagem, sendo necessário utilizar maiores quantidades para obter a mesma consistência que o concreto com areia natural.

Donza, Cabrera e Irassar (2002), utilizando areia de britagem granítica, calcário e dolomita em concretos de alta resistência, observaram que o concreto produzido com as areias granítica e calcária que possuíam formas angulares apresentaram comportamento similar ao concreto produzido com a areia natural, que possuía forma arredondada, enquanto o concreto produzido com a areia dolomítica, que possuía forma alongada, não apresentou trabalhabilidade. A resistência à compressão do concreto com areia granítica foi 10% superior ao concreto de referência, devido a maior compactação promovida pela maior quantidade de finos (10,7%), enquanto a areia natural apresentava 0% de partículas inferior a 75 μm . Atribui-se ainda o aumento da resistência à maior resistência intrínseca do granito. Park (2012) realizou estudo similar e verificou um incremento na resistência aos 28 dias para concretos com 70% e 100% de areia de britagem, de 1,39% e 4,64%, respectivamente, comparados com o concreto de referência. Quanto à trabalhabilidade, o consumo de aditivo superplastificante aumentou com a utilização de areia de britagem, ultrapassando 2% sobre a massa de cimento para a mistura com 100% de areia de britagem. Ambas as pesquisas apontam a necessidade de maior consumo de cimento e de aditivos superplastificantes para alcançar boa trabalhabilidade e resistência em concretos com areia de britagem.

Westerholm *et al.* (2008) estudaram a reologia de argamassas e concretos com 13 diferentes tipos de areia de britagem graníticas e uma areia natural. Concluíram que a reologia das misturas é fortemente dependente das características de forma e teor de finos do agregado miúdo. Verificou-se que o aumento da tensão de escoamento e da viscosidade plástica pode ser minimizado pelo uso de aditivos superplastificante. O efeito da forma das partículas foi testado, padronizando o teor de finos das amostras, variando-se o tipo de areia de britagem de diferentes formas, utilizando como principal parâmetro de forma a relação de aspecto (que é a razão entre o menor e o maior diâmetro da partícula). Constatou-se que a viscosidade do concreto fresco é extremamente sensível a pequenas variações nos parâmetros de forma, uma vez que uma alteração da relação de aspecto de 0,51 para 0,49 provocou um aumento na viscosidade plástica três vezes superior.

Santos (2008) estudou a influência das características da forma, textura e da natureza petrográfica de areias britadas nas propriedades do concreto em estado fresco. Também analisou a influência do grau de continuidade das curvas granulométricas e do teor de finos nas areias. Os resultados apontam que a forma dos grãos é mais relevante em termos

de influência em propriedades como a consistência, a segregação e o teor de água exsudada dos concretos, através do grau de esfericidade. Desse modo, a obtenção de propriedades satisfatórias no estado fresco está atrelada à esfericidade/equidimensionalidade dos grãos, o que implica que a areia pode apresentar alta angulosidade de cantos e arestas, e textura superficial rugosa, porém se o formato da partícula apresentar-se esférico/equidimensional não causará grandes deficiências na trabalhabilidade. Quanto à natureza petrográfica, observou-se que os agregados miúdos com altos teores de calcita apresentaram maior fluidez. Na análise da curva granulométrica dos agregados miúdos, notou-se uma relação efetiva entre o percentual de grãos intermediários (considerando a curva total de agregados) e o percentual de partículas finas (entre 0,3 mm e 0,075 mm) e as propriedades reológicas dos concretos, sendo os valores de tensão de escoamento e viscosidade mais elevados quando os percentuais desses grãos finos ultrapassam 30% da massa total de areia.

O estudo realizado por Buest Neto (2006) aponta para a necessidade de maior controle da qualidade na produção de agregados miúdos britados, devido à influência dos tipos de rocha e equipamentos de britagem na forma do agregado resultante. Os concretos produzidos com agregado miúdo britado obtiveram valores maiores de massa específica em relação aos concretos produzidos com agregado miúdo natural. Os ensaios mecânicos demonstraram que os concretos contendo agregado miúdo britado possuem maior resistência à tração por compressão diametral e à tração na flexão do que os concretos contendo agregado miúdo natural.

Rodolpho (2007) realizou um estudo para avaliar as propriedades no estado fresco do concreto contendo areia britada. Variou-se o teor de finos, a relação água/cimento e o uso ou não de aditivo. Fixou-se o abatimento em 120 ± 10 mm. A conclusão geral do estudo aponta que a influência do tipo e teor de finos das areias no comportamento reológico do concreto, para dada consistência, é dependente do teor de pasta do traço, limitado por faixas de consumo de cimento. É o teor de pasta que determina a contribuição da partícula grossa ou da partícula fina na resistência ao cisalhamento, seja por atrito, coesão ou efeito de lubrificação. O teor de pasta é determinado pelo empacotamento granular, influenciado pelas características particulares da combinação do tipo de areia e do teor de finos avaliados. Dentre as areias britadas utilizadas, a areia britada com tratamento de forma conferiu melhores resultados no concreto, porém a areia sem tratamento de forma mostrou-se viável para uso em concreto.

Beixing, Jiliang e Mingkai (2009) utilizaram areia de britagem de origem calcária em concretos de altas e baixas resistências, alterando o teor de finos de 0%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15% e 20%, verificaram a perda de abatimento dos concretos, melhoramento da coesão e redução da segregação, porém, para concretos de baixas resistências (relação água/cimento igual a 0,55), as misturas com 10% e 15% apresentaram melhor trabalhabilidade. Para os concretos de alta resistência (relação água/cimento igual a 0,32), as misturas de 7% a 10% apresentaram melhor trabalhabilidade. Ocorreu o aumento da resistência em ambos os tipos de concreto e para todos os percentuais de finos. Os autores também estudaram aspectos de durabilidade, como permeabilidade ao cloreto e ação de congelamento-descongelamento. Os concretos de maior relação água/cimento (0,55) a resistência à permeabilidade aos íons de cloro aumentou e a resistência ao congelamento e descongelamento foi reduzida com o incremento do percentual de finos. Para concretos de menor relação água/cimento (0,32) não foi verificado a influência dos finos nos aspectos acima citados.

Zhang, Zakaria e Hama (2013) verificaram a influência dos agregados na retração por secagem de concretos e argamassas. Foram experimentados três tipos de agregados graúdos e quatorze tipos de agregados miúdos, entre eles, oito tipos de areia de britagem de origem calcária e granítica. Portanto, os agregados miúdos tiveram pouca influência nessa propriedade do concreto, quando comparado com a influência dos agregados graúdos. As areias de britagem de origem granítica, tiveram comportamento similar à areia natural. No experimento de Shi-Cong e Chi-Sun (2009), a retração por secagem dos concretos com areia de britagem foi inferior ao concreto de referência devido as maiores dimensões das partículas (módulo de finura igual a 3,56), conseqüentemente, superfície específica menor, uma vez que agregados de maior superfície específica promove maior retração. A resistência à cloretos diminui na medida que aumentou o percentual de areia de britagem, podendo-se relacionar ao maior índice de vazios devido à maior dificuldade de compactação, devido as maiores partículas da areia.

Quiroga e Fowler (2003), Benabed *et al.* (2012) e Westerholm *et al.* (2008) apontam que o teor de material fino abaixo de 75 μm , contido nas areias de britagem, aumenta seu efeito na redução da trabalhabilidade a partir de teores acima de 15%. Dessa forma, teores abaixo disso não produzem grandes perdas de abatimento, principalmente, se associada a uma forma mais arredondada e equidimensional dos grãos. Conforme Nanthagopalan e Santhanan (2011), um dos efeitos benéficos do teor de finos é a sua contribuição para o aumento do volume da pasta, que pode representar uma redução do volume de cimento. Tendo em vista

que a forma mais angulosa dos grãos das areias de britagem demanda um maior volume de pasta cimentícia para promover um melhor empacotamento (CORTES *et al.*, 2008). Conforme Lagerblad, Gram e Westerholm (2014), para produzir concretos de boa qualidade com areia de britagem, sem aumentos significativos no consumo de cimento, pode-se utilizar a combinação dos finos da areia de britagem com aditivos superplastificantes, aumentando o teor de argamassa da mistura.

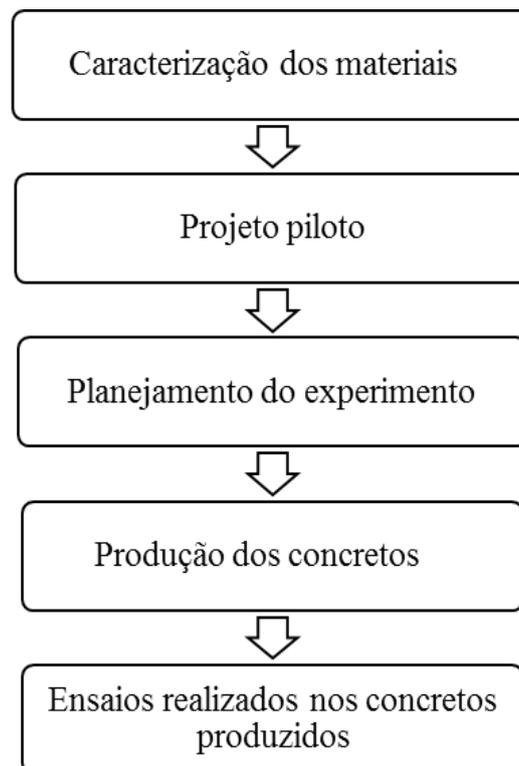
Estudos de Benabed *et al.* (2012), Bouziani (2013), Klein (2008), Nanthagopalan e Santhanan (2011), Mili e Ouezdou (2012) e Park (2012) acrescentam que o elevado teor de finos da areia de britagem também pode oferecer vantagens para concreto de alta resistência e concreto autoadensável que possuem como característica comum uma maior demanda por material de pequenas dimensões, sendo frequente a utilização de adições minerais, materiais com propriedades pozolânicas ou cimentantes, que reagem quimicamente com os componentes do cimento, ou fíler, que apenas promovem o efeito físico de maior empacotamento granular. Dessa maneira, a areia de britagem pode ser útil para promover a otimização da distribuição granulométrica da areia natural, sendo uma excelente alternativa como material de enchimento, portanto, melhorando a eficácia do custo através da redução do consumo de adições minerais. Resultados satisfatórios foram alcançados nas propriedades reológicas e mecânicas desses tipos de concreto, quando areia de britagem é combinada com areia natural em um percentual em torno de 30% de substituição.

A viabilidade técnica da utilização de areia de britagem em concretos é evidente nos resultados das pesquisas mencionadas, no entanto, é necessário adotar padrões de dosagem diferentes da areia natural, como o aumento do teor de argamassa e o uso de aditivos superplastificantes. A viabilidade econômica pode ser alcançada pela otimização do proporcionamento de cada material, dependendo de questões como disponibilidade dos materiais, custo de transporte e características específicas de cada tipo de concreto e das características da areia de britagem utilizada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os procedimentos experimentais realizados para contemplar os objetivos propostos nesta dissertação, iniciando com a caracterização dos materiais, seguido dos métodos de pesquisa, conforme apresentado no fluxograma da Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma do experimento



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Materiais

3.1.1 Caracterização dos materiais

3.1.1.1 Cimento

Utilizou-se na produção dos concretos o cimento Portland composto, com adição de pozolana (CP II Z -32), que é comercialmente o cimento mais utilizado na região de Fortaleza. A Tabela 1 apresenta as características físicas e mecânicas do cimento utilizado, os dados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 1 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II Z - 32

Ensaio realizado		Resultado
Químico	Perda ao fogo (%)	5,80
	Resíduos Insolúveis (%)	14,17
	Anidro Sulfúrico - SO ₃	3,17
	Óxido de Magnésio -MgO	2,82
	Finura - #200 (%)	1,02
Físico	Finura - # 325 (%)	7,55
	Área de superfície específica (Blaine cm ² /g)	4950
	Água de consistência (%)	28,78
	Tempo de pega - Início (min)	171
	Tempo de pega - Fim (min)	233
Mecânico	Expansibilidade a quente (mm)	0,04
	Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	25,9
	Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	29,6
	Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	35,4

Fonte: Dados do fabricante (2014).

A Tabela 2 apresenta as características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP V – ARI utilizado no ensaio de reação álcali-agregado.

Tabela 2 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP V -ARI

Ensaio realizado		Resultado
Químico	Perda ao fogo (%)	3,45
	Resíduos Insolúveis (%)	1,00
	Anidro Sulfúrico - SO ₃	3,51
	Óxido de Magnésio -MgO	1,75
	Equivalente Alcalino total (%)	0,954
	Finura - #200 (%)	0,2
	Finura - # 325 (%)	3,0
Físico	Área de superfície específica (Blaine cm ² /g)	4730
	Água de consistência (%)	30,6
	Tempo de pega - Início (min)	160
	Tempo de pega - Fim (min)	225
	Expansibilidade a quente (mm)	0,17
Mecânico	Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	33,5
	Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	41,0
	Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	50,2

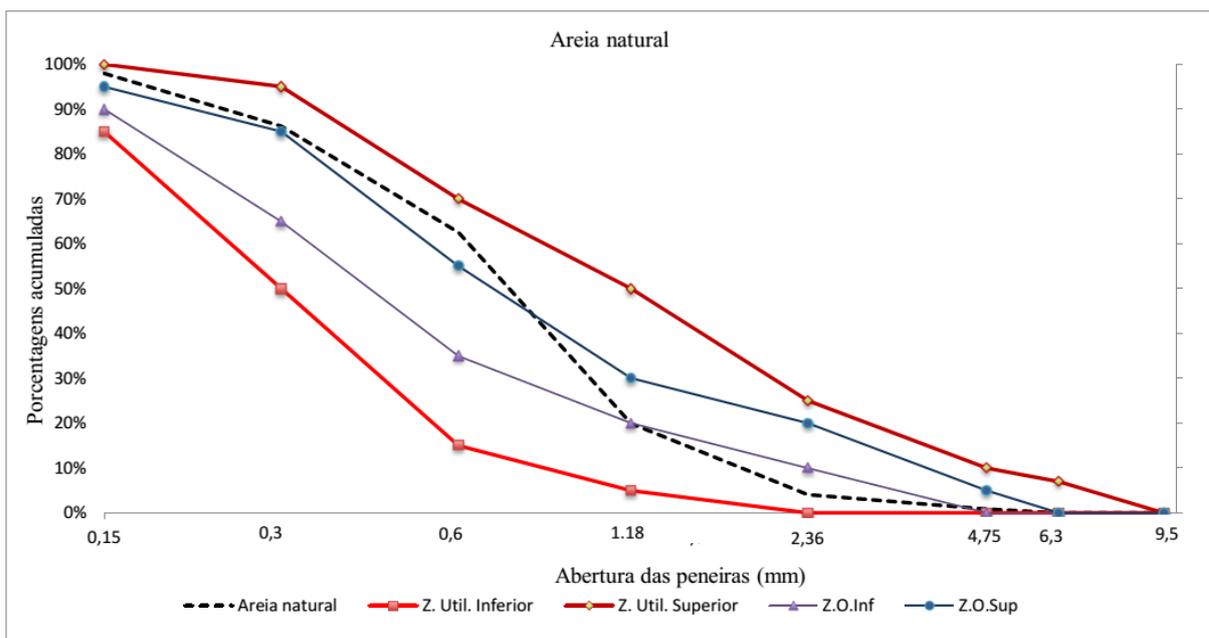
Fonte: Dados do fabricante (2014).

O cimento CP V – ARI atende as exigências da ABNT NBR 15577-4:2008, que estabelece o equivalente alcalino total expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($0,658\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) igual a $(0,90 \pm 0,10) \%$ e a finura, medida pela área de superfície específica, igual a $(4900 \pm 200) \text{ cm}^2/\text{g}$, para realização do ensaio de reatividade álcali-agregado.

3.1.1.2 Areia natural

Foi utilizada uma areia quartzosa sem identificação da jazida, adquirida em depósito de materiais de construção de Fortaleza. A areia natural apresentou distribuição granulométrica que atende os limites especificados na ABNT NBR 7211:2009. A curva granulométrica encontra-se na Figura 11 e os valores do módulo de finura e dimensão máxima característica estão apresentados na Tabela 3.

Figura 11 - Curva granulométrica da areia natural



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3 – Módulo de finura e dimensão máxima característica da areia natural

Ensaio realizado	Resultado	Norma de ensaio
Módulo de finura	2,71	ABNT NBR NM 248:2003
Dimensão máxima característica	4,75 mm	ABNT NBR NM 248:2003

Fonte: Elaborado pela autora

Os ensaios de caracterização da areia natural foram realizados nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará. As propriedades físicas da areia natural estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades físicas da areia natural

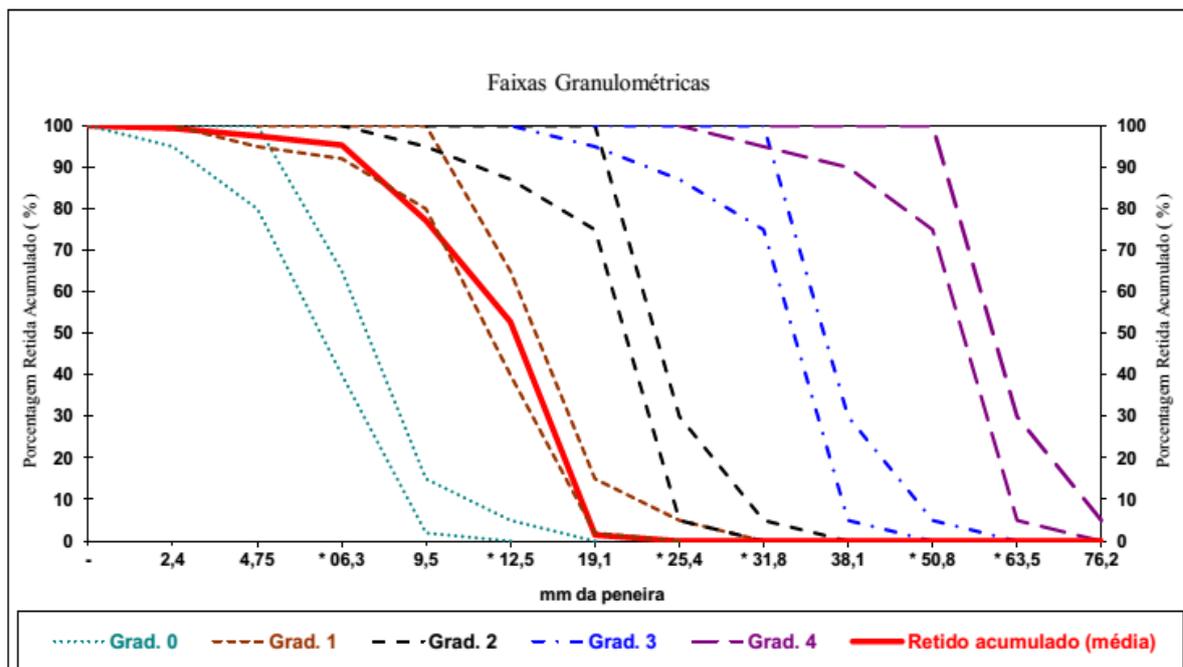
Ensaio realizado	Resultado	Norma de ensaio
Massa específica	2540 Kg/m ³	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária – solto	1432 Kg/m ³	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária - compactado	1533 Kg/m ³	ABNT NBR NM 45:2006
Teor de material pulverulento	1,03%	ABNT NBR NM 46:2003
Absorção de água	0,45%	ABNT NBR NM 30:2001

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.1.3 Pedra britada

Utilizou-se pedra britada granítica, sem identificação da jazida, adquirida em loja de materiais de construção na cidade de Fortaleza e caracterizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC. Na Figura 12 está apresentada sua curva granulométrica.

Figura 12 - Curva granulométrica da pedra britada



Fonte: Elaborada pela autora.

O módulo de finura e a dimensão máxima característica do agregado graúdo estão apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6 encontram-se os resultados dos ensaios da caracterização física.

Tabela 5 – Módulo de finura e dimensão máxima característica

Ensaio realizado	Resultado	Norma de ensaio
Módulo de finura	8,1	ABNT NBR NM 248:2003
Dimensão máxima característica	19 mm	ABNT NBR NM 248:2003

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6 - Propriedades físicas do agregado graúdo (pedra britada)

Ensaio realizado	Resultado	Norma de ensaio
Massa específica	2570 Kg/m ³	ABNT NBR NM 53:2009
Massa unitária - solto	1966 Kg/m ³	ABNT NBR NM 45:2006
Massa unitária - compactado	2057 Kg/m ³	ABNT NBR NM 45:2006
Absorção de água	0,57%	ABNT NBR NM 30:2001
Índice de forma	1,57	ABNT NBR 7809:2008

Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi o TechniFlow 520 da *MC Bauchemie*, superplastificante à base de policarboxilatos, de pega normal, líquido e de cor marrom. A densidade é igual a 1,08 g/cm³ e a dosagem pode variar de 0,2% a 2% sobre a massa do cimento.

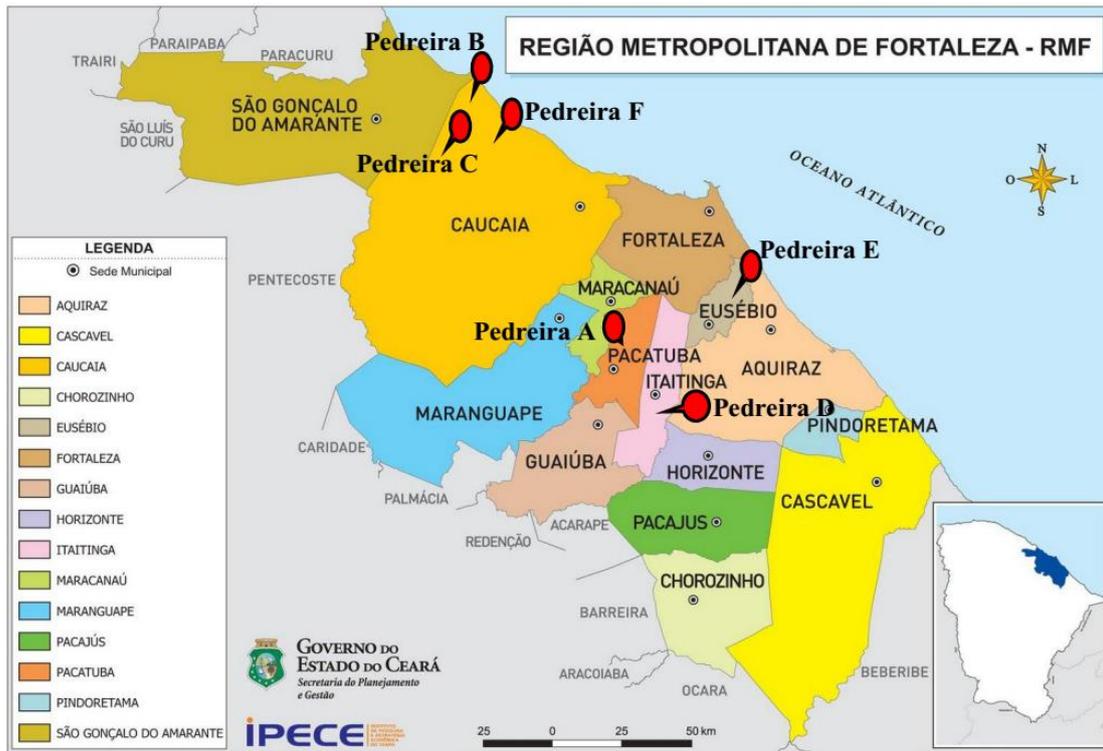
3.1.1.5 Água de amassamento

A água utilizada foi fornecida pelo sistema público de abastecimento da cidade de Fortaleza.

3.1.2 Caracterização das areias de britagem

As areias de britagem estudadas são provenientes de pedreiras localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza, conforme mostra o mapa na Figura 13.

Figura 13 - Localização das pedreiras no mapa da RMF



Fonte: Adaptado de Cavalcanti e Parahyba (2011).

As amostras foram retiradas dos estoques das pedreiras, conforme especifica a ABNT NBR NM 27:2001 para redução de amostras de campo de agregados para ensaios de laboratório. O material não passou por processos de lavagem ou peneiramento após a britagem, portanto, não foram descartadas as partículas abaixo de 75 μm . Neste experimento, as amostras foram identificadas conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Identificação das amostras de areia de britagem

Identificação da amostra	Pedreira de origem	Local da jazida
Areia A	Pedreira A	Município de Pacatuba/CE
Areia B	Pedreira B	Município de Caucaia/CE
Areia C	Pedreira C	Município de Caucaia/CE
Areia D	Pedreira D	Município de Itaitinga/CE
Areia E	Pedreira E	Município de Eusébio/CE
Areia F	Pedreira E	Município de Eusébio/CE
Areia G	Pedreira E	Município de Eusébio/CE
Areia H	Pedreira F	Município de Caucaia/CE

Fonte: Elaborado pela autora.

As areias E, F e G são provenientes da mesma jazida, pedreira E. O tamanho da abertura final do britador, no processo de britagem terciária, propicia uma característica granulométrica diferente para as areias E e F, enquanto que a areia G é produzida na britagem quaternária. No Quadro 2 estão apresentados os tipos de britadores utilizados no beneficiamento das rochas.

Quadro 2 - Tipos de britadores utilizados no beneficiamento das rochas

Amostra	Britador primário	Britador secundário	Britador terciário	Britador quaternário
Areia A	Mandíbulas	Cônico	Cônico	-
Areia B	Mandíbulas	Cônico	-	-
Areia C	Mandíbulas	Cônico	Cônico	-
Areia D	Mandíbulas	Cônico	-	-
Areia E	Mandíbulas	Cônico	Cônico	-
Areia F	Mandíbulas	Cônico	Cônico	-
Areia G	Mandíbulas	Cônico	Cônico	Cônico
Areia H	Mandíbulas	Cônico	Cônico	-

Fonte: Elaborado pela autora.

As amostras das areias de britagem foram estocadas em tambores metálicos de 200 litros, conforme apresentado na Figura 14, no Laboratório de Materiais de Construção da UFC para utilização nos ensaios de caracterização e produção dos concretos.

Figura 14 - Estoque de areias de britagem



Fonte: Elaborado pela autora.

Os ensaios de caracterização realizados nas areias de britagem estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 - Ensaios de caracterização das areias de britagem

Ensaio realizado	Norma/ procedimento de ensaio
Difração de raios – X	Procedimentos do Laboratório de Raios X da UFC
Fluorescência de raios –X	Procedimentos do Laboratório de Raios X da UFC
Análise Petrográfica	ABNT NBR 7389-1:2009
Granulometria, módulo de finura e dimensão máxima característica	ABNT NBR NM 248:2003
Massa específica	ABNT NBR NM 52:2009
Massa unitária - estado solto e compactado	ABNT NBR NM 45:2006
Absorção de água	ABNT NBR NM 30:2001
Reação álcali-agregado	ABNT NBR 15577-4:2008
Teor de Material Pulverulento	ABNT NBR NM 46: 2003
Análise da forma dos grãos	<i>Aggregate Image Measurement System (AIMS)</i>

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados dos ensaios de caracterização das areias de britagem estão apresentados no capítulo 4. Por ser um ensaio não convencional, a metodologia da análise da forma dos grãos das areias de britagem pelo *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) está apresentada no apêndice A.

3.2 Métodos de Pesquisa

3.2.1 Projeto Piloto

Para avaliar o traço do concreto calculado para o experimento, assim como, para definir o teor máximo de substituição da areia natural por areia de britagem, foi realizado o projeto piloto. O teste contemplou a execução de 15 traços de concreto, utilizando apenas a areia natural e um tipo de areia de britagem (areia H), variando nos teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, com relação água/cimento 0,4, 0,5 e 0,6.

Foram realizados os ensaios de consistência pelo abatimento de tronco de cone, resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água, índice de vazios e massa específica. A Tabela 8 apresenta os traços e os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 8 - Traços do projeto piloto

Nº	a/c	Agregado miúdo		Resultados dos ensaios nos concretos				
		% Areia natural	% Areia H	Slump (mm)	fc (MPa)	ABS (%)	I.V (%)	M.E (g/cm ³)
1	0,4	100	0	150	38,3	3,79	8,71	2,52
2	0,5	100	0	90	31,4	6,03	13,46	2,58
3	0,6	100	0	80	24,0	6,44	14,17	2,56
4	0,4	75	25	170	42,1	5,35	12,26	2,61
5	0,4	50	50	80	40,4	5,18	11,87	2,60
6	0,4	25	75	80	42,7	4,31	9,95	2,56
7	0,4	0	100	130	42,3	3,91	9,17	2,59
8	0,5	75	25	80	35,7	4,46	10,20	2,55
9	0,5	50	50	110	33,4	4,48	10,27	2,56
10	0,5	25	75	80	35,7	4,72	10,87	2,59
11	0,5	0	100	-	-	-	-	-
12	0,6	75	25	140	25,9	6	13,48	2,60
13	0,6	50	50	150	25,4	5,86	13,21	2,60
14	0,6	25	75	120	26,1	5,64	12,76	2,60
15	0,6	0	100	-	-	-	-	-

Fonte: Medeiros (2015).

Legenda: a/c - Relação água/cimento; Slump - resultado do slump test; fck - Resistência à compressão (28 dias); ABS - Absorção de água (28 dias); I.V - índice de vazios (28 dias); M.E - Massa específica (28 dias).

Para alcançar a trabalhabilidade desejada, definida para o valor de abatimento na faixa de 100 ± 20 mm, foi utilizado aditivo plastificante. Os resultados de abatimento superiores a essa faixa ocorreram devido ao excesso de aditivo incorporado no concreto. Para os traços com 100% de areia de britagem com relação água/cimento igual a 0,5 e 0,6 (Traços 11 e 15) não foi possível moldar os corpos de prova, pois não obtiveram a trabalhabilidade desejada, assim como, o aumento do percentual do aditivo plastificante provocou a segregação dos materiais, não constituindo assim, a mistura homogênea característica do concreto.

Os resultados apresentados na Tabela 8 demonstram que as substituições da areia natural por areia de britagem, em todos os teores utilizados, representam um ganho na resistência à compressão dos concretos, comparados com os traços de referência (0% de areia de britagem).

Os concretos produzidos com areia de britagem com relação água/cimento igual a 0,4 apresentaram um aumento na absorção de água e no índice de vazios, em relação ao traço de referência. Contudo, os traços com relação água/cimento 0,5 e 0,6 apresentaram uma redução da absorção e índices de vazios, em todos os teores de substituição.

A massa específica dos concretos não sofreu alterações significativas, concentrando-se na faixa de 2,52 g/cm³ a 2,60 g/cm³ para todos os concretos testados.

Através da avaliação da trabalhabilidade dos concretos na execução do projeto piloto, verificou-se a inviabilidade de utilizar 100% de areia de britagem na próxima etapa do experimento para o teor de argamassa de 52%, teor típico utilizado para concreto bombeado em Fortaleza. As demais propriedades testadas apresentaram-se satisfatórias.

3.2.2 Planejamento do experimento

Um experimento planejado é um teste ou uma série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo a permitir a observação e identificação das mudanças correspondentes na resposta de saída (MONTEGOMERY, 2001). Com o experimento planejado pode-se determinar quais das variáveis de entrada, também chamadas de fatores ou variáveis independentes, exercem maior influência nas variáveis de resposta para cada grupo de areia de britagem estudado.

A realização do experimento desta dissertação envolve sete tipos de areia de britagem aptas a serem utilizadas no concreto como agregado miúdo, conforme suas características físicas. No entanto, optou-se em classificar as areias em grupos baseados na classificação petrográfica da rocha, processo de britagem e na dimensão máxima característica dos grãos, pois se tornaria inviável a utilização das sete areias na produção do concreto, tendo em vista as variações na relação água/cimento e no teor de substituição. Seria necessário executar 63 traços de concreto, portanto, verificou-se que isto não seria possível, devido às restrições quanto ao tempo e aos recursos disponíveis. Os grupos das areias de britagem estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Grupos de areia de britagem classificados conforme o tipo de rocha, a dimensão máxima característica e o processo de britagem

Características	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Areias do grupo	A, C, H.	B, D.	F, G.
Tipo de Rocha	Monzogranito	Monzodiorito	Fonólito
Dimensão máxima característica	4,8	4,8	2,4
Processo de britagem	Terciário	Secundário	Terciário/quaternário
Areia utilizada no experimento	C	D	F

Fonte: Elaborado pela autora.

Para cada grupo foi selecionado uma areia de britagem para a execução do experimento, conforme visualizado na Tabela 9. A escolha da areia ocorreu em função da quantidade de material disponível.

Após definir quais areias de britagem seriam utilizadas, a próxima etapa foi a escolha dos fatores e dos níveis de variação dos mesmos no experimento. Definiu-se como fatores a relação água/cimento, variando em três níveis (0,4, 0,5 e 0,6), e o teor de substituição da areia natural pelas areias de britagem, também em três níveis (0%, 37,5% e 75%). A escolha da variação da relação água/cimento, em 0,4, 0,5 e 0,6, se justifica por se enquadrar dentro da faixa (de 0,4 a 0,6), que é comumente utilizada em obras convencionais, assim, pode-se elaborar um modelo matemático para prever o comportamento das variáveis de resposta dentro dessa faixa. A escolha dos níveis de variação do teor de substituição se deu em função dos resultados obtidos no projeto piloto, conforme apresentado no item 3.2.1. Dessa forma, optou-se por utilizar o teor máximo de substituição de 75%, considerando os resultados satisfatórios dos ensaios de consistência pelo abatimento de tronco de cone e de resistência à compressão aos 28 dias. O teor de substituição de 37,5% corresponde à metade do teor máximo, sendo utilizado na modelagem matemática para previsão de comportamento do concreto.

Na sequência, escolheu-se o método a ser aplicado no planejamento experimental. Conforme Montgomery (2001), o planejamento fatorial é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas. Esse tipo de planejamento normalmente é representado por b^k , sendo que k representa o número de fatores e “ b ” o número de níveis escolhidos (NEVES; SCHVARTZMAN, 2002).

O projeto de experimentos fatorial utilizado foi 3^2 para cada grupo de areia de britagem. Dessa forma 3^2 corresponde a 9 combinações possíveis entre as variáveis independentes, que multiplicadas por 3 grupos de areia de britagem totalizam 27 traços de concreto. No entanto, observou-se que seria necessário executar apenas uma vez os traços com 0% de areia de britagem para cada relação água/cimento, portanto, foram executados 21 traços de concreto. Na Tabela 10 estão apresentadas as variações dos fatores em seus diferentes níveis.

Tabela 10 - Identificação dos traços produzidos

Nº	a/c	Agregado miúdo			
		% Teor de substituição areia natural	% Teor de substituição areia grupo 1	% Teor de substituição areia grupo 2	% Teor de substituição areia grupo 3
1	0,4	100	0	0	0
2	0,5	100	0	0	0
3	0,6	100	0	0	0
4	0,4	62,5	0	0	37,5
5	0,4	25	0	0	75
6	0,5	62,5	0	0	37,5
7	0,5	25	0	0	75
8	0,6	62,5	0	0	37,5
9	0,6	25	0	0	75
10	0,4	62,5	37,5	0	0
11	0,4	25	75	0	0
12	0,5	62,5	37,5	0	0
13	0,5	25	75	0	0
14	0,6	62,5	37,5	0	0
15	0,6	25	75	0	0
16	0,4	62,5	0	37,5	0
17	0,4	25	0	75	0
18	0,5	62,5	0	37,5	0
19	0,5	25	0	75	0
20	0,6	62,5	0	37,5	0
21	0,6	25	0	75	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: a/c - Relação água/cimento.

As variáveis de resposta ou variáveis dependentes do experimento são: consumo de aditivo; resistência à compressão nas idades de 7, 28, 56 e 91 dias; resistência à tração por compressão diametral (28 dias); absorção de água (28 dias); índice de vazios (28 dias); massa específica (28 dias); retração por secagem (112 dias) e carbonatação natural (114 dias).

Para a análise estatística dos dados foi utilizado o software *Statistica 7.0*. Foi realizada a análise de variância (ANOVA) de todos os resultados, com nível de significância de 5%, para verificar a influência dos fatores controláveis, assim como, suas interações. Para a interpretação dos resultados da ANOVA analisou-se o teste estatístico “F”, que indica a variância dos resultados para o fator em questão, e o valor “p”, que indica a probabilidade dos resultados ocorrerem ao acaso, sendo quanto maior o valor obtido no teste “F” e o valor “p” apresentar-se inferior a 0,05, mais significativa será a influência do fator independente na resposta da variável dependente analisada. Posteriormente, foram definidos modelos matemáticos de comportamento, por meio da Análise de Regressão Linear Múltipla, para as variáveis de resposta que apresentaram o teor de substituição de areia de britagem significativo na ANOVA.

Os métodos estatísticos são aplicados nos resultados de um experimento para descrever o comportamento das variáveis independentes, a relação entre elas e estimar os efeitos produzidos nas variáveis de resposta (REY,1993). Montgomery (2001) ressalta que os métodos estatísticos são usados para fornecerem resultados e conclusões objetivas a partir dos dados obtidos no experimento.

3.2.3 Produção dos concretos

Como primeiro passo para confecção dos concretos realizou-se a dosagem conforme o método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), com o teor de argamassa 52% e relações água/cimento de 0,4, 0,5 e 0,6. Foi definido o valor do abatimento de tronco de cone igual a 100 ± 20 mm, para o concreto de referência (sem as areias de britagem). Esses valores foram escolhidos por serem largamente utilizado na região. Na Tabela 11 estão apresentados os consumos de materiais por metro cúbico de concreto para o traço de referência.

Tabela 11 – Consumo dos materiais por metro cúbico de concreto

Relação a/c	Cimento (Kg/m ³)	Agregado miúdo (Kg/m ³)	Agregado graúdo (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)
0,4	444,27	710,83	1066,24	177,70
0,5	369,23	775,38	1070,76	184,61
0,6	315,79	821,05	1073,68	189,47

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a substituição da areia natural pela areia de britagem, conforme os percentuais apresentados na Tabela 10 do item 3.2.2, foi realizada a compensação de volume, segundo Cabral, A. (2007), considerando as diferentes massas específicas das areias, conforme apresentado na Equação 2.

$$MAB = MAN \cdot \frac{\gamma_{AB}}{\gamma_{AN}} \quad (2)$$

Onde:

MAB = Massa da areia de britagem (Kg);

MAN = Massa da areia natural (Kg);

γ_{AB} = Massa específica da areia de britagem (Kg/cm³);

γ_{AN} = Massa específica da areia natural (Kg/ cm³).

Os agregados miúdos e o agregado graúdo foram secos em estufa com temperatura de 100±5°C. Todos os materiais foram pesados e separados em sacos plásticos, evitando absorção de umidade e perda de material no transporte. A água foi pesada e separada em recipientes plásticos.

Os concretos foram produzidos em betoneira com capacidade para 120 litros, nas instalações do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará. Para cada traço foram moldados vinte corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura) e dois corpos de prova prismáticos de dimensões 7,5 cm x 7,5 cm x 28,5 cm (largura x altura x comprimento), conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Corpos de prova moldados



Fonte: Elaborado pela autora.

Os corpos de prova cilíndricos foram curados imersos em água com temperatura ambiente de aproximadamente $23\pm 5^{\circ}\text{C}$. Os corpos de prova prismáticos foram curados imersos em água durante 28 dias, após esse período teve cura em ambiente com temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade de $55\pm 5\%$. A Figura 16 apresenta os corpos de prova prismáticos em cura em ambiente climatizado.

Figura 16 - Corpos de provas prismáticos em cura em ambiente climatizado



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.4 Ensaios realizados no concreto

Os ensaios realizados no concreto para avaliar suas propriedades estão especificados na Tabela 12.

Tabela 12 - Ensaios realizados no concreto

Ensaio realizado	Idade (dias)	Norma/ procedimento
Abatimento do tronco de cone	0	ABNT NBR NM 67:1998
Resistência à compressão	7, 28, 56 e 91	ABNT NBR 5739:2007
Resistência à tração diametral	28	ABNT NBR7222:2011
Absorção de água	28	ABNT NBR 9778:2005
Índice de vazios	28	ABNT NBR 9778:2005
Massa específica	28	ABNT NBR 9778:2005
Retração por secagem	1, 56, 91 e 112	ASTM C-157:1993
Carbonatação natural	114	Barin (2008); Pauletti (2009)

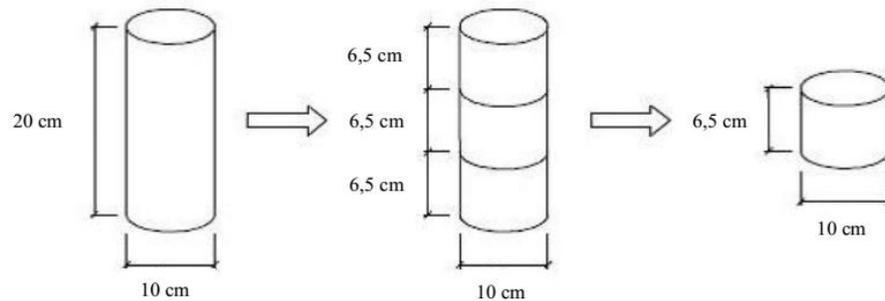
Fonte: Elaborado pela autora.

Estão descritos no item 3.2.4.1 os procedimentos realizados no ensaio de carbonatação natural. Esse ensaio não possui procedimentos normatizados, por essa razão a metodologia utilizada para obtenção dos resultados está apresentada a seguir.

3.2.4.1 Carbonatação Natural

O ensaio de carbonatação natural foi baseado na metodologia adotada por Barin (2008) e Pauletti (2009). Foram utilizados dois corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), que tiveram cura submersa em água durante 28 dias, após esse período, cada corpo de prova foi transformado em três corpos de prova de dimensões de 10 cm x 6,5 cm (diâmetro x altura), conforme a Figura 17.

Figura 17 - Corpos de prova de dimensões reduzidas



Fonte: Barin (2008).

Após serem cortados, cada corpo de prova teve as laterais e uma de suas faces impermeabilizadas com o produto Xypex concentrado, produto à base de cimento Portland e sílica ativa, da marca *MC Bauchemie*. A aplicação do impermeabilizante foi executada protegendo a face que seria exposta à carbonatação, conforme as Figuras 18-a e 18-b.

Figura 18 - Corpos de prova reduzidos

a) Laterais e face impermeabilizadas



b) Face livre exposta ao ambiente natural

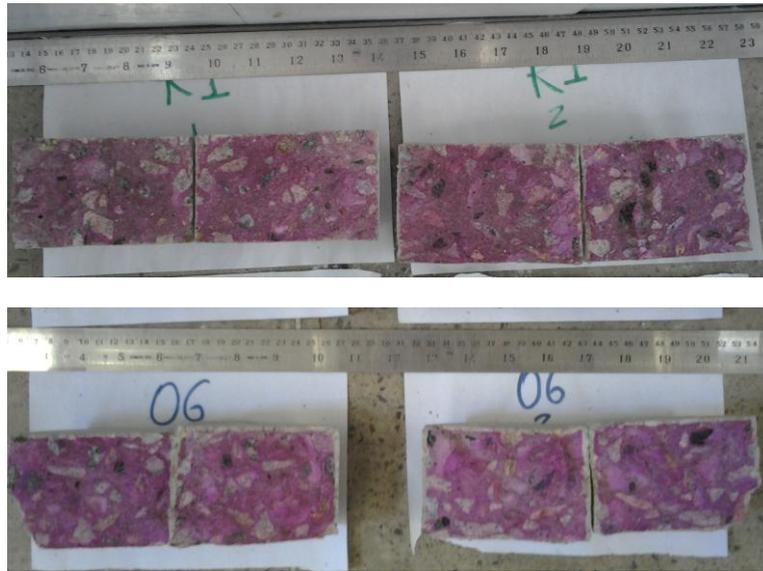


Fonte: Elaborado pela autora.

Após a secagem do produto impermeabilizante, os corpos de prova ficaram expostos ao ambiente natural na área externa do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC, considerado de classe agressiva moderada, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

As medições foram realizadas na idade de 114 dias, após o período de cura submersa. Os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral e aspergida uma solução de fenolftaleína sobre as partes. A área não carbonatada ou com pH superior a 9 apresentou coloração vermelho carmim, enquanto a área carbonatada manteve-se incolor. A imagem foi capturada por máquina fotográfica, digitalizada e no software *AutoCad* foi colocada em escala e medida a frente de carbonatação. A Figura 19 apresenta os corpos de prova após aspersão de fenolftaleína.

Figura 19 - Corpos de prova após a aspersão de fenolftaleína



Fonte: Elaborado pela autora.

A apresentação, análise e discussão dos resultados estão apresentados a seguir no capítulo 4.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

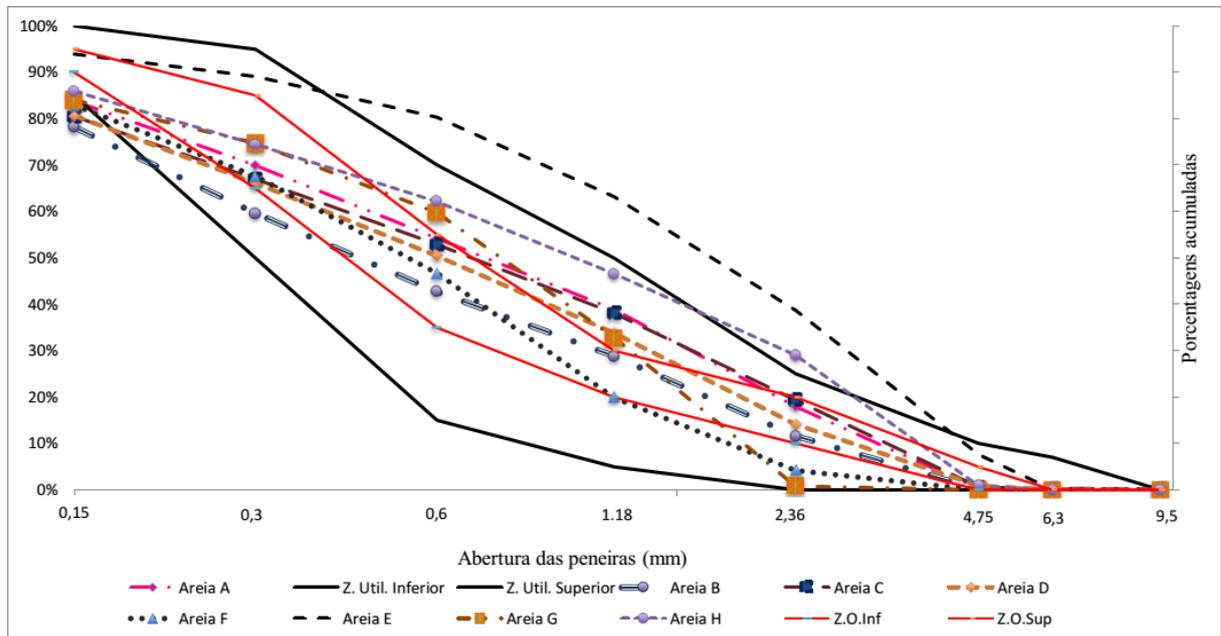
A caracterização física, química e mineralógica das areias de britagem, nesta dissertação, fazem parte dos objetivos específicos, portanto, os resultados serão apresentados dentro deste tópico, antecedendo os resultados das propriedades testadas nos concretos produzidos.

4.1 Caracterização das areias de britagem

4.1.1 Granulometria

As curvas granulométricas das areias de britagem estudadas estão apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Distribuição granulométrica das areias de britagem



Fonte: Elaborado pela autora.

As areias A, B, C, D, F, G e H apresentam distribuição granulométrica dentro dos limites estabelecidos pela ABN NBR 7211:2009. A distribuição granulométrica da areia E apresenta-se fora desses limites, portanto, essa areia foi descartada do estudo ainda nesta etapa. A Tabela 13 apresenta os resultados do módulo de finura e dimensão máxima característica de todas as areias de britagem estudadas.

Tabela 13 - Módulo de finura e Dimensão Máxima Característica

Areia	Módulo de finura	Dimensão Máxima Característica (mm)
Areia A	2,61	4,8
Areia B	2,21	4,8
Areia C	2,59	4,8
Areia D	2,46	4,8
Areia E	3,73	4,8
Areia F	2,52	2,4
Areia G	2,21	2,4
Areia H	2,99	4,8

Fonte: Elaborado pela autora.

A ABNT NBR 7211:2009 classifica o agregado miúdo de acordo com o módulo de finura, sendo de 1,55 a 2,20 o módulo de finura de areias da zona utilizável inferior, de 2,20 a 2,90 da zona ótima e de 2,90 a 3,50 da zona superior utilizável. O módulo de finura das areias A, B, C, D, F e G estão entre 2,21 a 2,61, portanto, estão na zona ótima. O módulo de finura da areia H está na zona superior utilizável e a areia E apresentou módulo de finura superior ao aceite por essa norma.

A dimensão máxima característica das areias A, B, C, D, E e H apresentou o valor de 4,8 mm e as areias F e G o valor de 2,4 mm, valores considerados típicos para areias de uso em concreto.

4.1.2 Índices físicos

Os resultados dos ensaios de massa específica, massa unitária, absorção de água e teor de material pulverulento das areias de britagem avaliadas estão apresentados na Tabela 14.

As massas específicas das amostras de areia de britagem se encontram entre 2330 kg/m³ e 2670 kg/m³ e as massas unitárias entre 1675 kg/m³ e 1760 kg/m³, valores similares aos encontrados nos trabalhos de Cabrera, Traversa e Ortega (2011), Park (2012), Zang, Zacaria e Hama (2013), Santos (2008) e Cabral, K. (2007), portanto, considerados típicos para agregados de origem granítica.

Tabela 14 - Ensaios de caracterização das areias de britagem

Areia	Massa específica	Massa unitária	Absorção de água	Material pulverulento
Norma de ensaio	ABNT NBR NM 52:2009	ABNT NBR NM 45:2006	ABNT NBR NM 30:2001	ABNT NBR NM 46:2003
A	2670 kg/m ³	1750 kg/m ³	0,60%	10,56%
B	2620 kg/m ³	1712 kg/m ³	0,40%	11,32%
C	2540 kg/m ³	1734 kg/m ³	0,59%	14,72%
D	2520 kg/m ³	1740 kg/m ³	0,88%	10,20%
F	2380 kg/m ³	1675 kg/m ³	0,70%	10,10%
G	2330 kg/m ³	1690 kg/m ³	1,04%	10,50%
H	2610 kg/m ³	1760 kg/m ³	0,6%	8,31%

Fonte: Elaborado pela autora.

As absorções de água das areias de britagem foram inferiores a 1,1%. O teor de material pulverulento da areia H foi inferior a 10%, das areias A, B, D, F e G foi entre 10% e 12% e da areia C foi superior a 12%, superando o limite estipulado pela ABNT NBR 7211:2009, para materiais provenientes de britagem de rochas.

4.1.3 Fluorescência de Raios X

O percentual de concentração dos elementos químicos que compõem cada areia de britagem avaliada é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Composição química das areias de britagem

Elemento	% concentração dos elementos químicos nas areias de britagem					
	A	B	C	D	F e G	H
Si	38,74	53,24	54,66	54,58	44,52	55,51
K	8,22	14,83	15,55	18,85	17,36	14,21
Al	12,00	9,15	8,56	10,96	14,54	9,44
Fe	20,40	11,17	10,34	7,21	10,15	10,26
Ca	14,83	8,63	8,83	6,14	5,73	8,96
Na	-	-	-	-	4,55	-

(continuação)

Elemento	% concentração dos elementos químicos nas areias de britagem					
	A	B	C	D	F e G	H
Ti	3,06	2,14	1,63	1,08	1,16	1,05
Mn	0,68	0,30	0,26	-	0,73	0,38
Zr	0,50	-	-	-	0,32	-
Cl	-	-	-	0,06	0,29	-
P	0,98	-	-	-	0,23	-
Sr	0,30	0,39	0,09	0,13	0,20	0,16
Rb	-	0,10	0,07	0,16	0,12	-
Nb	-	-	-	-	0,05	-
S	0,14	-	-	-	-	-
Zn	0,10	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	0,77	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

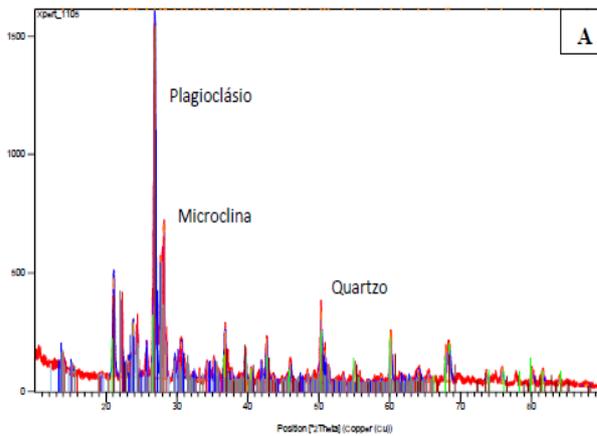
Os elementos químicos silício (Si), alumínio (Al), potássio (K), ferro (Fe) e cálcio (Ca) são comuns em todos os tipos de areia de britagem, juntos representam cerca de 90% da composição das mesmas. A concentração dos componentes químicos das areias de britagem F e G são iguais, pois possuem origem na mesma jazida. Desse modo, uma amostra de rocha foi utilizada tanto para o ensaio de fluorescência de Raios X, como para a difração de Raios X e petrografia.

4.1.4 Difração de Raios X

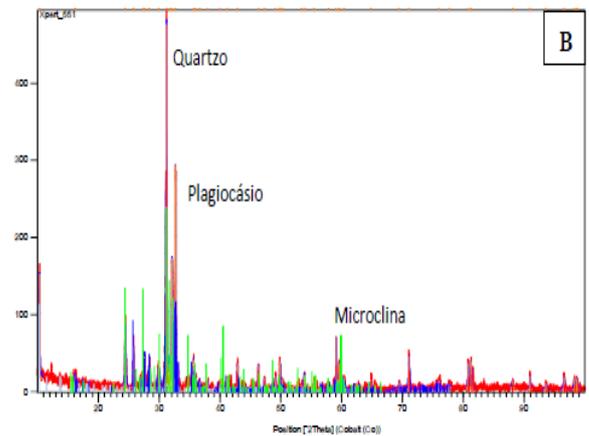
A Difração de Raios X (DRX) é uma técnica utilizada para identificar e quantificar fases de compósitos. Em análise de rochas é possível identificar os minerais que as compõem através dos compostos químicos, e o seu grau de cristalinidade através da intensidade dos picos formados por esses compostos. Segundo Marinoni (2012), a intensidade dos picos de Difração de Raios X indica a organização cristalina dos minerais, quanto maior o pico menos deformado se encontra o material, o que o torna mais estável. Os difratogramas de Raios X das areias de britagem estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Difratomogramas de Raios X das areias de britagem

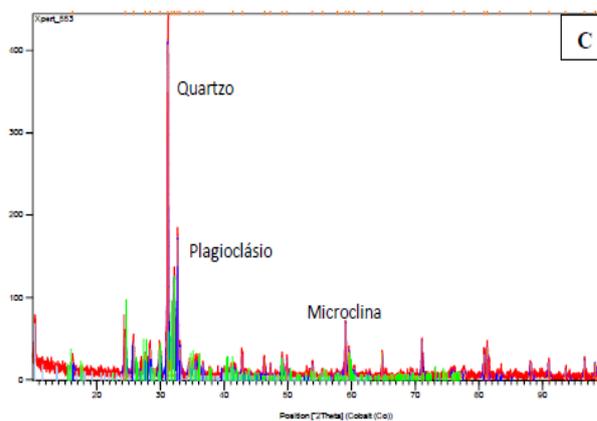
a) Areia A



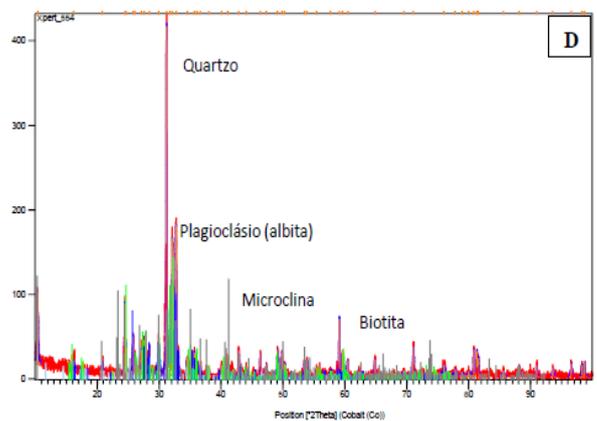
b) Areia B



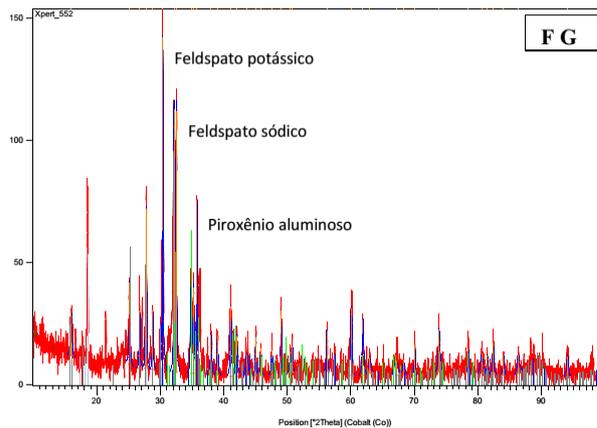
c) Areia C



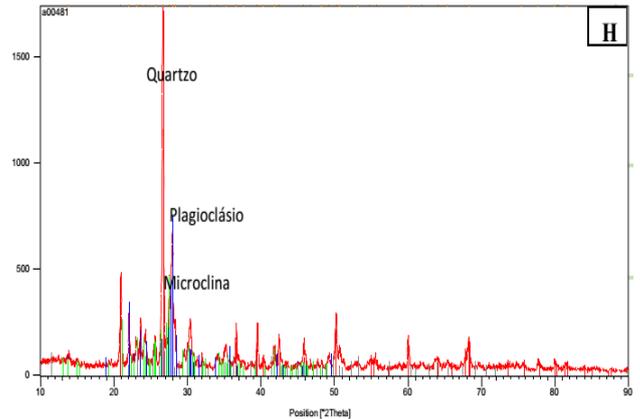
d) Areia D



e) Areias F e G



f) Areia H



Fonte: Elaborado pela autora

Os difratogramas das areias B, C, e D (Figuras 21-b, 21-c e 21-d, respectivamente) apresentam o quartzo como material de maior intensidade na formação dos picos de cristalinidade, seguidos dos feldspatos sódicos e potássicos, plagioclásio e microclina, respectivamente. No difratograma da areia A (Figura 21-a), o plagioclásio e a microclina demonstram possuir maior nível de organização interna na sua estrutura,

apresentando os picos mais intensos, enquanto que o quartzo apresenta leve intensidade. Na Figura 21-e está o difratograma da rocha matriz das areias F e G. Essa rocha possui composição de feldspatos sódicos e potássicos e piroxênios. Na Figura 21-f, difratograma da areia H, apresentam picos cristalinos os minerais de quartzo, plagioclásio e microclina.

Conforme apreciação dos resultados, as rochas estudadas são formadas por minerais de estruturas cristalinas bem definidas, desse modo, apresentam-se estáveis, sem riscos de reações deletérias quando utilizadas como agregado no concreto.

A seguir, a análise petrográfica apresenta a concentração dos minerais em cada rocha.

4.1.5 Petrografia

A classificação petrográfica com a identificação dos minerais principais e os minerais acessórios, assim como a textura das rochas que compõem as areias de britagem é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação petrográfica das areias de britagem avaliadas

Tipo	Rocha	Classificação petrográfica	Textura	Minerais principais	Min. Acessórios
A	Ígnea	Monzogranito	Inequigranular	Microclina. plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita
B	Ígnea	Monzodiorito	Inequigranular	Microclina. plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita
C	Ígnea	Monzogranito	Inequigranular	Microclina. plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita
D	Ígnea	Monzodiorito	Inequigranular	Microclina. plagioclásio, quartzo, biotita, hornblenda, muscovita, minerais opacos, sericita.	Apatita
F,G	Ígnea	Fonólito	Porfirítica	Feldspato potássico, piroxênio, hornblenda, nefelina, olivina, opacos. minerais opacos.	Apatita
H	Ígnea	Monzogranito	Inequigranular	Microclina. plagioclásio, quartzo, biotita, muscovita, minerais opacos.	Apatita

Fonte: Elaborado pela autora.

A areias A, B, C, D e H são formadas por rochas ígneas intrusivas ou plutônicas. Conforme Cavalcanti e Parahyba (2011), as jazidas localizadas nas cidades de Itaitinga, Caucaia e Pacatuba, onde estão as pedreiras produtoras dessas areias, podem ser consideradas granitóides, portanto, variações do granito. A textura inequigranular das rochas intrusivas apresentam cristais de maiores dimensões, que podem ser vistos a olho nu. As areia F e G, cuja jazida está situada na cidade de Eusébio, são formadas por rochas ígneas extrusivas ou vulcânicas, sua textura porfirítica indica uma massa formada por cristais de pequenas dimensões com a presença, em seu meio, de cristais de maiores dimensões (fenocristais).

O perfil de concentração dos minerais das rochas estudadas está apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Concentração dos minerais nas areias de britagem

% Concentração dos minerais nas areias de britagem							
Areia	Quartzo	Feldspatos		Mica		Feldspatos e piroxênios	Outros
		Mc	Pl	Bt	Msc		
A	30	35	20	6	3	-	5
B	5	15	50	20	3	-	7
C	33	23	27	8	4	-	5,8
D	5	10	55	20	3	-	9
F e G	-	-	-	-	-	70	17
H	33	30	22	6	3	-	4

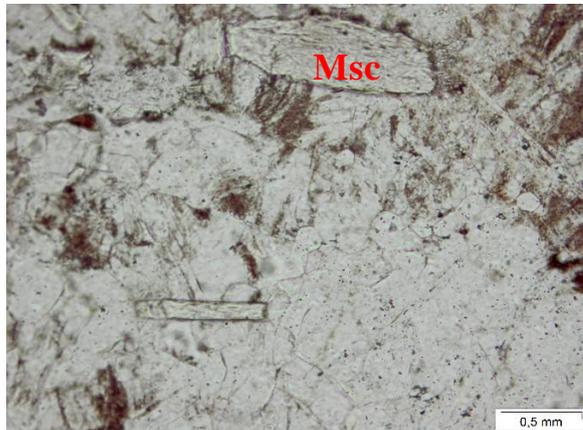
Fonte: Elaborada pela autora.

Legenda: Mc - Microclina; Pl - Plagioclásio; Bt - Biotita; Msc - Muscovita; Outros - minerais opacos, sericita, horblenda, nefelina e olivina.

O quartzo é o mineral predominante nas areias A, C e H, seguido dos feldspatos - microclina e plagioclásios, respectivamente. Rochas compostas com esses minerais, geralmente, são mais resistentes à fragmentação (PANG *et al*, 2010). Também são descritos pela ABNT NBR 7389-1:2009 como minerais com grãos inócuos, isto é, não reagem com a pasta de cimento e apresentam resistência físico-mecânica adequada. As areias B e D apresentam maiores teores de plagioclásio e microclina, assim como, apresentam as maiores concentrações de mica, principalmente, biotita.

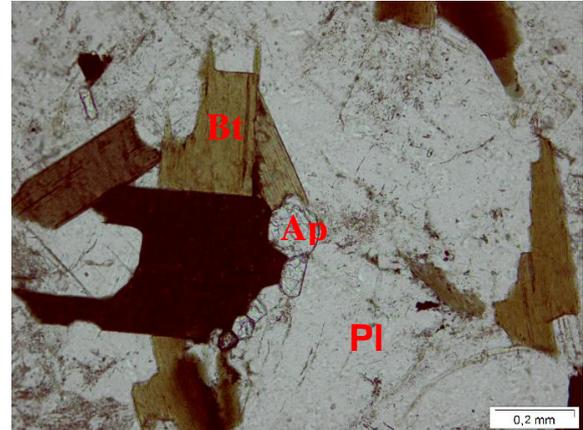
Na Figura 22 está apresentado a microscopia ótica da areia A, onde é visualizada a presença de muscovita à luz natural. A microscopia da areia D, apresentada na Figura 23, é verificada a presença de biotita, apatita e plagioclásio.

Figura 22- Microscopia ótica da areia A



Fonte: Elaborado pela autora.
Legenda: Msc - Muscovita.

Figura 23 - Microscopia da areia D



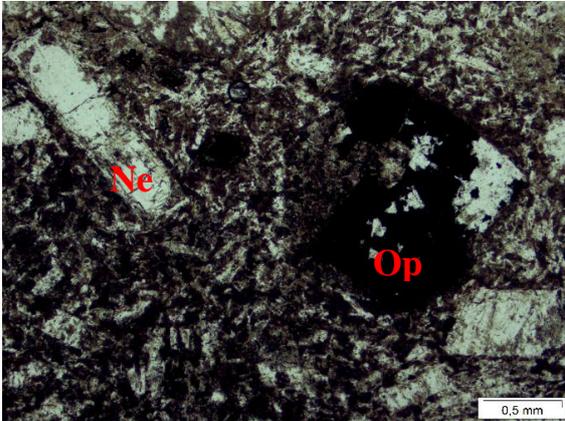
Fonte: Elaborada pela autora.
Legenda: Bt - Biotita; Ap - Apatita; Pl - plagioclásio.

A presença de muscovita, assim como da biotita também foram identificadas nas amostras das areias B, C e H. Esses minerais podem comprometer os concretos em termos de resistências mecânicas, devido aos planos de clivagem comum em minerais micáceos (LAGERBLAD, GRAM, WESTERHOLM, 2014; BAUER, SANTOS E JADALLAH, 2012). Conforme a ABNT NBR 7389-1:2009, altos teores desses minerais podem alterar a trabalhabilidade do concreto e aumentar a demanda por água ou ainda comprometer a aderência com a pasta de cimento. Contudo, segundo Donza, Cabrera e Irassar (2003), a presença de minerais micáceos em agregado miúdo não apresenta interferência, devido ao fato de que a pedra foi reduzida no processo de esmagamento, deixando as partículas restantes livres de falhas ou zonas de fraqueza.

A rocha fonólito, areias F e G, apresenta uma matriz microcristalina constituída por minerais máficos alterados como o piroxênio e feldspato potássico, representando cerca de 70% da amostra. Os fenocristais de nefelina, horblenda e olivina encontram-se situados em meio a essa matriz, conforme mostra as microscopias óticas na Figura 24.

Figura 24 - Microscopia ótica das areias F e G com a presença de fenocristais no seio da matriz microcristalina

a) Fenocristais de nefelina e opacos



b) Fenocristais de horblenda



Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: Ne - Nefelina; Op - Minerais Opacos; Hbn - Horblenda.

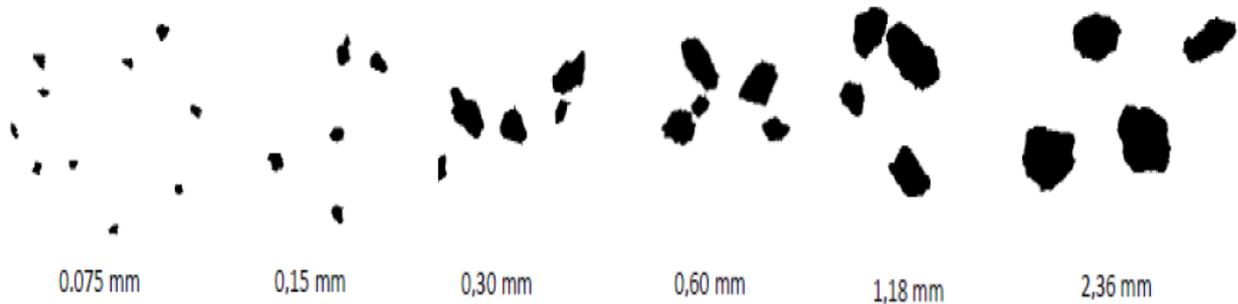
Conforme a análise petrográfica, as rochas estudadas apresentam composição mineral e textura adequadas para o uso como agregado. Essas características lhes conferem resistência mecânica adequada ao concreto.

A seguir estão apresentados os resultados do ensaio da análise da forma dos grãos.

4.1.6 Forma dos grãos

A análise da forma dos grãos foi realizada através do *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), equipamento moderno de análise digital de imagens. Os parâmetros de forma empregados para agregado miúdo são a forma 2D e a angularidade, conforme classificação de Al Rousan (BESSA,2012), apresentada na tabela AP.1 do apêndice A. Foram analisados 900 grãos de cada areia estudada, sendo 150 grãos por peneira. Nas Tabelas 17 e 18 está apresentado o perfil geral de concentração dos grãos para a classificação de forma 2D e de angularidade, respectivamente. No anexo A estão apresentados os gráficos gerados pelo AIMS que mostram a concentração dos grãos por peneira. A Figura 25 mostra um exemplo das imagens geradas pelo AIMS por peneira, para análise dos parâmetros de forma 2D e angularidade.

Figura 25 - Imagens geradas pelo AIMS por peneira



Fonte: Elaborada pela autora.

A areia natural, utilizada na produção do concreto, também foi analisada para comparação com os resultados das areias de britagem, tendo em vista a avaliação dos possíveis efeitos da forma dos grãos nas propriedades dos concretos.

O parâmetro de forma 2D indica o quanto uma partícula se aproxima de um círculo perfeito, classificando o grão em circular, semicircular, semialongado e alongado, conforme a tabela AP.1 do apêndice A. Na Tabela 17 está apresentada a classificação de forma 2D das areias estudadas.

Tabela 17 - Classificação de forma 2D dos grãos das areias estudadas

Areia	Concentração (%)			
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado
A	14,0	31,2	43,0	11,8
B	13,8	28,1	43,8	14,3
C	17,7	28,9	37,3	16
D	17,5	29,3	37,6	15,6
F	26,1	33,1	32,2	8,6
G	31,6	36,4	26,8	5,1
H	14,3	27,9	41	16,9
Natural	30,1	35,0	28,6	6,3

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com esse parâmetro, os grãos das areias A, B, C, D e H, de modo geral, são classificadas como semialongado, devido a maior concentração de grãos nessa faixa. Essas areias apresentam a faixa semicircular como a segunda maior faixa de concentração dos grãos.

As areias F, G e a areia natural possuem grãos concentrados, em sua maioria, na faixa semicircular. A areia F tem a segunda maior concentração na faixa semialongado,

enquanto que a Areia G e a areia natural apresentam segunda maior concentração na faixa circular.

Contudo, é relevante para a análise de forma, a concentração das partículas nos extremos - circular e alongado, pode-se observar que as areias F, G e areia natural possuem maiores quantidades de grãos concentrados na faixa circular e pequenas quantidades na faixa alongado. As demais areias possuem concentrações semelhantes de grãos nos dois extremos. Conforme os trabalhos de Gonçalves et al. (2007), Westerholm et al. (2008) e Santos (2008), a equidimensionalidade das partículas é o principal parâmetro de forma dos grãos do agregado miúdo, uma vez que afeta de forma mais significativa a trabalhabilidade do concreto. Dessa forma, o parâmetro de forma 2D representa a equidimensionalidade dos grãos no âmbito bidimensional. Portanto, as areias F e G apresentam as melhores características de equidimensionalidade entre as areias estudadas, com características mais próximas as da areia natural.

O parâmetro de angularidade quantifica a formação de ângulos nas bordas das partículas, quanto mais próximo de um círculo perfeito menor o gradiente de angularidade (BESSA, 2012). De acordo com a Tabela AP.1 do apêndice A, esse parâmetro classifica os grãos em quatro faixas, sendo elas: arredondado, subarredondado, subangular e angular. A angularidade neste trabalho é sinônimo do parâmetro grau de arredondamento. Na Tabela 18 estão apresentados os percentuais de concentração dos grãos de areia em cada faixa da classificação do parâmetro angularidade.

Nesse parâmetro as areias A, B, C, D, F, G, H e natural apresentam grãos em maior concentração na faixa subarredondado. No entanto, é verificado que as areias F e G apresentam os percentuais de concentração mais elevado que as demais areias nessa faixa. As areias A, B, C, D, H, F e natural apresentam a faixa subangular com a segunda maior faixa de concentração dos grãos. Enquanto a areia G apresenta a faixa arredondada. Nos extremos, nas faixas arredondados e angular, verifica-se que as areias A, B, C, D e H possuem maior concentração de grãos na faixa angular, enquanto que as areias F, G e natural concentram maior quantidade de grãos na faixa arredondado.

Tabela 18 - Classificação de angularidade dos grãos das areias estudadas

Areia	Concentração (%)			
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular
A	5,5	44,8	32,9	16,7
B	4	42,6	33,9	19,5
C	5,9	49,9	33,8	10,4
D	6,7	49,1	33,1	11,1
F	8,8	73,7	13,8	3,7
G	13,6	71	11,1	4,4
H	6,2	49,3	33,1	11,4
Natural	12,7	55,7	25,4	6,3

Fonte: Elaborado pela autora.

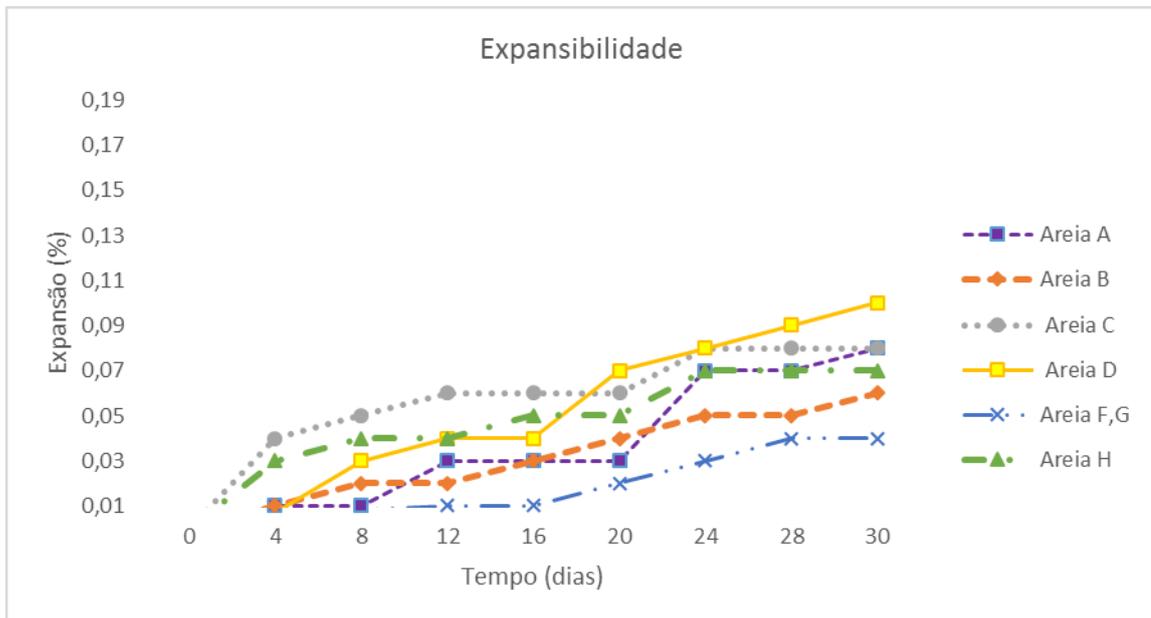
Essa característica de forma das areias de britagem é responsável pela demanda de um maior volume de pasta cimentícia para promover um melhor empacotamento, devido à maior quantidade de ângulos e arestas aumenta-se a área de superfície específica do grão (CORTES *et al.*, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

4.1.7 Reatividade álcali-agregado

Foi realizado o ensaio de Reação álcali-agregado em amostras de areia de britagem. O ensaio foi realizado através do método acelerado das barras de argamassa, conforme a norma brasileira ABNT 15577-4:2008. A Figura 26 apresenta o gráfico da expansão das barras de argamassa ao longo de 30 dias.

Conforme a ABNT NBR 15577-1:2008, quando o resultado obtido nesse ensaio indicar expansão menor que 0,19% aos 30 dias, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo para uso em concreto. Dessa forma, todas as areias de britagem analisadas podem ser consideradas potencialmente inócuas, uma vez que os resultados dos ensaios foram inferiores ao limite apontado pela norma.

Figura 26 - Expansão das barras de argamassa



Fonte: Elaborado pela autora.

A areia natural não foi testada nesse ensaio, pois trata-se de um material de uso corrente na cidade de Fortaleza, sem registros de reatividade.

4.2 Resultados dos ensaios realizados no concreto

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios realizados no concreto, conforme apresentado no item 3.2.4, as areias de britagem estudadas foram classificadas em três grupos, sendo escolhida uma areia de cada grupo para a produção dos concretos. Desse modo, foi adotada para a apresentação, análise e discussão dos resultados das propriedades do concreto a denominação de areia do grupo 1, areia do grupo 2 e areia do grupo 3, para os concretos produzidos com a incorporação das areias de britagem C, D e F, respectivamente.

4.2.1 Consumo de aditivo (Kg/m^3)

Foi realizado uma análise do consumo de aditivo para obtenção da trabalhabilidade desejada. Na Tabela 19 estão apresentados os resultados dos consumos de aditivo dos concretos produzidos com as areias de britagem e os valores de abatimento alcançados.

Tabela 19 - Consumo de aditivo (Kg/m³)

Grupo	Relação a/c	% Subst.	Consumo de aditivo (kg/m³)	Abatimento (mm)
Ref.	0,4	0%	4,00	100
	0,5	0%	3,32	95
	0,6	0%	2,53	80
Areia do Grupo 1	0,4	37,5%	4,00	85
	0,4	75%	5,78	90
	0,5	37,5%	3,32	130
	0,5	75%	3,32	80
	0,6	37,5%	2,53	125
	0,6	75%	2,21	80
Areia do Grupo 2	0,4	37,5%	4,00	100
	0,4	75%	5,33	80
	0,5	37,5%	2,58	120
	0,5	75%	2,95	95
	0,6	37,5%	2,21	125
	0,6	75%	2,53	130
Areia do Grupo 3	0,4	37,5%	4,00	130
	0,4	75%	4,00	100
	0,5	37,5%	2,22	100
	0,5	75%	2,22	140
	0,6	37,5%	1,58	110
	0,6	75%	1,58	120

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: a/c – Relação água/cimento.

Tendo em vista que a parte experimental foi planejada utilizando a ferramenta “projeto de experimentos” não se realizou uma análise comparativa dos resultados apresentados na Tabela 19, assim como nas demais propriedades apresentadas posteriormente.

Para um melhor entendimento sobre as influências exercidas pelos fatores independentes, relação água/cimento e teor de substituição das areias de britagem, sobre as propriedades dos concretos avaliados realizou-se uma análise estatística dos resultados, conforme apresentado a seguir.

- Análise estatística

Nas Tabelas 20, 21 e 22 estão apresentadas as análises de variância do consumo de aditivo dos concretos produzidos com a areia de britagem do grupo 1, do grupo 2 e do grupo 3, respectivamente.

Tabela 20 - Análise de variância do consumo de aditivo - grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	7,2062	1	7,2062	47,3159	0,000466	S
%ab	0,5508	1	0,5508	3,6166	0,105911	NS
ac*(%ab)	0,9861	1	0,9861	6,4725	0,043806	S
Erro	0,9138	6	0,1523			
Total	10,0692	9				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 21 - Análise de variância do consumo de aditivo - grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	6,1206	1	6,1206	16,5556	0,009644	S
%ab	0,05801	1	0,0580	0,15693	0,070833	NS
ac*(%ab)	0,44222	1	0,4422	1,19621	0,323951	NS
Erro	1,84844	5	0,3696			
Total	8,4692	8				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 22 - Análise de variância do consumo de aditivo - grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
Ac	5,18902	1	5,18902	40,0646	0,001451	S
%ab	0,76963	1	0,76963	5,94234	0,058821	NS
ac*(%ab)	0,02466	1	0,02466	0,19046	0,680738	NS
Erro	0,64758	5	0,12951			
Total	8,30595	8				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Conforme as Tabelas 20, 21 e 22, a relação água/cimento é considerada significativa em todos os concretos produzidos e o teor de areia de britagem não é considerado significativo. Nos concretos produzidos com areia do grupo 1 a interação entre a relação água/cimento e o teor de areia de britagem apresentam-se significativos.

Conforme a Tabela 19, os concretos produzidos com as areias de britagem apresentaram, de modo geral, consumo de aditivo igual ou inferior aos concretos produzidos com areia natural. Observa-se que os concretos produzidos com areia do grupo 3, com relação água/cimento 0,5 e 0,6, apresentaram os menores consumos de aditivo, quando comparados com os concretos de referência. No entanto, não há alterações no consumo de aditivo quando eleva-se o teor de areia de britagem de 37,5% para 75%. Vale ressaltar que o valor de “p”, conforme a Tabela 22, para o teor de areia de britagem do grupo 3 foi igual a 0,058821, não atingindo o nível de significância determinado por uma fração de aproximadamente 0,001.

A eficiência dos aditivos plastificantes é afetada diretamente por características do agregado miúdo, como o teor de finos abaixo de 75 µm, tamanho, forma e textura dos grãos (HUDSON, 2008; SANTOS, 2008; SHI-CONG; CHI-SUN, 2009; FABRO *et al.*, 2011; SBRIGHI NETO, 2011). Nos trabalhos de Cabrera, Traversa e Ortega (2011) e Park (2012) verificou-se o aumento no consumo de aditivo nos concretos produzidos com areia de britagem, devido à forma mais angulosa e alongada das partículas.

A forma dos grãos das areias de britagem estudadas apresentaram maior angularidade e menor equidimensionalidade comparadas aos grãos da areia natural, no entanto, o teor de finos das areias de britagem está entre 10% e 15%, superior ao da areia natural. Segundo Westerholm *et al.* (2008), Esteves, Cachim e Ferreira (2010), Cabrera, Traversa e Ortega (2011), o teor de material pulverulento presente nas areias de britagem, concentrado em até 15%, promove a redução da fricção interna entre as partículas, e consequentemente, reduzindo a viscosidade da mistura.

4.2.2 Resultados dos ensaios no concreto endurecido

4.2.2.1 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão obtidos para os concretos produzidos com as areias de britagem dos grupos 1, 2 e 3 estão apresentados na Tabela 23.

Ressalta-se que são apresentados os valores médios obtidos com o rompimento dos corpos de prova.

Tabela 23 - Resistência à compressão

Grupo	Relação a/c	% Subst.	Resistência à compressão (Mpa)			
			fc 7 dias	fc 28 dias	fc 56 dias	fc 91 dias
Ref.	0,4	0%	40,2	45,9	51,7	52,8
	0,5	0%	27,9	33,7	32,8	37,8
	0,6	0%	24,0	29,3	30,3	32,5
Areia do Grupo 1	0,4	37,5%	39,3	47,7	50,9	56,21
	0,4	75%	37,8	44,9	51,4	53,1
	0,5	37,5%	28,5	34,0	35,9	38,1
	0,5	75%	26,2	34,0	36,8	38,7
	0,6	37,5%	20,1	26,8	25,9	28,7
	0,6	75%	20,2	24,7	25,3	26,2
		0,4	37,5%	36,6	47,0	51,8
Areia do Grupo 2	0,4	75%	36,2	46,0	51,2	52,3
	0,5	37,5%	25,9	34,3	36,5	39,0
	0,5	75%	25,7	33,7	38,1	39,3
	0,6	37,5%	19,11	26,1	26,5	28,7
	0,6	75%	19,6	26,9	26,2	29,0
		0,4	37,5%	39,6	51,8	52,7
Areia do Grupo 3	0,4	75%	43,1	52,5	53,7	60,9
	0,5	37,5%	30,6	35,9	40,9	42,8
	0,5	75%	29,9	41,2	42,2	47,2
	0,6	37,5%	26,5	33,4	34,0	37,8
	0,6	75%	25,7	32,5	34,3	37,5
		0,4	37,5%	39,6	51,8	52,7

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: fc – Resistência à compressão; a/c – Relação água/cimento.

Para um melhor entendimento sobre as influências exercidas pelos fatores de relação água/cimento e teor de substituição das areias de britagem sobre a resistência à compressão aos 7 dias, está apresentada, a seguir, a análise estatística dos dados.

- Análise estatística

a. Resistência à compressão aos 7 dias

As Tabelas 24, 25 e 26 apresentam as análises de variância dos resultados da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos produzidos com as areias de britagem dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 24 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	935,98	1	935,98	264,03	0,00000	S
%ab	21,12	1	21,12	5,95	0,02854	S
ac*(%ab)	1,22	1	1,22	0,34	0,56605	NS
Erro	49,62	14	3,54			
Total	1007,95	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 25 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	841,68	1	841,68	182,25	0,00000	S
%ab	38,41	1	38,41	8,318	0,01201	S
ac*(%ab)	0,145	1	0,145	0,0316	0,0316	NS
Erro	64,65	14	4,618			
Total	944,89	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 26 - Análise de variância da resistência à compressão aos 7 dias – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	723,38	1	723,38	137,38	0,0000	S
% ab	14,34	1	14,34	2,733	0,1205	NS
ac*(%ab)	0,781	1	0,781	0,148	0,7054	NS
Erro	73,47	14	5,248	5,248		
Total	811,98	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Os resultados apresentados nas Tabelas 24, 25 e 26 indicam que a relação água/cimento e a incorporação de areia de britagem são significativas nos resultados de resistência à compressão aos 7 dias dos concretos com a areia do grupo 1 e do grupo 2. No entanto, o nível de significância da relação água/cimento mostra-se superior. Nos concretos produzidos com areia do grupo 3, somente a relação água/cimento é significativo. Isto implica que o uso das areias desse grupo não altera significativamente a resistência à compressão nessa idade. A interação entre as duas variáveis não é significativa em nenhum caso.

Para descrever o possível comportamento dos concretos frente à substituição da areia natural por areia de britagem, produziu-se modelos matemáticos por meio de uma regressão linear múltipla, simulando o comportamento da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos produzidos com as areias de britagem dos grupos 1 e 2. Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) dos modelos produzidos foram 95% e 93,1% para as areias dos grupos 1 e 2, respectivamente. Os modelos são apresentados nas Equações 3 e 4, sendo que os percentuais de substituição de areia natural pela de britagem devem ser informados na escala de 0 a 75 e a relação água/cimento na escala de 0,4 a 0,6. Tendo em vista a não significância do teor de areia de britagem, nessa idade, para a areia do grupo 3, não foi desenvolvido modelo matemático para esse grupo.

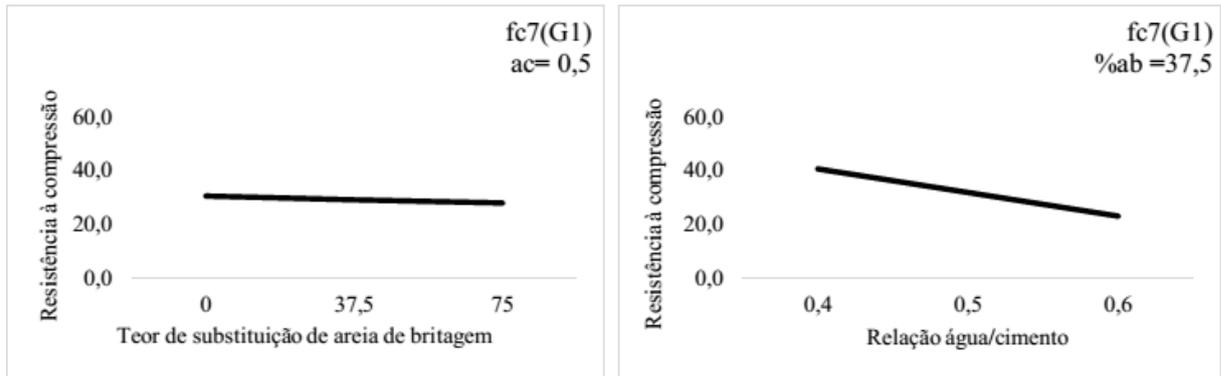
$$f_{c7}(G1) = 74,80 - 88,31 * ac - 0,035 * \%ab \quad (3)$$

$$f_{c7}(G2) = 72,00 - 83,75 * ac - 0,047 * \%ab \quad (4)$$

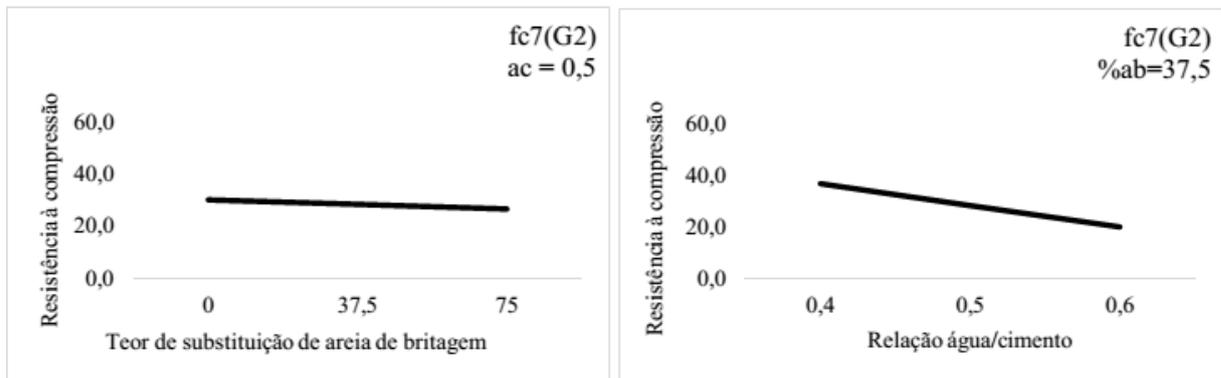
Para uma melhor visualização do efeito das variáveis independentes no resultado da variável de resposta, o modelo foi aplicado, para uma relação água/cimento de 0,5 (valor médio), variando-se o teor de substituição de areia de britagem e para o percentual de substituição de areia de britagem de 37,5% (valor médio), variando-se a relação água/cimento. O comportamento da resistência à compressão aos 7 dias obtido com as variações acima descritas está apresentado nas Figuras 27-a e 27-b para as areias dos grupos 1 e 2, respectivamente. As Tabelas 27-a e 27-b apresentam o comparativo entre as resistências à compressão dos concretos, quando feita a substituição de areia natural por areia de britagem e quando se varia a relação água/cimento, respectivamente, nos valores médios acima citados.

Figura 27 - Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias

a) Concretos produzidos com a incorporação da areia do grupo 1



b) Concretos produzidos com a incorporação da areia do grupo 2



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 27 - Comparativo do desempenho da resistência à compressão aos 7 dias

a) Variação do teor de areia de britagem

Teor Subst. com a/c=0,5	Tipo de areia de britagem	
	Areia do grupo 1	Areia do grupo 2
0%	1,000	1,000
37,5%	0,957	0,941
75%	0,914	0,883

b) Variação da relação água/cimento

Relação a/c com areia de britagem =37,5%	Tipo de areia de britagem	
	Areia do grupo 1	Areia do grupo 2
0,4	1,000	1,000
0,5	0,769	0,772
0,6	0,537	0,544

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme observado na Figura 27, a resistência diminui quando aumenta-se a relação água/cimento para ambos os concretos, o que é coerente com a bibliografia (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013). Observa-se na Tabela 27-b, que a redução produzida pela variação da relação água/cimento nos concretos moldados com areia do grupo

1 é de 23,1% quando aumenta-se a relação água/cimento de 0,4 para 0,5 e de 46,3% quando aumenta-se de 0,4 para 0,6. Nos concretos moldados com a incorporação da areia do grupo 2, a redução observada é de 22,8% quando aumenta-se a relação água/cimento de 0,4 para 0,5 e de 45,6% quando aumenta-se de 0,4 para 0,6.

A areia do grupo 1 promove a redução da resistência nos concretos de 4,3% quando aumenta-se o teor de substituição de areia de britagem de 0% para 37,5% e de 8,6% quando aumenta-se de 0% para 75%. A areia do grupo 2 provoca a redução da resistência de 5,9% quando aumenta-se o teor de areia de britagem de 0% para 37,5% e de 11,8% quando aumenta-se de 0% para 75%, conforme a Tabela 27-a. A redução da resistência à compressão aos 7 dias também foi observada no trabalho Cabral, K. (2007), que utilizou areia de britagem granítica no concreto com redução entre 6,58% e 1,16%.

b. Resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias

A Tabela 28 apresenta a significância dos fatores, obtida nas análises de variância, no resultado da resistência à compressão dos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3 aos 28, 56 e 91 dias. As tabelas das análises de variância dessas idades estão apresentadas no Apêndice B. Aqui os resultados serão resumidos, uma vez que identificou-se uma tendência de comportamento para os concretos de cada grupo nessas idades.

Tabela 28 - Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias – grupo 1

Fator	Significância								
	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3		
	28 d	56 d	91 d	28 d	56 d	91 d	28 d	56 d	91 d
ac	S	S	S	S	S	S	S	S	S
%ab	NS	NS	NS	NS	NS	NS	S	S	S
ac*(%ab)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: S- Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

A relação água/cimento é significativa para todos os concretos produzidos em todas as idades. A incorporação no concreto das areias de britagem do grupo 1 e do grupo 2, conforme mostra a Tabela 28, não interfere significativamente na resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias. Por outro lado, a incorporação da areia do grupo 3 mostra-se

significativa em todas as idades. A interação entre os dois fatores não é considerada significativa nos concretos dos grupos 1, 2 e 3 em todas as idades apresentadas.

A Equações 5, 6 e 7 apresentam o modelo matemático para descrever o comportamento da resistência à compressão dos concretos produzidos com as areias do grupo 3, nas idades de 28, 56 e 91 dias, respectivamente. Os coeficientes de determinação (R^2) das equações 5, 6 e 7 são 91,3%, 90,9% e 75%, respectivamente.

$$f_{c91}(G3) = 86,91 - 88,99 * ac + 0,101 * \%ab \quad (5)$$

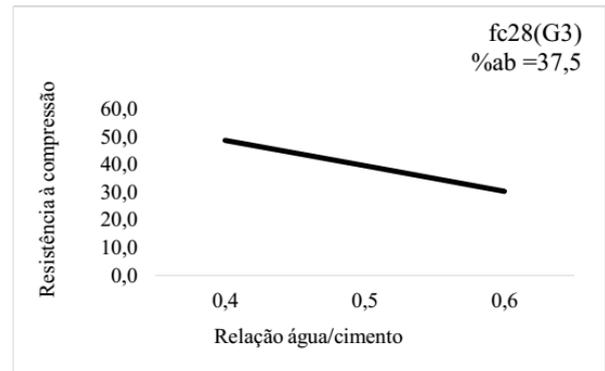
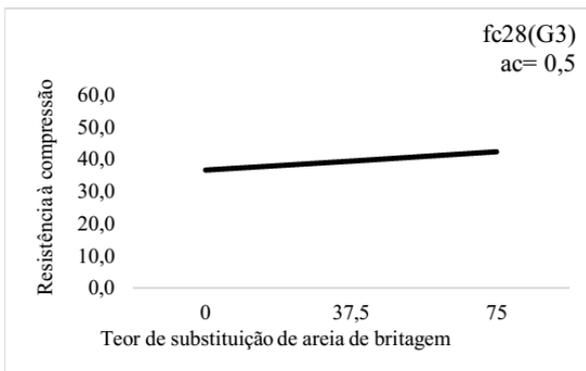
$$f_{c56}(G3) = 88,40 - 99,14 * ac + 0,068 * \%ab \quad (6)$$

$$f_{c28}(G3) = 82,48 - 91,58 * ac + 0,076 * \%ab \quad (7)$$

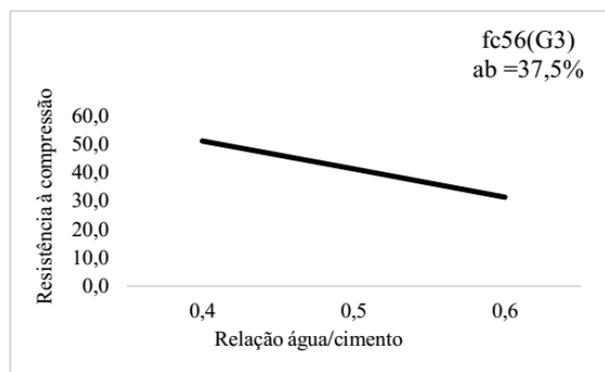
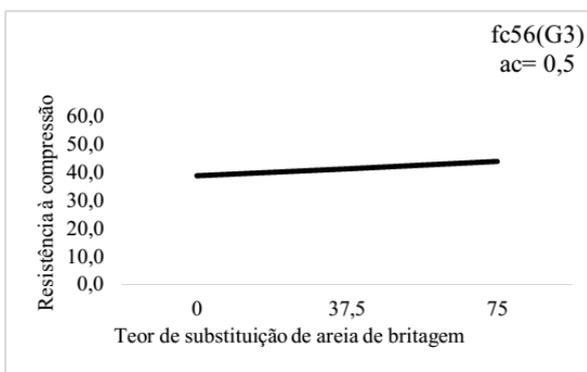
Nas Figuras 28-a, 28-b e 28-c estão apresentados os comportamentos da resistência à compressão aos 28, 56 e 91 dias, respectivamente, obtidos pela aplicação dos modelos acima apresentados.

Figura 28 - Comportamento da resistência à compressão dos concretos do grupo 3

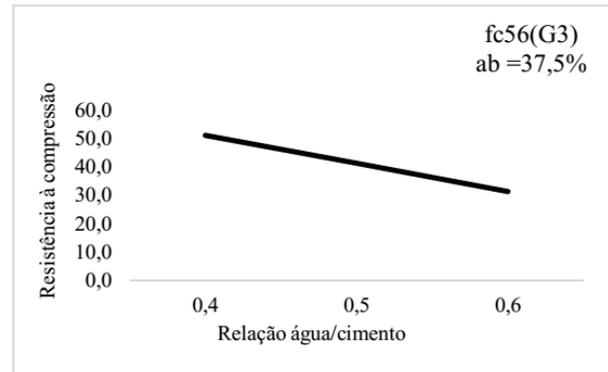
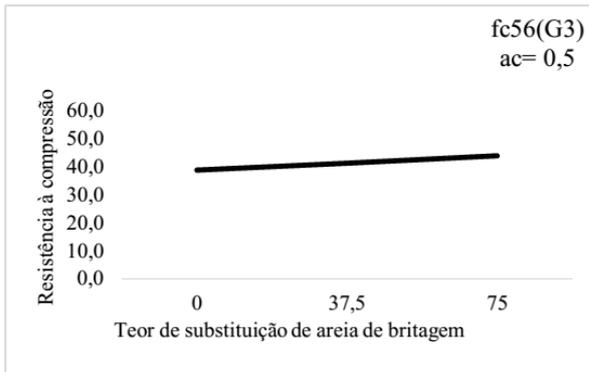
a. Resistência à compressão aos 28 dias



b. Resistência à compressão aos 56 dias



c. Resistência à compressão aos 91 dias



Fonte: Elaborado pela autora.

As Tabelas 29-a e 29-b apresentam o comparativo de desempenho entre as resistências à compressão, nas idades de 28, 56 e 91 dias dos concretos produzidos com a areia do grupo 3, quando varia-se o teor de substituição de areia de britagem e quando varia-se a relação água/cimento, respectivamente.

Tabela 29 - Comparativo do desempenho da resistência à compressão – grupo 3

a) Variação do teor de areia de britagem

Teor de subst. a/c=0,5	Tipo de areia de britagem		
	Areia do grupo 3		
	28 d	56 d	91 d
0%	1,000	1,000	1,000
37,5%	1,077	1,063	1,089
75%	1,155	1,131	1,178

b) Variação da relação água/cimento

Rel. a/c Teor =37,5%	Tipo de areia de britagem		
	Areia do grupo 3		
	28 d	56 d	91 d
0,4	1,000	1,000	1,000
0,5	0,812	0,806	0,838
0,6	0,623	0,613	0,676

Fonte: Elaborado pela autora.

Na idade de 28 dias, conforme a Tabela 29-a, à medida que se aumenta o teor de substituição de areia natural pela areia de britagem do grupo 3, de 0% para 37,5%, verifica-se um aumento na resistência à compressão de 7,7%, quando aumenta-se de 0% para 75%, verifica-se um aumento de 15,5%. A redução na resistência produzida pela relação água/cimento é de 18,8%, quando aumenta-se a relação de 0,4 para 0,5 e de 37,7%, quando aumenta-se de 0,4 para 0,6.

Conforme a Tabela 23, a incorporação das areias do grupo 1 e do grupo 2 no concreto também promove o aumento na resistência à compressão aos 28 dias, contudo, a análise estatística não considera tal efeito significativo.

Na idade de 56 dias, conforme a Tabela 29-a, à medida que aumenta-se o teor de substituição da areia de britagem do grupo 3 de 0% para 37,5%, verifica-se um acréscimo de resistência à compressão de 6,3%. Quando aumenta-se de 0% para 75%, verifica-se um aumento de 13,1%. Conforme a Tabela 29-b, quando varia-se a relação água/cimento de 0,4 para 0,5 ocorre uma redução de 19,4% e de 0,4 para 0,6 ocorre uma redução de 38,7%. O comportamento da resistência à compressão aos 56 dias é similar ao verificado aos 28 dias para os concretos produzidos com a areia de britagem do grupo 3.

Na idade de 91 dias, conforme a Tabela 29-a, a variação do teor de areia de britagem de 0% para 37,5% provoca o aumento da resistência à compressão de 8,9% e, de 0% para 75%, promove o aumento de 17,8%. Conforme a Tabela 29-b, a variação da relação água/cimento de 0,4 para 0,5 provoca uma redução na resistência à compressão de 16,2% e, de 0,4 para 0,6, a redução é de 32,4%.

O aumento da resistência à compressão em concretos com a incorporação de areia de britagem, é relatado nos trabalhos de Park (2012), Donza, Cabrera e Irassar (2002), Bastos (2002), Menossi (2004), Lodi e Prudêncio Jr (2006), Beixing, Jiliang e Mingkai (2009). O resultado obtido pela areia de britagem do grupo 3 pode ser atribuído ao efeito de empacotamento promovido pelo maior teor de partículas abaixo de 75 μm , em relação ao agregado convencional, associado a uma melhor esfericidade, que promove uma melhor acomodação das partículas, em relação aos outros grupos.

4.2.2.2 Resistência à tração

Os resultados do ensaio de resistência à tração diametral aos 28 dias estão apresentados na Tabela 30.

Os valores apresentados são as médias aritméticas dos resultados obtidos no ensaio de resistência à tração diametral dos concretos. Todos os resultados foram analisados estatisticamente.

Tabela 30 - Resistência à tração diametral

Relação a/c	Resistência à tração diametral (MPa)			
	% Subst.	Areia do Grupo 1	Areia do Grupo 2	Areia do Grupo 3
0,4	0%	3,67	3,67	3,67
0,5	0%	3,28	3,28	3,28
0,6	0%	3,12	3,12	3,12
0,4	37,5%	4,29	4,06	4,76
0,4	75%	3,98	3,93	4,22
0,5	37,5%	3,20	3,59	3,51
0,5	75%	3,20	3,36	3,83
0,6	37,5%	2,97	2,58	3,36
0,6	75%	2,73	2,97	3,36

Fonte: Elaborado pela autora.

- Análise estatística

As análises de variância realizadas nos resultados de resistência à tração dos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3 estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 31, 32 e 33.

Tabela 31 - Análise de variância da resistência à tração – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	3,255	1	3,255	42,410	0,00001	S
% ab	0,009	1	0,009	0,118	0,73606	NS
ac*(%ab)	0,2485	1	0,2485	3,237	0,09354	NS
Erro	1,074	14	0,0767			
Total	4,587	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 32 - Análise de variância da resistência à tração – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	2,9800	1	2,9800	18,512	0,00073	S
% ab	0,0114	1	0,0114	0,0370	0,7939	NS
ac*(%ab)	0,0882	1	0,0882	0,5479	0,4713	NS
Erro	2,2535	14	0,1609			
Total	5,3332	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 33 - Análise de variância da resistência à tração – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	2,6320	1	2,6320	17,572	0,0009	S
% ab	0,2408	1	0,2408	1,607	0,2254	NS
ac*(%ab)	0,04961	1	0,04961	0,3312	0,5740	NS
Erro	2,0969	14	0,1497			
Total	5,0194	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Conforme as Tabelas 31, 32 e 33, a relação água/cimento é o único fator significativo nos resultados do ensaio da resistência à tração por compressão diametral entre as variáveis independentes testadas neste trabalho.

Embora a análise estatística apresente a não significância da substituição da areia natural pela areia de britagem nos teores estudados, observou-se na Tabela 30 um incremento na ordem de até 29,7% da resistência à tração com a incorporação de areia de britagem em relação aos concretos de referência, o que tecnicamente é relevante, no entanto, esse comportamento é observado em um ponto específico no concreto com 37,5% de areia de britagem do grupo 3 com relação água/cimento 0,4.

Buest Neto (2006), Bastos (2002), Cabral, K. (2007) verificaram em seus estudos um pequeno aumento da resistência à tração por compressão diametral em concretos produzidos com areia de britagem. Buest Neto (2006) aponta como possível causa para o incremento da resistência à tração, o formato dos grãos das areias de britagem, pois os mesmos podem provocar um travamento melhor das partículas por serem mais angulosos,

melhorando as resistências, assim, a resistência à tração acompanha o comportamento da resistência à compressão axial.

4.2.2.3 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

A média dos resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3 estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica

a/c	% Subst.	Absorção de água, índice de vazios e massa específica								
		Areia do Grupo 1			Areia do Grupo 2			Areia do Grupo 3		
		ABS %	I.V %	M.E g/cm ³	ABS %	I.V %	M.E g/cm ³	ABS %	I.V %	M.E g/cm ³
0,4	0%	5,09	11,66	2,59	5,09	11,66	2,59	5,09	11,66	2,59
0,5	0%	5,78	13,10	2,61	5,78	13,10	2,61	5,78	13,10	2,61
0,6	0%	5,86	13,15	2,58	5,86	13,15	2,58	5,86	13,15	2,58
0,4	37,5%	5,24	12,02	2,61	2,14	4,73	2,50	5,16	11,80	2,59
0,4	75%	4,93	11,38	2,60	2,18	5,19	2,50	5,23	11,84	2,56
0,5	37,5%	5,62	12,60	2,57	2,73	6,42	2,51	5,56	12,55	2,57
0,5	75%	3,99	9,19	2,53	2,87	6,69	2,50	6,10	13,60	2,58
0,6	37,5%	4,92	11,04	2,52	3,79	8,66	2,50	6,20	13,85	2,60
0,6	75%	5,12	11,48	2,54	2,98	6,89	2,48	6,40	14,14	2,57

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: a/c - Relação água/cimento; ABS - Absorção de água; I.V - Índice de vazios; M.E - Massa específica.

Todos os resultados dos ensaios foram submetidos à análise estatística, com o intuito de esclarecer a influência que os fatores água/cimento e teor de substituição de areia natural por areia de britagem exercem nos resultados das variáveis de resposta.

- Análise estatística

a. Absorção de água

As Tabelas 35, 36 e 37 apresentam as análises de variância dos resultados do ensaio de absorção de água dos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 35 - Análise de variância da absorção de água – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	0,1386	1	0,1386	0,5987	0,4519	NS
%ab	2,448	1	2,448	10,570	0,0057	S
ab*(%ab)	0,1711	1	0,1711	0,7388	0,4045	NS
Erro	3,2424	14	0,2316			
Total	6,0002	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 36 - Análise de variância da absorção de água – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	3,7856	1	3,7856	6,3522	0,02448	S
%ab	25,259	1	25,259	42,384	0,00001	S
ac*(%ab)	0,0002	1	0,0002	0,0003	0,98564	NS
Erro	8,343	14	0,5959			
Total	37,388	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 37 - Análise de variância da absorção de água – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	2,96013	1	2,96013	35,9659	0,000033	S
%ab	0,32340	1	0,32340	3,9294	0,06742	NS
ac*(%ab)	0,07605	1	0,07605	0,9240	0,35273	NS
Erro	1,15225	14	0,08230			
Total	4,51184	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

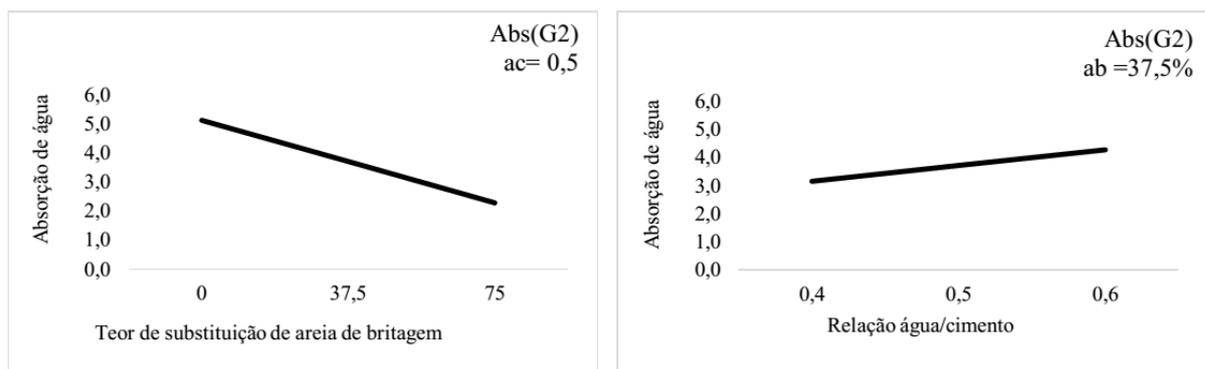
Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

A relação água/cimento é uma variável que tem influência significativa sobre a absorção de água dos concretos produzidos com as areias dos grupos 2 e 3. No entanto, apresentou-se não significativo para os concretos produzidos com a areia do grupo 1. Esse resultado não era esperado, uma vez que a porosidade da matriz da pasta de cimento está relacionada com a quantidade de água utilizada. O teor de areia de britagem mostra-se significativo nos concretos produzidos com as areias dos grupos 1 e 2. Nos concretos produzidos com a areia do grupo 3, o teor de areia de britagem não influencia significativamente a absorção de água. A interação entre os dois fatores apresentou-se não significativo em todos os concretos. O modelo que descreve o comportamento da absorção de água para os concretos produzidos com a areia do grupo 2 está apresentado na Equação 8, com um coeficiente de determinação (R^2) de 77,6%. Para os concretos produzidos com a areia do grupo 1 não encontrou-se modelo que explicasse satisfatoriamente os resultados observados, ou seja, nenhum modelo testado apresentou R^2 superior a 75%.

$$Abs(G2) = 2,34 + 5,61 * ac - 0,038 * \%ab \quad (8)$$

Na Figura 29 está apresentado o comportamento da absorção de água nos concretos produzidos com a areia do grupo 2, obtido pela aplicação do modelo descrito na Equação 8. As Tabelas 38-a e 38-b apresentam o comparativo entre as absorções de água, quando varia-se o teor de substituição de areia de britagem e quando varia-se a relação água/cimento, respectivamente.

Figura 29 - Comportamento da absorção de água dos concretos – grupo 2



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 38 – Comparativo do desempenho da absorção de água dos concretos – grupo 2

a) Variação do teor de areia de britagem b) Variação da relação água/cimento

Teor Subst. com a/c=0,5	Tipo de areia de britagem	Relação a/c com areia de britagem =37,5%	Tipo de areia de britagem
	Areia do grupo 2		Areia do grupo 2
0%	1,000	0,4	1,000
37,5%	0,723	0,5	1,179
75%	0,445	0,6	1,358

Fonte: Elaborado pela autora.

A variação no teor de areia de britagem de 0% para 37,5% promove uma redução na absorção de água de 27,7% e quando a variação é 0% para 75%, a redução é de 55,5%, conforme a Tabela 48-a. A influência observada nos concretos produzidos com a areia do grupo 2 corrobora com os resultado de Bastos (2002), que atribui tal efeito ao maior teor de material pulverulento, que promove maior empacotamento, reduzindo o volume de vazios, consequentemente, a absorção de água, em comparação à areia natural.

Conforme a Tabela 38-b, quando aumenta-se a relação água/cimento de 0,4 para 0,5 ocorre um aumento na absorção de água de 17,9% e quando aumenta-se de 0,4 para 0,6 ocorre um aumento de 35,8%. Esse comportamento está coerente com a literatura, conforme Neville e Brooks (2013), para um determinado grau de hidratação, a relação água/cimento determina a porosidade da pasta de cimento, que influencia na absorção de água.

b. Índice de vazios

As Tabelas 39, 40 e 41 apresentam as análises de variância dos resultados obtidos no ensaio de índice de vazios nos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 39 - Análise de variância do índice de vazios – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	0,16333	1	0,16333	0,15828	0,69674	NS
%ab	11,4075	1	11,4075	11,0542	0,00500	S
ac*(%ab)	1,05125	1	1,05125	1,01870	0,329955	NS
Erro	14,4473	14	1,03195			
Total	27,06944	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 40 - Análise de variância do índice de vazios – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	17,5208	1	17,5208	6,05144	0,027511	S
%ab	122,240	1	122,240	42,2201	0,000014	S
ac*(%ab)	0,0200	1	0,0200	0,00691	0,934939	NS
Erro	40,5344	14	2,8953			
Total	180,316	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 41 - Análise de variância do índice de vazios – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	11,6033	1	11,6033	32,186	0,000058	S
%ab	0,8533	1	0,8533	2,3670	0,146213	NS
ac*(%ab)	0,2812	1	0,2812	1,7805	0,392009	NS
Erro	5,04708	14	0,36051			
Total	17,7850	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

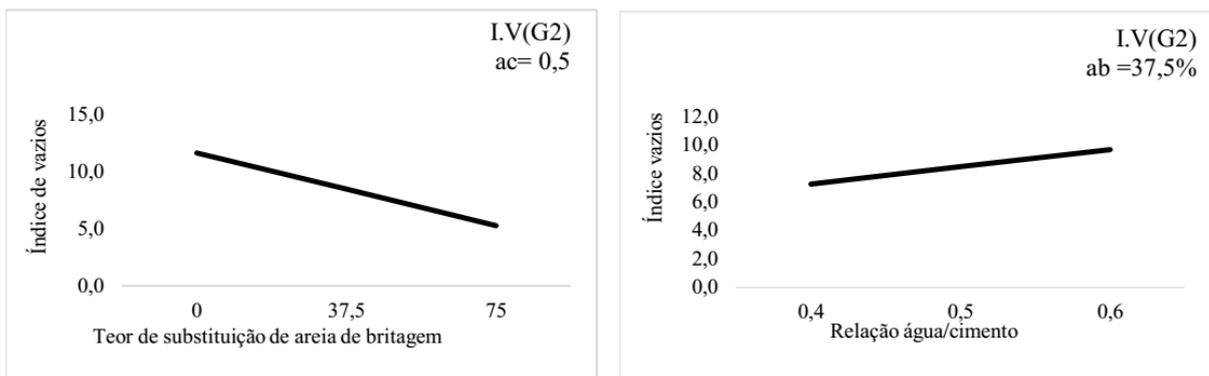
O teor de substituição de areia de britagem é significativo para determinar o índice de vazios dos concretos produzidos com as areias dos grupos 1 e 2. Contudo, apresentou-se não significativo nos concretos com a areia do grupo 3. A relação água/cimento é significativa nos concretos com as areias dos grupos 2 e 3. No entanto, não foi considerada significativo nos concretos com a areia do grupo 1. A interação entre os fatores é considerada

não significativo para todos os concretos. A Equação 9 apresenta o modelo matemático que descreve o comportamento do índice de vazios nos concretos produzidos com a areia do grupo 2. O coeficiente de determinação (R^2) para esse modelo é igual a 77,5%. Não encontrou-se modelo que explicasse satisfatoriamente o comportamento do índice de vazios nos concretos produzidos com areia do grupo 1.

$$I.V(G2) = 5,62 + 12,08 * ac - 0,085 * \%ab \quad (9)$$

A Figura 30 apresenta o gráfico do comportamento do índice de vazios nos concretos produzidos com a areia do grupo 2, obtido pela aplicação do modelo descrito na Equação 9. As Tabelas 42-a e 42-b apresentam o comparativo entre os índices de vazios quando varia-se o teor de substituição de areia de britagem e quando varia-se a relação água/cimento, respectivamente.

Figura 30 – Comportamento do índice de vazios



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 42 – Comparativo do desempenho do índice de vazios

a) Variação do teor de areia de britagem b) Variação da relação água/cimento

Teor Subst. com a/c=0,5	Tipo de areia de britagem	Relação a/c com areia de britagem =37,5%	Tipo de areia de britagem
	Areia do grupo 2		Areia do grupo 2
0%	1,000	0,4	1,000
37,5%	0,726	0,5	1,166
75%	0,452	0,6	1,333

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme a Tabela 42-a, a substituição de areia natural pela areia de britagem do grupo 2 provoca a redução do índice de vazios. Quando aumenta-se de 0% para 37,5% reduz-

se 27,4% e quando aumenta-se de 0% para 75% reduz-se 54,8%. Conforme a Tabela 42-b, a relação água/cimento produz o aumento no índice de vazios de 16,6% quando sai de 0,4 para 0,5 e de 33,3% quando sai de 0,4 para 0,6. De modo geral, o comportamento do índice de vazios nos concretos produzidos com areia de britagem é semelhante aos resultados da absorção de água, visto no item anterior, uma vez que essas propriedades estão relacionadas.

c. Massa específica

As Tabelas 43, 44 e 45 apresentam as análises de variância dos resultados do ensaio de massa específica dos concretos produzidos com as areias de britagem dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 43 - Análise de variância da massa específica – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor P	Significância
ac	0,00800	1	0,00800	23,445	0,000261	S
%ab	0,00440	1	0,00440	12,906	0,00294	S
ac*(%ab)	0,00151	1	0,00151	4,4281	0,05390	NS
Erro	0,00478	14	0,00034			
Total	0,018711	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 44 - Análise de variância da massa específica – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	0,00040	1	0,00040	0,7581	0,39859	NS
%ab	0,03203	1	0,03203	59,476	0,00000	S
ac*(%ab)	0,00011	1	0,00011	0,2088		NS
Erro	0,00754	14	0,00053			
Total	0,04009	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 45 - Análise de variância da massa específica – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	0,000675	1	0,000675	1,13874	0,303975	NS
%ab	0,001408	1	0,001408	2,37590	0,145516	NS
ac*(%ab)	0,000112	1	0,000112	0,18979	0,669733	NS
Erro	0,008299	14	0,000593			
Total	0,010494	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

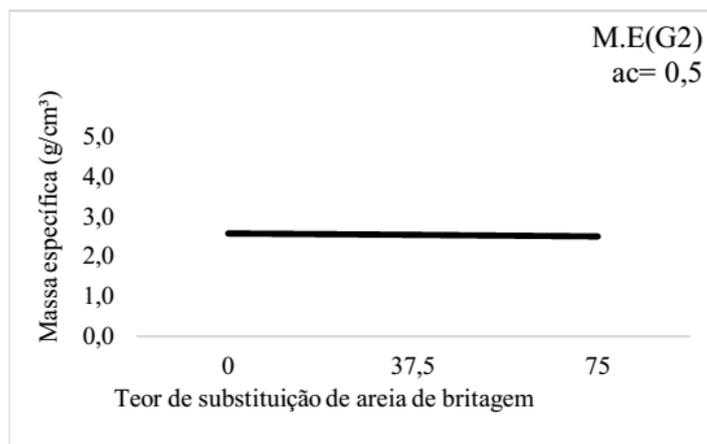
Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

O teor de substituição de areia de britagem é significativo para a determinação da massa específica nos concretos produzidos com as areias dos grupos 1 e 2, enquanto que, nos concretos produzidos com a areia do grupo 3, não é significativo. A relação água/cimento mostra-se significativa somente nos concretos produzidos com a areia do grupo 1. A interação entre os fatores não é significativa em nenhum caso. A Equação 10 apresenta o modelo que descreve o comportamento da massa específica nos concretos produzidos com a areia do grupo 1, com coeficiente de determinação (R^2) de 79,8%.

$$M.E(G2) = 2,58 - 0,001 * \%ab \quad (10)$$

Na Figura 31 está apresentado o comportamento da massa específica nos concretos produzidos com a areia do grupo 2, obtido pela aplicação do modelo descrito na Equação 10. A Tabela 46 apresenta a massa específica quando varia-se o teor de substituição de areia de britagem.

Figura 31 - Comportamento da massa específica



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 46 - Desempenho do massa específica com a variação do teor de areia de britagem

Teor Subst. com a/c=0,5	Tipo de areia de britagem
	Areia do grupo 2
0%	1,000
37,5%	0,984
75%	0,968

Fonte: Elaborado pela autora.

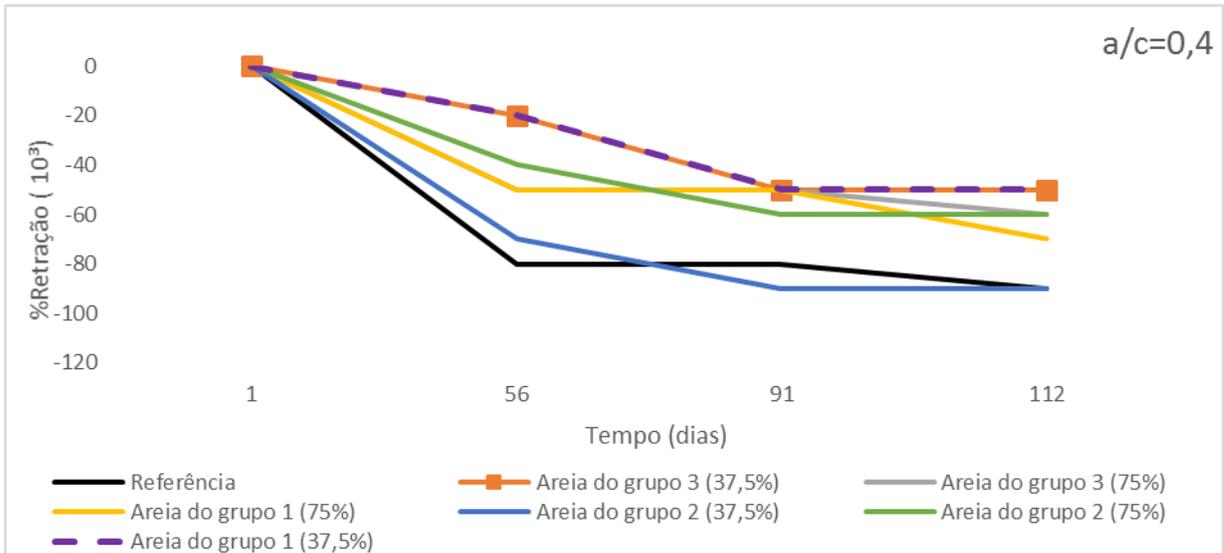
Conforme a Tabela 46, a massa específica diminui 1,6% quando aumenta-se o teor de areia de britagem do grupo 2 de 0% para 37,5% e 3,2%, quando aumenta-se de 0% para 75%.

Autores como Barbosa, Coura e Mendes (2008) e Cabral, K. (2007) verificaram o aumento da massa específica do concreto em seus experimentos, atribuindo ao maior fator de empacotamento promovido pelos finos das areias de britagem. Por outro lado, a massa específica de materiais compósitos, como o concreto, sofre influência dos seus componentes. Verifica-se na Tabela 34, uma leve queda nos valores de massa específica dos concretos do grupo 3 comparados com o concreto de referência, contudo, não foi considerado significativo na análise estatística. Também verifica-se uma leve redução na massa específica nos concretos com a areia do grupo 1, a areia C, que possui massa específica igual à da areia natural. A sua incorporação no concreto foi considerada significativa na análise de variância, no entanto o modelo matemático para descrição do comportamento dessa propriedade apresentou R^2 inferior a 75%, portanto foi descartado.

4.2.2.4 Retração por secagem

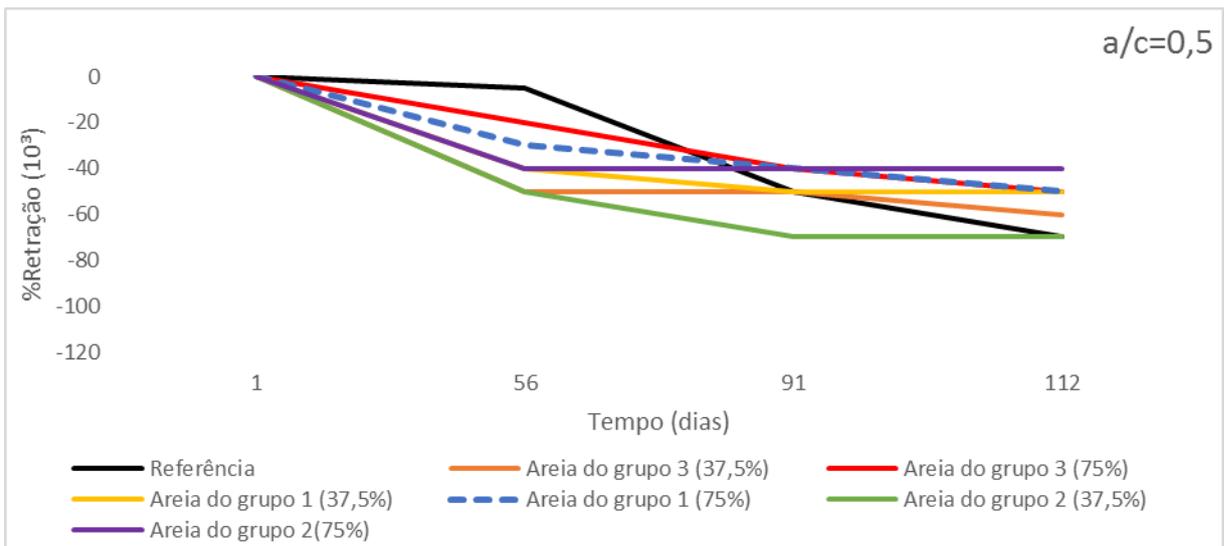
As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os resultados do ensaio de retração por secagem para os concretos com relação água/cimento 0,4, 0,5 e 0,6, respectivamente.

Figura 32 - Retração por secagem dos concretos com relação água/cimento igual a 0,4



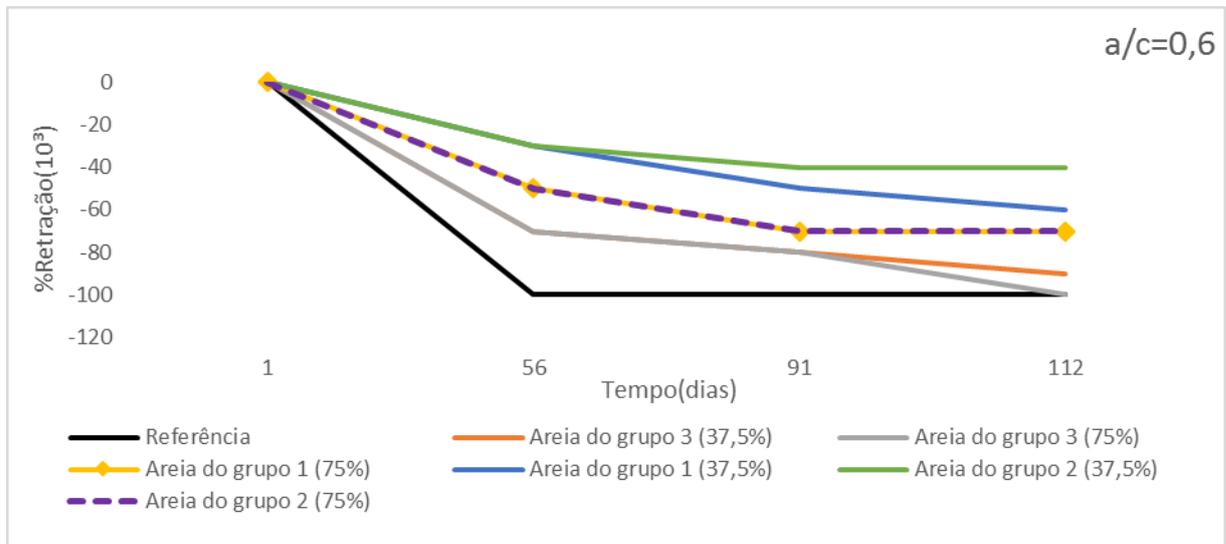
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 - Retração por secagem dos concretos com relação água/cimento igual a 0,5



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 - Retração por secagem dos concretos com relação água/cimento igual a 0,6



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a análise dos resultados da retração por secagem dos concretos a seguir apresenta-se a análise estatística dos dados aos 112 dias.

- Análise estatística

As Tabelas 47, 48 e 49 apresentam os resultados das análises de variância de todos os resultados da medida de retração por secagem aos 112 dias dos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 47 - Análise de variância da retração por secagem – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	0,00067	1	0,00067	0,38475	0,54503	NS
%ab	0,00187	1	0,00187	1,06876	0,31875	NS
ac*(%ab)	0,00005	1	0,00005	0,02850	0,86835	NS
Erro	0,02456	14	0,00175			
Total	0,027161	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 48 - Análise de variância da retração por secagem – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	0,00007	1	0,00007	0,04329	0,83816	NS
%ab	0,00367	1	0,00367	2,12164	0,16729	NS
ac*(%ab)	0,00050	1	0,00050	0,02886	0,8675	NS
Erro	0,02425	14	0,00173			
Total	0,02805	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 49 - Análise de variância da retração por secagem – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	0,00270	1	0,00270	1,3662	0,26197	NS
%ab	0,00163	1	0,00163	0,8265	0,37867	NS
ac*(%ab)	0,00005	1	0,00005	0,0253	0,87589	NS
Erro	0,02766	14	0,00197			
Total	0,03205	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Conforme as Tabelas 47, 48 e 49, os fatores analisados não interferem na retração por secagem dos concretos.

A substituição de areia natural por areia de britagem não afeta a retração, o que está de acordo com os resultados do experimento de Zhang, Zakaria e Hama (2013). Conforme Mehta e Monteiro (2014), são os agregados graúdos que mais influenciam a retração no concreto através de características como o módulo de elasticidade, tamanho e formato da partícula. Segundo Shi-Cong e Shi-Sun (2009), os agregados miúdos, quando possuem partículas de maiores dimensões, podem afetar positivamente a retração, portanto, conforme a análise granulométrica das areias estudadas, tanto areia de britagem como areia natural apresentaram dimensão máxima característica igual ou inferior a 4,75 mm e módulo de finura na zona ótima (2,20 a 2,90).

Por outro lado, a relação água/cimento é apontada por diversos autores, como Mehta e Monteiro (2014), Neville e Brooks (2013), Imamoto e Arai (2008), Güneseyisi,

Gesoglu e Ozbay (2010), como fator que exerce forte influência na retração por secagem do concreto, sendo que, quanto maior o volume de água disponível na pasta, maior será a retração. Para uma melhor compreensão foi realizada a análise de variância nos resultados da retração dos concretos nas idades de 56 e 91 dias, contudo esse comportamento manteve-se constante nas análises.

4.2.2.5 Carbonatação natural

Os resultados do ensaio de profundidade da frente de carbonatação, medida aos 114 dias, estão apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 - Profundidade da frente de carbonatação

Nº	Relação a/c	% Subst.	Profundidade da carbonatação (mm)		
			Areia do Grupo 1	Areia do Grupo 2	Areia do Grupo 3
1	0,4	0%	1,32	1,32	1,32
2	0,5	0%	3,90	3,90	3,90
3	0,6	0%	4,32	4,32	4,32
4	0,4	37,5%	1,47	1,32	1,92
5	0,4	75%	1,83	1,10	1,05
6	0,5	37,5%	2,45	1,91	2,68
7	0,5	75%	2,83	1,92	1,60
8	0,6	37,5%	4,53	4,77	4,26
9	0,6	75%	4,91	2,72	3,28

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: a/c – Relação água/cimento.

A seguir está apresentada a análise estatística dos dados.

- Análise estatística

As Tabelas 51, 52 e 53 apresentam as análises de variância dos resultados da profundidade da frente de carbonatação nos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 51 - Análise de variância da carbonatação – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor P	Significância
ac	27,816	1	27,816	26,816	0,000152	S
%ab	0,0012	1	0,0012	0,0011	0,973574	NS
ac*(%ab)	0,0040	1	0,0040	0,0040	0,95147	NS
Erro	14,771	14	1,055			
Total	42,593	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 52 - Análise de variância da carbonatação – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor P	Significância
ac	21,627	1	21,627	15,109	0,00164	S
%ab	4,979	1	4,979	3,478	0,08325	NS
ac*(%ab)	0,9591	1	0,9591	0,670	0,42674	NS
Erro	20,039	14	1,4313			
Total	47,605	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela 53 - Análise de variância da carbonatação – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor P	Significância
ac	19,866	1	19,866	18,975	0,00065	S
%ab	4,2840	1	4,2840	4,091	0,06261	NS
ac*(%ab)	0,2450	1	0,2450	0,234	0,6360	NS
Erro	14,657	14	1,0469			
Total	39,052	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Conforme a análise estatística dos dados, a relação água/cimento é o fator que exerce influência significativa nos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3. Pode-se observar, na Tabela 50, que a profundidade de carbonatação aumenta quando a relação água/cimento é maior, em todos os concretos testados, devido a maior porosidade da matriz da pasta de cimento. A profundidade de carbonatação tende a reduzir na medida que

aumenta-se o teor de areia de britagem nos concretos produzidos com as areia do grupo 2 e do grupo 3, corroborando com os resultados de Bastos (2002). Por outro lado, observa-se a tendência do aumento da profundidade de carbonatação nos concretos produzidos com a areia do grupo 1. No entanto, essas variações não são consideradas significativas estatisticamente conforme as Tabelas 51, 52 e 53.

4.3 Discussão dos resultados

4.3.1 Caracterização das areias de britagem

Inicialmente foram analisadas oito tipos de areia de britagem, provenientes de seis pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza. Conforme os resultados da análise granulométrica, a areia E foi descartada para uso como agregado miúdo, por apresentar módulo de finura e distribuição granulométrica fora dos padrões da ABNT NBR 7211:2009. As areias A, B, C, D, F e G apresentaram módulo de finura dentro dos limites da zona ótima utilizável e a areia H dentro da zona superior utilizável, conforme a mesma norma.

Os índices físicos analisados podem ser considerados típicos para areias de britagem, uma vez que, são semelhantes aos apresentados por Cabrera, Traversa e Ortega (2011), Donza, Cabrera e Irassar (2002), Park (2012), Gonçalves *et al.* (2007), Zang, Zacaria e Hama (2013), Santos (2008) e Cabral, K. (2007) e Westerholm *et al.* (2008).

O teor de material pulverulento ($< 75 \mu\text{m}$) das areias de britagem A, B, D, F, G e H se concentra na faixa de 8,31% a 11,32%. A areia D apresentou o percentual igual a 14,72%. Dessa forma, somente a última não atendeu ao limite máximo de 12% para agregado miúdo britado utilizado em concretos protegidos do desgaste superficial, especificado pela ABNT NBR 7211/2009. Por outro lado, as pesquisas de Quiroga e Fowler (2003), Benabed *et al.* (2012) e Westerholm *et al.* (2008) apontam que até 15% de material pulverulento em areias de britagem pode ser considerado benéfico para o uso em concretos e argamassas por atuar como lubrificante entre as partículas de agregado.

A análise química e petrográfica identificou cinco tipos de areia de britagem de rocha granítica, formada principalmente pelos minerais de quartzo, feldspatos e micas, e dois tipos de areia de rocha fonólito, formada principalmente por feldspatos e piroxênios. Em todas as areias, os minerais de quartzo e feldspatos apresentaram estrutura cristalina bem definida, conforme análise de difração de Raios X, o que implica em rochas de boa resistência

mecânica e baixo risco de reação deletéria no concreto. As areias de britagem B e D apresentaram teores de materiais micáceos, biotita e muscovita, acima de 20% em suas composições. A presença de altos teores de mica pode prejudicar a resistência mecânica e alterar a trabalhabilidade do concreto devido a presença de planos de clivagem, no entanto, Donza, Cabrera e Irassar (2003) afirmam que o processo de esmagamento do agregado miúdo pode eliminar essas zonas de fraqueza, mas segundo Lagerblad; Blam; Westerholm (2014), a mica livre nas frações mais finas é difícil de se cubicizar (adquirir dimensões de comprimento, largura e espessura iguais ou aproximadas), pois os blocos tendem a dobrar em vez de quebrar, interferindo na forma dos grãos.

Na análise de forma 2D, os grãos das areias A, B, C, D e H foram classificadas como semialongado. Os grãos das areias F, G e natural foram classificados como semicircular. Na análise de angularidade, todas as areias foram classificadas como subarredondado. Dessa forma, as areias de britagem F e G, apresentam melhor condição de equidimensionalidade, sendo que isto pode ser atribuído ao processo de britagem utilizado pela pedreira. Devido à proximidade à zona urbana, essa pedreira optou pelo processo de britagem úmido, além das configurações dos britadores terciário e quaternário ajustadas para produzir areia de britagem, uma vez que essas areias são empregadas na produção de concreto pré-moldado, uma iniciativa da própria pedreira. A equidimensionalidade das partículas, conforme Gonçalves et al. (2007), Westerholm et al. (2008) e Santos (2008), é considerado o parâmetro de forma mais significativo para a trabalhabilidade de concretos e argamassas.

As areias de britagem foram testadas quanto ao potencial de reatividade álcali-agregado, portanto todas as areias apresentaram-se potencialmente inócuas não oferecendo risco de reação química com os álcalis do cimento no concreto endurecido. Vale salientar que a análise do potencial de reatividade de agregados deve ocorrer periodicamente. Quando a análise é realizada pelo ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, a ABNT NBR 15577-2:2008 estabelece o período de cada seis meses ou 150.000 m³ de agregados produzidos para a repetição da análise.

4.3.2 Consumo de aditivo (Kg/m³)

Foi avaliado o consumo total de aditivo para alcançar a consistência estipulada para os concretos no estado fresco. As areias de britagem C, D e F foram utilizadas nos

concretos em substituição à areia natural em 0%, 37,5% e 75%. Cada uma representa um grupo de areias de britagem, anteriormente definidos, sendo grupo 1 (areias A, C e H), grupo 2 (B e D) e grupo 3 (F e G).

Conforme os resultados obtidos no projeto piloto (item 3.2.1), é inviável a confecção de concretos com 100% de areia de britagem com o teor de argamassa igual a 52%. Autores Cortes *et al.* (2008), Rodolpho (2007), Donza, Cabrera e Irassar (2002) e Park (2012) sugerem o aumento do teor de argamassa para alcançar boa trabalhabilidade em concretos moldados com 100% de areia de britagem, pois a maior angulosidade das partículas britadas demanda uma maior quantidade de argamassa. Em outras regiões do Brasil, como no Rio Grande do Sul, já são empregadas nas concreteiras 100% de areia de britagem com maiores teores de argamassa.

Os concretos testados com as areias dos grupos 1, 2 e 3 alcançaram a trabalhabilidade desejada com diferentes percentuais de aditivo plastificante. Os concretos produzidos com as areias dos grupos 1 e 2 apresentaram comportamento semelhante aos concretos de referência com as relações água/cimento igual a 0,5 e 0,6, ou seja, tiveram consumo de aditivos semelhantes. Contudo, apresentaram consumo de aditivo superior com a relação água/cimento 0,4. No entanto, na análise estatística essas variações não foram consideradas significativas.

Os concretos produzidos com areia do grupo 3, com relação água/cimento 0,5 e 0,6, apresentaram os menores consumos de aditivo comparados com os concretos de referência. Os concretos com relação água/cimento 0,4 apresentaram consumo igual ao de referência. Contudo, essas variações não foram consideradas significativas na análise estatística, pois não há alterações quando aumenta-se o teor de areia de britagem de 37,5% para 75% nos concretos produzidos com a areia do grupo 3.

Vale ressaltar que, entre as areias de britagem testadas nos concretos, a areia do grupo 3 apresentou formato mais equidimensional das partículas, semelhante ao da areia natural, que, atuando em conjunto com teor de material pulverulento de 10,1%, pode explicar a melhor eficiência do aditivo plastificante para a trabalhabilidade. As areias dos grupos 1 e 2 apresentaram grãos mais alongados, no entanto, quando comparado ao concreto de referência, isto não afetou significativamente a trabalhabilidade devido aos seus teores de material pulverulento de 14,72% e 10,2%, respectivamente. Conforme Quiroga e Fowler (2003), Westerhom *et al.* (2008), Benabed *et al.* (2012), entre outros, o teor de material pulverulento, atua como um lubrificante reduzindo a fricção interna entre as partículas do agregado britado.

Observa-se que a classificação do formato dos grãos das areias de britagem A, B, C D e H foi semelhante, sendo que isto pode ser associado ao tipo de rocha, todas de origem granítica, e ao processo produtivo, também semelhante, britagem à seco com uso de britador de mandíbula na britagem primária e britador cônico nas britagens secundária e terciária. Dessa forma, supõe-se que os concretos com as areias A, B e H, apresentem trabalhabilidade semelhante ao apresentado pelos concretos com as areias C, representante do grupo 1 e D, representante do grupo 2.

Da mesma forma, supõe-se que o concreto produzido com a areia G apresente trabalhabilidade semelhante ao concreto produzido com a areia F, representante do grupo 3, uma vez que ambas tem origem a rocha fonólito e são produzidas na mesma pedreira com processo de britagem úmido.

4.3.3 Concreto no estado endurecido

Os concretos produzidos com as areias de britagem dos grupos 1 e 2 apresentaram redução na resistência à compressão aos 7 dias, considerada significativa na análise estatística, quando comparados com os concretos de referência. Conforme a aplicação do modelo matemático, obtido por regressão linear múltipla, a redução da resistência aos 7 dias nos concretos com a areia de britagem do grupo 1 é de 4,3% e de 5,9% nos concretos com a areia do grupo 2.

Nos concretos produzidos com a areia do grupo 3, verifica-se um aumento na resistência aos 7 dias, entretanto essa variação não foi considerada significativa na análise estatística. Contudo, os resultados para essa propriedade aos 28, 56 e 91 dias mostraram que os concretos produzidos com as areias dos grupos 1 e 2 promoveram um acréscimo na resistência para as relações água/cimento 0,4 e 0,5 em relação ao concreto de referência, no entanto, esses efeitos não foram considerados significativos. Desse modo, supõe-se que a substituição da areia natural pelas as areias dos grupos 1 e 2, que são as areias A, B, C, D e H, pode ser realizada em até 75% sem nenhum prejuízo na resistência à compressão nessas idades. Os concretos produzidos com a areia do grupo 3, aos 28, 56 e 91 dias, apresentaram ganhos de resistência significativos em relação aos concretos de referência. Conforme a aplicação do modelo matemático, os ganhos foram de 7,7%, 6,3% e 8,95%, nas idades de 28, 56 e 91 dias, respectivamente. Dessa forma, os concretos moldados com a areia do grupo 3

apresentaram maior resistência à compressão quando utilizada em até 75%, corroborando com os resultados de autores como Donza, Cabrera e Irassar (2002), Park (2012), Menossi (2004), Bastos (2002), entre outros.

Por outro lado, a angulosidade das areias dos grupos 1 e 2 são semelhantes aos da areia do grupo 3, enquanto o teor de material pulverulento da areia do grupo 1 é superior ao das areias do grupo 2 e 3. Embora os concretos produzidos com as areias dos grupos 1 e 2 tenham alcançado ganhos na resistência aos 28, 56 e 91 dias, porém esse efeito não foi considerado significativo na análise estatística. Uma explicação para o melhor desempenho dos concretos produzidos com a areia de britagem do grupo 3 em relação aos concretos produzidos com as areias dos grupos 1 e 2, é que essas apresentaram menor equidimensionalidade dos grãos, ou seja, maior quantidade de partículas mais alongadas, conforme visto na análise de forma. Segundo Neville e Brooks (2013), essas partículas tendem a se acomodar segundo um plano orientado, favorecendo a formação de vazios no concreto e o acúmulo de água na parte inferior.

É verificado um aumento da resistência à tração por compressão diametral nos concretos produzidos com a areia do grupo 3 para todas as relações água/cimento, e nos concretos produzidos com as areias do grupo 1 e do grupo 2 para as relações água/cimento igual a 0,4 e 0,5. Contudo, essas variações não foram consideradas estatisticamente significativas. Conforme autores como Mehta e Monteiro (2014) e Neville e Brooks (2013), a resistência à compressão e a resistência à tração são intimamente relacionadas, mesmo não havendo uma proporcionalidade direta, a resistência à tração acompanha a tendência da resistência à compressão.

A incorporação das areias de britagem dos grupos 1 e 2 promove uma redução da absorção de água e do índice de vazios nos concretos testados em relação aos concretos de referência, considerada significativa na análise estatística. A incorporação da areia do grupo 3 promove um acréscimo nessas propriedades, no entanto, essa variação não foi considerada significativa estatisticamente, tendo em vista que foram inferiores a 1%, comparadas com os concretos de referência.

Conforme a aplicação do modelo matemático, a incorporação da areia do grupo 2 promove uma redução de 27,7% na absorção de água e de 27,4% no índice de vazios dos concretos. Os modelos aplicados para descrever o comportamento dessas propriedades nos concretos com a areia do grupo 1 não foram satisfatórios, uma vez que os coeficientes de

determinação (R^2) foram inferiores a 75%, portanto, a relação entre a absorção de água e índice de vazios e a incorporação da areia do grupo 1 não ficou bem definida.

De modo geral, a massa específica dos concretos testados com as areias de britagem dos grupos 1, 2 e 3 apresentaram massa específica inferior às dos concretos de referência. Essa variação foi considerada significativamente nos concretos com a areia dos grupos 1 e 2, sendo considerada não significativa nos concretos com a areia do grupo 3. Conforme a aplicação do modelo para descrever o comportamento da massa específica dos concretos com a areia do grupo 2, a redução alcançada foi de 1,6%, que pode ser justificada pela massa específica dessa areia que é inferior à da areia natural. Assim como, nas propriedades de absorção de água e índice de vazios, o modelo para descrever o comportamento da massa específica dos concretos produzidos com a areia do grupo 1 não foi satisfatório, portanto, sugere-se uma nova investigação.

A retração por secagem não apresentou variações significativas estatisticamente nos concretos testados. Na análise dos resultados do ensaio, a influência da incorporação da areia de britagem testadas aos concretos não ficou bem definida, dessa forma, é aconselhável a realização de novos estudos para uma melhor definição.

A profundidade de carbonatação dos concretos sofreu redução de até 37%, 55% e 41% nos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente, quando comparadas com o concreto de referência, no entanto, quando comparadas com os concretos de diferentes teores de areia de britagem, as variações não são relevantes, dessa forma, não foram consideradas significativas estatisticamente.

5 CONCLUSÕES

Conforme os resultados apresentados nesta dissertação, de modo geral, as areias de britagem da Região Metropolitana de Fortaleza apresentam características físicas e químicas adequadas ao uso como agregado miúdo na produção de concretos e argamassas.

Para concretos com teor de argamassa igual a 52%, o teor máximo de substituição de areia de britagem é 75%, sendo necessário maior teor de argamassa para alcançar boa trabalhabilidade em concretos com 100% de areia de britagem.

A trabalhabilidade é o principal fator que restringe o uso de areia de britagem em substituição à areia natural no concreto de cimento Portland, em função da forma do grão mais alongada e angulosa, portanto, a combinação do teor de material pulverulento na faixa de 10% a 15% com uso de aditivos químicos plastificantes, reduz o efeito da fricção interna promovida pelas partículas de agregado.

A equidimensionalidade das partículas das areias de britagem são mais influentes que a angularidade das mesmas na trabalhabilidade. Isto foi observado nos resultados dos concretos produzidos com a areia do grupo 3, que possui formato mais equidimensional que as areias dos grupos 1 e 2, portanto, teor de material pulverulento e angularidade semelhante aos das mesmas. Quanto mais equidimensionais forem os grãos, melhores os resultados obtidos.

A resistência à compressão é influenciada positivamente com a substituição da areia natural pela areia de britagem em até 75% no concreto.

As propriedades do concreto endurecido como resistência à tração, retração por secagem e carbonatação não sofrem influências significativas da incorporação de areia de britagem em concretos com relação água/cimento igual a 0,4, 0,5 e 0,6 em até 75% de substituição da areia natural. Dessa forma, a utilização de areia de britagem é viável no concreto, assegurando sua durabilidade.

A absorção de água, índice de vazios e a massa específica foram reduzidas com o incremento de areia de britagem dos grupos 1 e 2. A incorporação da areia de britagem do grupo 3 não produziu efeitos significativos nessas propriedades.

De modo geral, a incorporação de areia de britagem ao concreto de cimento Portland pode ser considerado viável tecnicamente, considerando as condições e as propriedades testadas nesta dissertação.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

A utilização de areia de britagem como agregado miúdo no concreto é uma realidade mundial, que deve se tornar, no futuro próximo, uma realidade local da Região Metropolitana de Fortaleza, dessa forma sugere-se a ampliação dos estudos nas seguintes abordagens:

a. Estudo do teor de argamassa ideal para substituição de 100% de areia de britagem, considerando as variações de forma e o teor de material pulverulento, relacionados ao processo de produção.

b. Estudo da influência da substituição do agregado natural por areia de britagem em outras propriedades do concreto no estado fresco, como exsudação, segregação e incorporação de ar e no estado endurecido, como módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão, fissuração na fluência, carbonatação acelerada, penetração de cloretos, entre outras.

c. Estudo da influência do processo produtivo das pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza na formação de material pulverulento e na forma dos grãos das areias de britagem.

d. Estudo da incorporação de areia de britagem em concreto autoadensável e de alta resistência, assim como em outros tipos de concretos especiais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Relatório técnico 01: Análise da cadeia produtiva de agregados minerais para obras de construção civil e de infraestrutura.** Brasília, 2012. Disponível em: <http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/05/ABDI-AGREGADOS-MINERAIS-RELATORIO-01.pdf>.

ALHOZAIMY, A.M. **Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete.** Cement & Concrete Composites. v.31, pp. 470-473, 2009.

ALMEIDA, S.L.M.; LUZ, A. B. **Manual de agregados para a construção civil.** 2ª edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

ALMEIDA, S.L.M. et al. **Produção de areia artificial em uma usina piloto na Pedra Sul mineração.** In: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Florianópolis, 2004.

ALMEIDA, S.L.M.; SILVA, V.S. **Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados.** In: II SUFFIB – Seminário: O uso da fração fina da britagem. São Paulo, 2005.

ALMEIDA, F.C.R.; SALES, A. **Efeitos da ação do meio ambiente sobre estruturas de concreto.** In: Ribeiro, D. V. (organizador). Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 125/2006:** Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 157/1993:** Standard Test Method for Length Change of hardened Hydraulic – Cement mortar and concrete. Philadelphia, 1993.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** 184 fls. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós –graduação em engenharia civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – especificações. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 52:** Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9935:** Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR NM 53:** Agregado Graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15577-1/2008:** Agregados – Reatividade álcali-agregado: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto . Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15577-2/2008:** Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15577-4/2008:** determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 5739/2007:** Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7222/2011:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 6118/2014:** Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7389-1/ 2009.** Agregados- Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

BAL, L.; BUYLE-BODIN, F. **Artificial neural network for predicting drying shrinkage of concrete.** Construction and Building Materials. v.38, pp.248-254, 2013.

BASTOS, Sandra R. Bertocini. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais.** 118 fls. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

BARIN, D.S. **Carbonatação e absorção capilar em concretos de cimento Portland branco com altos teores de adição de escória de alto forno e ativador químico**. 162 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS. 2008.

BARBOSA, M.T.G.; COURA, C.V.G.; MENDES, L.O.; **Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto**. Ambiente Construído. v.8,n.4, p.51-60. Out/Dez, 2008.

BAUER, E.; SANTOS, C.N.N.; JADALLAH, N.M. **Empregos de finos de britagem-investigação de parâmetros reológicos de argamassas com areia artificial**. Divulgação Técnica 02/2012. Disponível em: <http://materialsandmateriais.blogspot.com.br/2012/11/divulgacao-tecnica-at-02.html>. Acesso em fevereiro de 2015.

BEIXING, L.; JILIANG, W.; MINGKAI, Z. **Effect of limestone fines content in manufactured sand on durability of low –and high-strength concretes**. Construction and Building Materials. v.23,pp.2846-2850. 2009.

BENABED, B. et al. **Properties of self-compacting mortar made with various types of sand**. Cement & Concrete Composites. v.34, pp.1167-1173, 2012.

BENGTSSON, M.; EVERTSSON, C.M. **Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers**. Minerals Engineering. V.19, p.p.1479-1486. 2006.

BENGTSSON, M.; SVEDENSTEN, P.; EVERTSSON, C.M. **Improving yield and shape in a crushing plant**. Minerals Engineering.v.22,pp. 618-624. 2009.

BERN, R. **Agregados cúbicos: produção de agregados de alta qualidade com impactadores e britadores cônicos**. Revista areia e brita. São Paulo. Publicação trimestral. N.1. Maio/1997.

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas**. 120 fls. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em engenharia de transportes da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2012.

BOUZIANI, T. **Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach**. Construction and Building Materials. v.49, pp.308-314, 2013.

BRANDÃO, R.L. Sistema de Informação para gestão e administração territorial da Região Metropolitana de Fortaleza – Projeto Sinfor. **Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza – Texto Explicativo**. Fortaleza: CPRM, 1995b.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. 2011. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030)**. Brasília, MME/SGM. Disponível em: http://10.1.1.2/mineracao/pnm_2030.pdf.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland.** 117 f. Dissertação (Mestrado em construção civil). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006

CABRAL, A.E.B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** 248 Fls. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

CABRAL, K.O. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaiss nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido.** 246 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.

CABRERA, O. A.; TRAVERSA, L.P.; ORTEGA, N.F. **Estado fresco de morteros y hormigones con arenas de machaqueo.** *Revista Materiales de Construccion.* La Plata, Vol. 61, n.303, 401-416. Julho/Setembro, 2011.

CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, R. E. R. **Indústria de agregados para a construção civil na Região Metropolitana de Fortaleza.** Fortaleza: DNPM, 2011.

ÇELIC, T.; MARAR, K. **Effects of crushed stone dust on some properties of concrete.** *Cement and Research.* v.26, pp.1121-1130, 1996.

CEPURITIS, R.; JACOBSEN, S.; ONELLA, T. **Sand production with VSI crushing and air classification: Optmising fines grading for concrete production with micro-proportioning.** *Minerals Engineering.* V.28, pp. 1-14. 2015.

CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** Britagem, peneiramento e moagem, Vol 3. 2ª Ed. São Paulo: Signus Editora, 2003.

CORTES, D.D. et al. **Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sand.** *Cement and Concrete Research.* v.38, pp. 1142-1147, 2008.

CRAEYE, B. et al. **Módulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes.** *Cement and Concrete Composites.* v.54, pp.53-61, 2014.

DRAGO, C.; VERNEY, J.C.K.; PEREIRA, F.M. **Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland.** *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto,* 62(3): 399-408, jul. set. 2009.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E.F. **High-strength concrete with different fine aggregate.** *Cement and Concrete Research,* v.32, 2002, p.1755-1761.

ENGLITON, M.S.; HIGGINBOTTOM, I.E.; PETTIFER, G.S. **An unfamiliar alkali-agregado reaction from Trinidad.** *Quarterly Journal of Engineering Geology.* n. 27, pp. 363-373, 1994.

ERDOGDU, S. **Effect of retempering with superplasticizer admixtures on slump loss and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing.** Cement and Concrete Research.v.35,pp.907-912, 2005.

ESTEVEES, L.P.; CACHIM, P.B.; FERREIRA, V.M. **Effect of fine aggregate on the rheology properties of high performance cement – silica systems.** Construction and Building Materials. v.24, n.5, pp. 640-649, 2010.

FABRO, F. et al. **Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto.** Revista Ibracon de estruturas e materiais. São Paulo. V. 4, N. 2. Junho, 2011.

FANG, Y.H. **Effect of flexural load on carbonation of carbonation of cement past and mortar.** In: DHIR, R.K. et al. Concrete durability: Achievement and Enhancemet. Dundee: HIS BRE Press, 2008.

FARIAS, M.M.; PALMEIRAS, E.M. **Agregados para a construção Civil.** In: ISAIA, G.C. Concreto: Ciência e tecnologia.1º Ed. São Paulo. IBRACON, 2010.

FIGUEIRA, H.V.O.; LUZ, A.B.; ALMEIDA, S. L.M. **Britagem e Moagem.** In: LUZ, A.B. SAMPAIO, J.A. FRANÇA, S.C.A. Tratamento de minérios. 5ª Ed. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2010.

FRASCÁ, M.H.B.O. **Rocha como material de construção.** In: ISAIA, G.C. Concreto: Ciência e tecnologia.1º Ed. São Paulo. IBRACON, 2010.

GARCÍA-LODEIRO, I. *et al.* **Alkali-aggregate reaction in active fly ash systems.** Cement and Concrete Research.V. 37, nº 2, pp 175-183, 2007.

GONÇALVES, J.P. et al. **Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars.** Cement and concrete research. n.37, p. 924-932. 2007.

GUIMARÃES, M.S. Et al. **Aggregate production: Fines generation during rock crushing.** Int.J. Miner. Process. V.81.pp.237-247.2007.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; OZBAY, E. **Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures.** Construction and Building Materials. v.24, n.10. pp. 1878-1887, 2010.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland.** In: ISAIA, Geraldo Cechella (Organizador). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2010.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo. Editora PINI, 1992.

HUDSON, B.P. **Discovering the lost aggregate opportunity: Parts 1 to 9.** Pit and Quarry, 2003. Disponível em: www.pitandquarry.com

IMAMOTO, K.; ARAI, M. **Specific surface area of aggregate and its relation to concrete drying shrinkage**. *Mater Struct.* v.41. p. 323–33. 2008

KIHARA, Y. *et al.* **Avaliação Prática da Previsão da Reação Álcali-Silicato de Rochas Granitóides**. *Revista IBRACON de Materiais.* V.2, N.2, 2006.

KLEIN, N.S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto autoadensável**. 155 fls. Dissertação (Mestrado em engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, 2008.

KRIVENKO, P. *et al.* **Mechanism of preventing the alkali-aggregate reaction in alkali activated cement concretes**. *Cemente and Concrete Composites.* n° 45, pp 157-165, 2014.

KWAN, A.K.H.; NG, P.L.; HUEN, K.Y. **Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete**. *Construction and Building Materials.* v.61, pp. 270-277, 2014.

LAGERBLAD, B.; GRAM, H.E.; WESTERHOLM, M. **Evaluation of the quality of fine materials and filler from crushed rocks in concrete production**. *Construction and Building Materials.* v.67, pp.121-126, 2014.

LEVY, S.M.; HELENE, P. **Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development**. *Cement and Concrete Research.* v.34, pp.1975-1980, 2004.

LOCATI, F.; MARFIL, S.; BALDO, E. **Effect of ductile deformation of quartzo-bearing rocks on the alkali-silica reaction**. *Engineering Geology.* n.116, pp. 117-128, 2010.

LODI, V. H., PRUDÊNCIO JR, L. R. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó - SC**. In: Workshop Desempenho de Sistemas Construtivos, Unochapecó, Chapecó, SC, novembro de 2006.

LI, L.G.; KWAN, A.K.H. **Packing density of concrete mix under dry wet conditions**. *Powder Technology.* v.253, pp.514-521, 2014.

MARINONI, N. *et al.* **Influence of aggregate mineralogy on alkali–silica reaction studied by X-ray powder diffraction and imaging techniques**. *J. Mater Sci.* n° 47, p. 2845-2855, 2012.

MATHER, B. **How to make concrete that will not suffer deleterious álcali-silica reaction**. *Cement and Concrete Research.* n. 29, pp 1277-1280, 1999.

MEDEIROS, M.A. **Avaliação do uso da areia de britagem na produção de concretos estruturais**. Monografia (Curso de Engenharia civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2015. (Em publicação).

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEIER, S.A. *Et al.* **Dynamics of the internal reaction layer arising during carbonation of concrete**. *Chemical Engineering Science.* v.62, pp.1125-1137, 2007.

MENADI, B. et al. **Strenght and durability of concrete incorporating crushed limestone sand.** Construction and Building Materials. n° 23,p. 625-633. 2009.

MENOSSEI, R. T. et al. **Pó de pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia natural na elaboração de misturas de concreto?** Revista HOLOS Environment, São Paulo, V.10, N.2, P. 209. 2010.

MENOSSEI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** 94 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP. Ilha Solteira, 2004.

METSO MINERALS. **Manual de Britagem.** 6ª Ed. Sorocaba: METSO MINERALS, 2005.

MICHEL, B.; THIÉBAUT, J.; WACKENHEIM, C. **Intérêt de la minéralogie des granulats dans la connaissance des risques de l'alcali-réaction.** Bull Eng Geol Env. n° 62, pp. 145-153, 2003.

MILI, A.R.; OUEZDOU, M.B. **Valorization of the crushed sand ando f the desert sand in the composition of the self compacting concrete.** In: MATEC Web Conferences 2, 2012. Disponível em: <http://www.matec-conferences.org>. Acesso em 26/05/2015.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments.** 5 ed. Arizona: John Wiley & Sons Inc, 2001.

NANTHAGOPALAN, P.; SANTHANAM, M. **Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand.** Cement & Concrete Composites. v.33,pp.353-358, 2011.

NEVES, C. F. C.; SCHVARTZMAN, M. M. A. M. **Variables search technique applied togas separation.** Química Nova. v.25, n 2, p.327-329, 2002.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto.** 2ª Ed. Porto Alegre: Brookman, 2013.

OLLIVIER, P.J.; TORRENTI, J.M. **A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte.** In: OLLIVIER, J.P.; VICHOT, A. Durabilidade do concreto. Ed. Tradução: CASCUDO, O. CASAREK, H. São Paulo: IBRACON, 2014.

PANG, L. et al. **Relationship between Petrographical and Physical Properties of aggregates.** Wuhan University of Technology - Mater. Sci. Aug/2010.

PARK, S. **Study on the fluidity and Strength properties of high performance concrete utilizing crushed sand.** International Journal of concrete structures and materials.v.6, n.4, pp. 231-237, December, 2012.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e modelos de predição.** 253 fls. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2009.

PETER, M.A. et al. **Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study.** Cement and Concrete Research.v.38, pp. 1385-1393, 2008.

PRUDÊNCIO JR, L.R. et al. **Particle shape analysis of fine aggregate using a simplified digital image processing method.** Magazine of Concrete Research. v.65. pp. 27-36. 2013.

QUIROGA, P.N.; FOWLER, D.W. **The Effects of the Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete.** International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin (2003).

REVISTA MANUTENÇÃO E TECNOLOGIA. **Areia de brita avança no mercado.** Edição 156. Abril/2012. Disponível em: <http://www.revistamt.com.br>

REY, L. **Planejar e redigir trabalhos científicos.** 2ª Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

RIBEIRO, S.; BONETTI, C. **Variabilidade morfométrica de sedimentos arenosos: revisão de métodos e uso do *software imageJ* na diferenciação de ambientes deposicionais na ilha de Santa Catarina e Região Continental, SC, Brasil.** GRAVEL. v. 11, n.1. pp. 37-47. Dezembro, 2013.

RODOLPHO. P. M. **Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada** 155 f. Dissertação (mestrado em construção civil). Programa de Pós-graduação da Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2007.

SACHLOVA, S. **Microstructure parameters affecting alkali-silica reactivity of aggregates.** Construction and Building Materials. n.49, pp.604, 2013.

SAETTA, A.V.; SCHREFLER, B.A.; VITALIANI, R.V. **2 – D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials.** Cement and Concrete Research. v.25, n.8, pp.1703-1712, 1995.

SAKOTA, I.; RAVINA, D. **Hot Weather Concreting with Admixtures.** Cement and Concrete Composites. v.20, pp.129-136, 1998.

SANTOS. C.C.N. **A influência das características da areia artificialmente britada nas propriedades do estado fresco do concreto.** 243 f. Tese (Doutorado em Construção Civil) Programa de Pós-graduação em estruturas e construção civil da Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2008.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados naturais, britados e artificiais para concreto.** In: ISAIA, G.C. Concreto: Ciência e tecnologia.1º Ed. São Paulo. IBRACON, 2011.

SILVA, W.R.L.; PRUDÊNCIO JR, L.R. **Avaliação da influência do tipo de beneficiamento no desempenho de agregados miúdos de britagem na produção de concreto usinado.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 54, 2012, Maceió. Anais...Maceió: IBRACON, 2012.

SHI-CONG, K.; CHI-SUN, P. **Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates.** Construction and Building Materials. v. 23. p. 2877–2886. 2009.

STARK, J. **Recent advanced in the field of cement hydration and microestruture analisys.** *Cement and Concrete Research.* v.41. pp. 666-678. 2011.

STEFFENS, A.; DINKLER, D.; AHRENS, H. **Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures.** *Cement and Concrete Research.* v.32, pp.935-941, 2002.

TIECHER, F. *et al* – **Influence of mesostasis in volcanic rocks on the alkali-aggregate reaction.** *Cement and Concrete Composites,* n. 34, pp. 1130-1140, 2012.

WAKIZAKA, Y. **Alkali-silica reactivity of Japanese rocks.** *Engeneering Geology.* n. 62, pp. 145-153, 2000.

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

WESTERHOLM, M. *et al.* **Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars.** *Cement & Concrete Composities.* v.30, pp. 274-282, 2008.

ZHANG, W.; ZAKARIA, M.; HAMA, Y. **Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete.** *Journal Construction and Building Materials.* v.49. p.500–510, 2013.

APÊNDICE A – METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE FORMA DOS GRÃOS PELO AGGREGATE IMAGE MEASUREMENT SYSTEM (AIMS)

A análise da forma dos grãos foi realizada através de Processamento Digital de Imagens – PDI, esta técnica envolve a digitalização de uma imagem real e a análise de seus componentes para a obtenção de parâmetros relacionados à forma e à orientação das mesmas (BESSA, CASTELO BRANCO e SOARES, 2009).

Foi utilizado equipamento Aggregate Image Measurement System (AIMS), que é um sistema de obtenção e processamento de imagens que tem como objetivo principal a caracterização direta de agregados graúdos e miúdos com respeito às propriedades de forma, angularidade e textura (CASTELO BRANCO et al, 2006). Para agregado miúdo, o sistema fornece dois parâmetros: Forma 2D e angularidade. O ensaio foi realizado no Laboratório de Pavimentação do Departamento de Engenharia de Transportes –DET da Universidade Federal do Ceará.

A Forma 2D aplica-se somente aos agregados miúdos e quantifica a forma relativa de imagens bidimensionais das partículas de agregado. O seu índice varia de 0 a 20 e quanto mais próximo de zero, mais a partícula de agregado terá a forma de um círculo perfeito. A equação AP.1 apresenta o cálculo desse parâmetro:

$$Forma - 2D = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[\frac{R\theta + \Delta\theta - R\theta}{R\theta} \right] \quad (AP.1)$$

Onde:

$R\theta$ = raio da partícula no ângulo 0;

$\Delta\theta$ = diferença de incremento no ângulo.

A angularidade é medida através do parâmetro gradiente e quantifica as mudanças ao longo das bordas das partículas e varia em uma escala de 0 a 10.000. De acordo com esse parâmetro, um círculo perfeito tem um valor de gradiente de angularidade muito baixo, tendendo a zero (BESSA, 2012). O cálculo da angularidade é realizado conforme a equação AP.2, que é aplicado tanto para os agregados graúdos quanto para os agregados miúdos.

$$Angularidade = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (AP.2)$$

Onde:

θ = ângulo de orientação dos pontos de borda;

n = número total de pontos;

i = i -ésimo ponto de borda da partícula.

Para realização da análise de imagens em agregados miúdos é necessário obedecer uma sequência de procedimentos. Inicialmente, separa-se o material por quarteamento, em seguida realiza-se a separação das partículas por peneira. Utiliza-se as peneiras de abertura 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm e 0,075 mm. Realiza-se a análise do material retido em cada peneira. É realizada a análise em uma amostra de 150 grãos para cada fração separada, que deve ser colocada na bandeja do equipamento e espalhada uniformemente ao longo da bandeja, que tem formato circular e gira de forma que a câmera não capture a mesma imagem mais de uma vez. O equipamento avalia as imagens de forma que as partículas de agregados que estejam em contato não sejam analisadas e não afetem, assim, o resultado. A distribuição dos agregados deve ser feita de forma que evite aglomerações de suas partículas ao longo da bandeja. A melhor forma de espalhar as partículas é utilizar a ponta dos dedos de forma a espalhar o material. A figura 5.6 apresenta o sistema AIMS.

Figura AP.1 - Equipamento AIMS (Aggregate Image Measurement System).



Fonte: Elaborado pela autora.

Após a preparação da amostra na bandeja, deve-se selecionar no *software* o tipo de análise a ser realizada, bem como o tamanho do agregado a ser ensaiado. As portas do equipamento devem ser fechadas e, enfim, o ensaio é iniciado. Após as digitalizações necessárias, o equipamento retorna a bandeja à sua posição inicial, e então são gerados todos os resultados em planilhas do MS Excel.

A metodologia de classificação dos agregados foi desenvolvida pelo pesquisador Al Rousan em sua tese de doutorado na University College Station, Texas-EUA em 2004, após realizar uma série de ensaios em agregados de diversas origens mineralógicas. Foi utilizado o método estatístico dos clusters, ou agrupamentos para as análises de cada propriedade obtida através do AIMS e para a determinação dos limites de classificação (BESSA, 2012). Os limites de classificação são apresentados na Tabela A.1.

Tabela AP.1 – Limites de classificação de Al Rousan.

Propriedades	Valores limites/ Classificação			
		< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 -10,5
Forma 2D	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado
	< 2100	2100 - 4000	4000 -5400	> 5400
Angularidade	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular

Fonte: Bessa (2012).

Conforme os limites indicados na tabela A.1, as partículas que se concentram nas faixas circular e semicircular da forma 2D e nas faixas arredondado e subarredondado apresentam maior grau de esfericidade, portanto são melhores para trabalhabilidade do concreto.

REFERÊNCIAS

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas**. 120 fls. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em engenharia de transportes da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2012.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. **Caracterização de Agregados Convencionais e Alternativos Utilizando Técnicas de Processamento Digital de Imagens**. In: XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET. Vitória, 2009.

CASTELO BRANCO, V. T. F. et al. **Caracterização de Forma, Angularidade e Textura de Agregado de Brita Granítica e Escórias de Aciaria Usando o *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS)**. In: XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília, DF.2006.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS AOS 28, 56 E 91 DIAS

a. Resistência à compressão aos 28 dias

As Tabelas B1, B2 e B3 apresentam as análises de variância dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos produzidos com as areias de britagem dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela B1 - Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1084,52	1	1084,52	223,26	0,0000	S
%ab	7,39	1	7,39	1,522	0,2375	NS
ac*(%ab)	4,79	1	4,79	0,986	0,9860	NS
Erro	68,00	14	4,85			
Total	1164,71	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela B254 - Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1068,23	1	1068,23	237,665	0,00000	S
% ab	1,733	1	1,733	0,3855	0,5446	NS
ac*(%ab)	3,380	1	3,380	0,7520	0,4004	NS
Erro	62,92	14	4,495			
Total	1136,26	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela B3 - Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1006,50	1	1006,50	143,19	0,00000	S
% ab	98,38	1	98,38	13,99	0,00219	S
ac*(%ab)	5,900	1	5,900	0,839	0,37509	NS
Erro	98,40	14	7,029			
Total	1209,18	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

a. Resistência à compressão aos 56 dias

As Tabelas B4, B5 e B6 apresentam as análises de variância dos resultados da resistência à compressão aos 56 dias para os concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela B455 - Análise de variância da resistência à compressão aos 56 dias – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1749,66	1	1749,66	206,74	0,0000	S
%ab	0,521	1	0,521	0,061	0,8076	NS
ac*(%ab)	10,97	1	10,97	1,296	0,2739	NS
Erro	118,48	14	8,46			
Total	1879,64	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela B5 - Análise de variância da resistência à compressão aos 56 dias - grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1711,71	1	1711,71	193,944	0,0000	S
% ab	0,200	1	0,200	0,0227	0,8824	NS
ac*(%ab)	6,444	1	6,444	0,7301	0,4072	NS
Erro	123,56	14	8,826			
Total	1841,92	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – Média quadrada; S – significativo; NS – não significativo; a/c – relação água /cimento; %ab – percentual de areia de britagem. ac*(%ab) – interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela B6 - Análise de variância da resistência à compressão aos 56 dias – grupo 3

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1179,48	1	1179,48	133,26	000000	S
% ab	79,619	1	79,619	8,99	0,00956	S
ac*(%ab)	2,060	1	2,060	0,232	0,63691	NS
Erro	123,91	14	8,851			
Total	1385,07	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

b. Resistência à compressão aos 91 dias

As Tabelas B7, B8 e B9 apresentam as análises de variância dos resultados da resistência à compressão aos 91 dias dos concretos produzidos com as areias dos grupos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela B7 - Análise de variância da resistência à compressão aos 91 dias – grupo 1

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1903,60	1	1903,60	217,92	0,0000	S
%ab	8,317	1	8,317	0,952	0,3457	NS
ac*(%ab)	21,51	1	21,51	2,463	0,1388	NS
Erro	122,29	14	8,735			
Total	2055,73	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela B8 - Análise de variância da resistência à compressão aos 91 dias – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	1615,88	1	1615,88	184,65	0,00000	S
%ab	1,172	1	1,172	0,133	0,72987	NS
Ac*(%ab)	5,900	1	5,900	0,6742	0,425363	NS
Erro	122,51	14	8,751			
Total	1745,46	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

Tabela B9 - Análise de variância da resistência à compressão aos 91 dias – grupo 2

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
ac	950,34	1	950,34	35,87	0,000003	S
% ab	173,20	1	173,20	6,538	0,022806	S
ac*(%ab)	3,948	1	3,948	0,149	0,14903	NS
Erro	370,87	14	26,49			
Total	1498,37	17				

Fonte: Elaborado pela autora.

Legenda: SQ - Soma quadrada; GDL - Grau de liberdade; MQ - Média quadrada; S - Significativo; NS - Não significativo; ac - Relação água/cimento; %ab - Percentual de areia de britagem; ac*(%ab) - Interação entre a relação água/cimento e teor de areia de britagem.

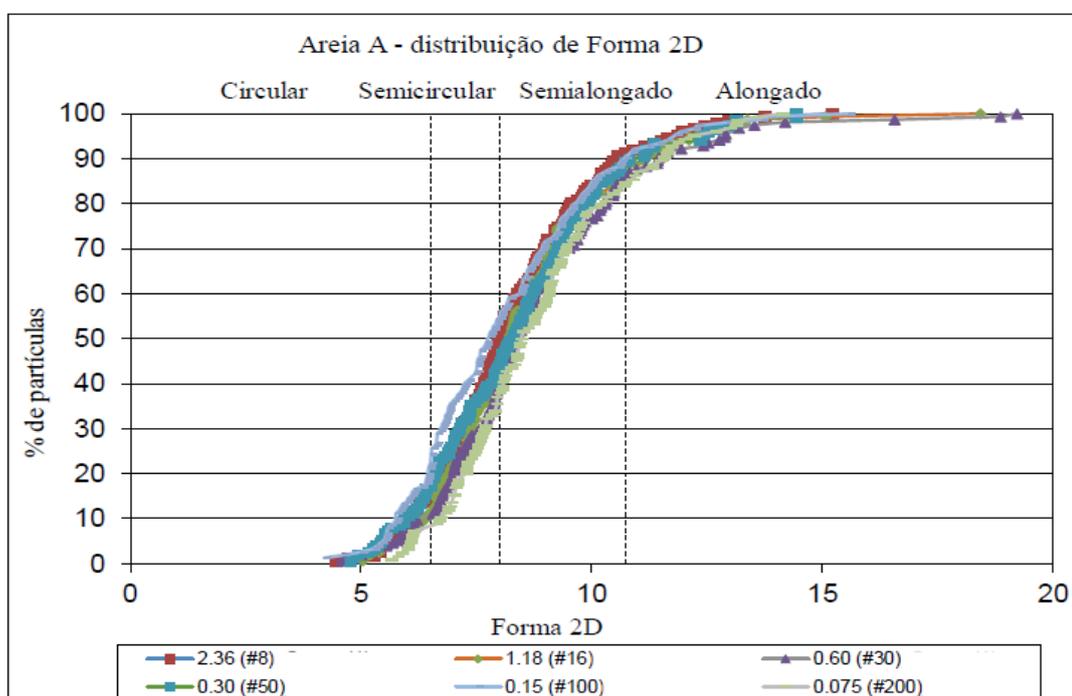
ANEXO A – ANÁLISE DA FORMA DOS GRÃOS - GRÁFICOS GERADOS PELO AGGREGATE IMAGE MEASUREMENT SYSTEM (AIMS)

Os gráficos apontam o perfil de concentração dos grãos nas faixas de classificação de cada parâmetro. Os grãos foram analisados por peneira, dessa forma, as curvas geradas representam o material retido nas peneiras de abertura 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm e 75 μm . Para cada uma delas foram analisadas 150 partículas, no caso da peneira de abertura 4,75 mm, para a amostra de ensaio não foi possível acumular essa quantidade de partículas retidas, portanto, não foi possível realizar a análise.

1. Forma 2D

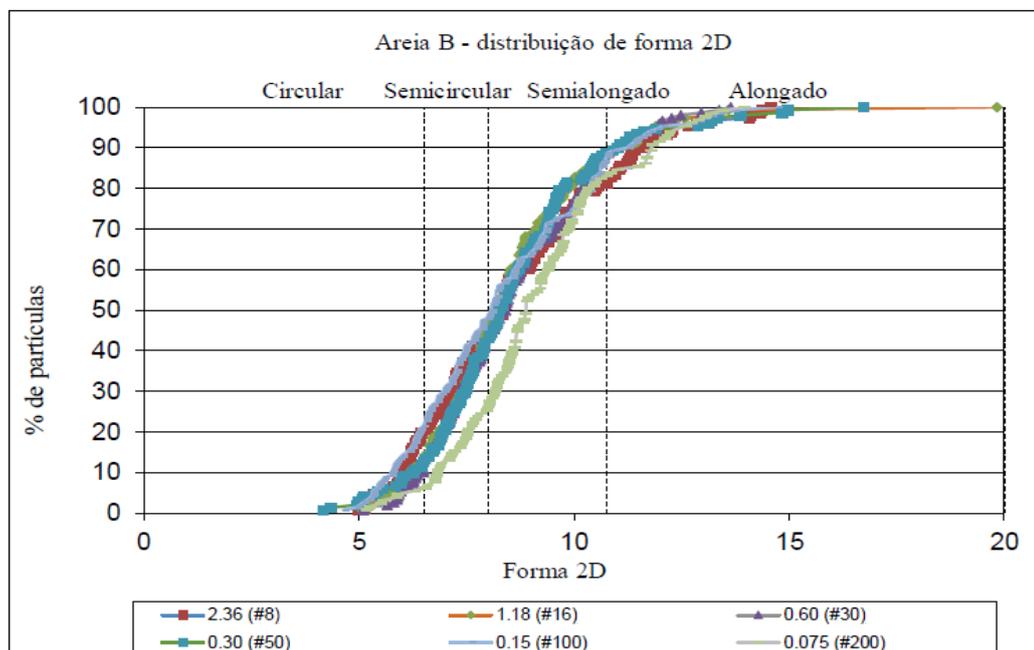
Na figura AN.1 está apresentado o gráfico da distribuição dos grãos analisados para o parâmetro de forma 2D da areia A.

Figura AN.1 - Distribuição de forma 2D da areia A



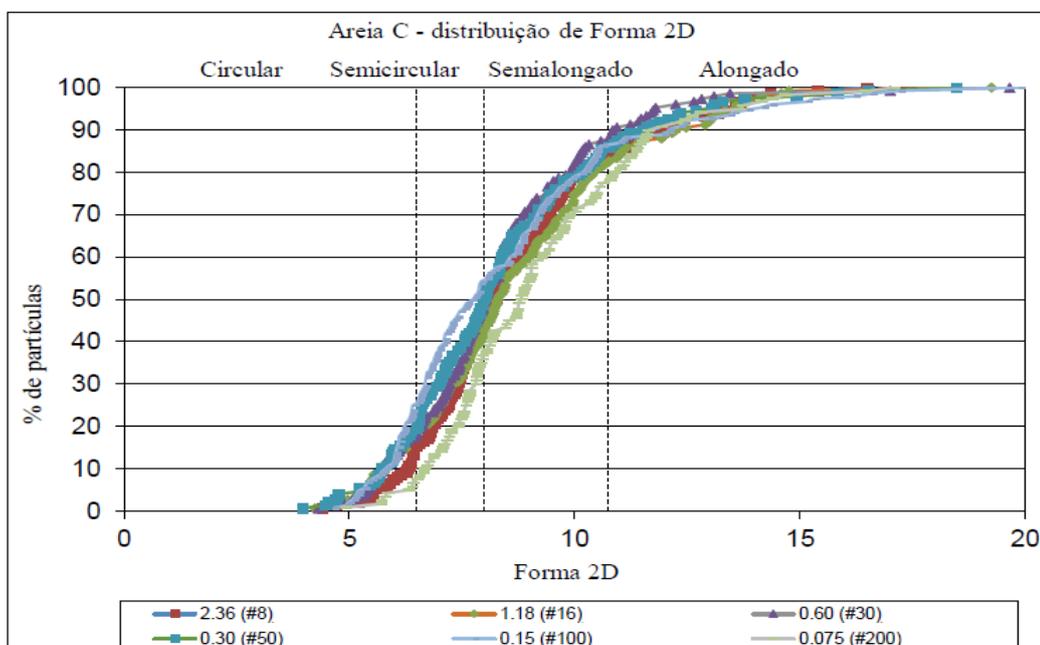
Na figura AN.2 está apresentado o gráfico da distribuição de forma 2D da areia B.

Figura AN.2 - Distribuição de forma 2D da areia B



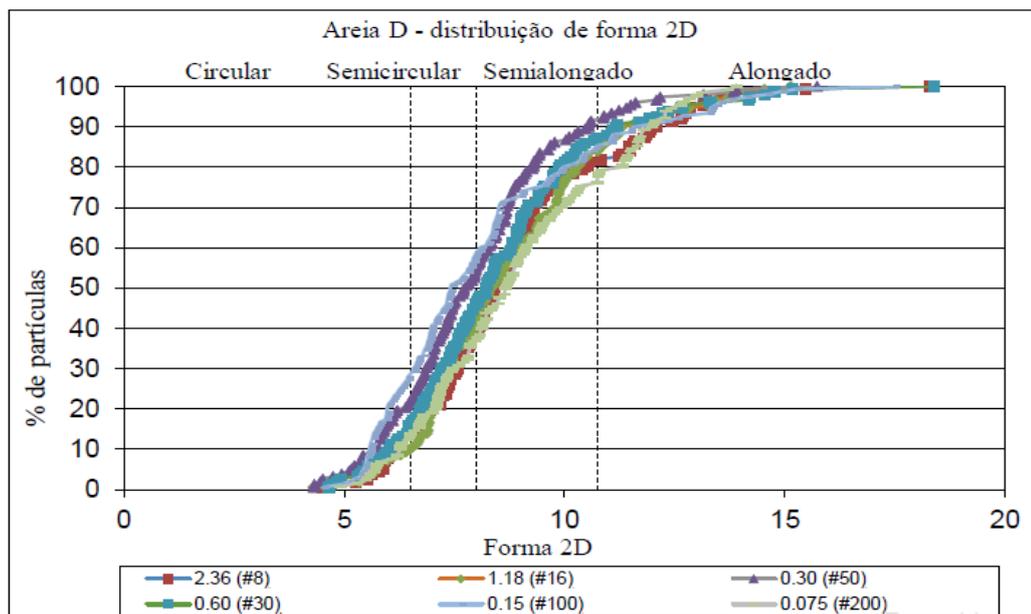
Observa-se no gráfico um leve deslocamento para a direita da curva da peneira de nº 200, indicando que os grãos pertencentes a essa fração são mais alongados que os grãos retidos nas demais peneiras. A figura AN.3 mostra a distribuição granulométrica da areia C.

Figura AN.3 - Distribuição granulométrica da areia C



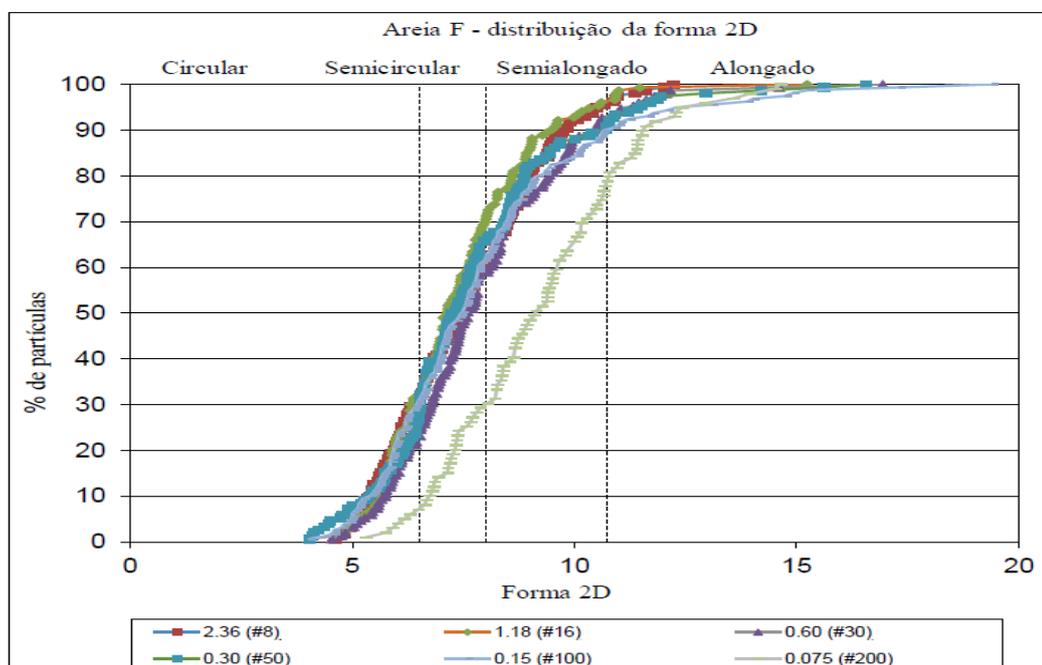
A figura AN.4 apresenta o gráfico da distribuição de forma da areia D.

Figura AN.4 - Distribuição de forma 2D da areia D



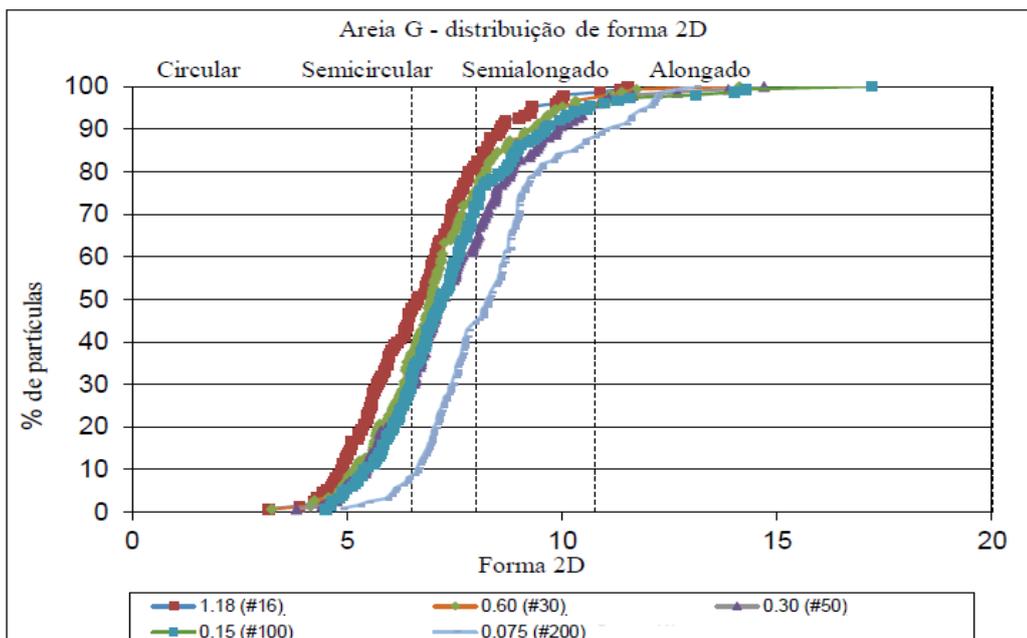
A figura AN.5 apresenta a distribuição de forma da areia F.

Figura AN.5 Distribuição de forma da areia F



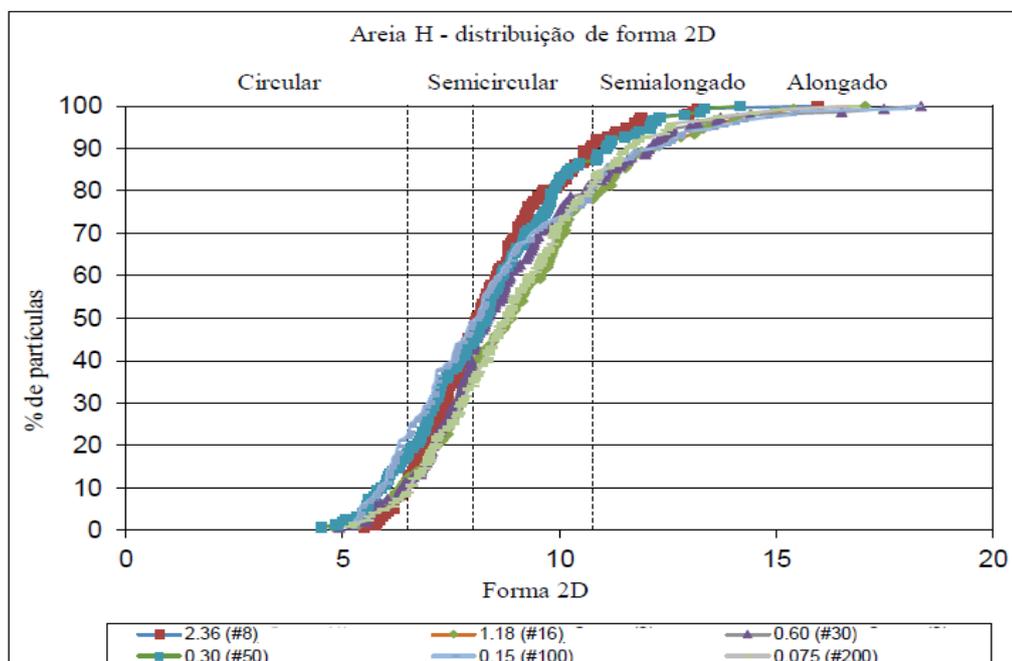
Observa-se o deslocamento da curva de distribuição de forma 2D dos grãos da peneira de nº 200, indicando que na fração da areia de 0,075 mm, os grãos são mais alongados que nas demais peneiras. O mesmo ocorre com a areia G, proveniente da mesma pedreira, como é apresentado na figura AN.6.

Figura AN.6 - Distribuição de forma 2D



A figura AN.7 mostra o gráfico de distribuição de forma 2D da areia H.

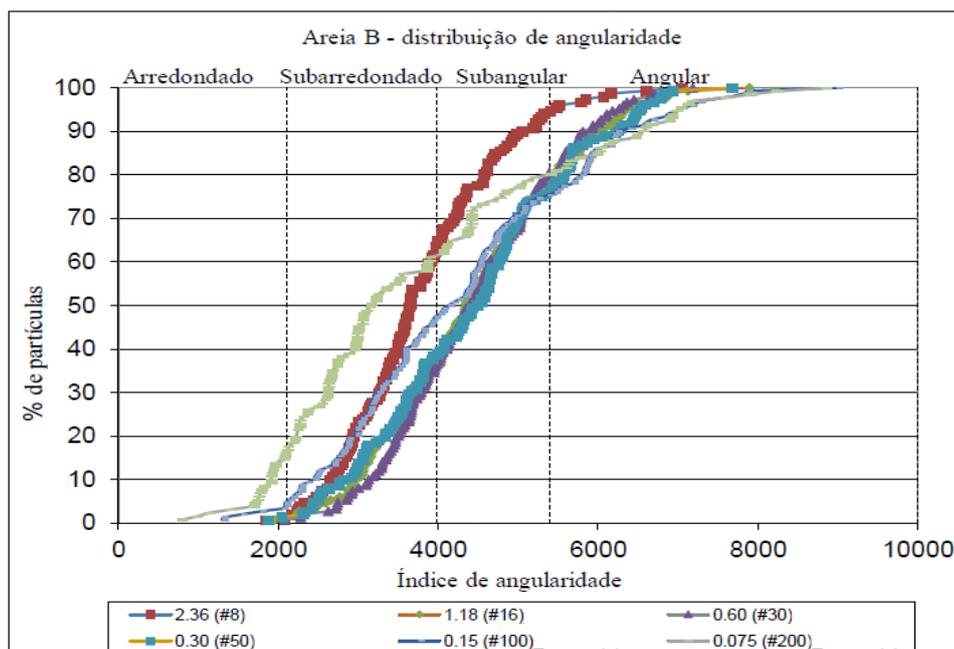
Figura AN.7 - Distribuição de forma 2D da areia H



A figura AN.8 apresenta o gráfico da distribuição de forma da areia natural.

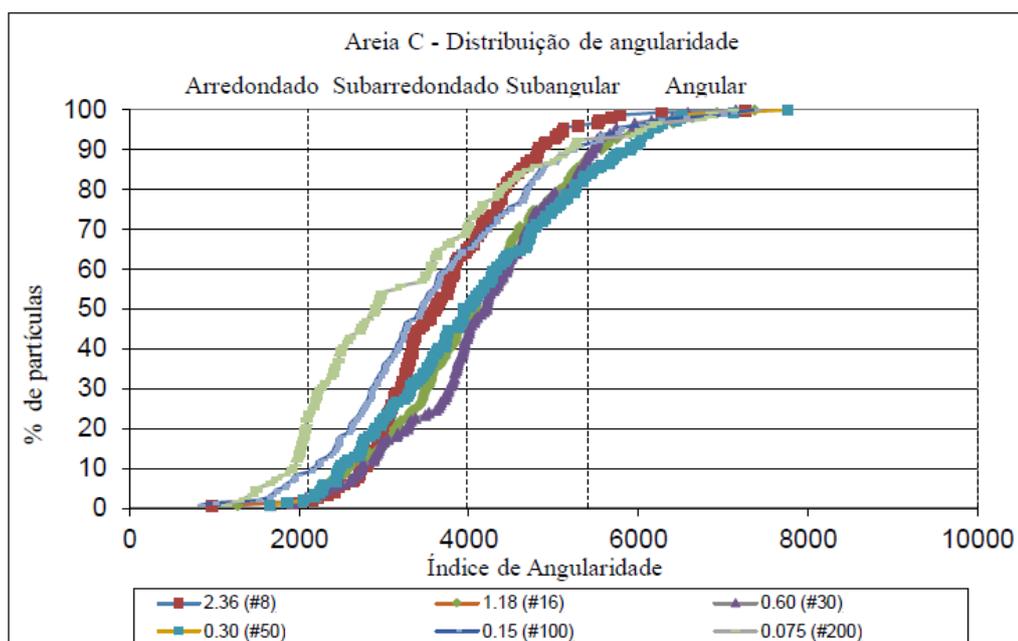
Observa-se que as curvas são mais dispersas entre si, sendo a curva da peneira nº 200 a mais destacada para o lado esquerdo, indicando que os grãos dessa fração tendem a ser mais arredondados. A figura AN.10 mostra o gráfico da distribuição da angularidade da areia B.

Figura AN.10 - Distribuição de angularidade da areia B



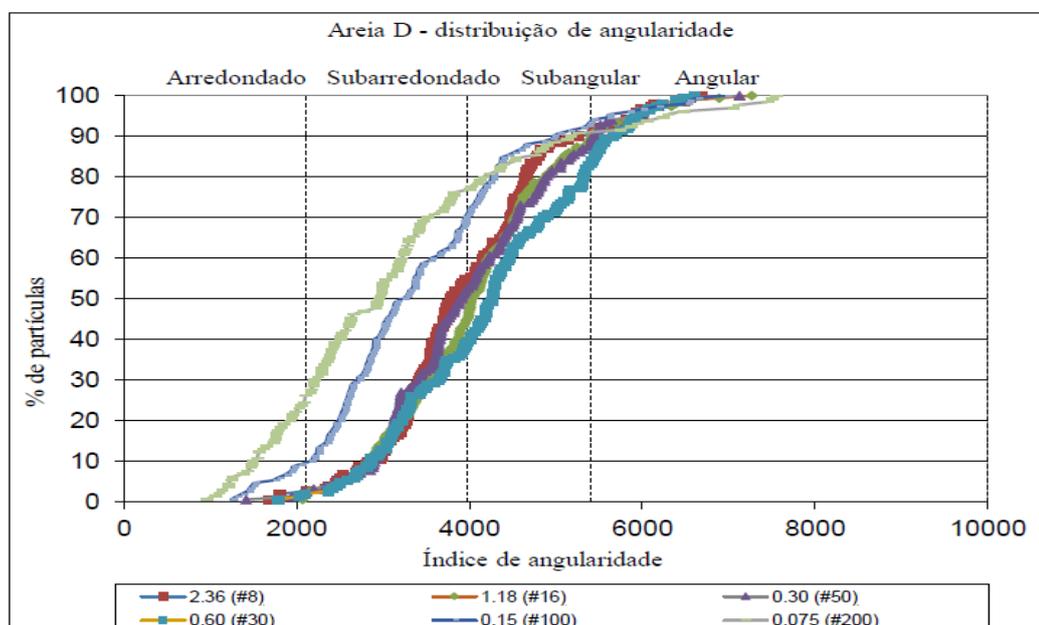
Na figura AN.11 está apresentado o gráfico da distribuição de angularidade da areia C.

Figura AN.11 - Distribuição de angularidade da areia C



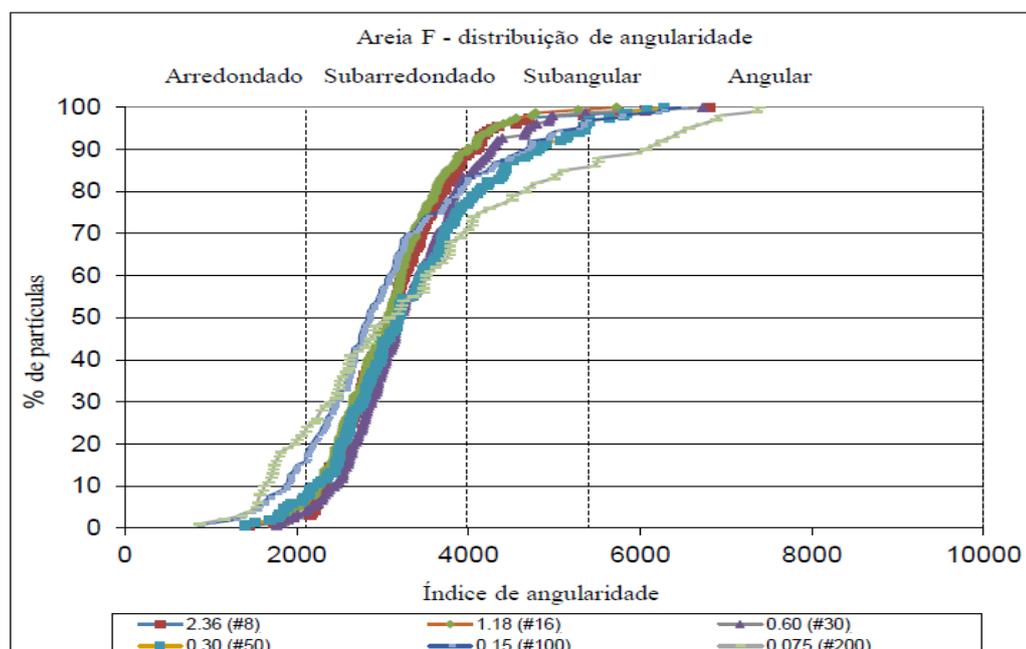
A figura AN.12 apresenta a distribuição dos grãos da areia D.

Figura AN.12 - Distribuição de angularidade da areia D



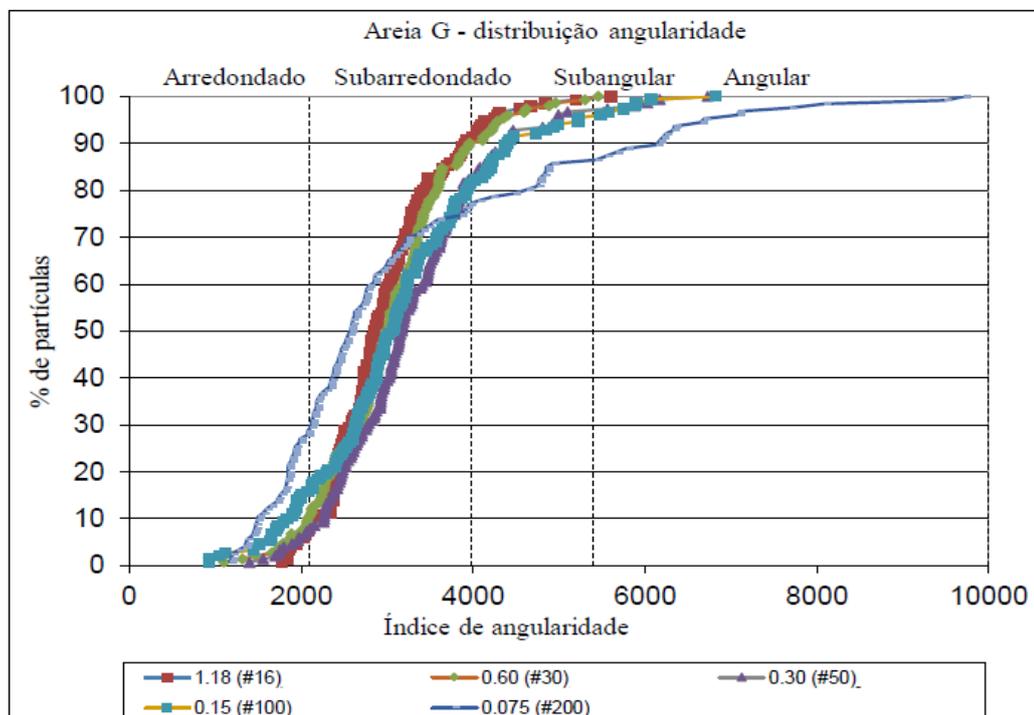
A figura AN.13 mostra o gráfico da areia F.

Figura AN. 13 - Distribuição de angularidade da areia F



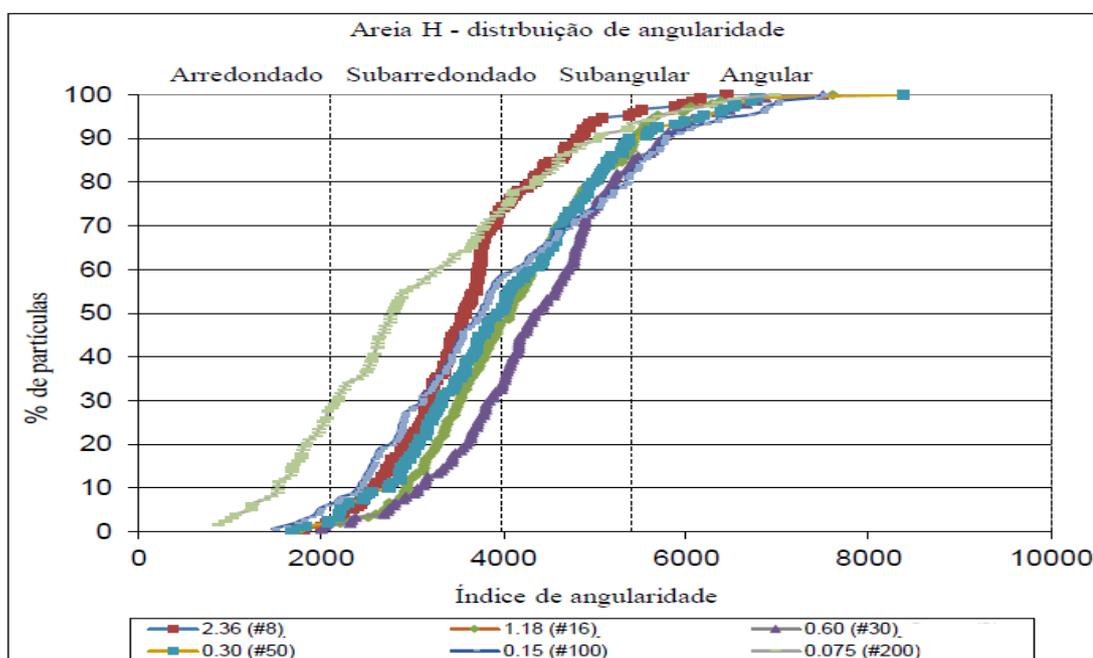
Na figura AN.14 está apresentado o gráfico da areia G.

Figura AN. 14 - Distribuição de angularidade da areia G



As curvas das frações dos grãos, também, apresentam-se mais aproximadas na areia G, contudo a curva da peneira nº 200 se distancia para a direita. Essa amostra de areia não foi analisada as partículas retidas na peneira nº 8, com abertura de 2,36 mm, devido a quantidade total retida ter sido inferior à quantidade exigida no ensaio. A figura AN.15 mostra o gráfico da areia H.

Figura AN.15 - Distribuição de angularidade da areia H



A figura AN.16 mostra o gráfico da distribuição da angularidade da areia natural de leito de rio.

Figura AN.16 - Distribuição da angularidade da areia natural de leito de rio

