



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE AREIAS NATURAIS E DE BRITAGEM PARA
FORMULAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE AGREGADO
MIÚDO PRONTO PARA CONCRETOS DE DIFERENTES
RESISTÊNCIAS**

FELIPE DE OLIVEIRA COSTA

Florianópolis, dezembro de 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FELIPE DE OLIVEIRA COSTA

**ESTUDO DE AREIAS NATURAIS E DE BRITAGEM PARA
FORMULAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE AGREGADO
MIÚDO PRONTO PARA CONCRETOS DE DIFERENTES
RESISTÊNCIAS**

Trabalho de Conclusão apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Luiz Roberto
Prudêncio Júnior

Coorientadora: Rudiele Aparecida
Schankoski

Florianópolis, dezembro de 2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Costa, Felipe de Oliveira

Estudo de areias naturais e de britagem para formulação e comercialização de agregado miúdo pronto para concretos de diferentes resistências / Felipe de Oliveira Costa ; orientador, Luiz Roberto Prudêncio Júnior ; co-orientadora, Rudiele Aparecida Schankoski. - Florianópolis, SC, 2013.

88 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. composição de agregados. 3. areia de britagem. 4. pó-de-pedra. 5. concreto. I. Prudêncio Júnior, Luiz Roberto. II. Schankoski, Rudiele Aparecida. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

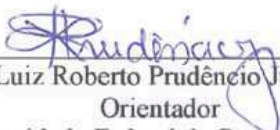
Felipe de Oliveira Costa

**ESTUDO DE AREIAS NATURAIS E DE BRITAGEM PARA
FORMULAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE AGREGADO
MIÚDO PRONTO PARA CONCRETOS DE DIFERENTES
RESISTÊNCIAS**

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 29 de novembro de 2013.

Banca Examinadora:



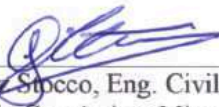
Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Rudiele Aparecida Schankoski, Eng.^a Civil Msc.
Coorientadora
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.ª Janaide Cavalcante Rocha, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina



Joelcio Luiz Stocco, Eng. Civil Msc.
Cedro Engenharia Comércio e Mineração Ltda.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE EQUAÇÕES	xv
RESUMO	xvii
1 INTRODUÇÃO	19
2 Objetivos	20
2.1 Objetivo geral	20
2.2 Objetivos específicos	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Definições	22
3.1.1 Agregados	22
3.1.2 Areia natural	22
3.1.3 Agregados miúdos de britagem	22
3.2 Agregados para concreto	23
3.2.1 Características dos agregados miúdos	24
3.3 Agregados miúdos de britagem	32
3.3.1 Produção de agregados miúdos de britagem	32
3.3.2 Métodos de remoção de material pulverulento	35
3.3.3 Aplicação em concretos e argamassas de cimento Portland	38
3.3.4 Composição com areia natural	39
3.4 O Índice de Fluidéz	41
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
4.1 Materiais empregados	42
4.1.1 Cimento	42
4.1.2 Aditivo	42
4.1.3 Água	43

4.1.4	Agregado graúdo	43
4.1.5	Agregados miúdos	43
4.2	Metodologia	43
4.2.1	Caracterização dos agregados miúdos	43
4.2.2	Composição de agregados miúdos	44
4.2.3	Ensaio em argamassa	44
4.2.4	Ensaio em concreto	47
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
5.1	Características dos agregados miúdos utilizados em argamassa	52
5.1.1	Areia Natural	52
5.1.2	Areia de Britagem	52
5.1.3	Pó-de-pedra	53
5.1.4	Composições	54
5.2	Características dos agregados miúdos utilizados em concreto	56
5.2.1	Areia Natural	56
5.2.2	Areia de Britagem	57
5.2.3	Pó-de-pedra	59
5.2.4	Composições	60
5.3	Caracterização dos agregados graúdos	61
5.3.1	Brita 0	61
5.3.2	Brita 1	62
5.4	Ensaio em argamassa	63
5.4.1	Estado fresco	63
5.4.2	Estado endurecido	67
5.4.3	Composições selecionadas	69
5.4.4	Repetição das argamassas para o novo lote de materiais	70
5.5	Ensaio em concreto	71

5.5.1	Teores de argamassa	71
5.5.2	Curvas de dosagem	72
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6.1	Conclusões	82
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	83
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Material fragmentado durante o desmonte em pedreira na Grande Florianópolis.	32
Figura 2 - Britador tipo cone empregado como britador secundário em uma pedreira na Grande Florianópolis.	33
Figura 3 - Lavador de rosca (METSO MINERALS, 2005).	36
Figura 4 - Roda desaguadora (METSO MINERALS, 2005).	37
Figura 5 - Funcionamento de um hidrociclone (CRUZ, 2008).	37
Figura 6 - Misturador mecânico empregado no preparo das argamassas.	45
Figura 7 - <i>Flow table test</i>	46
Figura 8 - Materiais pesados em baldes para preparo do concreto.	47
Figura 9 - Ilustração de parte do ensaio de abatimento do tronco de cone. As dimensões apresentadas estão em milímetros.	49
Figura 10 - Ruptura de um corpo de prova à compressão.	50
Figura 11 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos.	54
Figura 12 - Curvas granulométricas das composições de areia de britagem com areia natural.	55
Figura 13 - Curvas granulométricas das composições de pó-de-pedra com areia natural.	56
Figura 14 - Curvas granulométricas das duas areias naturais usadas no trabalho.	57
Figura 15 - Distribuição granulométrica das areias de britagem empregadas no trabalho.	58
Figura 16 - distribuição granulométrica dos dois lotes de pó-de-pedra utilizados no trabalho.	60

Figura 17 - Distribuições granulométricas das composições selecionadas.	60
Figura 18 - Curva granulométrica da brita 0 usada no trabalho.	62
Figura 19 - Distribuição granulométrica da brita 1 empregada no trabalho.	63
Figura 20 - Valores de Índice de Fluides para cada traço das argamassas confeccionadas com as composições.	65
Figura 21 - Perda de espalhamento em função do tempo decorrido para as misturas com traço 2,1.	66
Figura 22 - Perda de espalhamento em função do tempo decorrido para as misturas com traço 3,0.	66
Figura 23 - Perda de espalhamento em função do tempo decorrido para as misturas com traço 3,9.	67
Figura 24 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade (barras) e respectiva relação água/cimento de cada mistura (pontos).	68
Figura 25 - Índice de Fluides das argamassas preparadas com as composições de agregados selecionadas para o traço 3,0.	70
Figura 26 - Consumo de água por metro cúbico apresentado pelas misturas.	75
Figura 27 - Curvas de dosagem dos concretos.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aberturas nominais do conjunto de peneiras padronizadas pela ABNT NBR 7211/2009.	26
Tabela 2 – Traços iniciais das argamassas	45
Tabela 3 – Traços dos concretos preparados.	48
Tabela 4 – Características da areia natural utilizada.	52
Tabela 5 - Características da areia de britagem.	53
Tabela 6 - Características do pó-de-pedra.	53
Tabela 7 - Características da areia natural utilizada nos ensaios em concreto.	57
Tabela 8 - Características da areia de britagem utilizada nos ensaios em concreto.	58
Tabela 9 - Características do pó-de-pedra usado na etapa de concreto.	59
Tabela 10 – Teor de material pulverulento e módulo de finura de cada composição.	60
Tabela 11 - Caracterização da brita 0.	61
Tabela 12 - caracterização da brita 1.	62
Tabela 13 - Resultados de espalhamento obtido com as argamassas testadas.	64
Tabela 14- Teor de ar incorporado às argamassas.	68
Tabela 15 - Teores de argamassa dos concretos para cada uma das composições (porcentagem em massa).	71
Tabela 16 - Valores de abatimento e relação água/materiais secos obtidos em concreto.	73
Tabela 17 - Outros resultados obtidos em concreto.	74
Tabela 18 - Resistências à compressão (MPa) estimadas fixando valores de relação água/cimento.	76

Tabela 19 - Consumo de cimento por metro cúbico de concreto para valores de resistência à compressão estipulados.....	78
Tabela 20 - Acréscimo no consumo de cimento por metro cúbico (kg/m ³) das misturas com pó-de-pedra em relação à mistura empregando composição com 55% de areia de britagem.	80

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	51
Equação 2.....	51
Equação 3.....	51

RESUMO

Diante do enorme consumo de agregados para concreto no cenário mundial hoje, surgem diariamente novos estudos e tecnologias que visam seu aperfeiçoamento. A carência de fontes de boa qualidade próximas dos centros consumidores, a implantação de leis ambientais restritivas e a grande variabilidade apresentada pelas areias naturais contribuíram para que os agregados miúdos de britagem conquistassem um grande espaço no mercado de agregados. Os agregados miúdos de britagem são amplamente comercializados, mas geralmente demandam processos de beneficiamento para se adequar às condições de desempenho exigidas, especialmente em função da grande quantidade de material pulverulento que apresentam, visando o melhor desempenho em concretos convencionais, principalmente de alta resistência. Todavia, essa parcela removida pode não ser tão prejudicial no caso de concretos com consumos de cimento mais baixos. Visando atenuar as inconveniências de se utilizar um agregado isoladamente, realiza-se na maioria dos casos a composição entre areia natural e agregado miúdo de britagem, escolha mais adequada sob os pontos de vista técnico e econômico. Desta forma, os produtores de agregados de britagem poderiam adicionar areia natural ao agregado miúdo de britagem no processo de produção em teores ideais, produzindo composições de agregados com características otimizadas para diferentes aplicações. Diante do exposto, este trabalho avaliou experimentalmente o desempenho de composições com diferentes teores de areia natural com areia de britagem e com pó-de-pedra. Ambos os materiais de britagem são oriundos do mesmo processo de cominuição de rochas, porém com diferentes teores de material pulverulento e granilha (fração retida entre as malhas 2,36 mm e 4,8 mm). O trabalho teve como objetivo verificar o desempenho de agregados miúdos de britagem com maior quantidade de pulverulento, ou seja, verificar o desempenho do pó de pedra sem nenhum beneficiamento, em concretos com resistências à compressão abaixo de 35 MPa, e encontrar as melhores proporções entre esses materiais para produção de concretos com relações água/cimento altas e baixas através de ensaios preliminares em argamassa e posteriormente em concreto. Nos estudos em argamassa foram avaliados o índice de consistência, a perda de fluidez com 30 e 60 minutos, a massa específica e a resistência à compressão. Em concreto foram avaliados o abatimento de tronco de cone com 30 minutos, a massa específica e resistência à compressão.

Os resultados dos estudos revelaram que a composição de 55% de areia de britagem com 45% de areia natural fina apresentou bons resultados em concreto quanto à demanda de água para chegar à faixa de abatimento desejada, resistência à compressão e consumo de cimento e, portanto, é recomendada para emprego em concretos de altas e baixas resistências. A hipótese de se empregar composições entre areia natural e agregados miúdos de britagem com pouca ou nenhuma redução no teor de material pulverulento no preparo de concretos de resistência mais baixa foi rejeitada. No cálculo do consumo de cimento para diferentes resistências, as misturas com pó-de-pedra testadas exibiram elevados consumos de cimento por metro cúbico, mesmo para classes de resistência mais baixas.

Palavras chave: composição de agregados, areia de britagem, pó-de-pedra, concreto.

1 INTRODUÇÃO

O consumo mundial de concreto é de aproximadamente 11 bilhões de toneladas por ano. Como um concreto convencional tipicamente é composto por aproximadamente 80% de agregados em massa, a produção mundial de agregados para concreto pode ser estimada em 9 bilhões de toneladas (MEHTA E MONTEIRO, 2006).

A enorme demanda por agregados para concreto no cenário mundial faz com que seja crescente a busca pela melhoria da qualidade e redução de custos desse produto. Em consequência disso, surgem diariamente novos estudos e tecnologias que visam o aperfeiçoamento dos agregados que compõem misturas de concreto e argamassa.

Existe atualmente também uma preocupação especial quanto à questão ecológica e ambiental. Seguindo essa tendência, tem se tornado mais comum a implantação de leis ambientais restritivas e incremento da fiscalização com relação à extração de areias naturais. Somado a isso, o aumento nos custos de transporte da areia natural em função da carência de fontes de boa qualidade nas imediações dos grandes centros consumidores contribuiu para que os agregados miúdos de britagem conquistassem um grande espaço no mercado de agregados (SBRIGHI NETO, 2005).

Os agregados miúdos de britagem, que outrora já foram considerados resíduos ou subprodutos das pedreiras e hoje são amplamente comercializados, geralmente demandam processos de beneficiamento para que possam se adequar às condições de desempenho exigidas, especialmente em função da grande quantidade de material pulverulento que apresentam, visando o melhor desempenho do agregado em concretos convencionais de baixa relação água/cimento (alta resistência à compressão). Todavia, essa parcela removida pode não ser significativamente prejudicial no caso de concretos com relações água/cimento mais elevadas, como também nos concretos autoadensáveis.

A grande variabilidade apresentada pelas areias naturais em suas características é outro fator responsável pelo crescente interesse no emprego dos agregados miúdos de britagem, uma vez que esses possuem distribuições granulométricas mais constantes e baixas quantidades de impurezas (DAMO, 2011). Neville (1997) afirma que a constância da qualidade de um agregado pode ser mais importante que se ter um bom agregado.

Apesar disso, a substituição total de agregados miúdos naturais por agregados miúdos de britagem tem encontrado alguns obstáculos: o elevado teor de material pulverulento e os grãos angulosos e ásperos dos agregados miúdos de britagem (PRUDÊNCIO JR et al,1995). A parcela fina tende a conduzir a mistura à uma maior demanda de água, enquanto a fração mais grossa propicia misturas ásperas e pouco trabalháveis. As areias naturais habitualmente apresentam baixo teor de material pulverulento e grãos com forma arredondada e de textura superficial lisa. Essas características das areias naturais fazem com que a demanda de água para uma dada trabalhabilidade do concreto seja menor que no caso dos agregados miúdos de britagem, acarretando a redução do consumo de cimento e conseqüentemente diminuindo o custo da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

Para se esquivar das inconveniências da substituição total do agregado miúdo de britagem ao natural, realiza-se, na maioria dos casos a composição entre esses agregados, com o objetivo de formar um agregado miúdo mais adequado sob os pontos de vista técnico e econômico.

Com base nisso, as pedreiras poderiam em seu processo de produção fazer a adição de areia natural ao agregado miúdo de britagem nos teores ideais, visando produzir composições de agregados com características otimizadas para diferentes aplicações.

Neste contexto, este trabalho se propõe a analisar experimentalmente o desempenho em concreto de composições com diferentes teores de areia natural e dois agregados miúdos de britagem: uma areia de britagem em um pó-de-pedra. Ambos os materiais são oriundos do mesmo processo de cominuição de rochas, porém sua principal diferença está no teor de material pulverulento. Objetiva-se no trabalho encontrar as melhores proporções entre esses materiais para produção de concretos com relações água/cimento altas e baixas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho possui como objetivo principal avaliar o desempenho de concretos com diferentes composições de agregado miúdo natural e de britagem, como também o desempenho da composição com e sem a fração mais fina do agregado miúdo de

britagem, visando encontrar as melhores proporções entre esses materiais para produção de concretos com altas e baixas relações água/cimento.

2.2 Objetivos específicos

Destacam-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Caracterização dos agregados;
- Elaboração das diferentes composições de agregados miúdos, a partir do agregado miúdo natural e agregados miúdos de britagem com e sem a remoção dos finos;
- Produção de argamassas para avaliação das diferentes composições de agregados;
- Produção de concretos para determinação do teor de argamassa a ser utilizado nos ensaios seguintes;
- Produção de concretos para avaliação das composições que obtiveram melhor desempenho em argamassa;
- Verificar o desempenho de agregados miúdos de britagem com maior quantidade de pulverulento em concretos com resistências à compressão abaixo de 35 MPa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definições

3.1.1 Agregados

Agregados são materiais granulares, sem definição de forma ou volume, com dimensões e propriedades consideradas adequadas para as obras de engenharia (SBRIGHI NETO, 2011). A ABNT NBR 7211:2009 divide os agregados em miúdos e graúdos. Segundo a norma, os agregados miúdos são aqueles que ficam retidos entre as malhas 0,150 mm e 4,75 mm. Os graúdos, por sua vez, possuem os grãos passantes na malha de 75 mm e retidos na malha de 4,75 mm.

3.1.2 Areia natural

Não há um consenso entre os autores quando se trata da classificação dos agregados quanto à origem. Todavia alguns autores, como Sbrighi Neto (2011), definem agregados naturais como derivações de rochas presentes na crosta terrestre que sofreram ações de intemperismo, como variação de temperatura, dissolução de compostos solúveis e ciclos de umedecimento e secagem, entre outros, sendo encontrados na natureza prontos para o uso sem qualquer beneficiamento senão lavagem e classificação. Os sedimentos formados são transportados pela água ou vento, ou permanecem no próprio local em que se formaram. Como exemplos podem ser citados areia de rio, pedregulho, areia de cava, entre outros.

Neste trabalho, refere-se por areia natural ao agregado miúdo quartzoso de origem natural encontrados em leitos de rio, cava, solo de alteração ou depósitos eólicos.

3.1.3 Agregados miúdos de britagem

Segundo Sbrighi Neto (2011), agregados de britagem provém de processos de cominuição de rochas. Na britagem, os blocos de rochas são reduzidos até atingirem tamanho adequado ao uso. Numa etapa posterior da produção é feita a separação granulométrica por peneiramento das frações.

O agregado passante na última peneira da classificação, normalmente de abertura nominal 4,75 mm, é denominado pó-de-pedra.

Esse material pode conter também uma pequena parcela retida na referida peneira (DAMO 2011; WEIDMANN, 2008).

Esse material é, muitas vezes, tratado como resíduo, formando grandes estoques nas plantas das pedreiras. Entretanto, quando devidamente beneficiado através do uso de peneiras, ar ou água para ajuste da curva granulométrica, pode-se produzir a areia de britagem, agregado com melhor aceitação para concreto. Esse agregado contém menos material pulverulento (passante na peneira de malha 0,0075 mm) e comumente é removida também parte do material grosseiro, geralmente entre as malhas 2,36 mm e 4,8 mm, à qual se dá o nome de granilha (DAMO 2011; WEIDMANN, 2008).

O processo de britagem será abordado mais detalhadamente no item 3.3.1.

3.2 Agregados para concreto

Agregados são materiais granulares, sem definição de forma ou volume, com dimensões e propriedades consideradas adequadas para as obras de engenharia (SBRIGHI NETO, 2011).

Cerca de 60 a 80% do volume total do concreto é ocupado pelos agregados, volume esse que engloba tanto os grãos quanto os miúdos. Todavia, não era dada muita atenção aos efeitos que esses causavam nas propriedades dos concretos, uma vez que eram tratados como materiais inertes empregados apenas para enchimento. Isso se dava porque seu custo é bastante inferior ao do cimento, e dessa forma, seu emprego diminui o custo da produção de um dado volume de concreto. Além disso, sua abundância e boa qualidade contribuíam para que fossem considerados materiais de menor importância entre os constituintes da mistura cimentícia. Entretanto, graças à aplicação do concreto em larga escala, já é amplamente aceito que os agregados possuem propriedades que influenciam de forma direta no seu desempenho (SBRIGHI NETO, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2006; NEVILLE, 1997).

Neville (1997) afirma que os agregados promovem ao concreto diversas vantagens técnicas como maiores durabilidade e estabilidade volumétrica em relação à pasta de cimento. Mehta e Monteiro (2006) ainda acrescentam que os agregados têm um papel essencial no custo e trabalhabilidade de misturas de concreto.

Segundo Sbrighi Neto (2011) e também conforme já citado, o esgotamento das jazidas de areia natural de qualidade próximas aos centros consumidores, paralelamente à crescente competitividade comercial entre produtores de concreto e ao aumento dos custos de

transporte, somados ainda à maior rigidez e fiscalização das leis ambientais devidas à conscientização da sociedade fizeram com que os agregados de britagem obtivessem espaço no mercado de agregados para concreto.

Outros fatores que contribuíram para a crescente aceitação da areia de britagem no mercado, especialmente pelas centrais dosadoras de concreto, foram as maiores constâncias da granulometria e da ausência de impurezas, quando comparada ao agregado miúdo natural (DAMO, 2011).

Portanto, conhecer as características dos agregados e suas influências no concreto é de fundamental importância para se obterem os melhores desempenho técnico e resultado econômico possíveis.

3.2.1 Características dos agregados miúdos

Devido à elevada porcentagem que os agregados representam no concreto, suas características influenciam diretamente nas propriedades deste, assim como ocorre nas argamassas, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Segundo Damo (2011), os agregados miúdos correspondem a cerca de 45% do volume total de agregados.

Como os agregados são originados a partir de uma grande rocha-mãe, muitas das suas propriedades dependem inteiramente das propriedades dela, como por exemplo, massa específica, dureza e resistência. Em contrapartida, algumas propriedades encontradas nos agregados não se fazem presentes nas rochas-mãe, tais quais forma e tamanho da partícula, entre outras (NEVILLE, 1997).

Segundo Sbrighi Neto (2000), curva granulométrica, quantidade de impurezas, estabilidade dos grãos, resistência mecânica, forma, textura superficial, massa específica, absorção, dureza e módulo de elasticidade dos agregados são propriedades que devem ser observadas no intuito de se obter um concreto de qualidade, e além de interferir tecnicamente, são economicamente importantes.

Propriedades de um concreto no estado fresco, como trabalhabilidade, acabamento, facilidade de bombeamento, exsudação e segregação são diretamente influenciadas pela textura superficial, forma e distribuição granulométrica dos agregados. Além disso, essas características dos agregados atuam também na resistência mecânica, módulo de elasticidade, permeabilidade, densidade, retração, fluência e durabilidade no estado endurecido do concreto (LAFRENZ, 1997 apud QUIROGA; FOWLER, 2004).

As areias naturais de origem eólica são formadas por grãos arredondados de superfície polida. Dessa forma, para uma determinada trabalhabilidade desejada, permite redução no consumo de água do concreto fresco, agindo como agente de plasticidade (SBRIGHI NETO, 2011).

No caso dos agregados miúdos de britagem, algumas de suas características têm favorecido sua utilização, conforme já citado. Por outro lado, seu uso pode ser entravado por algumas de suas características, como seus altos teores de material pulverulento, distribuição granulométrica e forma angulosa das partículas, muitas vezes lamelares. Essas podem ser danosas para o concreto, elevando o consumo de água para manutenção da trabalhabilidade, com conseqüente aumento do consumo de cimento para a mesma resistência. O bombeamento, acabamento e trabalhabilidade do concreto podem ser prejudicados pela aspereza dos grãos desse agregado, que eleva o atrito interno das partículas sólidas da mistura. Atualmente, o uso de aditivos para concreto tem abrandado algumas dessas desvantagens (DAMO, 2011), tais quais os aditivos plastificantes e os superplastificantes.

3.2.1.1 Composição granulométrica

Comumente chamada de granulometria, a composição granulométrica é a proporção relativa entre os grãos que compõem um agregado, comumente expressa em termos percentuais (PRUDÊNCIO, 2007). Neville (1997) afirma que na prática, essa é uma análise que consiste basicamente na divisão de uma amostra do agregado em diferentes frações, onde cada fração contém partículas com dimensões compreendidas dentro de limites específicos, os quais são dados pela abertura das malhas de peneiras padronizadas.

No Brasil, a ABNT NBR NM 248:2003 regulamenta o ensaio de determinação da composição granulométrica, no qual são utilizadas peneiras com aberturas quadradas, dispostas de modo que a malha da peneira seguinte tenha abertura de lado duas vezes maior que a anterior (PRUDÊNCIO, 2007). Na Tabela 1 a seguir são mostradas as aberturas nominais das peneiras da série normal e intermediária, dadas pela ABNT NBR 7211/2009.

Tabela 1 - Aberturas nominais do conjunto de peneiras padronizadas pela ABNT NBR 7211/2009.

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-

A determinação da quantidade de material pulverulento, passante na peneira 75 μm , através de lavagem habitualmente é feito antes do ensaio descrito acima, e seus procedimentos são prescritos pela ABNT NBR NM 46:2003.

Os resultados obtidos na análise granulométrica podem ser representados em tabelas ou gráficos, os quais são chamados de curvas granulométricas.

Quiroga e Fowler (2004) afirmam que a distribuição granulométrica tem grande influência na durabilidade de um concreto, porque essa propriedade é afetada pela porosidade da mistura, que por sua vez está intimamente ligada à quantidade de vazios na mistura de agregados. Para Mehta e Monteiro (2006), a trabalhabilidade e o custo do concreto são os principais fatores afetados pela granulometria dos agregados, dentre diversas propriedades que também sofrem sua influência.

Areias muito finas elevam a demanda de água do concreto, aumentando também a demanda de cimento para uma mesma resistência, assim aumentando o custo. Por outro lado, agregados miúdos mais grossos tornam a mistura áspera e a deixam com pouca trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além disso, o uso de areias excessivamente grossas pode resultar em segregação. Diversas vezes são utilizados teores maiores de pasta ou argamassa para suprir suas deficiências. Já as areias finas também propiciam misturas bastante coesivas e podem demandar um teor de argamassa mais baixo para obter coesão e trabalhabilidade satisfatórias, entretanto seu uso, da mesma forma, pode resultar em segregação (WEIDMANN, 2008). Damo (2011) afirma que se deve procurar um equilíbrio entre as vantagens e desvantagens obtidas com o uso das diferentes granulometrias, visando à solução mais satisfatória considerando a economia e a qualidade do concreto.

Neville (1997) destaca que não há uma curva granulométrica ideal, uma vez que além dos requisitos físicos do agregado, é necessário considerar seu aspecto econômico. Assim, o autor defende que não se podem impor limites estreitos à granulometria. Ainda segundo o autor, a granulometria desejada é regida pelo volume relativo ocupado pelos agregados no concreto, pela trabalhabilidade da mistura, pela tendência à segregação e também pela área superficial dos agregados, a qual determina a demanda de água para molhar todas as partículas sólidas.

Dessa forma, atualmente é comum a composição entre dois ou mais agregados miúdos, buscando-se uma distribuição granulométrica mais adequada e redução do custo do concreto (WEIDMANN, 2008).

Mehta e Monteiro (2006) defendem que agregados que não contenham uma grande carência ou excesso de qualquer tamanho de partícula produzem misturas mais trabalháveis e econômicas. Quando os agregados possuem essa característica, diz-se que sua granulometria é contínua, e segundo Farias e Palmeira (2007), sua curva granulométrica possui o formato de “S” alongado na horizontal.

Para que uma mistura seja satisfatoriamente trabalhável, deve conter uma quantidade suficiente de partículas inferiores a 300 μm . Como o cimento está incluso nessa parcela, para uma dada trabalhabilidade, misturas com mais cimento precisam de menos areia que uma mistura com cimento em menor quantidade. (NEVILLE, 1997).

3.2.1.2 Módulo de finura

Módulo de finura é o nome dado ao parâmetro que mede, através de um único valor, o quão grosso ou fino é um agregado. Pode ser obtido se dividindo por 100 a soma dos percentuais acumulados de agregados retidos em cada uma das peneiras da série normal. É importante destacar que quanto mais grosso é o agregado, maior o módulo de finura do mesmo (MEHTA; MONTEIRO, 2006; NEVILLE, 1997; ABNT NBR 7211:2009).

Segundo Neville (1997), o módulo de finura pode ser interpretado como a ordem da peneira, começando-se pela mais fina, cujo tamanho de abertura da malha representa o tamanho médio das partículas do agregado. Popovics (1966) apud Neville (1997) mostrou que na verdade se trata da média logarítmica da distribuição do tamanho de partículas.

Neville (1997) ainda acrescenta que um número como único parâmetro é insuficiente para representar uma distribuição granulométrica, podendo um mesmo valor representar infinitas distribuições diferentes. Todavia, o autor ressalta que essa pode ser uma maneira de avaliar variações em agregados provenientes da mesma fonte e que pode inclusive apontar um provável comportamento em concreto de um agregado de certa granulometria.

3.2.1.3 Teor de material pulverulento

Material pulverulento, ou microfinos, é como costuma ser chamada a fração passante pela peneira de malha 0,075 mm do agregado. Conforme já mencionado, no Brasil, a determinação do teor de material pulverulento é regulamentada pela ABNT NBR NM 46:2003.

Muitos autores e a própria ABNT NBR 7211:2009 o tratam como uma substância nociva presente nos agregados. Neville (1997) alega que altos teores desse material devem ser evitados em função da sua elevada superfície específica, que faz com que a quantidade de água necessária para molhar as partículas na mistura aumente. Para Sbrighi Neto (2011), além de afetar a trabalhabilidade, o excesso de material pulverulento pode provocar fissuração no concreto. Por outro lado, segundo Damo (2011), alguns estudos têm demonstrado que, quando respeitados determinados limites, o material pulverulento pode até contribuir para melhorias no concreto.

Conforme mencionado anteriormente, Neville (1997) estabelece que as partículas passantes nas peneiras 300 μm e 150 μm são importantes para que se obtenham misturas com trabalhabilidade

adequada. Diante disso, pode-se observar que concretos com baixo consumo de cimento podem demandar um agregado com maior teor de finos. Da mesma forma, agregados com poucos finos podem ser utilizados em concretos mais ricos em cimento.

A distribuição dos finos, especialmente os de certas argilas, dentro da matriz do agregado também é importante. Quando forma uma fina camada que recobre os grãos de areia, acaba por ser muito mais prejudicial à resistência do concreto do que quando espalhada em todo o material, porque reduz a aderência dos grãos com a pasta de cimento (PRUDÊNCIO, 2007).

A ABNT NBR 7211:2009 limita os percentuais máximos aceitáveis de material pulverulento nos agregados miúdos em 3% em relação à massa desse agregado para concreto submetido a desgaste superficial e 5% para os demais concretos. Entretanto a própria norma traz uma observação que quando esse material for constituído exclusivamente de grãos gerados no processo de britagem da rocha, os limites podem ser alterados para 10 e 12% respectivamente.

Prudêncio (2007) afirma que essa maior tolerância cedida aos agregados de britagem ocorre graças aos grãos angulosos que compõem a areia e à redução do atrito entre partículas promovida pela presença de finos, que favorecem uma maior trabalhabilidade da mistura. O autor ainda acrescenta que os grãos gerados na britagem não são tão finos quanto os comumente encontrados em agregados naturais, de natureza argilosa, que podem até ser expansivos.

3.2.1.4 Dimensão máxima característica

Dimensão máxima característica, segundo a ABNT NBR 7211:2009, é o valor de abertura da malha da peneira na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. A peneira pode ser da série normal ou intermediária e o valor da abertura é dado em milímetros.

Deve-se considerar esse parâmetro porque partículas menores de agregado requerem mais água de amassamento que partículas maiores, para os mesmos consumos de cimento e trabalhabilidade. Isso ocorre porque partículas maiores apresentam menor área específica a ser envolvida. Contudo, agregados com partículas maiores tendem a formar zonas de transição mais fracas contendo mais microfissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A dimensão máxima característica dos agregados miúdos está intimamente ligada à trabalhabilidade da mistura e sua aspereza,

dependendo não só do tamanho das partículas, mas também de quantidade de material mais grosseiro. Quanto aos agregados graúdos, a trabalhabilidade e a resistência à compressão da mistura são influenciadas pela sua dimensão máxima característica, que geralmente acaba por ser limitada devido a algumas condições da peça a ser concretada, como dimensões, espaçamento da armadura e cobrimento; ou outras condições como diâmetro da tubulação da bomba de concreto (WEIDMANN, 2008).

3.2.1.5 Textura superficial e forma dos grãos

É amplamente aceito que a forma e a textura das partículas dos agregados influenciam muito as propriedades de concretos e argamassas. Entretanto, não há um consenso entre os autores no que diz respeito à classificação quanto à forma do agregado.

Mehta & Monteiro (2006) determinam que a forma dos agregados se refere às características geométricas dos grãos, classificando esses quanto à forma como arredondados, angulosos, alongados ou achatados. Segundo os autores, quando a partícula possui espessura relativamente pequena em relação às outras dimensões, diz-se esta é achatada (ou lamelar). Quando o oposto ocorre, chama-se a partícula de alongada.

Partículas de areia de depósitos eólicos ou encontradas em leitos de rios são exemplos de agregados formados por atrito, cujas partículas se tornaram arredondadas através da perda de cantos e arestas. Não obstante, agregados provenientes da britagem de rochas intrusivas geralmente produzem partículas equidimensionais e comumente apresentam arestas e bordas bem definidas, sendo portanto classificados como angulosos. Por sua vez, calcários estratificados, arenitos e folhelhos tendem a produzir fragmentos alongados e achatados (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Segundo Neville (1997), isso acontece porque a forma dos grãos depende de características da rocha-mãe, tais quais resistência mecânica e à abrasão, e quantidade de desgaste sofrido. Também segundo o autor, quando se trata de agregados britados, ainda há a influência do tipo de britador e do processo de britagem.

A ABNT NBR 7225:1993 (cancelada em 2009) definia as dimensões dos grãos como comprimento, a distância de dois planos paralelos que possam conter o agregado, em sua maior dimensão; largura, o diâmetro da menor abertura circular através da qual o

agregado possa passar; e espessura, a distância mínima de dois planos paralelos que possam conter o agregado.

Essa mesma norma citada classificava os grãos de pedregulho e areia baseada na relação de suas dimensões como alongados, esféricos, lamelares e discóides. Por sua vez, pedra britada, pedrisco e pó-de-pedra tinham seus grãos classificados como alongados, cúbicos, lamelares e quadráticos pela norma. A norma ainda classificava os grãos de acordo com seus cantos ou arestas, que podem ser angulosos ou arredondados. Eram considerados angulosos quando apresentam arestas vivas e angulosidade nos cantos; e arredondados quando possuem cantos torneados e não exibem arestas.

Segundo Neville (1997), não existem limites estabelecidos para a quantidade de partículas alongadas ou lamelares, todavia essas partículas são indesejáveis e não devem exceder 10 a 15% da massa de agregados graúdos. Da mesma forma, Mehta e Monteiro (2006) defendem que essas partículas contribuem para a produção de concretos ásperos e por isso devem ser evitadas ou limitadas a 15% em relação à massa total de agregados.

Para compensar a maior área específica e o alto travamento das partículas, é comum o aumento da demanda de pasta de cimento da mistura conforme mais ásperas, angulosas e alongadas forem as partículas do agregado. Assim, é fácil notar a maior influência da forma e textura dos grãos no estado fresco do concreto em relação ao endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Ao grau de aspereza ou lisura das partículas se dá o nome de textura superficial. Assim como a forma dos grãos, essa é uma característica do agregado que depende das características da rocha-mãe, como a dureza, granulação, porosidade, e sua posterior exposição a esforços de atrito (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2006). Essa característica que é avaliada visualmente. Deve-se avaliar a aspereza dos grãos, sendo a avaliação regulamentada pela ABNT NBR 7389:2009.

Neville (1997) e Mehta e Monteiro (2006) concordam que durante as primeiras idades, a resistência do concreto, em especial à tração, sofre grande influência da textura superficial do agregado. Superfícies mais ásperas parecem contribuir para o surgimento de aderência física entre a pasta de cimento e o agregado. Esse efeito perde sua importância em idades maiores, quando as ligações químicas entre o agregado e a pasta ficam mais fortes.

De acordo com o que já foi referido, a trabalhabilidade e consequentemente a demanda de água de concretos são influenciadas

pela forma e textura dos seus agregados. Porém, Galloway (1994) apud Quiroga & Fowler (2004) afirma que o efeito da textura superficial é menos importante que os da forma e da distribuição granulométrica.

3.3 Agregados miúdos de britagem

3.3.1 Produção de agregados miúdos de britagem

De acordo com Sbrighi Neto (2011), o processo de produção de agregados britagem é realizado em três etapas: o desmonte, a britagem e o beneficiamento. Inicialmente na pedreira, é feita a remoção da camada de rocha descomposta e solo situada sobre o afloramento de rocha, processo esse conhecido como decapagem. A seguir, inicia-se o desmonte, fragmentando a rocha com o uso de explosivos inseridos em perfurações devidamente espaçadas. Quando necessário, submetem-se a um fogo secundário os blocos inaptos para serem carregados nos britadores (SBRIGHI NETO, 2011).

Figura 1 - Material fragmentado durante o desmonte em pedreira na Grande Florianópolis.



Durante a britagem, os blocos são reduzidos novamente, e de maneira sucessiva. Inicia-se pelo britador primário, que pode ser giratório ou de mandíbula, o qual reduz a dimensão dos blocos para algumas dezenas de milímetros. Dando sequência, surgem os britadores secundários, que podem ser de mandíbula ou de cone. Os britadores

terciários, por sua vez, podem ser de cone ou de eixo vertical de impacto, esse último conhecido também como VSI (PRUDÊNCIO, 2007; SBRIGHI NETO, 2011; DAMO, 2011). Três reduções costumam ser suficientes, mas em alguns casos pode haver inclusive a presença de um britador quaternário, especialmente quando se deseja obter uma granulometria mais fina (WEIDMANN, 2008).

Figura 2 - Britador tipo cone empregado como britador secundário em uma pedreira na Grande Florianópolis.



Os britadores tipo cone fragmentam as rochas através do movimento oscilatório de uma peça no formato de tronco de cone (denominada revestimento) sobre as paredes fixas do britador (chamadas de manto), de formato semelhante. As partículas originadas nesse processo costumam apresentar forma lamelar. Já nos britadores tipo VSI, as partículas são fragmentadas ao serem arremessadas contra um anteparo metálico ou mesmo contra o próprio material, produzindo grãos mais cúbicos (DAMO 2011). Segundo Sbrighi Neto (2011), além da forma mais equidimensional, os britadores tipo VSI também são responsáveis por produzirem partículas com textura superficial menos áspera.

Dando continuidade ao processo de britagem, é feita a separação granulométrica por peneiramento das frações obtidas no processo anterior (SBRIGHI NETO, 2011). É nessa subdivisão que aparece o pó-de-pedra, nome comercial dado ao material passante pela peneira de abertura 4,75 mm, podendo englobar também uma pequena quantidade de material retida nessa peneira. A quantidade de pó-de-pedra produzido é maior quanto maior for o número de etapas de redução do material (DAMO, 2011; WEIDMANN, 2008).

Embora o pó-de-pedra tenha aplicações como em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), por exemplo, a demanda no seu estado natural para uso em concretos de cimento Portland é muito pequena. Dessa forma, esse material possui baixo valor agregado e acaba sendo tratado muitas vezes como rejeito. Por isso, comumente forma grandes estoques nas plantas das pedreiras. Além disso, esse material é considerado um passivo ambiental e implica o aumento de custos financeiros em função dos estoques e remanuseio das pilhas.

Diante disso, a maioria das pedreiras retira parte do material pulverulento presente no pó-de-pedra, principalmente para atender à normalização e aos requisitos de desempenho. O item 3.3.2 trata dos principais métodos empregados pelas pedreiras para a remoção do material pulverulento. Além disso, é comum a remoção da fração grosseira (acima de 2,36 mm), que pode produzir concretos ásperos (WEIDMANN, 2008; GONÇALES et al., 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Por outro lado, o interesse das pedreiras é manter a máxima quantidade possível de material pulverulento na areia de britagem (WEIDMANN, 2008).

Isso se deve ao fato de que a parcela fina removida do pó-de-pedra geralmente não recebe a destinação adequada, e acarreta a formação de estoques no pátio das pedreiras. Esses estoques ocasionam problemas operacionais para as pedreiras, pois costumam ocupar grandes áreas. Devem-se considerar também os custos relacionados à remoção do material pulverulento do pó-de-pedra. Além disso, de acordo com Damo (2011), quanto menor o produto final no processo de britagem, maior é seu custo de produção. Ou seja, a fração removida, agora sem valor econômico, consiste em um material que demandou um custo considerável durante sua produção, ao passar por um elevado número de processos de cominuição.

Atualmente, existe ainda uma grande preocupação com relação à estocagem desse material, porque também se trata de um passivo ambiental. As chuvas e o vento são agentes que carregam as partículas

desse material e, assim, poluem água e ar. Devido aos motivos citados, há um crescente interesse na tentativa de se utilizar a máxima quantidade possível desse material. A forma mais simples de empregar o material pulverulento e conseqüentemente reduzir seus estoques nas plantas das pedreiras é mantê-lo em maiores teores na areia de britagem. Inclusive, pode-se dizer que, para determinadas aplicações, o beneficiamento que o pó-de-pedra recebe nem mesmo seria necessário. O item 3.3.3 retoma esse assunto.

No item seguinte são apresentados alguns equipamentos mais frequentemente utilizados para retirar o material pulverulento do pó-de-pedra.

3.3.2 Métodos de remoção de material pulverulento

Existem diversos tipos de equipamentos que são empregados com a finalidade de remover os microfinos dos agregados, e a sua maioria utiliza água como meio de remoção. Damo (2011) diz que o ajuste do teor de material pulverulento através da água já é feito desde o início do século XX, e esse foi baseado na lavagem das areias naturais pela correnteza dos rios.

Os lavadores de rosca, também conhecidos como classificadores espirais, são equipamentos simples comumente empregados com esse objetivo. O equipamento é formado por um tanque inclinado e uma rosca helicoidal. No tanque, as partículas menores ficam suspensas em água devido à sua turbulência, causada pelo movimento da rosca fornecimento e injeção de água. Enquanto isso, as partículas maiores decantam e são arrastadas de forma ascendente pela hélice parcialmente imersa. A hélice as conduz para uma correia transportadora, que por sua vez, as levará a uma pilha de estocagem. As partículas finas são removidas do tanque através do transbordo de água. A dimensão das partículas a serem removidas depende da quantidade de água utilizada (DAMO, 2011; WEIDMANN, 2008).

Figura 3 - Lavador de rosca (METSO MINERALS, 2005).

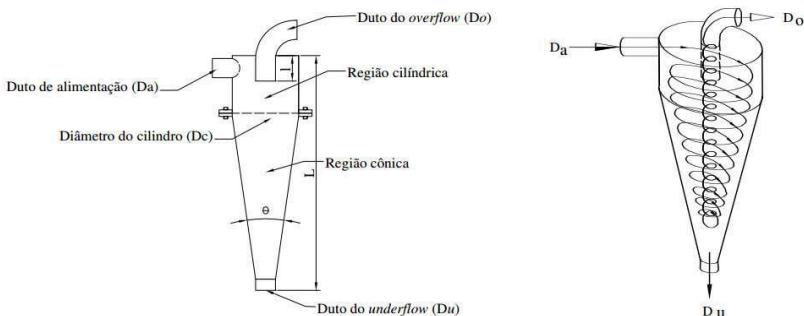


Outro equipamento empregado com a finalidade de remover o material pulverulento dos agregados de britagem é a roda desaguadora, chamada popularmente de roda d'água. Seu funcionamento é muito semelhante ao dos lavadores de rosca. Durante o processo, o agregado é colocado em um tanque de água para decantar, onde é escavado pelas caçambas existentes na roda. A agitação da água causada por esse movimento contribui para desprender os microfios e outros resíduos dos demais grãos. O material coletado pelas caçambas é desaguado às telas de peneiras existentes no fundo das mesmas e em seguida é conduzido à uma calha de saída. A água que carrega as partículas finas transborda através de um vertedor (METSO MINERALS, 2005; WEIDMANN, 2008). De acordo com Damo (2011), esse é o equipamento predominante dentre as pedreiras que optam por sistemas úmidos para ajuste do teor de material pulverulento.

Figura 4 - Roda desaguadora (METSO MINERALS, 2005).



Figura 5 - Funcionamento de um hidrociclone (CRUZ, 2008).



Os aero-separadores estão entre os principais equipamentos que utilizam processos via seca para a supressão do material pulverulento. Basicamente, o equipamento é formado por um rotor que faz girar horizontalmente pás de inclinação ajustável. Sobre as pás é despejado agregado miúdo, que conseqüentemente é dispersado. Devido à força centrífuga, as partículas maiores são arremessadas radialmente, concentrando-se próximas às paredes do equipamento. As partículas mais finas são conduzidas por uma corrente de ar a sair pela parte superior central (DAMO, 2011). Weidmann (2008) destaca que embora

possuam elevado custo financeiro, os aero-separadores apresentam boa eficiência na separação de partículas. Damo (2011) ainda acrescenta que a produtividade desse equipamento é considerada baixa.

Outros equipamentos via seca amplamente conhecidos são os separadores ciclônicos (análogos aos hidrociclones), câmaras gravitacionais e filtros de mangas. Em alguns casos, é empregado o simples peneiramento do material em uma malha de menor abertura na separação granulométrica durante a produção do agregado, especialmente graças ao seu baixo custo. Entretanto, esse método possui a desvantagem de sua eficiência ser fortemente prejudicada pela umidade do material no momento do peneiramento, uma vez que as partículas mais finas ficam aderidas às maiores. Damo (2011) ressalta que as inconveniências relacionadas ao material pulverulento úmido e as leis ambientais são as duas principais razões responsáveis pela crescente preferência e procura por equipamentos via seca em relação aos via úmida. A autora também destaca que nos processos via úmida, parte dos microfinos pode aderir na superfície dos grãos maiores em função da umidade, possibilitando problemas de aderência entre a pasta de cimento e o agregado.

3.3.3 Aplicação em concretos e argamassas de cimento Portland

O alto teor de material pulverulento e os grãos ásperos e angulosos dos agregados miúdos de britagem são os principais fatores que dificultam a substituição total desse material aos agregados miúdos naturais. Isso ocorre porque a forma angulosa e a superfície áspera dos grãos acarretam aumento do atrito interno entre partículas, além de tenderem a aumentar o volume de vazios. Já a elevação da demanda de água é consequência da presença de altos teores de material pulverulento, que possui uma grande superfície específica (PRUDÊNCIO JR et al,1995; DAMO, 2011). Outro fator que prejudica o emprego de 100% de agregado miúdo de britagem é a falta de continuidade na distribuição granulométrica desses agregados.

Embora haja essas limitações, é crescente a utilização de agregados miúdos de britagem, especialmente em substituição parcial à areia natural. Da mesma forma, vem crescendo o número de estudos que visam avaliar o emprego desse agregado, em substituição parcial ou total, em concretos e argamassas.

Pode-se citar como exemplo o estudo de Nogueira et al (2005) apud Weidmann (2008). Nele, foram avaliados os desempenhos em argamassa de nove agregados miúdos diferentes: duas areias naturais e

sete areias de britagem. Na comparação se mantiveram constantes os traços em volume, e a quantidade de água foi ajustada para uma dada consistência. Os resultados do estudo revelaram resistências à compressão das misturas com areia de britagem superior a das misturas contendo areia natural.

Esse fato pode ser explicado. Segundo Damo (2011), as areias de britagem possuem microfinos que atuam como filer, minimizando a quantidade de vazios, que desta forma, contribuem para a redução do volume de pasta de cimento. Segundo a autora ainda, o consumo de cimento também interfere no desempenho da areia de britagem, pois quando essa apresentar um alto teor de material pulverulento, beneficiará concretos com baixos consumos de cimento, preenchendo vazios e possivelmente refinando poros. Tais comportamentos conduzem a mistura a maiores resistências. Quando o consumo de cimento da mistura e o teor de material pulverulento da areia forem elevados, a grande quantidade de materiais finos pode ser prejudicial para a resistência, por requerer mais água para uma trabalhabilidade constante. Para o caso de concretos de resistência à compressão entre 20 e 30 MPa, muito comumente empregadas, esses finos, a princípio, são pouco prejudiciais.

No caso de concretos autoadensáveis, a utilização de agregados miúdos de britagem também pode ser benéfica. Segundo Efnarc (2002) apud Tutikian & Dal Molin (2008), o concreto autoadensável deve possuir fluidez, habilidade passante (relacionada à coesão) e resistência à segregação. Essas propriedades podem ser alcançadas se utilizado um volume mínimo de finos. Assim, o emprego de agregados miúdos de britagem, especialmente em composição com areia natural fina, contribui para que seja atingido esse volume de finos necessário, diminuindo a demanda de outras adições minerais ou aditivos modificadores de viscosidade. Devido ao maior teor de material pulverulento, o uso do pó-de-pedra pode ser ainda mais vantajoso.

Atualmente, visando contornar as inconveniências de se empregar 100% de areia de britagem, é cada vez mais comum a composição com a areia natural, procurando-se obter um agregado miúdo mais adequado técnica e economicamente. Esse assunto é melhor tratado no item a seguir.

3.3.4 Composição com areia natural

Os agregados miúdos de britagem costumam apresentar elevada quantidade de material retido nas malhas 1,18 mm e 2,36 mm, menor

quantia de grãos entre 150 μm e 600 μm , e maior teor de material pulverulento em relação à areia natural. Esses motivos contribuem para que seja feita a composição do agregado miúdo de britagem com a areia natural. Soma-se a isso ainda, o fato dos agregados miúdos de britagem possuírem normalmente forma mais angulosa e lamelar aliada a uma textura rugosa (WEIDMANN, 2008). Segundo CCAA (2008), há tanta diferença entre esses materiais, que as misturas contendo-os serão distintas mesmo quando a distribuição granulométrica for similar.

Deve-se lembrar de que a composição de agregados também é realizada de forma a obter uma distribuição granulométrica mais adequada, diminuindo o teor de vazios na matriz de agregados. Conforme já citado, Mehta e Monteiro (2008) ressaltam que misturas sem falta ou excesso de qualquer dimensão de partículas conduzem a resultados bastante satisfatórios. CCAA (2008) declara que a composição entre agregados miúdos de britagem e areia natural é efetiva na redução do teor de material pulverulento do agregado miúdo total, evitando-se desta forma, as suas inconveniências já referidas.

CCAA (2008) também apresenta que a maioria das usinas dosadoras de concreto que consomem areia de britagem habitualmente a compõe com areia natural, por uma série de razões. Além do que já foi comentado, a forma arredondada, juntamente com a textura lisa dos grãos da areia natural, ajuda a reduzir o atrito entre partículas, o que melhora a trabalhabilidade da mistura sem necessidade de acréscimo de água. Também, em regiões onde a areia de britagem já é produzida em grandes quantidades, a maioria das pedreiras não seria capaz de produzir pó-de-pedra suficiente para abastecer as centrais dosadoras, caso fosse utilizada somente a areia de britagem. Ademais, a composição de agregados é um método bastante simples e economicamente viável de se reduzir o teor de material pulverulento do agregado miúdo total.

Em seu estudo em concretos, Weidmann (2008) concluiu que o aumento do teor de areia natural na composição de agregados miúdos ocasionou queda na resistência à compressão, apesar de mantida a relação água/cimento. Segundo o autor, as partículas arredondadas e lisas da areia natural podem ter dificultado a aderência entre a pasta de cimento e as partículas, dado que essa deriva da área específica e da rugosidade superficial das partículas.

Atualmente, em grande parte dos locais onde é empregada, a composição granulométrica é feita com a escolha dos teores de cada agregado que proporcionem a maior massa unitária compactada (menor teor de vazios), ou uma curva granulométrica melhor enquadrada visualmente na chamada Zona Ótima, estipulada pela ABNT NBR

7211:2009. Nota-se claramente que esse segundo método não contempla algumas características dos agregados, tais quais a forma do grão e sua textura superficial, e portanto, pode não conduzir à composição que propiciaria concretos mais trabalháveis ou economicamente vantajosos. Além do mais, os limites apresentados pela norma foram estipulados com base em estudos empregando areias naturais, e desta forma, podem não ser adequados para as composições.

3.4 O Índice de Fluidiez

Pode-se relacionar o consumo de água para a produção de um dado volume de concreto com o espalhamento obtido no ensaio de fluidiez da argamassa (preconizado pela ABNT NBR 13276:2005). Entretanto, algumas vezes a correlação entre os parâmetros pode ser fortemente prejudicada se os agregados apresentarem grande variação nos valores de módulo de finura, porque o concreto exigirá diferentes teores de argamassa para manter uma dada trabalhabilidade. Essa constatação foi feita por Weidmann (2008) em seus estudos.

Todavia, o autor atentou que, por sua vez, o teor de argamassa dos concretos possuía boa correlação com o módulo de finura do agregado total. Dessa forma, o autor estabeleceu um novo parâmetro: o Índice de Fluidiez, que consiste na razão entre a abertura de uma argamassa na mesa de espalhamento e o módulo de finura do agregado. De posse desse novo índice, o autor obteve boas correlações com o consumo de água por metro cúbico em concreto.

A utilização do Índice de Fluidiez é importante porque maior é o espalhamento de uma argamassa dosada com um determinado agregado quanto menor for a superfície específica do mesmo. A avaliação pelo espalhamento isoladamente prejudica agregados mais finos de duas maneiras distintas: para uma relação água/cimento fixada, haveria um pequeno espalhamento; para um espalhamento fixo, a maior demanda de água pela mistura ocasionaria queda na resistência à compressão. Entretanto, ressalta-se que um agregado fino não é necessariamente inadequado.

Dessa forma, o Índice de Fluidiez é um parâmetro muito utilizado para comparação do desempenho de diferentes agregados miúdos em argamassa, por indicar qual será o comportamento desses em concreto.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

É apresentada neste capítulo a descrição dos materiais empregados nesta pesquisa, bem como a descrição dos procedimentos experimentais adotados no desenvolvimento deste trabalho. O programa experimental foi realizado integralmente no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, do Departamento de Engenharia Civil – ECV, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, com o apoio do Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland – GTec.

A metodologia pode ser subdividida em três etapas principais. A primeira delas é a caracterização e composição dos agregados, seguida pelos ensaios preliminares em argamassa e posteriormente os ensaios em concreto.

4.1 Materiais empregados

Os itens subsequentes descrevem os materiais utilizados no programa experimental deste trabalho.

4.1.1 Cimento

O cimento CP IV-RS classe 32 foi utilizado em todo o trabalho. Sua escolha é justificada por ser o principal tipo de cimento empregado pelas centrais dosadoras de concreto na região Sul do país. Esse material foi armazenado em tambor plástico com tampa de vedação acondicionado em abrigo protegido.

4.1.2 Aditivo

Tanto nos estudos em argamassa, quanto nos estudos em concreto, foi utilizado aditivo plastificante polifuncional produzido pela empresa Grace Brasil Ltda. Sua escolha também se deve por ser o tipo de aditivo para concreto mais comumente adotado pelas centrais dosadoras. O aditivo utilizado foi Mira 7 320 LF, classificado pela ABNT NBR 11768:2011 como aditivo tipo PN e pela ASTM C 494:2010 como tipo A e F.

4.1.3 Água

A água utilizada nos ensaios provinha da rede de abastecimento do LMCC-UFSC.

4.1.4 Agregado graúdo

Os agregados graúdos empregados na etapa dos estudos em concreto provinham da Pedreira Rio Zoadá, de Joinville-SC, e foram fornecidos pela empresa Infracul Infraestrutura. Tratam-se de agregados de origem geológica gnáissica e, segundo a ABNT NBR 7211:2009, de classificação 4,75/12,5 e 9,5/25 (brita 0 e brita 1 respectivamente, segundo versão anterior a 2005 da mesma norma). Em seu processo de britagem, além dos britadores primário e secundário, 100% do agregado graúdo passou por um britador tipo VSI.

4.1.5 Agregados miúdos

Na pesquisa, para obtenção das composições estudadas, foram utilizados três diferentes agregados miúdos. Um deles foi a areia natural, também proveniente da região de Joinville-SC, e dois agregados oriundos do processo de britagem de rocha gnáissica: o pó-de-pedra e a areia de britagem. Esses provieram da mesma jazida dos agregados graúdos supracitados.

Conforme já explanado, tanto a areia de britagem quanto o pó-de-pedra se originam do mesmo processo. Entretanto, nesse caso, no beneficiamento do pó-de-pedra para a produção da areia, uma parcela de material fino é removida ao passar por uma peneira com malha de abertura 0,40 mm disposta a 45° de inclinação.

4.2 Metodologia

4.2.1 Caracterização dos agregados miúdos

Amostras dos agregados miúdos foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 e quanto à dimensão máxima característica e módulo de finura segundo prescrições da ABNT NBR 7211:2009. As amostras também foram

caracterizadas quanto ao teor de material pulverulento segundo critério da ABNT NBR NM 46:2003.

Realizou-se a determinação da massa específica aparente pelo processo do picnômetro, seguindo procedimento semelhante ao recomendado na ABNT NBR NM 52:2009. Entretanto, foi utilizado um picnômetro menor, com volume de aproximadamente 250 cm³.

4.2.2 Composição de agregados miúdos

Para alcançar os objetivos desse trabalho, efetuou-se a composição dos agregados miúdos de britagem com ou sem a remoção da fração fina (pó-de-pedra e areia de britagem) juntamente com diferentes teores de areia natural. Os percentuais de areia natural variaram de cinco em cinco, indo de 25 a 45%. Assim, formaram-se dez composições que tiveram seu desempenho analisado nos ensaios em argamassa. Composições com 50% ou mais de areia natural não foram testadas porque não há interesse por parte das pedreiras em elaborar composições cuja proporção de agregados miúdos de britagem seja inferior à metade. Além disso, o uso de elevados teores de areia natural na composição é contraditório em razão da dificuldade de se encontrar jazidas de areia natural de boa qualidade próximas dos locais de utilização e de outros problemas decorrentes da exploração da areia natural já descritos.

4.2.3 Ensaios em argamassa

Para a realização dos ensaios em argamassa, os agregados foram previamente secos em estufa. Sua pesagem, no entanto, só ocorreu após o resfriamento dos mesmos em sala climatizada (temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$). Após a pesagem, os agregados foram acondicionados em sacos plásticos vedados. O mesmo foi feito com o cimento. Entretanto, a água e o aditivo foram pesados apenas instantes antes do preparo da mistura.

Em seguida, procedeu-se a mistura em misturador mecânico (argamassadeira), obedecendo aos tempos e sequência descritos abaixo:

- 0 s – 30 s: Mistura dos materiais secos
- 30 s – 1 min: Adição de aproximadamente 80% da água;
- 1 min – 2 min: Mistura para homogeneização da argamassa;

- 2 min – 2 min 30s: Pausa para remoção do material aderido na superfície da cuba e colocação do aditivo;
- 2 min 30 s – 4min: Mistura para homogeneização da argamassa com a adição da sobra de água;

Após esse tempo, realizavam-se os ensaios e a moldagem dos corpos de prova.



Figura 6 - Misturador mecânico empregado no preparo das argamassas.

Para cada composição, foram preparadas três argamassas com diferentes traços unitários iniciais, que podem ser observados na Tabela 2. Esses parâmetros se baseiam em estudos e trabalhos já realizados pelo grupo GTec – UFSC. O teor de aditivo se refere à massa de cimento.

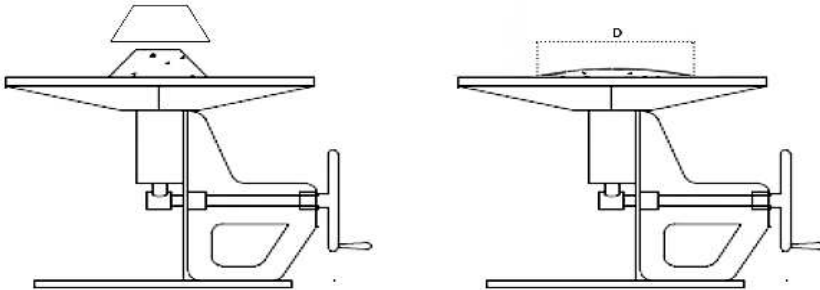
Tabela 2 – Traços iniciais das argamassas

Material	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Cimento	1,0	1,0	1,0
Agregado miúdo	2,1	3,0	3,9
Água	0,44	0,53	0,63
Aditivo	0,60%	0,60%	0,60%

O índice de consistência foi avaliado através do *flow table test*, seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 13276:2005. Nesse ensaio, o molde tronco-cônico era preenchido com argamassa em três

camadas, das quais a primeira era adensada com 15 golpes, a segunda com 10 golpes e a última com 5 golpes de soquete padronizado. Em seguida, o molde era erguido verticalmente. Depois de aplicados os 30 golpes da mesa, faziam-se duas medidas ortogonais do espalhamento da argamassa sobre a mesa. Esse procedimento é ilustrado pela Figura 7.

Figura 7 - Flow table test.



Adaptado de Carasek (2007).

A perda de fluidez foi analisada com 30 e 60 minutos, realizando novamente o ensaio do índice de consistência nos tempos mencionados.

A plasticidade da mistura foi avaliada através do Índice de Fluidez, que consiste na razão da abertura na mesa de espalhamento para o módulo de finura do agregado, conforme explanado na Revisão Bibliográfica.

No estado endurecido, obteve-se a resistência à compressão aos 28 dias de idade por meio da moldagem e ruptura de corpos de prova cilíndricos de 5 x 10 cm. Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos permaneceram na sala climatizada e foram desmoldados após 24 h. Posteriormente foram colocados para cura em câmara úmida onde permaneceram até o dia da ruptura, quando foram retificados com máquina fresadora e posteriormente ensaiados à compressão.

Devido à insuficiência de material para o preparo dos concretos na etapa seguinte, uma nova remessa de materiais se fez necessária. Como era de se esperar, depois de caracterizado, constatou-se que o novo lote de materiais era significativamente distinto do anterior, como poderá ser visto no item 5.2. Por esse motivo, os quatro traços que tiveram o desempenho escolhido para desenvolvimento em concreto foram repetidos em argamassa. Os resultados foram comparados e, em função disso, foi dada sequência ao trabalho.

4.2.4 Ensaios em concreto

Após os estudos em argamassa, foram selecionadas as composições de agregados para terem seu desempenho avaliado em concreto, sendo duas dessas com areia de britagem e outras duas com pó-de-pedra. A seleção foi feita com base principalmente no índice de fluidez apresentado pelas misturas. Assim, foram eleitas as composições com 55 e 65% de areia de britagem e as com 60 e 70% de pó-de-pedra.

Confeccionou-se uma curva de dosagem para cada composição escolhida, a partir do preparo de três concretos, com os traços em massa 1:3,5; 1:5 e 1:6,5. O teor de argamassa ideal para cada composição foi previamente ajustado de modo semelhante ao método sugerido pelo IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993). Calculou-se o traço de cada concreto para que tivesse inicialmente teor de argamassa em massa de 51%, e posteriormente se faziam as adições de cimento, agregado miúdo, água e aditivo de modo a aumentar o teor de argamassa em 1%. A determinação foi feita se buscando obter um concreto com abatimento 10 ± 2 cm.

Para a elaboração das curvas, os materiais foram pesados em baldes, como ilustrado pela Figura 8. Foi feito o cálculo da umidade dos agregados miúdos para então corrigir a quantidade dos materiais a ser pesada.

Figura 8 - Materiais pesados em baldes para preparo do concreto.



Os traços unitários em massa dos concretos se encontram na Tabela 3. A quantidade de água foi definida durante o preparo do concreto, buscando-se obter um abatimento de 10 ± 2 cm após 30 minutos do início da mistura.

Tabela 3 – Traços dos concretos preparados.

Material		Cimento	Areia Natural	Areia de Britagem	Brita 4,75/12,5	Brita 9,5/25	Aditivo
55% areia de britagem	Traço 1 (m=3,5)	1,000	0,580	0,710	0,660	1,540	0,006
	Traço 2 (m=5,0)	1,000	0,930	1,130	0,880	2,060	0,006
	Traço 3 (m=6,5)	1,000	1,270	1,550	1,100	2,570	0,006
65% areia de britagem	Traço 4 (m=3,5)	1,000	0,461	0,856	0,655	1,528	0,006
	Traço 5 (m=5,0)	1,000	0,730	1,360	0,870	2,040	0,006
	Traço 6 (m=6,5)	1,000	1,000	1,860	1,090	2,550	0,006
60% pó-de-pedra	Traço 1 (m=3,5)	1,000	0,540	0,800	0,650	1,510	0,006
	Traço 2 (m=5,0)	1,000	0,850	1,270	0,860	2,020	0,006
	Traço 3 (m=6,5)	1,000	1,160	1,740	1,080	2,520	0,006
70% pó-de-pedra	Traço 4 (m=3,5)	1,000	0,410	0,950	0,640	1,500	0,006
	Traço 5 (m=5,0)	1,000	0,650	1,510	0,860	2,000	0,006
	Traço 6 (m=6,5)	1,000	0,880	2,060	1,070	2,490	0,006

Para a confecção dos concretos, todos os materiais secos eram adicionados juntos na betoneira, cuja cuba era previamente molhada com água e deixada emborcada por poucos minutos. Ligava-se a betoneira por alguns instantes e se desligava em seguida para colocação de uma quantidade de água. Ligava-se mais uma vez por poucos minutos e após, com a betoneira desligada, era feita a raspagem do material aderido à cuba e às pás. A betoneira era mantida ligada novamente até a homogeneização da mistura.

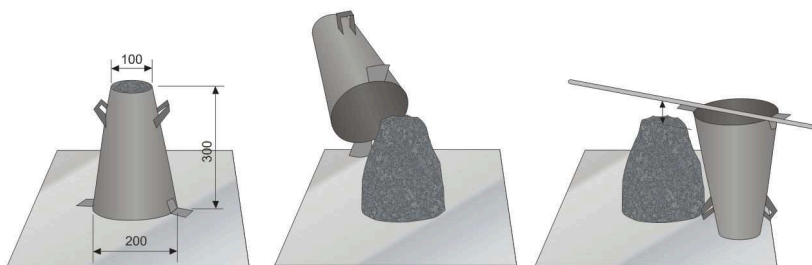
Depois disso, era adicionada água até que as pelotas formadas na mistura começassem a apresentar superfície úmida e brilhosa. Nesse momento, com a betoneira desligada, era adicionado o aditivo. A seguir, o concreto era misturado mais uma vez. Buscava-se nesse momento

alcançar uma mistura cujo abatimento estimado visualmente fosse próximo de 10 ± 2 cm, adicionando-se mais água quando necessária.

Quando julgado obtido o abatimento desejado, a betoneira era desligada e coberta com uma tampa até atingir os 30 minutos de mistura desde a colocação da água. Após esse período, o concreto era misturado mais uma vez. Se necessária, mais água era adicionada para que o abatimento estimado voltasse para a faixa estipulada.

Só então era realizado o ensaio de abatimento (*slump test*). O ensaio foi realizado seguindo as prescrições da ABNT NBR NM 67:1998 e é ilustrado pela Figura 9. O abatimento inicial era apenas estimado e não efetivamente medido através do slump test porque quando é necessário realizar esse ensaio algumas vezes até atingir o valor de abatimento proposto, ocorre perda de material (argamassa fica aderida à aparelhagem e parte da água pode evaporar), com consequente mudança no comportamento da mistura, agravada ainda pelo adensamento sofrido durante o ensaio. Esse tipo de influência já foi verificado em diversos estudos realizados pelo grupo GTec – UFSC. Assim, tendo em vista que o slump test teria de ser realizado novamente com 30 minutos, optou-se por dispensar o ensaio inicial, evitando que a alteração comportamental mencionada ocorresse uma segunda vez.

Figura 9 - Ilustração de parte do ensaio de abatimento do tronco de cone. As dimensões apresentadas estão em milímetros.



O término da dosagem e a realização dos ensaios no estado fresco só ocorriam depois de passados 30 minutos desde o início da mistura porque se desejou simular o tempo mediano que decorre desde o carregamento de um caminhão betoneira na central dosadora até a aplicação do concreto em seu destino. Ressalta-se que a ABNT NBR 7212:2012 limita o tempo de produção, transporte e espera antes da descarga em 90 minutos.

Ainda no estado fresco, foi medida a massa específica do concreto para posterior cálculo do teor de ar incorporado à mistura e consumo de cimento. Para isso uma caixa metálica com volume 8,044 litros foi pesada após ser preenchida em duas camadas, adensadas com 25 golpes com haste, similarmente com o procedimento descrito na ABNT NBR 9833:2009.

Já no estado endurecido, foi avaliada a resistência à compressão aos 28 dias através do rompimento de corpos de prova cilíndricos 10 x 20 cm. Três corpos de prova foram moldados para cada traço, os quais foram desmoldados com 24 h de idade e colocados para cura em câmara úmida. Para a ruptura, foram retificados através de capeamento com pasta de cimento. Na Figura 10 se pode observar o ensaio de um corpo de prova.

Figura 10 - Ruptura de um corpo de prova à compressão.



A partir dos resultados obtidos em concreto foram confeccionadas as curvas de dosagem, que foram dispostas num mesmo diagrama. No primeiro dos três quadrantes do diagrama, encontra-se a resistência do concreto em função da relação água/cimento do mesmo

(Lei de Abrams). Assim, pode-se encontrar a relação água/cimento capaz de conduzir a uma resistência desejada. No segundo quadrante se obtém o teor de agregados (“m”) a partir do valor de água/cimento resultante do primeiro quadrante (Lei de Lyse). No último quadrante, a partir do valor de “m” que foi obtido, pode-se achar o valor do consumo de cimento por metro cúbico do concreto (Lei de Prizkulnik & Kirilos). As equações que definem de dosagem são apresentadas a seguir:

$$f_{cj} = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

f_{cj} = resistência de dosagem em MPa;

a/c = relação água/cimento;

K_1 e K_2 = constantes do conjunto de materiais empregados.

$$m = K_3 + K_4 \times a/c \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

m = teor de agregados em relação ao cimento em massa seca;

K_3 e K_4 = constantes do conjunto de materiais empregados.

$$C_c = \frac{1000}{K_5 + K_6 \times m} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

C_c = consumo de cimento por metro cúbico em Kg/m³;

K_5 e K_6 = constantes do conjunto de materiais empregados.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os itens superiores mostram os resultados obtidos durante a realização do trabalho. Inicialmente a caracterização dos agregados é apresentada, seguida pelos resultados obtidos nos estudos em argamassa e por fim os resultados obtidos em concreto.

5.1 Características dos agregados miúdos utilizados em argamassa

5.1.1 Areia Natural

As características da areia natural quanto ao teor de material pulverulento, dimensão máxima característica, módulo de finura e massa específica aparente são apresentadas na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 – Características da areia natural utilizada.

Areia Natural (lote 1)	
Dimensão Máxima Característica (mm)	1,2
Módulo de Finura	1,212
Material Pulverulento (%)	1,32
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,638

Nota-se da tabela que tanto a dimensão máxima característica quanto o módulo de finura apresentam valores baixos, indicando que se trata de uma areia bastante fina. O teor de material pulverulento também é considerado baixo. A curva granulométrica pode ser vista mais adiante na Figura 11.

5.1.2 Areia de Britagem

A massa específica aparente, o módulo de finura e a quantidade de material pulverulento da areia de britagem empregada no trabalho são exibidos na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Características da areia de britagem.

Areia de britagem (lote 1)	
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8
Módulo de Finura	2,681
Material Pulverulento (%)	13,08
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,73

Pode-se observar a curva granulométrica desse agregado também na Figura 11.

5.1.3 Pó-de-pedra

O pó-de-pedra utilizado durante o trabalho tem sua caracterização apresentada na Tabela 6.

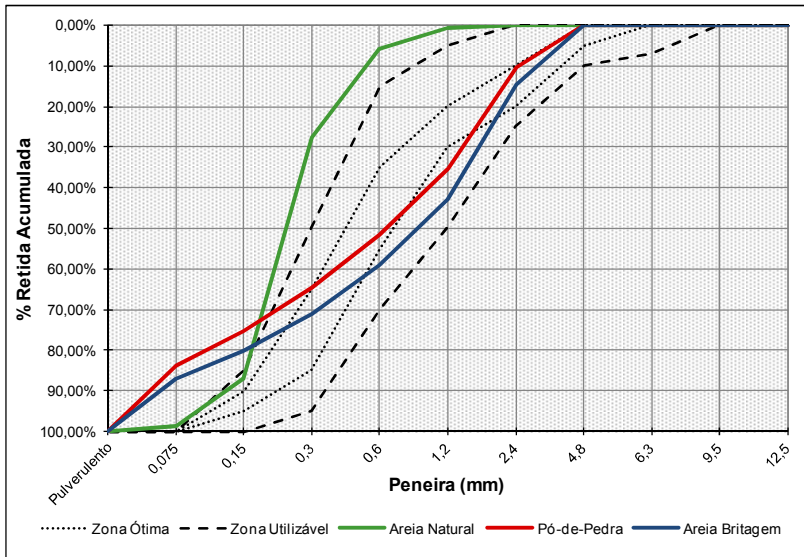
Tabela 6 - Características do pó-de-pedra.

Pó-de-pedra (lote 1)	
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8
Módulo de Finura	2,373
Material Pulverulento (%)	16,30
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,701

A tabela mostra que o pó-de-pedra possui cerca de 3% a mais de microfinos que a areia de britagem. A diferença nas massas específicas aparentes dos agregados miúdos de britagem pode ter ocorrido porque não necessariamente os dois materiais provieram da exploração da mesma frente de mineração.

A Figura 11 a seguir mostra a curva granulométrica do pó-de-pedra juntamente com as curvas da areia natural e da areia de britagem.

Figura 11 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos.



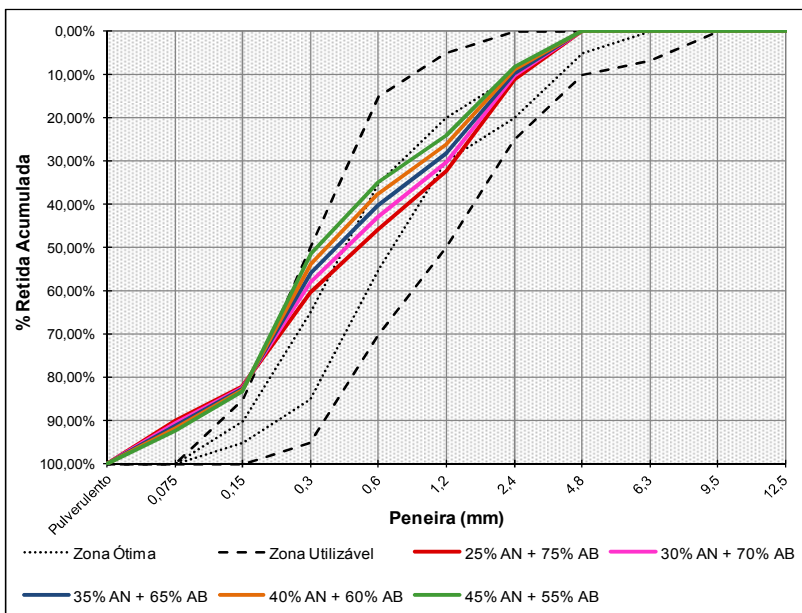
Do gráfico da Figura 11 observa-se que a areia natural se encontra quase integralmente fora da denominada Zona Utilizável (ABNT NBR 7211:2009), portanto não é aconselhável aplicá-la sozinha. Além disso, quase todos os seus grãos são passantes na peneira de malha 1,2 mm. Com relação à areia de britagem e ao pó-de-pedra, percebe-se que ambos possuem distribuições granulométricas com formas semelhantes. Como a curva do pó-de-pedra está deslocada para cima em relação à curva da areia de britagem, conclui-se que o primeiro se trata de um material mais fino, fato comprovado quando comparados os valores módulo de finura. Podem-se destacar também os elevados teores de material pulverulento e outras frações mais finas em relação à areia natural.

5.1.4 Composições

Para a primeira parte do estudo, foram realizadas composições entre a areia natural e o pó-de-pedra e entre a areia natural e a areia de britagem. Essa etapa preliminar objetivou selecionar através de testes em argamassa as composições de melhor desempenho.

As curvas granulométricas das composições com areia de britagem podem ser observadas na Figura 12. Por sua vez, as curvas granulométricas das composições com pó-de-pedra podem ser vistas na Figura 13.

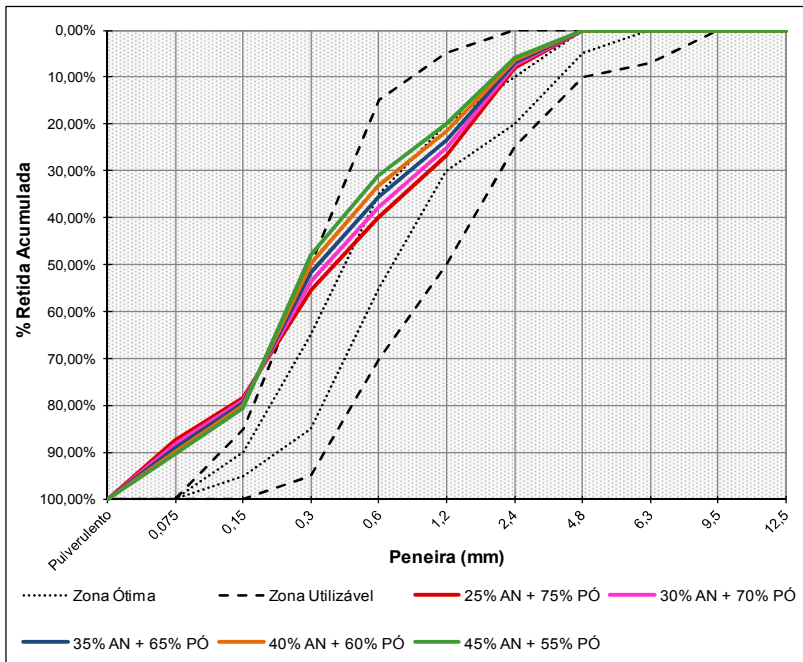
Figura 12 - Curvas granulométricas das composições de areia de britagem com areia natural.



Pode-se observar na Figura 12 que as granulometrias apresentadas por essas composições são relativamente parecidas, havendo maior diferença na quantidade de partículas entre as malhas 0,3 mm e 2,4 mm. Nessas composições, o módulo de finura variou de 2,02 a 2,31.

Mais uma vez não houve total adequação à Zona Utilizável, mas nesse caso é importante reforçar que os limites estipulados pela ABNT NBR 7211:2009 foram impostos a partir de estudos com areias naturais e são de caráter orientativo, e não restritivo. Além disso, o item 5.1.1 da referida norma salienta que agregados com distribuições granulométricas que não seguem esses limites podem ser utilizados se estudos comprovarem a sua empregabilidade.

Figura 13 - Curvas granulométricas das composições de pó-de-pedra com areia natural.



Da mesma forma que ocorreu com as composições contendo areia de britagem, as composições com pó-de-pedra exibiram curvas granulométricas similares. Nessas composições, o módulo de finura variou de 1,85 a 2,08.

5.2 Características dos agregados miúdos utilizados em concreto

Conforme explanado na metodologia deste trabalho, para os ensaios em concreto foi utilizado um novo lote de materiais. A caracterização desses materiais se encontra nos próximos itens.

5.2.1 Areia Natural

A areia natural empregada na etapa de concreto era bastante similar à primeira, apresentado valores muito próximos de massa específica aparente, módulo de finura e teor de material pulverulento, e

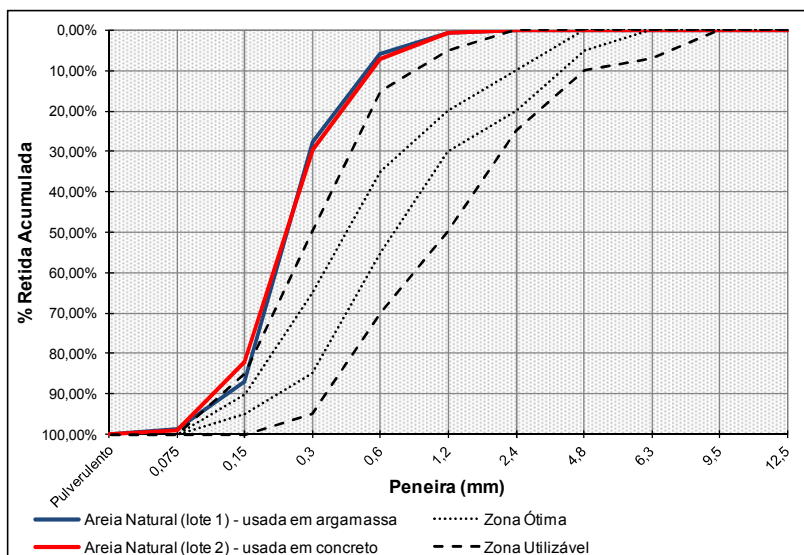
mesma dimensão máxima característica, como pode ser constatado na Tabela 7.

Tabela 7 - Características da areia natural utilizada nos ensaios em concreto.

Areia Natural (lote 2)	
Dimensão Máxima Característica (mm)	1,2
Módulo de Finura	1,198
Material Pulverulento (%)	0,90
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,63

A fim de favorecer a comparação, a Figura 14 exhibe a distribuição granulométrica das duas areias naturais. A partir dela, é possível comprovar que os materiais são realmente muito semelhantes também quanto à granulometria.

Figura 14 - Curvas granulométricas das duas areias naturais usadas no trabalho.



5.2.2 Areia de Britagem

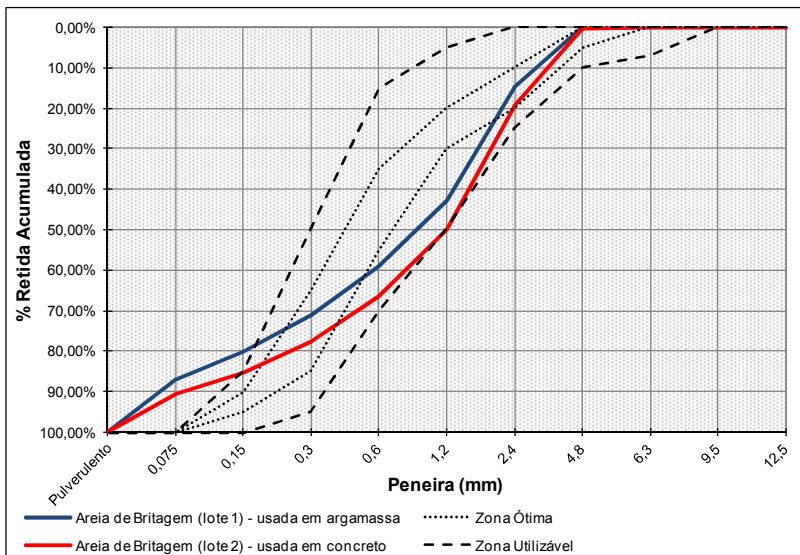
A caracterização do segundo lote de areia de britagem pode ser observada na Tabela 8.

Tabela 8 - Características da areia de britagem utilizada nos ensaios em concreto.

Areia de britagem (lote 2)	
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8
Módulo de Finura	2,989
Material Pulverulento (%)	9,37
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,86

Diferindo do que ocorreu com os dois lotes de areia natural, o segundo lote de areia de britagem apresentou variações muito significativas em relação ao primeiro. Houve grande diminuição do percentual de material pulverulento, aumento da massa específica e engrossamento do material. A comparação entre as curvas granulométricas das duas areias de britagem aparece na Figura 15.

Figura 15 - Distribuição granulométrica das areias de britagem empregadas no trabalho.



O gráfico acima também evidencia a variação que ocorreu. Tal qual o módulo de finura, a nova curva granulométrica abaixo da anterior

mostra que essa areia é mais grossa. No entanto, pode-se perceber que a forma das curvas é semelhante.

Acredita-se que na areia de britagem tenha ocorrido maior variação porque, conforme já foi dito, parte da fração fina é removida desse material por meio de peneiramento. Nesse processo, a eficiência pode ser fortemente prejudicada pela umidade momentânea do material.

5.2.3 Pó-de-pedra

A Tabela 9 mostra as características do pó-de-pedra usado nas misturas de concreto. Como ocorreu com a areia de britagem, notam-se variações entre os agregados dos diferentes lotes, porém menores. O módulo de finura também aumentou, indicando que esse material é ligeiramente mais grosso que o primeiro. O material pulverulento diminuiu aproximadamente 2%. A massa específica aparente também sofreu alteração.

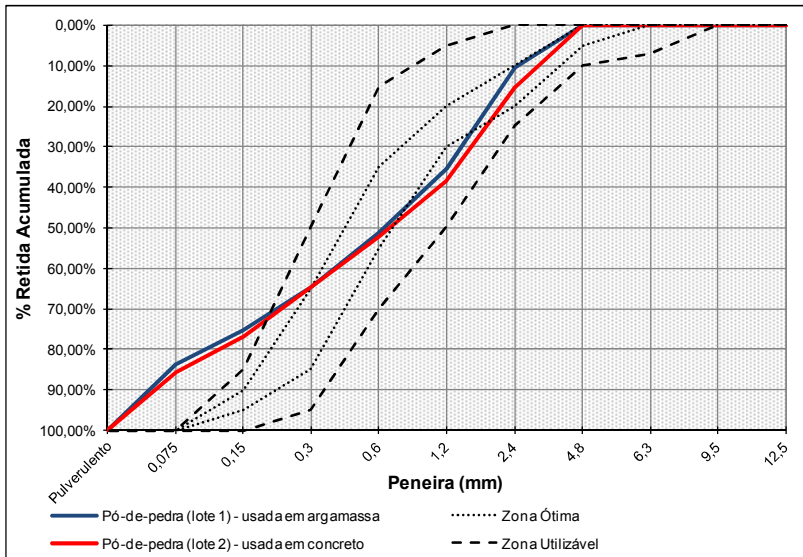
Tabela 9 - Características do pó-de-pedra usado na etapa de concreto.

Pó-de-pedra (lote 2)	
Dimensão Máxima Característica (mm)	4,8
Módulo de Finura	2,478
Material Pulverulento (%)	14,26
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,86

As curvas granulométricas deste lote do pó-de-pedra e do lote anterior podem ser observadas a seguir, na Figura 16.

Por meio da Figura 16 se percebe que a diferença que as granulometrias dos materiais sofreram foi pequena, ao contrário do que ocorreu com a areia de britagem.

Figura 16 - distribuição granulométrica dos dois lotes de pó-de-pedra utilizados no trabalho.



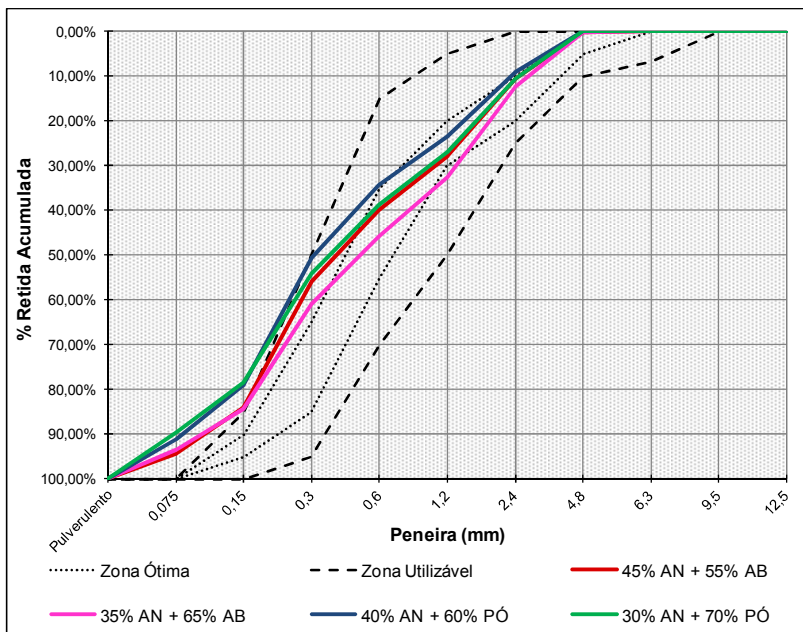
5.2.4 Composições

Como consequência da alteração ocorrida nos agregados miúdos, houve evidentemente alteração nas características das composições. Por esse motivo, se faz necessário apresentar na Figura 17 as curvas granulométricas das composições escolhidas para serem testadas em concreto. A razão da seleção dessas composições será justificada no item 5.4.3. Os teores de material pulverulento e os módulos de finura apresentados pelas composições podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Teor de material pulverulento e módulo de finura de cada composição.

Composição	Material Pulverulento (%)	Módulo de Finura
AN 45% + AB 55%	5,56	2,183
AN 35% + AB 65%	6,41	2,362
AN 40% + PÓ 60%	8,92	1,966
AN 30% + PÓ 70%	10,25	2,094

Figura 17 - Distribuições granulométricas das composições selecionadas.



5.3 Caracterização dos agregados graúdos

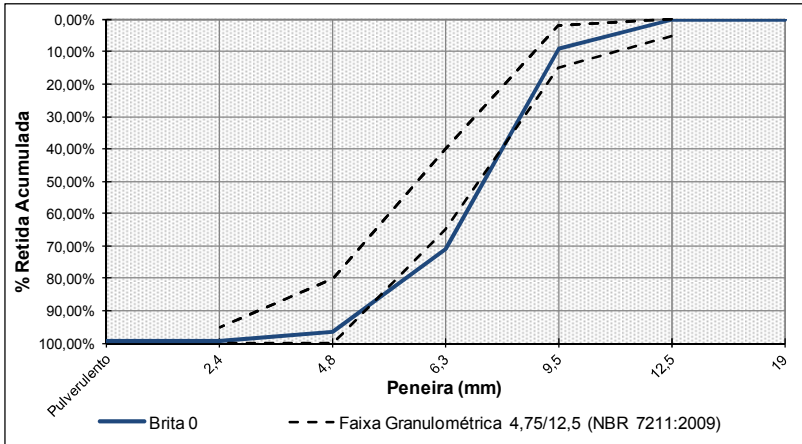
5.3.1 Brita 0

A caracterização da brita 0 utilizada no preparo dos concretos deste trabalho quanto a dimensão máxima característica, módulo de finura, percentual de material pulverulento e massa específica aparente é mostrada na Tabela 11. A distribuição granulométrica pode ser vista na Figura 18.

Tabela 11 - Caracterização da brita 0.

Brita 0	
Dimensão Máxima Característica (mm)	12,5
Módulo de Finura	6,048
Material Pulverulento (%)	0,64
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,863

Figura 18 - Curva granulométrica da brita 0 usada no trabalho.



5.3.2 Brita 1

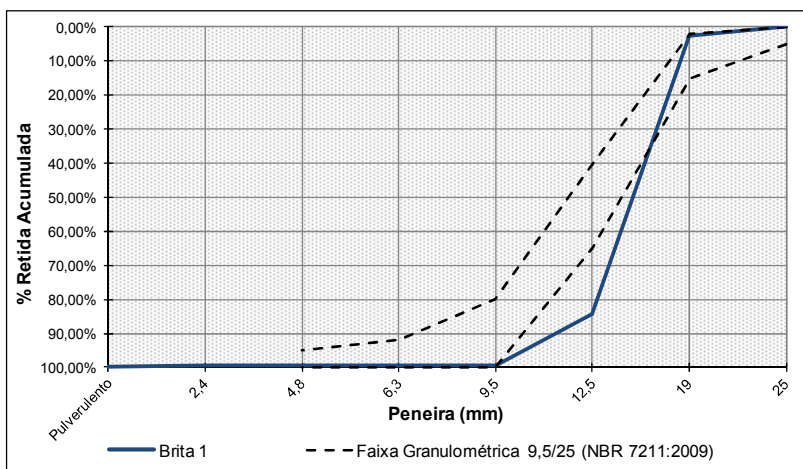
A dimensão máxima característica, módulo de finura, percentual de material pulverulento e massa específica aparente da brita 1 que foi empregada no trabalho pode ser observada na Tabela 12.

Tabela 12 - caracterização da brita 1.

Brita 1	
Dimensão Máxima Característica (mm)	19,0
Módulo de Finura	6,997
Material Pulverulento (%)	0,38
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2,855

Na Figura 19 pode ser vista a granulometria desse material.

Figura 19 - Distribuição granulométrica da brita 1 empregada no trabalho.



5.4 Ensaios em argamassa

Neste item serão abordados e discutidos os resultados obtidos nos estudos em argamassa.

5.4.1 Estado fresco

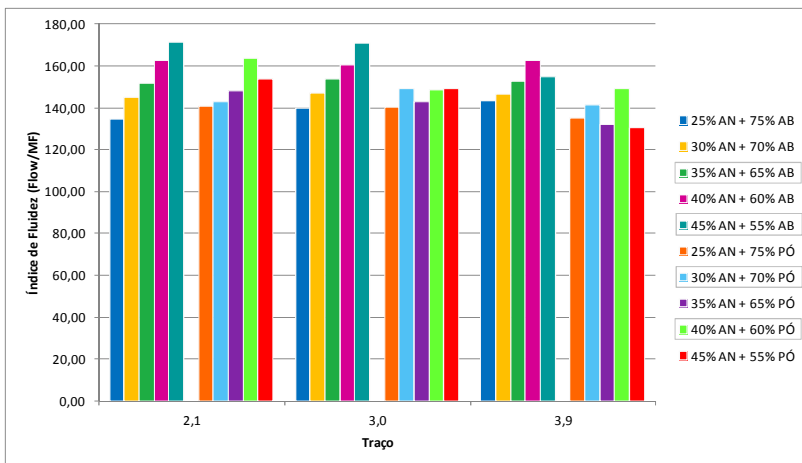
Os resultados obtidos no estado fresco são expostos nas tabelas seguintes. A Tabela 13 contém os resultados de espalhamento obtidos pela mesa de consistência (flow table test) com as misturas preparadas a partir das diferentes composições.

De acordo com o que foi apresentado no item 3.4, a análise da consistência simplesmente pelo valor de espalhamento é prejudicada em função dos diferentes módulos de finura apresentados pelas composições de agregados. Para uma comparação mais justa, a Figura 20 mostra os valores de Índice de Fluides apresentado por cada composição. Em destaque na legenda estão as composições que foram selecionadas para os estudos em concreto. É válido frisar que maiores valores desse índice tendem a indicar menor consumo de água por metro cúbico em concreto para a mesma composição de agregados e mesma trabalhabilidade do concreto. Consequentemente, para uma mesma relação água/cimento, essa redução do consumo de água implica a redução do consumo de cimento, tornando a mistura mais econômica.

Tabela 13 - Resultados de espalhamento obtido com as argamassas testadas.

Tempo	Composição	Espalhamento (mm)		
		m=2,1	m=3,0	m=3,9
5 min	25% AN 75% AB	312	323	332
30 min		292	294	298
60 min		282	289	296
5 min	30% AN 70% AB	325	330	328
30 min		302	297	292
60 min		289	293	290
5 min	35% AN 65% AB	329	333	331
30 min		296	299	303
60 min		288	295	303
5 min	40% AN 60% AB	340	336	340
30 min		299	310	308
60 min		299	300	284
5 min	45% AN 55% AB	346	345	313
30 min		311	309	301
60 min		302	309	290
5 min	25% AN 75% PÓ	293	292	282
30 min		284	271	274
60 min		271	271	263
5 min	30% AN 70% PÓ	289	302	286
30 min		276	287	271
60 min		276	277	271
5 min	35% AN 65% PÓ	291	281	260
30 min		274	271	262
60 min		274	266	247
5 min	40% AN 60% PÓ	312	284	285
30 min		288	269	267
60 min		283	266	258
5 min	45% AN 55% PÓ	315	306	268
30 min		294	277	258
60 min		288	264	240

Figura 20 - Valores de Índice de Fluidez para cada traço das argamassas confeccionadas com as composições.



Observando a Figura 20, percebe-se a tendência do aumento do Índice de Fluidez com o aumento do teor de areia natural na composição, especialmente nas composições com areia de britagem. Tal fato ocorre porque os grãos finos, lisos e arredondados da areia natural empregada atuam como lubrificantes da mistura, uma vez que diminuem o atrito interno entre grãos, fazendo com que maiores valores de espalhamento sejam atingidos.

Na mesma figura, observa-se que na maioria dos casos, para um mesmo traço, as composições com areia de britagem apresentam Índice de Fluidez mais elevado que as com pó-de-pedra. Deve-se levar em conta que, embora o espalhamento seja ponderado pelo módulo de finura, esse último é obtido considerando apenas as porcentagens retidas acumuladas das peneiras da série normal. Como a principal diferença entre os agregados miúdos de britagem avaliados neste trabalho está na fração passante pela peneira de abertura 0,150 mm (última peneira da série normal), o módulo de finura dos agregados pode ser insuficiente para caracterizar (ou compensar, no caso do Índice de Fluidez) o efeito causado por essas partículas finas.

Ressalta-se também na Figura 20, a composição com 60% de pó-de-pedra. Principalmente para os traços 2,1 e 3,9, seu índice se destaca dos índices das demais composições compostas pelo mesmo agregado miúdo de britagem. Por sua vez, nos traços 3,0 e 3,9, a composição que possui 70% de pó-de-pedra apresentou bom desempenho perante as

demais composições com pó-de-pedra, mesmo com baixo teor de areia natural.

A perda de fluidez avaliada com 30 e 60 minutos pode ser analisada nas Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 - Perda de espalhamento em função do tempo decorrido para as misturas com traço 2,1.

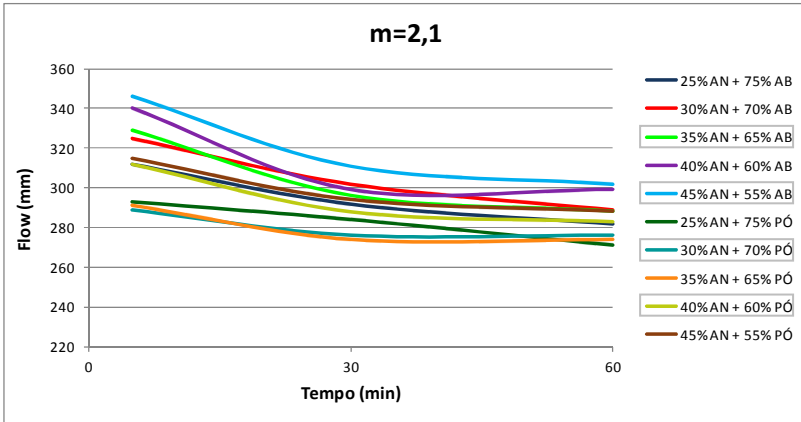


Figura 22 - Perda de espalhamento em função do tempo decorrido para as misturas com traço 3,0.

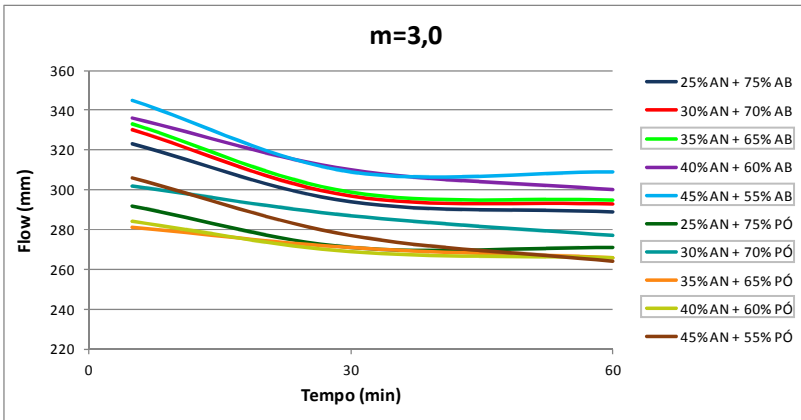
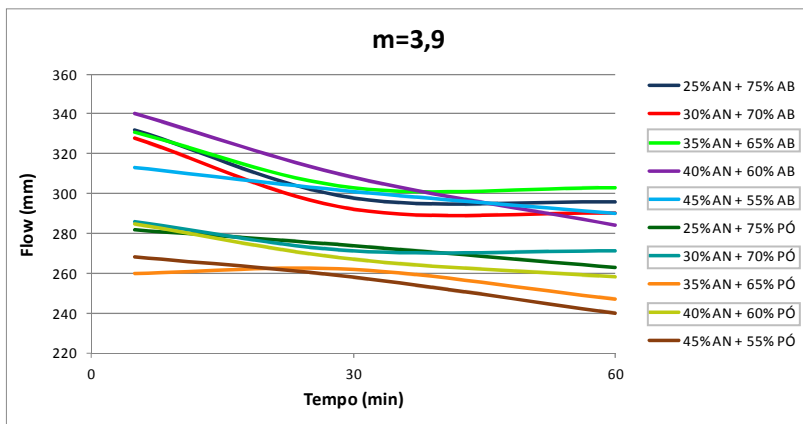


Figura 23 - Perda de espalhamento em função do tempo decorrido para as misturas com traço 3,9.



O tempo comumente decorrido até a aplicação dos concretos transportados por caminhões betoneira está aproximadamente entre meia e uma hora. Desta forma, a avaliação desse parâmetro é importante porque misturas apresentem bons resultados de fluidez inicial, mas com grandes perdas de fluidez no tempo citado, são indesejáveis.

A observação das Figuras 21, 22 e 23 permite notar que a perda de fluidez foi maior nas argamassas preparadas com areia de britagem que nas preparadas com pó-de-pedra. Observa-se também que não houve nenhuma mistura que apresentou um gráfico discrepante de perda de fluidez. As perdas das misturas com pó-de-pedra variaram de 5,4 a 11,2%, enquanto as perdas das misturas com areia de britagem oscilaram entre 10,3 e 13,4%.

Nas Figuras 21, 22 e 23, ainda se percebe que as misturas, principalmente aquelas com areia de britagem, apresentam maior perda na primeira meia hora do que na segunda. Da Figura 23 se destaca também a curva da mistura com 60% de areia de britagem, que inicialmente expôs a maior fluidez entre as argamassas estudadas. Porém, após a passagem de 60 minutos, seu desempenho ficou abaixo dos apresentados por outras três misturas.

5.4.2 Estado endurecido

Os resultados de resistência à compressão alcançados com 28 dias e a respectiva relação a/c de cada mistura são mostrados no gráfico

da Figura 24. Embora seja medido no estado fresco das argamassas, o teor de ar incorporado à mistura é importante na avaliação dos resultados de resistência à compressão e, portanto, é apresentado na Tabela 14.

Figura 24 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade (barras) e respectiva relação água/cimento de cada mistura (pontos).

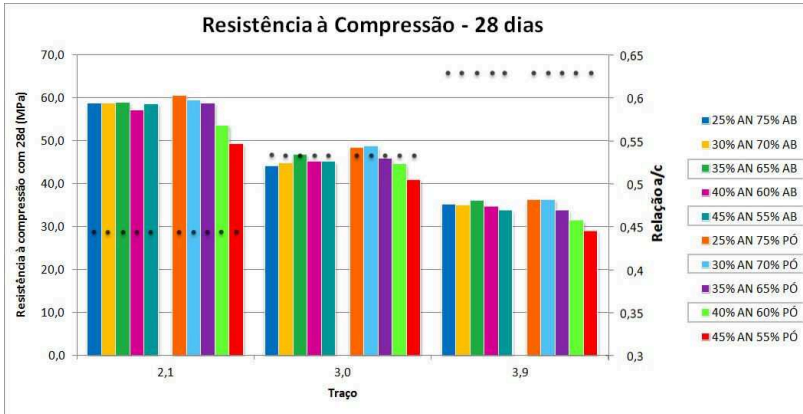


Tabela 14- Teor de ar incorporado às argamassas.

Composição	Traço		
	m=2,1	m=3,0	m=3,9
25% AN + 75% AB	3,5%	3,6%	3,5%
30% AN + 70% AB	5,3%	4,7%	4,4%
35% AN + 65% AB	5,8%	5,0%	4,7%
40% AN + 60% AB	5,3%	5,3%	4,6%
45% AN + 55% AB	5,3%	5,2%	5,7%
25% AN + 75% PÓ	5,7%	5,6%	5,5%
30% AN + 70% PÓ	5,8%	5,3%	5,7%
35% AN + 65% PÓ	5,5%	6,0%	6,1%
40% AN + 60% PÓ	4,5%	5,2%	6,7%
45% AN + 55% PÓ	5,0%	5,3%	7,0%

Observa-se na Figura 24 que o aumento do teor de areia natural pode estar prejudicando a resistência dos corpos-de-prova, especialmente nos casos com pó-de-pedra. Isso pode estar acontecendo porque os maiores percentuais de areia de britagem ocasionam redução

no módulo de finura da composição. A diminuição do módulo de finura indica que haverá uma maior superfície de grãos para ser molhada pela água da mistura, havendo menos quantidade de água disponível para a hidratação do cimento. No caso do pó-de-pedra, cujo módulo de finura já é originalmente menor, esse efeito é mais realçado.

Outra possível explicação para o ocorrido é que a aderência entre a pasta de cimento e os grãos tenha sido prejudicada pelos grãos lisos e arredondados da areia natural, porque a aderência é função da rugosidade superficial e da área específica do agregado (DAMO, 2011).

Comparando os teores de ar incorporado com os resultados de resistência à compressão, nota-se que apesar de geralmente incorporarem mais ar na mistura, as argamassas com pó-de-pedra obtiveram, em alguns casos, valores de resistência à compressão ligeiramente maiores para as mesmas relações água/cimento.

5.4.3 Composições selecionadas

Como já foi apontado, foram selecionadas as composições contendo 55 e 65% de areia de britagem e com 60 e 70% de pó-de-pedra. Apesar de possuir um elevado percentual de areia natural, ficou claro que a composição com 55% de areia de britagem resultou em argamassas com excelente desempenho quanto ao Índice de Fluidiez, mantendo a trabalhabilidade com o passar do tempo. Seus teores de ar incorporado e resultados de resistência à compressão se mostraram na mesma faixa que os das demais misturas com areia de britagem.

As misturas com 60 e 65% de areia de britagem resultaram em valores próximos de teor de ar incorporado, e essa primeira obteve melhor desempenho na análise de fluidiez. Contudo, para uma mesma relação água/cimento, a resistência à compressão da argamassa com 65% de areia de britagem foi ligeiramente maior nos três traços testados. Na avaliação da manutenção da fluidiez, a composição com 60% de areia de britagem apresentou uma grande perda para o traço 3,9. A composição com 65% de areia de britagem ainda obteve a vantagem de possuir maior quantidade de agregado de britagem que a outra composição referida, tornando-a mais interessante para os produtores de agregados industriais.

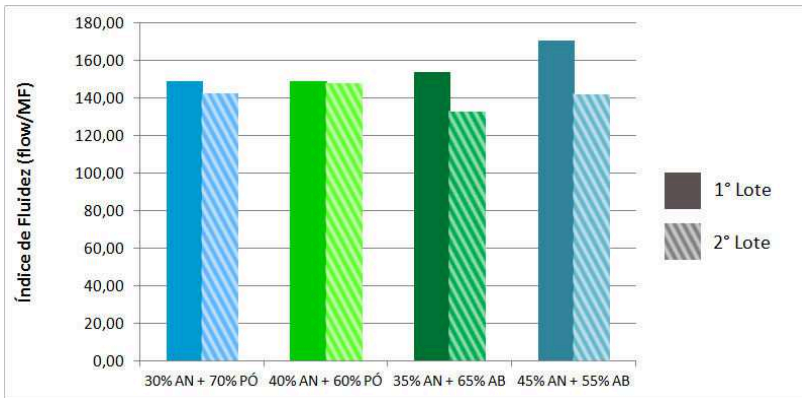
A escolha das composições com 60 e 70% de areia de britagem foi feita tomando como base principalmente os bons Índices de Fluidiez exibidos pelas misturas, especialmente para os traços 3,0 e 3,9, uma vez que os teores de ar incorporado e perda de fluidiez ficaram próximos aos

das demais argamassas com pó-de-pedra. A argamassa com 70% de pó-de-pedra apresentou bons resultados de resistência à compressão, sem nenhum destaque especial para o desempenho da composição com 60% de pó-de-pedra.

5.4.4 Repetição das argamassas para o novo lote de materiais

Para que os resultados inicialmente obtidos em argamassa pudessem ser extrapolados para o novo lote de materiais, optou-se por repetir a mistura de traço intermediário ($m=3,0$) com materiais do novo lote para cada uma das composições selecionadas. Essas quatro argamassas foram avaliadas apenas quanto ao índice de consistência e tiveram seu desempenho no ensaio comparado com os resultados alcançados anteriormente. A Figura 25 apresenta esses resultados para comparação.

Figura 25 - Índice de Fluidez das argamassas preparadas com as composições de agregados selecionadas para o traço 3,0.



Os gráficos do Índice de Fluidez das argamassas preparadas a partir das composições com 60 e 70% de pó-de-pedra na Figura 25 mostram que houve uma variação muito pequena nos desempenhos de ambas, os quais decaíram 0,5 e 4,4% respectivamente. A razão disso é a pequena alteração encontrada na comparação entre os pós-de-pedra, conforme visto no item 5.2.3. Em função da pequena variação de desempenho, admitiu-se que as análises obtidas nos resultados dos ensaios em argamassa anteriores eram válidas também para os materiais do novo lote.

As misturas com areia de britagem também apresentaram decréscimo no Índice de Fluidez, todavia bem maior. A mistura com 55% de areia de britagem na composição teve redução de 17,0% no índice, enquanto para a mistura contendo 65% de areia de britagem na composição esse declínio foi 13,6%. Essa maior diminuição, da mesma forma que ocorreu para o pó-de-pedra, é função da variação apresentada pela areia de britagem do segundo lote em relação à do primeiro. Percebe-se que as taxas de decréscimo ficaram razoavelmente próximas e as argamassas com os diferentes lotes de areia de britagem seguiram a mesma tendência de comportamento. Por esse motivo, considerou-se que os resultados e análises feitos anteriormente também podem ser adotados para a areia de britagem do novo lote. Assim, os percentuais das composições selecionadas poderiam ser mantidos para que os estudos em concreto pudessem ser realizados.

5.5 Ensaios em concreto

Nesta etapa do trabalho as composições de agregados miúdos selecionadas nos estudos preliminares em argamassa tiveram desempenho avaliado em concreto.

5.5.1 Teores de argamassa

Para que pudessem ser preparados os concretos, foi necessário definir primeiramente os teores de argamassa que seriam adotados. Os teores ideais foram definidos para concretos com abatimento de 10 ± 2 cm que apresentassem coesão considerada adequada. Os teores encontrados na determinação podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 - Teores de argamassa dos concretos para cada uma das composições (porcentagem em massa).

Composição de agregados miúdos	Alfa (%)
45% AN + 55% AB	51,0
35% AN + 65% AB	51,5
40% AN + 60% PÓ	52,0
30% AN + 70% PÓ	52,5

Conforme pode ser observado na Tabela 15, os concretos preparados com as composições contendo areia de britagem exigiram um teor de argamassa menor que os concretos contendo as composições com pó-de-pedra. Esperava-se que as composições com maiores módulos de finura demandassem um maior teor de argamassa ideal para preencher os vazios intergranulares e compensar a aspereza e baixa mobilidade geralmente apresentadas. Contudo, isso não ocorreu.

Deve-se considerar que essa determinação depende muito da experiência do tecnologista que a realiza, uma vez que é feita com base em critérios subjetivos. Além disso, apesar de inesperado, o resultado pode ser correlacionado com a literatura. Damo (2011), por exemplo, encontrou comportamentos semelhantes para composições com areia de britagem e areia natural. Uma explicação possível é que o aumento no teor de argamassa tenha sido causado pela diminuição do teor de areia natural na composição. A irregularidade e aspereza dos grãos dos agregados miúdos de britagem podem exigir um maior teor de argamassa para compensar o incremento no atrito interno e perda de mobilidade da mistura.

5.5.2 Curvas de dosagem

Depois de determinados os teores de argamassa ideais para cada concreto, foram confeccionados três concretos com diferentes traços para cada composição de agregado, objetivando-se a elaboração das curvas de dosagem.

A medida de abatimento obtida para cada traço de cada composição testada em concreto, juntamente com a respectiva relação água/materiais secos (H), é mostrada na Tabela 16.

Destaca-se da Tabela 16 que todos os concretos apresentaram valores de abatimento dentro da faixa estipulada, com a exceção da mistura com 70% de pó-de-pedra na composição de agregados para o traço $m=3,5$. Isso ocorreu porque essa foi a primeira mistura com pó-de-pedra preparada após a confecção das misturas com areia de britagem. Durante o acerto da quantidade de água feito inicialmente, adicionou-se água em excesso em função do aspecto visual diferente apresentado pela mistura em relação às misturas anteriores (com areia de britagem).

Tabela 16 - Valores de abatimento e relação água/materiais secos obtidos em concreto.

Composição	m	Abatimento (cm)	H
45% AN + 55% AB	3,5	8,5	8,4
	5,0	10,0	7,7
	6,5	9,5	7,6
AN 35% + 65% AB	3,5	11,5	8,8
	5,0	9,0	7,9
	6,5	9,0	7,7
40% AN + 60% PÓ	3,5	11,0	9,2
	5,0	10,5	8,4
	6,5	11,0	8,3
30% AN + 70% PÓ	3,5	15,5	9,2
	5,0	11,5	8,5
	6,5	10,0	8,4

A Tabela 17 apresenta outros resultados alcançados nos ensaios em concreto. Os teores de ar incorporado pelas misturas foram bastante baixos e próximos, estando todos abaixo de 1%. Isso pode indicar que as composições de agregados empregadas possuem tamanhos de partículas bem distribuídos (boas distribuições granulométricas), deixando pouco volume de vazios intergranulares que pudessem ser preenchidos pelo ar incorporado à mistura. É provável que valores negativos de teor de ar incorporado tenham aparecido porque, em alguns casos, o aprisionamento de ar na mistura foi superado pela absorção de água dos agregados, a qual foi considerada nula nos cálculos do percentual de ar incorporado.

Os valores de resistência à compressão apresentados na Tabela 17 se referem à média dos resultados obtidos com 28 dias. Os concretos de traços 3,5 e 5,0 com 55% de areia de britagem tiveram as médias das resistências calculadas com apenas dois resultados, pois nos dois casos um dos corpos de prova apresentou problemas no capeamento.

Tabela 17 - Outros resultados obtidos em concreto.

Composição	m	a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Resistência à compressão (MPa)	Teor de ar incorporado (%)
AN 45% + AB 55%	3,5	0,38	507,8	58,44	0,05
	5,0	0,46	382,5	48,98	0,90
	6,5	0,57	309,7	38,71	0,00
AN 35% + AB 65%	3,5	0,40	505,0	54,85	-0,52
	5,0	0,47	386,3	48,57	-0,37
	6,5	0,58	310,2	37,08	-0,44
AN 40% + PÓ 60%	3,5	0,41	500,5	52,27	-0,51
	5,0	0,51	379,5	41,93	-0,17
	6,5	0,63	306,0	32,97	-0,86
AN 30% + PÓ 70%	3,5	0,41	501,1	47,90	-0,41
	5,0	0,50	380,8	43,00	-0,16
	6,5	0,63	307,0	32,83	-0,69

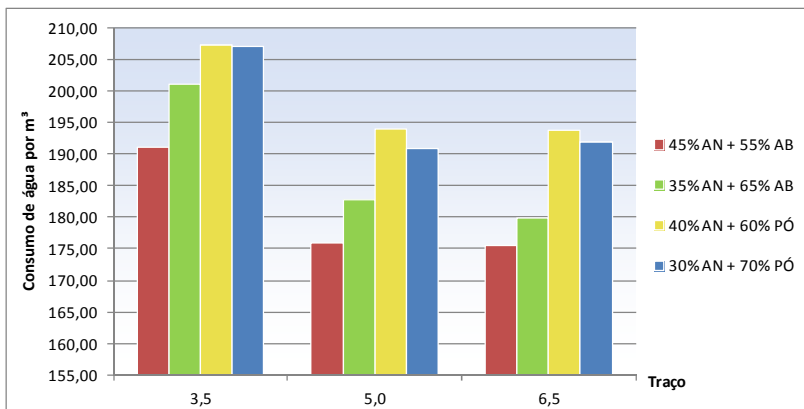
Destaca-se na Tabela 17 que os consumos de cimento por metro cúbico do traço mais rico em cimento se mostraram bastante elevados para todas as composições. É válido ressaltar que em todo o programa experimental foi utilizado o cimento CP IV-RS, que pode não ser o tipo mais apropriado para obtenção de resistências nessa faixa. Os elevados teores de pozolana em sua composição têm reação lenta, dificultando o alcance de resistências elevadas aos 28 dias. Todavia, quando se deseja produzir concretos nessa classe de resistência atingida, os cimentos CP V-ARI e CP V-ARI RS são os mais recomendados.

Através da relação água/cimento do traço e do consumo de cimento por metro cúbico se pôde encontrar o consumo de água por metro cúbico de cada concreto. Esses valores foram calculados e estão representados na Figura 26.

A análise da Figura 26 revela que os concretos que utilizaram pó-de-pedra em sua composição demandaram mais água por metro cúbico que os concretos com areia de britagem para alcançarem a faixa de abatimento proposta. Mas, é preciso considerar que os abatimentos alcançados nas misturas com pó-de-pedra foram, de maneira geral, superiores aos obtidos nas misturas com areia de britagem, o que significa que, para um mesmo abatimento, essa diferença seria reduzida. Embora isso tenha acontecido, tal variação na demanda de água já era

esperada, por conta da maior quantidade de material fino e pulverulento que o pó-de-pedra possuía, juntamente com os menores módulos de finura apresentados.

Figura 26 - Consumo de água por metro cúbico apresentado pelas misturas.



As misturas com a composição que continha 60% de pó-de-pedra foram as que apresentaram maiores demandas de água por metro cúbico. Mesmo que o teor de material pulverulento dessa composição seja menor que o da outra composição com pó-de-pedra, ainda é maior que o das composições com areia de britagem. Além disso, seu módulo de finura é o mais baixo dentre todas as composições. Esses fatores justificam a maior demanda de água dos concretos executados com essa composição. Realça-se que embora o módulo de finura possa conduzir a comparações inapropriadas entre pó-de-pedra e areia de britagem ou suas composições em alguns casos, é um índice relevante na comparação entre composições com os mesmos agregados.

Já na comparação entre as demandas de água dos concretos contendo as composições com areia de britagem, destaca-se que a composição com 55% de areia de britagem conduziu a misturas com as menores demandas. Embora a outra composição apresentasse maior módulo de finura, a referida composição tem o menor teor de microfios dentre as composições testadas nessa etapa. Além disso, seu módulo de finura é maior que os módulos das composições com pó-de-pedra. Os baixos valores de demanda de água por metro cúbico apresentados em concreto indicam um grande potencial dessa composição, em especial para uso nos casos em que é necessária uma relação a/c mais baixa.

Os valores apresentados na Tabela 17 também foram utilizados para traçar as curvas de dosagem dos concretos, as quais aparecem na Figura 27.

As curvas de dosagem da Figura 27 permitiram calcular as resistências à compressão aos 28 dias estimadas a partir de dois valores de relação água/cimento escolhidos: 0,40 e 0,65. Esses valores foram adotados para que o desempenho das composições fosse avaliado para um valor mais elevado e outro mais baixo de água/cimento, a fim de alcançar os objetivos deste trabalho, sem que as curvas de dosagem fossem demasiadamente extrapoladas. O valor 0,65 também foi estipulado porque é o maior valor de água/cimento admitido pela ABNT NBR 6118:2007 para concretos empregados em estruturas correntes, embora se saiba que esses valores são ultrapassados ocasionalmente nas centrais dosadoras. Os valores de resistência à compressão estimados através das curvas de dosagem são exibidos na Tabela 18.

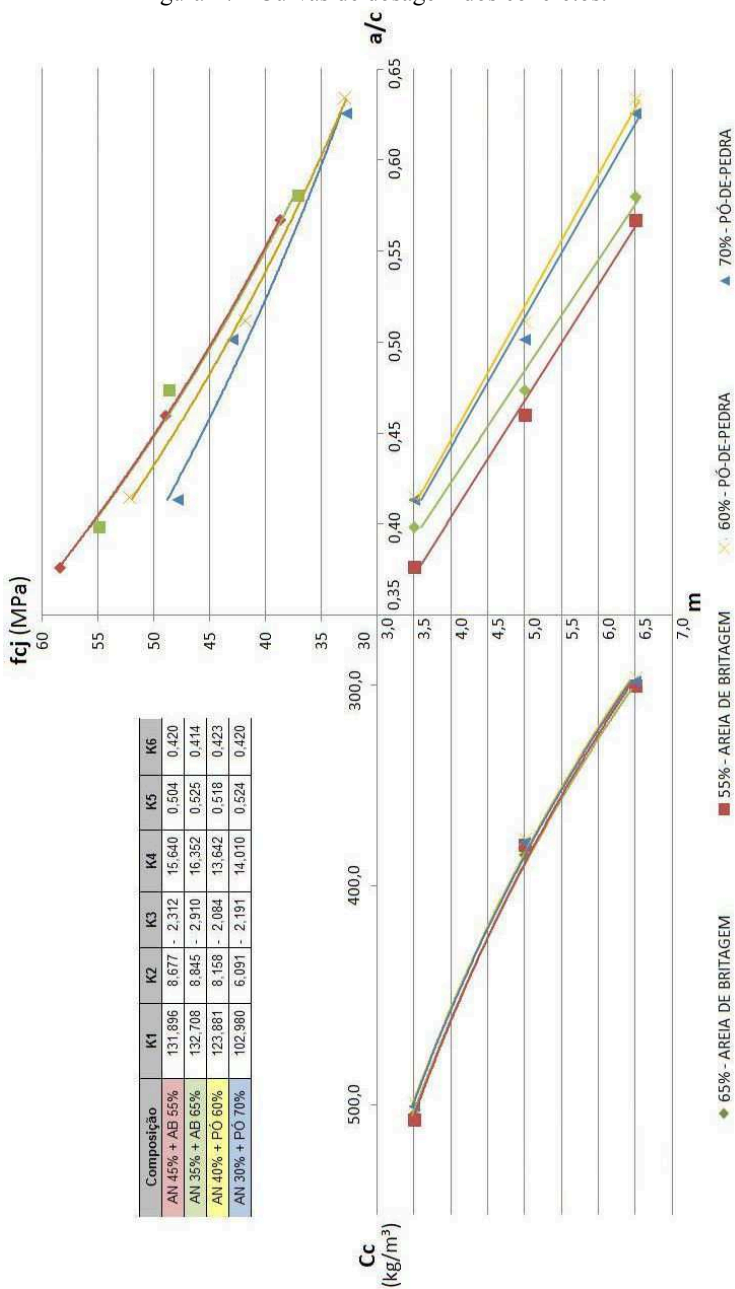
Tabela 18 - Resistências à compressão (MPa) estimadas fixando valores de relação água/cimento.

Composição	Relação a/c	
	0,40	0,65
45% AN + 55% AB	55,58	32,38
35% AN + 65% AB	55,49	32,18
40% AN + 60% PÓ	53,50	31,66
30% AN + 70% PÓ	49,99	31,82

Na Tabela 18 fica claro que a variação entre teores de areia natural e areia de britagem pouco influencia a resistência à compressão do concreto, independentemente se a relação água/cimento da mistura é alta ou baixa. Isso é comprovado se avaliando mais uma vez a Figura 27, na qual se observa no primeiro quadrante, a sobreposição entre as curvas dos concretos com areia de britagem. No caso do pó-de-pedra, para a relação água/cimento mais baixa, a variação entre os teores causou uma diferença de aproximadamente 3,5 MPa. A Figura 27 aponta que essa diferença tende a crescer com a diminuição da relação água/cimento.

Para a relação água/cimento de 0,65, a diferença entre os valores de resistência à compressão foi insignificante mesmo quando comparados os concretos com pó-de-pedra e com areia de britagem, havendo uma tendência de homogeneização entre os valores de acordo

Figura 27 - Curvas de dosagem dos concretos.



com o aumento da proporção água/cimento. Essa tendência também pode ser observada na Figura 27. Porém, para a relação água/cimento 0,40 é possível perceber que a resistência à compressão tende a diminuir à medida que o teor de material pulverulento da composição empregada aumenta. Uma possível causa para isso é que nos casos de relações água/cimento mais baixas, as partículas mais finas dos agregados retêm parte da água que seria consumida pelas partículas de cimento, prejudicando sua hidratação e a resistência do concreto como consequência. Quando a relação água/cimento é mais elevada, há água suficiente para molhar superficialmente todas as partículas finas dos agregados e também para ser consumida pelo cimento, não havendo “disputa”. Por isso, o efeito da variação de material pulverulento é praticamente nulo nesse caso (DAMO, 2011).

Esses resultados comprovam que, do ponto de vista da resistência à compressão, o potencial de empregabilidade de ambas as composições com areia de britagem é bastante elevado para relações água/cimento mais baixas. Um fator que poderia ser decisivo na escolha é a quantidade de agregado miúdo de britagem na composição. No caso de relações água/cimento mais altas, considerando-se apenas a resistência à compressão sem levar em conta a trabalhabilidade do concreto, poder-se-ia utilizar composições com qualquer um dos dois agregados miúdos de britagem. Entretanto, como os desempenhos são semelhantes, há preferência pelo uso do pó-de-pedra, pois se deve lembrar do grande interesse das pedreiras em agregar valor ao pó-de-pedra e de encontrar uma finalidade adequada para esse material.

As curvas de dosagem da Figura 27 também permitiram estimar os consumos de cimento por metro cúbico para diferentes valores de resistência à compressão escolhidos. Fixaram-se os valores de 35, 40 e 50 MPa para que fosse feita a comparação mostrada pela Tabela 19.

Tabela 19 - Consumo de cimento por metro cúbico de concreto para valores de resistência à compressão estipulados.

Composição	Resistência (MPa)		
	35,0	40,0	50,0
45% AN + 55% AB	280,38	316,40	402,90
35% AN + 65% AB	288,82	328,16	424,89
40% AN + 60% PÓ	321,34	364,34	469,27
30% AN + 70% PÓ	320,38	372,32	510,63

Com base nos resultados contidos nas Tabela 18, Tabela 19 e Figura 26, conclui-se que embora as composições com 55 e 65% de areia de britagem tenham conduzido a concretos com resistências muito próximas para as mesmas relações água/cimento, os concretos que empregaram a primeira composição demandaram as menores quantidades de água para alcançar o abatimento proposto e os menores consumos de cimento para as resistências determinadas.

Os valores apontados pela Tabela 19 também demonstram que o consumo de cimento por metro cúbico também aumenta com a elevação do teor de material pulverulento da composição empregada, para os três valores de resistência escolhidos. Somente no caso da composição com 70% de pó-de-pedra houve uma redução, a qual foi de aproximadamente 0,3%. Não foi encontrada uma razão para esse desvio de comportamento. Contudo, observa-se que quanto maior a resistência à compressão avaliada, mais prejudicial é a elevação do teor de material pulverulento no consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Por exemplo, para a resistência de 40 MPa, a mistura contendo a composição com 70% de pó-de-pedra apresentou aumento no consumo de cimento de 2,2% em relação à mistura preparada com a composição de 60% de pó-de-pedra. Para a resistência de 50 MPa, esse aumento foi de 8,8%.

Desta forma, avaliando-se o potencial econômico obtido pela redução do consumo de cimento por metro cúbico de concreto, as misturas com menos material pulverulento na composição de agregados saem em vantagem.

A utilização de composições com pó-de-pedra faz o consumo de cimento dos concretos aumentar muito em relação às com areia de britagem, tanto para altas quanto para baixas resistências. Por esse motivo, seria necessário estudar se os interesses de sua aplicação já mencionados são capazes de compensar economicamente a inviabilidade aqui apontada. Tomando como referência o consumo de cimento da mistura usando a composição com 55% de areia de britagem, foram calculados os acréscimos de cimento necessários para que fossem atingidas as mesmas resistências à compressão com as misturas com pó-de-pedra. A Tabela 20 contendo esses valores é mostrada a seguir.

Tabela 20 - Acréscimo no consumo de cimento por metro cúbico (kg/m^3) das misturas com pó-de-pedra em relação à mistura empregando composição com 55% de areia de britagem.

Composição	Resistência (MPa)		
	35,0	40,0	50,0
40% AN + 60% PÓ	40,96	47,94	66,37
30% AN + 70% PÓ	40,00	55,91	107,73

Considerando que o preço por tonelada de cimento CP IV-RS na região de Florianópolis gira em torno de R\$345,00 para as centrais dosadoras, a comparação revela que para resistências de 35 MPa, o metro cúbico do concreto produzido com a composição com 70% de pó-de-pedra custaria R\$13,80 mais caro. Evidentemente, para a mesma resistência à compressão, o concreto com 60% de pó-de-pedra na composição de agregados miúdos apresentaria um incremento ainda maior no custo, em função do maior consumo de cimento. Como o pó-de-pedra e a areia de britagem possuem a mesma massa específica, nas mesmas proporções, não alteram o volume de concreto produzido.

O preço da tonelada da areia de britagem em Florianópolis é de R\$26,00. Estimando o valor da tonelada de areia natural em 20 reais, desprezando os custos da água e do aditivo no cálculo e levando em conta que os percentuais de agregados de britagem na composição e os teores de agregados (m) são distintos, para compensar a diferença de R\$13,80 calculada para a composição com 70% de pó-de-pedra, a tonelada do pó-de-pedra teria que custar apenas R\$4,51, ou seja, 82,7% menos que a areia de britagem, valor muito abaixo do praticado.

É importante ressaltar aqui que, mesmo que haja a compensação de custos, não se objetiva ter um consumo de cimento tão elevado. A fabricação de cimento acarreta significativos impactos sociais e ambientais, poluindo solo e água, e é responsável por 5% das emissões mundiais de dióxido de carbono (WBCSD, 2002 apud CARVALHO, 2008).

Diante do exposto, a hipótese de se utilizar agregados miúdos oriundos de processos britagem com teores de material pulverulento mais elevados para concretos com classes de resistência à compressão mais reduzidas foi descartada.

Com relação ao outro objetivo, de selecionar a melhor composição de areia natural com a areia de britagem, aponta-se a composição com 55% de areia de britagem. Devido ao seu bom

desempenho, é recomendado tanto para concretos com classes mais altas de resistência à compressão quanto para classes mais baixas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Após a realização deste trabalho e da análise dos resultados nele obtidos, compuseram-se algumas conclusões com relação à quantidade de material pulverulento em composições de agregados miúdos de britagem com areia natural e o teor dessas composições.

Com relação aos agregados utilizados, observou-se que suas características podem variar significativamente de um lote para outro, especialmente se tratando da areia de britagem.

Os resultados satisfatórios obtidos com algumas misturas comprovam que os limites estipulados pelas zonas Utilizável e Ótima (ABNT NBR 7211:2009) não se aplicam a agregados miúdos de britagem e suas composições, uma vez que as composições testadas não se enquadravam rigorosamente em nenhum desses limites.

A comparação entre os resultados dos estudos em argamassa e concreto revelam que há boa correlação entre os valores apresentados de Índice de Fluidez das argamassas com a quantidade de água demandada por metro cúbico em concreto, que é menor quanto maior for o índice.

Quanto à determinação do teor de argamassa ideal para cada composição, fica evidente a interferência negativa dos agregados miúdos de britagem na mobilidade da mistura, fazendo com que essa demande mais argamassa conforme aumenta o teor de agregados de britagem, em função da aspereza e angulosidade apresentada por suas partículas.

Em diferentes ocasiões se pôde perceber que o módulo de finura dos agregados não é um parâmetro suficientemente sensível para comparar adequadamente agregados miúdos com diferentes teores de material pulverulento, uma vez que no seu cálculo são utilizadas exclusivamente as porcentagens retidas acumuladas das peneiras da série normal.

Nos ensaios em concreto também foi possível perceber que, embora fossem empregadas composições que foram preliminarmente selecionadas de acordo com o desempenho, o cimento CP IV-RS não é recomendado para classes de resistência elevadas, uma vez que conduziu a consumos de cimento por metro cúbico consideravelmente altos.

Dentre as quatro composições testadas em concreto, a composição com 55% de areia de britagem apresentou a menor

demanda de água para chegar à faixa de abatimento desejada nos diferentes traços, maior resistência à compressão para os dois valores de água/cimento adotados na estimativa e menores consumos de cimento para as três resistências determinadas. Diante desse excelente desempenho, recomenda-se o emprego da areia de britagem e desses teores na composição com areia natural fina para emprego em concretos de altas e baixas resistências.

A hipótese de se empregar composições entre areia natural e agregados miúdos de britagem com pouca ou nenhuma redução no teor de material pulverulento no preparo de concretos de resistência mais baixa foi rejeitada. Apesar de terem apresentado resultados considerados satisfatórios em outras avaliações, no cálculo do consumo de cimento para diferentes resistências, ambas as misturas com pó-de-pedra analisadas apresentam um grande aumento na demanda de cimento por metro cúbico, mesmo para resistências mais baixas. Para compensar a diferença no custo da produção do concreto causado pelo aumento no consumo de cimento, o preço do pó-de-pedra necessitaria ser consideravelmente menor que o da areia de britagem. Um estudo de viabilidade econômica poderia indicar se a economia alcançada com a supressão de processos de beneficiamento e de gastos com a estocagem e remanuseio de pilhas é capaz de compensar a diminuição necessária no preço de venda.

Diante do que foi exposto, conclui-se que a influência de elevados teores de material pulverulento nos agregados miúdos de britagem é evidente, prejudicando o desempenho de concretos convencionais, independentemente da resistência à compressão almejada. Assim, orienta-se que sejam utilizados para concretos convencionais, os agregados miúdos de britagem com beneficiamento.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Diante da análise dos resultados e conclusões obtidos neste trabalho, sugerem-se para trabalhos futuros:

- Estudar composições entre areia natural e agregados miúdos de britagem com outros teores de material pulverulento visando encontrar um teor ideal;

- Avaliar o desempenho nos mesmos ensaios deste trabalho de composições com areias de britagem e pós-de-pedra de outra origem geológica e/ou outro processo de britagem;
- Analisar qualitativamente o material pulverulento presente nos agregados miúdos.
- Calcular a viabilidade econômica de forma mais ampla do emprego do pó-de-pedra nos concretos de classes baixas de resistência;
- Testar a utilização do pó-de-pedra em substituição à areia de britagem em concretos autoadensáveis;
- Buscar por um novo parâmetro de avaliação da finura dos agregados que seja mais sensível à variação do teor de material pulverulento que o módulo de finura.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM C 494**: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. West Conshohocken, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

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

_____. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central — Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____. **NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIAS, G. C. (Ed.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. Iphis Gráfica e Editora, São Paulo, 2007.

CARVALHO, M. B. M. **Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal**. Brasília, 2008. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) Universidade de Brasília.

CCAA, CEMENT & CONCRETE AGGREGATES AUSTRALIA. **Guide to the Specification and Use of Manufactured Sand in Concrete**. Austrália, 2008.

CRUZ, O. C. **Desempenho de um Hidrociclone de Geometria “Rietema” como Pré-Filtro para Sistemas de Irrigação**. Jaboticabal, 2008. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias e Veterinárias) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

DAMO, G. F. **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland**. Florianópolis, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. **Agregados para a Construção Civil**. In: ISAÍIA, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712p.

GONÇALVES, M.; ARTHUSO, V.; DEGUTI, R.; OHASHI, T. **Produção de areia de brita com qualidade**. ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. *Revista Areia e Brita* Nº 10. Abr, mai, jun 2000.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. PINI. São Paulo, 1993.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, properties, and materials**. 3ª Ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

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

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2ª Ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997.

PRUDÊNCIO JR, L.R. **Materiais de Construção Civil**. Notas de aula. Disciplina ECV 5302 do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

PRUDÊNCIO JR, L.R.; COELHO, A.H.; GUTSTEIN, D. **Utilização do pó-de-pedra para a produção de agregado miúdo para uso em concreto**. In: XXII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Tucumán, Argentina: setembro de 1995. Anais. PP 173-185.

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. 2004

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

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

TUTIKIAN, B. F., & DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. São Paulo, PINI: 2008.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao Estudo da Forma e da Composição Granulométrica de Agregados Miúdos de Britagem nas Propriedades do Concreto de Cimento Portland**. Florianópolis, 2008.

Disertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina.