



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

GABRIELA FERREIRA DAMO

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES
AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM EM CONCRETOS DE
CIMENTO PORTLAND**

Florianópolis, 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES
AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM EM CONCRETOS DE
CIMENTO PORTLAND**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -PGEC para obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

GABRIELA FERREIRA DAMO

Florianópolis, 2011.

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

D163a Damo, Gabriela Ferreira

Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento portland [dissertação] / Gabriela Ferreira Damo ; orientador, Luiz Roberto Prudêncio Junior. - Florianópolis, SC, 2011.

230 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Britagem. 4. Concreto. 5. Cimento portland. I. Prudêncio Junior, Luiz Roberto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

Gabriela Ferreira Damo

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES
AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM EM CONCRETOS DE
CIMENTO PORTLAND**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Florianópolis, novembro de 2011.

Prof. Ph.D.Roberto Caldas de Andrade Pinto
Coordenador do PPGEC

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.
Orientador

Prof. Dr. Oswaldo Cascudo
UFG

Prof. Dr. Alexandre Lima de Oliveira
IFSC

Profª. Drª. Janaíde Cavalcante Rocha
ECV/UFSC

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, coragem e perseverança para buscar meus objetivos.

Ao professor, orientador e amigo, Luiz Roberto Prudêncio Jr., sempre disposto a passar seu conhecimento. Agradeço pela orientação e apoio durante esses anos. Obrigada também pela oportunidade de poder participar desta família que é o GTec.

Aos professores Dra. Janaíde Cavalcante Rocha e Dr. Alexandre Lima de Oliveira, por terem aceito avaliar este trabalho, desde sua qualificação. E também pelo auxílio e ensinamentos.

Ao professor Dr. Oswaldo Cascudo por aceitar avaliar este trabalho.

Aos amigos do GTec, obrigada por toda amizade, ajuda e apoio durante esses anos. Valeu Cintya, Vivi, Luiz, Lucas, Diego, Felipe, Rudiele, Ronaldo, Eduardo, Wilson, Rômulo, Tochetto e Juliano, sem vocês esse trabalho não seria possível!

À Pirolla, pela ajuda, apoio e, principalmente, pela enorme amizade!

Um agradecimento especial também à Regina, pelo apoio e momentos de descontração.

À professora Janaíde Cavalcante Rocha, por disponibilizar equipamentos e laboratório para ensaios, além de prestar todo auxílio necessário.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina e seus funcionários Renato, Luiz Henrique e Roque pela ajuda, disponibilização das instalações e equipamentos para execução dos ensaios.

Ao Nanotec- Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil, pela disponibilização para o ensaio de granulometria a laiser.

Às empresas Cedro Engenharia, Vale do Selke, Setep e Calcário Botuverá, pela doação dos agregados.

À Engemix, pela doação do cimento, aditivo e de outros produtos utilizados. Também aos seus funcionários e, em especial, ao Sérgio e Cleiton pela ajuda e colaboração.

Aos meus pais, irmã e sobrinha, que são pessoas muito importantes na minha vida, obrigada pelo carinho e compreensão. Sem a presença e o constante apoio de vocês com certeza eu não teria chegado até aqui.

E, por fim, um agradecimento especial ao meu pai Nei Damo, pelo apoio, incentivo, ensinamentos e, principalmente, por ser uma pessoa tão especial, que me deu o exemplo de caráter e perseverança.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, me ajudaram e me apoiaram, ao longo dos últimos anos, para poder concluir esta dissertação.

RESUMO

DAMO, Gabriela Ferreira. *Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland*. Florianópolis, 2011. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Os agregados miúdos de britagem, por razões econômicas e ambientais, têm sido cada vez mais utilizados na produção de concretos de cimento Portland, em substituição dos agregados miúdos naturais. Com isso, surge a necessidade do desenvolvimento de estudos sobre a viabilidade do emprego de areia de britagem na produção de concretos. A crescente demanda de areia de britagem tem incentivado os produtores de agregados a melhorar seu produto, com o objetivo de obter, por exemplo, uma areia com grãos menos lamelares e com um menor teor de material pulverulento. Com o objetivo de melhor entender a influência das características dos agregados miúdos nas propriedades do concreto, este trabalho analisou agregados miúdos de britagem de quatro diferentes origens mineralógicas: basalto, gnaisse, granito e calcário. Dezesesseis tipos de areias de britagem foram compostas através dos agregados obtidos, para posterior utilização nos estudos em argamassa, sendo quatro das quais selecionadas para os estudos em concreto. Foram analisadas diversas composições de areias de britagem com uma areia natural, através de um programa experimental executado em argamassas, composto com o objetivo de avaliar os efeitos das areias de britagem nas propriedades das misturas no estado fresco e endurecido. Estas análises forneceram resultados úteis, pertinentes aos prováveis efeitos das areias de britagem nas propriedades dos concretos. O principal objetivo do programa experimental foi analisar a influência da granulometria, incluindo a fração abaixo de $75\mu\text{m}$, da forma dos grãos e do teor de material pulverulento. Para tal, as principais propriedades avaliadas em concretos e argamassas foram consistência, ar incorporado e resistência à compressão. Visando atingir os objetivos do trabalho, outros testes realizados foram Granulometria a Laser, análise de forma, e o teste do Azul de Metileno. Analisando os resultados, foi possível observar grande melhoria na trabalhabilidade dos concretos e argamassas quando utilizados os agregados miúdos de britagem com grãos mais arredondados e, principalmente, quando eliminada parte do material pulverulento. Além disto, observou-se que o material

pulverulento, desde que controlado, pode trazer benefícios na trabalhabilidade dos concretos, sem prejudicar sua resistência.

Palavras Chave: agregado miúdo, forma dos grãos, britagem, concreto.

ABSTRACT

DAMO, Gabriela Ferreira. *Effects of various manufactured fine aggregates on the properties of Portland cement concrete*. Florianópolis, 2011. 193 p. Dissertação (Master Degree in Civil Engineer) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

The reduced availability of natural sands and the need to better utilise sand-sized material generated in the aggregate crushing process, for both economical and environmental reasons, has combined to increase the use of manufactured sand in cement Portland concrete, as an alternative to natural sand. As a result, it has encouraged producers to include processes in the quarries that attempt to improve particle shape in fine aggregates and control the level of microfines in the final product. In order to increase the knowledge of the influence of the fine aggregate characteristics on the concrete properties, this research tested four sources of manufactured sand including basalt, granite, limestone and gneiss. Sixteen different types of manufactured sand were composed from the fine aggregates obtained, and were used for the mortar study, four of which were selected to be used again in concrete. Several blends of the manufactured sands with natural sand were evaluated by using a structured series of mortar trials designed to examine the effects of the manufactured sand on the plastic and hardened properties of the mortar. These trials provided useful information on the probable effects of the manufactured sand on the properties of the concrete. The main purpose of the experimental program is to analyze the influences of the grain size distribution, including the fraction below 75 μ m, the shape of manufactured sand the content of microfines. Hence, the main properties of mortar and concrete evaluated were consistency, air content and compressive strength. To achieve the objectives another tests carried out were Laser Particle Size Distribution, Shape analysis and the Methylene Blue Test. It was concluded that optimized aggregate blends, in addition to a better shape and a controlled amount of microfines, can improve the workability of concrete, decreasing the cement and water content. Furthermore, it was found that a certain amount of microfines can be used to improve the workability of concrete without negatively affecting hardened concrete.

Key Words: manufactured fine aggregates; grain shape; microfines, concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Ciclo das rochas (FRASCA; SARTORI, 1998).	40
Figura 2- Partículas com comprimento (a) e largura (b) maiores que a abertura da malha da peneira (adaptado de KWAN <i>et al.</i> , 1999 <i>apud</i> WEIDMANN, 2008).	46
Figura 3– (a) Relação água/cimento; (b) Dosagem de aditivo, mL (a/c constante)	53
Figura 4– a) Resistência à compressão de argamassas com substituição por argilo-minerais, relação a/c variável (a/c apresentada acima das misturas); b) resistência à compressão de argamassas com substituição por argilo-minerais, relação a/c fixa (demanda de aditivo apresentada acima das misturas).	54
Figura 5– a) Retração por secagem, a/c variável (a/c apresentada acima das misturas) b) Retração por secagem, a/c variável (demanda de aditivo acima das misturas, mL).	55
Figura 6– Resistência à compressão (4% de substituição, a/c variável)	57
Figura 7– Resultados da Granulometria a Laser	61
Figura 8- Tabela para avaliação visual dos graus de esfericidade e de arredondamento (NBR7389:1992).	68
Figura 9- Planta de esquema básico de uma britagem.	76
Figura 10 – Fluxograma do esquema básico de uma britagem	77
Figura 11– Britador tipo Cone (à esquerda) e britador tipo VSI (à direita).	78
Figura 12- Britador tipo Cone	79
Figura 13– Definição do revestimento, de acordo com o produto final que se deseja.	80
Figura 14- Exemplo de partículas em forma de agulha e chapa, formadas na situação de câmara parcialmente vazia.	81
Figura 15–Comparação entre agregados resultantes das situações de câmara cheia e vazia do Cone, respectivamente.	81

Figura 16– Modo de operação de um VSI (<i>Mesto Minerals, 2005</i>).	82
Figura 17- Quanto maior a rotação de um VSI, maior a energia que atua nos processos de fragmentação da rocha.	83
Figura 18–À esquerda partículas provenientes de um britador do tipo Cone. À direita o mesmo material com apenas uma passagem pelo britador VSI.	84
Figura 19- Lavadores de rosca.	86
Figura 20- Roda desaguadora.	87
Figura 21- Tanque classificador.	88
Figura 22- Hidrociclone.	89
Figura 23- Otrner.	90
Figura 24- Tubos para a captação do pulverulento nos pontos de maior concentração.	92
Figura 25- Aero-separador (<i>STURTEVANT Inc.</i>).	93
Figura 26- Sistema para produção de areia de britagem utilizado no Japão (<i>Pettingel, 2008</i>).	94
Figura 27- Filtro de mangas.	95
Figura 28-Fluxograma do preparo das areias de britagem a serem estudadas.	101
Figura 29– Equipamento utilizado na realização do ensaio de granulometria a laser.	104
Figura 30– Equipamentos para o ensaio do azul de metileno.	106
Figura 31- Fluxograma representativo de como pode funcionar uma instalação de britagem para redução do material retido na peneira de malha 1,2 mm no produto final.	108
Figura 32- Fluxograma das misturas para o estudo em argamassa.	111
Figura 33- Ensaio para determinação de consistência – mesa de espalhamento.	112

- Figura 34– Realização do ensaio, medição do espalhamento. 113
- Figura 35– Curvas granulométricas das areias de britagem. 122
- Figura 36– Imagens dos grãos de basalto obtidas através do escâner. 125
- Figura 37– Basalto: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm. 126
- Figura 38– Basalto: Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas no ensaio de granulometria a laser. 127
- Figura 39- Gnaisse: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm. 129
- Figura 40- Granito: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm. 130
- Figura 41- Granito: Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas no ensaio de granulometria a laser. 131
- Figura 42- Calcário: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm. 132
- Figura 43- Calcário: Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas no ensaio de granulometria a laser. 132
- Figura 44– Distribuição das partículas abaixo de 75 μm , obtida por granulometria a laser. 134
- Figura 45– Ensaio do Azul de Metileno: a), b) e c) ensaio da areia de britagem de basalto VSI original; e d) ensaio da areia de britagem de granito Cone original. 137
- Figura 46– Basalto: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural adicionado. 142
- Figura 47– Basalto: Variação do Índice de fluidez (espalhamento ou *flow 0*/módulo de finura) em função do teor de areia natural. 144

- Figura 48–Basalto: Variação das resistências à compressão em função do teor de areia natural adicionado. 145
- Figura 49- Gnaiss: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural adicionado. 148
- Figura 50– Gnaiss: Variação do Índice de fluidez (espalhamento ou *flow 0*/módulo de finura) em função do teor de areia natural. 148
- Figura 51- Gnaiss: Variação das resistências à compressão em função do teor de areia natural adicionado. 150
- Figura 52- Granito: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural adicionado. 153
- Figura 53– Granito: Variação do Índice de fluidez (espalhamento ou *flow 0*/módulo de finura) em função do teor de areia natural. 154
- Figura 54- Granito: Variação das resistências a compressão em função do teor de areia natural adicionado. 154
- Figura 55- Calcário: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural. 157
- Figura 56- Calcário: Variação do Índice de fluidez (*flow 0*/módulo de finura) em função do teor de areia natural. 158
- Figura 57- Calcário: Variação das resistências à compressão em função do teor de areia natural adicionado. 158
- Figura 58– Variação do Índice de Fluidez (espalhamento ou *flow 0*/Módulo de Finura) em função do teor de areia natural: a) areias lavadas e b) areias originais 160
- Figura 59– Teor de ar incorporado em função do teor de areia natural. 161
- Figura 60– Resistências das argamassas das composições feitas com as areias Cone lavada e original e VSI lavada e original. 162
- Figura 61– Calcário: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno. 163

Figura 62- Granito: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno.	163
Figura 63- Gnaisse: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno.	164
Figura 64- Basalto: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno.	164
Figura 65- Basalto: Relação Espalhamento 0/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.	166
Figura 66- Gnaisse: Relação Espalhamento 0/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.	167
Figura 67- Granito: Relação Espalhamento 0/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.	168
Figura 68- Calcário: Relação Flow/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.	168
Figura 69- Espalhamento 0/Módulo de finura em função do teor de areia natural, das areias com 50% a menos retido na peneira 1,2 mm.	170
Figura 70- Espalhamento 0/Módulo de finura em função do teor de areia natural, das areias com o material abaixo da peneira 0,3 mm invertido.	171
Figura 71- Pontos relativos às resistências à compressão dos concretos e suas respectivas relações água/cimento	179
Figura 72- Curva de Abrams para estimativa de resistência à compressão.	179
Figura 73- Curvas de dosagem dos concretos.	180
Figura 74- Curvas de dosagem com uma única curva de Abrams estimada através de todos os resultados.	185
Figura 75- Relação entre o consumo de água por metro cúbico dos concretos de $m=6,5$ e os resultados dos espalhamentos (flow 0) das argamassas correspondentes, com os mesmos agregados miúdos.	190

- Figura 76– Relação entre o consumo de água por metro cúbico dos concretos de $m=6,5$ e o Índice de Fluidez das argamassas correspondentes, com os mesmos agregados miúdos. 190
- Figura 77- Relação entre as relações água/cimento dos concretos de $m=6,5$ e os resultados dos Índices de Fluidez (flow/MF) das argamassas correspondentes, com os mesmos agregados miúdos. 191
- Figura 78– Furação do maciço rochoso para posicionar o explosivo. 209
- Figura 79–Carregamento do material detonado. 210
- Figura 80- Britador de mandíbulas (*Metso Minerals, 2005*). 211
- Figura 81- Peneira vibratória. 213
- Figura 82- Aparatos utilizados para auxiliar na aquisição das imagens para análise do coeficiente de forma: a) caixa com lâmpadas; b) câmara escura. 216

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).	44
Tabela 2– Demanda de água e aditivo (Tabela adaptada de Stewart <i>et al.</i> , 2006)	57
Tabela 3- Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.	62
Tabela 4– Pedregulho e areia (NBR 7225:1993)	66
Tabela 5– Pedra britada, pedrisco e pó-de-pedra (NBR 7225:1993)	66
Tabela 6– Propriedades médias do cimento.	98
Tabela 7- Legenda fluxograma das argamassas: NLV, LV, NLC, LC.	108
Tabela 8- Legenda fluxograma das argamassas: 1,2LV e 1,2LC.	109
Tabela 9- Legenda fluxograma das argamassas: 0,3LV e 0,3LC.	109
Tabela 10- Legenda fluxograma das argamassas: 0,85LV+0,15LC e 0,70LV+0,30LC.	110
Tabela 11– Areia Natural: composição granulométrica, módulo de finura, massa específica e teor de material pulverulento.	117
Tabela 12- Resultados de massa específica para as areias de calcário.	118
Tabela 13- Resultados de massa específica para as areias de basalto.	118
Tabela 14- Resultados de massa específica para as areias de gnaisse.	118
Tabela 15- Resultados de massa específica para as areias de granito.	118
Tabela 16- Teor de material pulverulento antes e depois do processo de lavagem.	119

Tabela 17- Composição granulométrica das areias de Calcário original (não lavada).	119
Tabela 18- Composição granulométrica das areias de Gnaisse original (não lavada).	120
Tabela 19- Composição granulométrica das areias de Basalto original (não lavada).	120
Tabela 20- Composição granulométrica das areias de Granito original (não lavada).	121
Tabela 21- Módulo de Finura das areias lavadas e originais.	121
Tabela 22- Basalto: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.	123
Tabela 23- Calcário: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.	123
Tabela 24- Gnaisse: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.	123
Tabela 25- Granito: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.	124
Tabela 26- Características dos agregados de basalto obtidas no ensaio de granulometria a laser.	128
Tabela 27- Características dos agregados de gnaisse obtidas no ensaio de granulometria a laser.	129
Tabela 28- Características dos agregados de granito obtidas no ensaio de granulometria a laser.	130
Tabela 29- Características dos agregados de calcário obtidas no ensaio de granulometria a laser.	133
Tabela 30- Valores do Ensaio do Azul de Metileno	135
Tabela 31- Resultados de Azul de Metileno para material pulverulento antes e depois de passar por aeroseparador.	138
Tabela 32- Resultados argamassas da areia de britagem de basalto, do VSI, lavada e original (não lavada).	140

Tabela 33- Resultados argamassas da areia de britagem de basalto, do Cone, lavada e original (não lavada).	141
Tabela 34- Resultados argamassas da areia de britagem de gnaíse, do VSI, lavada e original (não lavada).	146
Tabela 35- Resultados argamassas da areia de britagem de gnaíse, do Cone, lavada e original (não lavada).	147
Tabela 36- Resultados argamassas da areia de britagem de granito, do VSI, lavada e original (não lavada).	151
Tabela 37- Resultados argamassas da areia de britagem de granito, do Cone, lavada e original (não lavada).	152
Tabela 38- Resultados argamassas da areia de britagem de calcário, do VSI, lavada e original (não lavada).	155
Tabela 39- Resultados argamassas da areia de britagem de calcário, do Cone, lavada e original (não lavada).	156
Tabela 40- Características dos concretos no ajuste do teor de argamassa ideal.	174
Tabela 41- Resultados obtidos nos concretos.	176
Tabela 42- Resistência à compressão (MPa) para relações água/cimento fixas.	181
Tabela 43- Consumo de cimento por metro cúbico de concreto, para resistências fixas.	182
Tabela 44- Novos consumos de cimento por metro cúbico de concreto, para resistências fixas.	186
Tabela 45- Resumo dos resultados dos ensaios em argamassas e concretos.	189
Tabela 46- Resolução mínima de aquisição das imagens em função do tamanho dos grãos.	216
Tabela 47- Resultados dos ensaios em argamassa da areia de basalto	219
Tabela 48- Resultados dos ensaios em argamassa da areia de gnaíse	221

Tabela 49– Resultados dos ensaios em argamassa da areia de granito	223
Tabela 50– Resultados dos ensaios em argamassa da areia de calcário	225
Tabela 51– Basalto: Verificação da existência de relação entre as variáveis através da inclinação da reta	227
Tabela 52– Gnaisse: Verificação da existência de relação entre as variáveis através da inclinação da reta	228
Tabela 53– Granito: Verificação da existência de relação entre as variáveis através da inclinação da reta	229
Tabela 54– Calcário: Verificação da existência de relação entre as variáveis através da inclinação da reta	230

LISTA DE ABREVIATURAS E GLOSSÁRIO

Flow 0: média de duas medidas ortogonais do espalhamento de uma argamassa na mesa para ensaio de consistência após o içamento vertical do molde tronco-cônico, sem aplicação de quedas na mesa;

Flow 10: média de duas medidas ortogonais do espalhamento de uma argamassa na mesa para ensaio de consistência após aplicação de 10 quedas na mesa em um intervalo de 10 segundos;

Material Pulverulento: material passante na peneira de malha de 0,075 mm (75 μ m) por lavagem de acordo com ensaio prescrito pela NBR NM 46:2003;

Microfinos: sinônimo de material pulverulento;

Módulo de finura (MF): soma das porcentagens retidas acumuladas, relativas à massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100;

CP IV RS: Cimento Portland Pozolânico Resistente a Sulfatos;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
1.1. GENERALIDADES	29
1.2. OBJETIVOS	31
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	32
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1. GENERALIDADES	35
2.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES	36
2.2.1. Os Agregados	36
2.2.2. As Rochas	39
2.2.2.1. Geologia e mineralogia das rochas	39
2.2.2.2. Ensaio aplicado as rochas para produção de agregados em geral	41
2.3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS E SUAS INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND	42
2.3.1. Composição Granulométrica	43
2.3.1.1. Módulo de Finura	47
2.3.1.2. Material pulverulento	47
2.3.1.3. O material pulverulento e o ensaio do Azul de Metileno	48
2.3.1.3.1. Generalidades	48
2.3.1.3.2. Propriedades dos argilo-minerais e sua influência em concretos e argamassas	51
2.3.1.3.3. O ensaio do Azul de Metileno	58
2.3.1.4. Faixas Granulométricas em uso no Brasil	62
2.3.1.5. Dimensão máxima característica	63
2.3.2. Forma e Textura Superficial das Partículas	64
2.3.2.1. Métodos para determinação da forma de agregados miúdos.	67
2.3.3. Massa Específica e Massa Unitária	69

2.3.4. A aplicação de Areia de Britagem e o Efeito da Interação de suas Características nas Propriedades de Concretos e Argamassas.	70
2.3.4.1. A composição de areia de britagem com areia natural	70
2.4. PRODUÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM	73
2.4.1. Princípios de uma Britagem	73
2.4.2. Esquema Básico de uma Britagem	74
2.4.3. Diferenças entre Britadores Tipo VSI e Tipo Cone	78
2.4.3.1. Cones	78
2.4.3.1.1. Generalidades	78
2.4.3.1.2. Forma do produto final	80
2.4.3.2. VSIs	82
2.4.3.2.1. Generalidades	82
2.4.3.2.2. Forma do produto final	84
2.4.4. Equipamentos de Supressão de Pulverulento	85
2.4.4.1. Tipos de Equipamentos	85
2.4.4.1.1. Lavador de Rosca	85
2.4.4.1.2. Roda Desaguadora	86
2.4.4.1.3. Tanque Classificador	87
2.4.4.1.4. Equipamentos que combinam força da gravidade com força centrífuga	89
2.4.4.1.4.1. Hidrociclones	89
2.4.4.1.4.2. Ortner	90
2.4.4.2. Equipamentos Via Seca e suas características	90
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	97
3.1. MATERIAIS EMPREGADOS	97
3.2. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	99
3.3. PARÂMETROS GERAIS ANALISADOS	102
3.3.1. O Tipo do Britador Utilizado na Cominuição das Rochas	102
3.3.2. O Teor de Material Pulverulento	102
3.3.3. O Teor de Areia Natural Fina	103

3.3.4. O Tipo da Rocha e a Forma dos Agregados	103
3.4. METODOLOGIA	103
3.4.1. Avaliação da Forma dos Grãos	103
3.4.2. Granulometria a Laser	104
3.4.3. O Ensaio do Azul de Metileno	105
3.4.4. Estudo em Argamassa	106
3.4.4.1. Parâmetros analisados	107
3.4.4.2. Procedimentos	112
3.4.5. Estudo em Concreto	114
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	117
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	117
4.1.1. Areia Natural	117
4.1.2. Agregados Miúdos de Britagem	117
4.1.3. Forma dos grãos	122
4.1.4. Granulometria a Laser	126
4.1.5. Azul de Metileno	135
4.2. ESTUDO EM ARGAMASSA	138
4.2.1. Análise Geral	139
4.2.1.1. Basalto	139
4.2.1.2. Gnaisse	145
4.2.1.3. Granito	150
4.2.1.4. Calcário	154
4.2.2. Análise dos Quatro Tipos de Rocha	159
4.2.3. Correlação entre Argamassas e o Azul de Metileno	162
4.2.4. Análise quanto à Mistura das Areias Cone e VSI	165
4.2.5. Análise quanto à Redução do Teor de Material Retido na Peneira 1,2mm	169
4.2.6. Análise quanto à Forma dos Grãos abaixo da Peneira 0,3 mm.	171
4.3. ESTUDO EM CONCRETO	173

4.3.1. Definição dos Concretos	173
4.3.2. Teores de Argamassa	173
4.3.3. Curvas de Dosagem	175
4.3.4. Correlações entre Concretos e Argamassas	188
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	193
5.1. CONCLUSÕES	193
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	197
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
7. ANEXOS	207
7.1. ANEXO: ABERTURA DE PEDREIRAS	207
7.2. ANEXO: ETAPAS E PROCESSOS BÁSICOS DE UMA BRITAGEM	209
7.3. ANEXO: MÉTODO GTEC-UFSC PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE FORMA DE AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS.	214
7.4. ANEXO: RESULTADOS DO ESTUDO EM ARGAMASSA	219
7.5. ANEXO: CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE FLUIDEZ DAS ARGAMASSAS E OS VALORES DE AZUL DE METILENO: VERIFICAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS	227

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

O concreto é hoje o material de construção mais usado no mundo. O consumo atual de concreto é estimado em 11 bilhões de toneladas métricas ao ano, significando ser esta indústria a maior consumidora mundial de recursos naturais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No contexto atual, com o crescimento da população, a urbanização e a crescente necessidade de construção de obras de infraestrutura, torna-se cada vez mais imperiosa a preocupação com a escolha de materiais, que agora deve ser também orientada por considerações ecológicas, e não puramente por vantagens técnicas e econômicas.

Para se ter uma idéia da dimensão do consumo mundial de agregados, em 16 países europeus é registrado o consumo médio de 511 t de agregados por habitante em toda a sua vida ou de 6 a 10 t/ha/ano. Nos EUA, a taxa é de 8 t/ha/ano e, no Brasil, o consumo é de 2,1 t/ha/ano. A produção de agregados no Brasil alcançou, em 2004, 129×10^6 t para a pedra-britada e 187×10^6 t para a areia (FRAZÃO, 2005). O consumo de agregados no mundo só é menor do que o consumo de água (LCPC, 2000). Segundo Kuck (2004 *apud* DRAGO *et al.*, 2009), a extração da areia natural em rios chega a aproximadamente 320 milhões de m³ por ano, volume suficiente para construir 7100 estádios como o do Maracanã.

Diante disto, os investimentos, proposições de projetos de engenharia e o uso de recursos naturais começam a ser concebidos e avaliados sob a perspectiva de um desenvolvimento sustentável.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o concreto comum, tipicamente, contém 12% de cimento, 8% de água de amassamento e 80% de agregado, por massa. Sendo assim, atualmente, além dos 1,5 bilhão de toneladas de cimento consumidas anualmente, a indústria do concreto ainda consome 9 bilhões de toneladas anuais de areia e rocha. Diante disso, ainda segundo os mesmos autores, é inevitável a percepção de que os processos de escavação, processamento e transporte dessa imensa quantidade de agregados consumirão grande quantidade de energia e afetarão negativamente o equilíbrio ecológico do planeta Terra.

Nestes bilhões de toneladas de agregado, cerca de 45% é o agregado miúdo, com uma forte tendência mundial de substituição da

areia natural por um agregado proveniente do próprio processo de britagem da rocha.

O desenvolvimento da tecnologia de produção de areia de britagem surgiu por quatro principais motivos:

- A distância de transporte entre pontos de consumo e pontos de origem de areia natural. Núcleos populacionais e industriais em regiões carentes de areia necessariamente geram elevado custo de transporte. Segundo Drago *et al.* (2009), os gastos com transporte podem chegar a 70% do custo final da areia.
- A necessidade de se aproveitar o material fino obrigatoriamente produzido na instalação de britagem, o qual, de outra maneira, acabaria formando enorme estoque inservível, gerando resíduos.
- As reservas naturais se esgotando ou sendo poluídas por elementos químicos, orgânicos e inorgânicos, que acabam prejudicando o uso da areia na construção civil. Como exemplo orgânico, estão os dejetos humanos lançados sem tratamento. Como exemplo químico, estão as águas utilizadas nas indústrias e, como exemplo inorgânico, está a contaminação de areias de rio pela mineração do carvão.
- As restrições ambientais à exploração da areia, com elevado e demorado custo burocrático na obtenção de licenças e elevado custo de extração pela limitação da caixa dos rios, fazendo com que as dragas tenham que percorrer distâncias mais longas para um mesmo volume. Este fato está fazendo aumentar a escavação em jazidas de cava sem tantas restrições ambientais e com mais facilidade na obtenção de licenças. Nacionalmente, segundo o DNPM (2001), o panorama é de 90% de extração de leitos de rio e apenas 10% dos casos em cava seca.

Diante do exposto, tendo em vista que a qualidade do concreto é associada à qualidade dos agregados empregados, foi visível a intensificação na busca por soluções tecnológicas alternativas. Uma das soluções para a redução dos problemas associados à extração da areia natural tem sido a produção de areia de britagem, a partir do material fino gerado no processo, antes um resíduo inservível, para o uso na composição do agregado miúdo para concreto.

As areias naturais, usadas até bem pouco como única fonte de agregado miúdo, têm tido historicamente uma preferência técnica em relação às de britagem. Isto se deve principalmente à forma arredondada, à textura superficial lisa dos grãos e ao seu baixo teor de material pulverulento, que são características que fazem com que o concreto demande menos água, reduzindo assim o consumo de cimento. Além disto, estas características proporcionam um melhor acabamento superficial e um menor desgaste de equipamentos como bombas, betoneiras e tubulações (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; WEIDMANN *et al.*, 2009).

No entanto, além dos fatores econômicos e ambientais, existem também fatores técnicos que contribuem para a substituição da areia natural pela areia de britagem. Como um primeiro exemplo está a falta de homogeneidade das características das areias naturais ao longo do tempo, que muda conforme o local de coleta ou conforme o regime pluviométrico dos rios, o que estimula muitas concreteiras a usar parcialmente a areia de britagem que, por sua vez, possui uma maior constância nas suas características. Esta variabilidade, muitas vezes apresentada pelas areias naturais, gera a necessidade do uso de maior quantidade de cimento para garantir a obtenção das resistências características exigidas, pois a falta de homogeneidade pode levar a grandes variações nas resistências. Outros exemplos são: mudança no beneficiamento da areia de britagem, com o surgimento dos britadores tipo VSI (Vertical Shaft Impact) produzindo partículas menos lamelares; controle cada vez mais preciso do material pulverulento através de equipamentos e controle do diâmetro máximo por peneiramento, técnicas estas que garantem uma melhor qualidade da areia.

Neste contexto, o conjunto de fatores exposto justifica e incentiva o desenvolvimento de estudos sobre a viabilidade do emprego de areia de britagem na produção de concreto. Este trabalho visa analisar experimentalmente a substituição parcial e total da areia natural por agregados miúdos de britagem, com estudos em concreto e argamassa. Serão estudados diversos parâmetros tais como granulometria, tipo de rocha, forma dos grãos, teor de pulverulento e tipo de equipamento utilizado na cominuição, com o intuito de contribuir no entendimento de como o uso destes agregados influencia nas propriedades do concreto.

1.2. OBJETIVOS

Analisar experimentalmente a substituição parcial e integral do agregado miúdo natural por agregado miúdo de britagem, de diferentes

origens geológicas e provenientes de diferentes equipamentos de cominuição, em concretos de cimento Portland.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Analisar o desempenho da composição de areias de britagem com areias naturais finas para o uso em concreto de cimento Portland;
- Verificar a influência do teor de material pulverulento e da forma dos grãos, considerando cada tipo de rocha e características particulares de cada agregado miúdo;
- Estudar o benefício trazido pelo uso de britadores do tipo “VSI” na produção de areias de britagem destinadas a concretos de cimento Portland, bem como o comportamento dos diferentes tipos de rocha submetidos a este processo;
- Através desses estudos, contribuir para o entendimento da influência do método de cominuição dos agregados, para buscar um melhor aproveitamento do pó-de-pedra nas pedreiras com um mínimo de desperdício de materiais e, por fim, para que se possa produzir areias de britagem de boa qualidade.
- Estudar correlações entre o desempenho dos agregados miúdos nos estudos em concretos e argamassas;

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por cinco principais capítulos assim dispostos:

O Capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa, destacando-se as justificativas, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 é constituído de uma revisão bibliográfica focada nas características dos agregados miúdos e suas influências nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Destaca-se também o tema relacionado à substituição dos agregados miúdos naturais por britados na fabricação do concreto. Ainda neste capítulo, é abordada também a produção de agregados miúdos de britagem, processos e equipamentos utilizados na cominuição das rochas, bem como a influência destes fatores nas características do produto final.

O Capítulo 3 apresenta o programa experimental com os materiais e métodos empregados, bem como os parâmetros analisados. A metodologia aplicada está exposta também neste capítulo.

No Capítulo 4 encontra-se a apresentação e análise de todos os resultados obtidos no programa experimental.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais com conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GENERALIDADES

A importância da escolha adequada do tipo e qualidade dos agregados não pode ser subestimada. Os agregados, tanto o grão como o miúdo, apesar de ocuparem geralmente de 60% a 80% do volume do concreto, eram comumente tratados como material de enchimento, inerte, destinado a baratear o custo final de produção do concreto. Com o desenvolvimento dos estudos do concreto de cimento Portland, o conceito do agregado como material de enchimento vem sendo drasticamente modificado, e a sua influência nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido, nas proporções na mistura e no seu custo, vem tomando maior destaque (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SBRIGHI NETO, 2007; NEVILLE, 1997).

Com uma melhor compreensão do papel dos agregados, pôde-se então verificar que muitas propriedades do concreto são influenciadas pelas suas características, tais como: composição granulométrica, forma e textura superficial, porosidade, absorção de água, resistência à compressão, módulo de elasticidade e a presença de substâncias deletérias (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SBRIGHI NETO, 2007).

Originalmente, todas as partículas de agregados naturais eram parte de uma massa maior, a rocha-mãe. Devido a processos naturais de intemperismo e abrasão, ou artificiais por britagem, ocorre a fragmentação da rocha. Sendo assim, propriedades como composição química e mineralógica, massa específica, dureza, resistência, cor e estrutura dos poros, dependem inteiramente das propriedades da rocha-mãe. Por outro lado, a forma e o tamanho das partículas, a textura superficial e a absorção, são características independentes da rocha-mãe e resultantes do processo natural de fragmentação, ou do processo e tipo de equipamentos utilizados na cominuição da rocha, na produção dos agregados (NEVILLE, 1997).

Segundo Neville (1997), como o agregado custa menos que o cimento, quanto mais agregado e menos cimento se usar no concreto, mais econômico este será. Além disso, o agregado confere vantagens técnicas consideráveis ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura.

Conforme mencionado anteriormente, e também segundo Sbrighi Neto (2007), em anos recentes, o esgotamento das jazidas de agregado natural de boa qualidade perto dos grandes centros consumidores, o aumento dos custos de transporte, o acirramento da competição

comercial entre os produtores de concreto e a conscientização da sociedade, que demanda leis de proteção ao meio ambiente, vieram a “abrir as portas” para a possibilidade da inserção da areia de britagem no mercado do concreto.

Vale destacar que a qualidade constante da areia de britagem, na maioria dos casos, tanto em relação a sua granulometria quanto à ausência de impurezas, quando comparada à areia natural, é uma das características mais relevantes que tornaram esta areia um produto de boa aceitação no mercado, principalmente nas concreteiras. Além disso, a areia de britagem pode garantir às concreteiras uma fonte alternativa dessa importante matéria prima, a médio e longo prazo.

Segundo o DNPM (2001), no ano de 2000 foram produzidas no Estado de São Paulo aproximadamente 3380 000 toneladas de areia industrial, valor que corresponde a cerca de 80% da produção nacional. O Estado de Santa Catarina é o segundo produtor, com 265000 toneladas por ano, correspondendo a cerca de 77% de toda a produção da região Sul do país.

Ressalta-se que a produção tende a crescer, de acordo com as políticas públicas e desenvolvimento urbano, entre outros fatores sócio-econômicos no qual está inserido o setor de construção civil.

Diante disso, destaca-se a grande importância do conhecimento da influência e papel dos agregados miúdos nas propriedades do concreto em busca de uma otimização do seu desempenho, desde a sua escolha e produção até seu desenvolvimento tecnológico, visando atingir a qualidade almejada de maneira mais econômica e sustentável possível.

2.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.2.1. Os Agregados

Os agregados podem ser definidos como materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia civil, podendo ser classificados quanto à dimensão de suas partículas, sua origem e massa unitária (SBRIGHI NETO, 2005; FRAZÃO; PARAGUASSU, 1998).

A NBR 7225:93 define como agregado o material natural, de propriedades adequadas ou obtido por fragmentação artificial de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 152 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075 mm.

Com relação à dimensão de suas partículas, os agregados são divididos em agregados miúdos e agregados graúdos. De uma maneira

geral, segundo diversas literaturas, o termo agregado graúdo é aplicado para material maior ou igual do que 4,75 mm e o termo agregado miúdo é aplicado para o material menor que 4,75 mm.

Segundo a norma brasileira NBR 7211:2009, o agregado miúdo é o agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 4,75 mm. Já o agregado graúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira de malha 75 mm e ficam retidos na malha de 4,75 mm em ensaio de peneiramento.

Vale ressaltar que, com relação ao tamanho mínimo limite do agregado miúdo, há divergências entre os limites apresentados na literatura. Segundo Mehta e Monteiro (2008), os agregados miúdos contêm partículas que variam entre 0,075 mm e 4,75 mm, não considerando o material passante na peneira de malha 0,075 mm como parte do agregado miúdo. Por outro lado, Neville (1997) considera o tamanho mínimo limite do agregado miúdo de 60 μm , enquanto Mindess (2008) estabelece a malha de 0,15 mm. A NBR 7211:2005 estabelecia também a malha de 0,15 mm como tamanho mínimo, diferentemente da NBR 7211:2009 que não menciona este limite. Neville (1997) ainda classifica as partículas entre 60 μm e 2 μm como silte e partículas menores que 2 μm como argila.

A classificação dos agregados, quanto à origem, varia consideravelmente de acordo com cada autor. No presente trabalho, a classificação considerada mais adequada é a seguinte:

- a) **Agregados Naturais:** são os derivados de rochas existentes na crosta da Terra, encontrados na natureza já adequados para o uso, ou ainda, agregados britados, provenientes dos processos de cominuição de rochas, para que possam se adequar ao uso como agregados para concreto.
- b) **Agregados Artificiais:** são aqueles produzidos através de processos industriais como, por exemplo, a argila expandida.
- c) **Agregados Reciclados:** são os resíduos industriais granulares, comprovadamente adequados ao uso como agregado do concreto, ou proveniente do beneficiamento de entulho de construção ou demolição.

Sendo os agregados minerais naturais os mais importantes para a produção de concreto de cimento Portland, e sendo este o escopo principal deste trabalho, ainda é preciso definir algumas outras terminologias que serão aplicadas aqui:

- a) **Areia natural:** agregado miúdo quartzoso, encontrado na natureza. É proveniente da decomposição e erosão de rochas, cujo último componente mineral é o quartzo, devido à sua alta resistência. O meio erosivo pode ser fluvial ou eólico, e quando fluvial, a areia se distribui ao longo dos rios, sendo mais grossa ou menos grossa conforme se afasta ou se aproxima das nascentes. Junto às nascentes, a rocha erodida se apresenta em forma de seixo e a sua forma mais fina acontece junto à foz dos rios. As rochas que originam areia são as rochas intrusivas com grãos de quartzo visíveis a olho nu, como granitos, gnaisses e arenitos, e, obviamente, os rios produtores tem que ter seus cursos assentes sobre estas rochas. Rios que tem seus cursos sobre rochas extrusivas, como basaltos, riodacitos e diabásios, originam, em seu processo erosivo, a argila, último estágio destas rochas (BARBER-GREENE, 1986; FRASCÁ; SARTORI, 1998; BAUER, 1985).
- b) **Pó-de-pedra:** agregado resultante de britagem, passante na última tela do peneiramento final. O diâmetro máximo varia de região para região do País, dependendo de sua curva granulométrica, sendo definido, geralmente, por composições granulométricas que atendam determinadas especificações. Normalmente, esta última tela é 6,23 mm ou 4,75 mm.
- c) **Areia de britagem:** pó-de-pedra cuja curva granulométrica é ajustada por meio físico, com uso de peneiras, água ou ar, de modo a atender faixas granulométricas especificadas, ou, de modo a atender condições granulométricas de melhores resultados comprovados em estudos de laboratório.
- d) **Granilha:** material resultante do corte do pó-de-pedra na parte grossa da curva granulométrica, para a produção de areia de britagem.
- e) **Agregado miúdo total:** conjunto de todos os grãos resultantes da composição de dois ou mais agregados miúdos.
- f) **Material pulverulento:** material pulverulento, também chamado de microfino, é um filler¹ presente nos agregados,

¹ Material fino com tamanho máximo de 2 mm e com no mínimo 65% passante na peneira de malha 0,075 mm.

composto de partículas passantes na peneira de malha 0,075 mm (75 μ m).

2.2.2. As Rochas

A identificação dos constituintes minerais auxilia no reconhecimento das propriedades do agregado, mas não pode, por si só, servir de parâmetro para sua escolha, pois não se pode prever seu desempenho no concreto com base apenas na mineralogia (KOSMATKA *et al.*, 2003; NEVILLE, 1997). Contudo, conforme comentado anteriormente, algumas noções básicas de geologia, classificação e descrição de rochas e minerais, são essenciais para entender as origens e propriedades dos agregados miúdos naturais e de britagem, que terão importante influência no desempenho do concreto.

Ressalta-se ainda que, segundo Neville (1997), o exame mineralógico do agregado é útil para avaliar sua qualidade e permitir a detecção de propriedades indesejáveis como, por exemplo, a presença de algumas formas instáveis de sílica. Além disso, ainda permite a comparação de um agregado com desempenho conhecido, com outro ainda não conhecido.

Neste contexto, os itens seguintes visam a expor uma noção geral sobre as rochas, suas características, seus constituintes e alguns dos principais ensaios de caracterização.

2.2.2.1. Geologia e mineralogia das rochas

Os átomos que constituem os elementos são a base de todos os materiais, incluindo os minerais e as rochas.

Por mineral entende-se toda a substância homogênea natural, com composição química definida, de corpo sólido e cristalino.

Na natureza, e em relação às rochas, os minerais se formam por cristalização de líquidos magmáticos, ou por recristalização em estado sólido, ou ainda por reações entre sólidos e líquidos.

Todos os minerais possuem suas propriedades físicas, e estas são: brilho, cor, traço, clivagem, fratura, dureza, tenacidade, magnetismo e peso específico.

Rocha é um corpo sólido natural, resultante de um processo geológico determinado, formado por agregados de um ou mais minerais, arranjados segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante sua formação. De acordo com a formação, as rochas constituem três grandes grupos: ígneas, sedimentares e metamórficas. As ígneas são

resultantes da solidificação do magma do interior da crosta terrestre e, como exemplos, estão os granitos e basaltos. As rochas sedimentares são resultantes da consolidação de sedimentos, e como exemplos mais comuns, se apresentam os calcários e arenitos. As rochas metamórficas são derivadas dos outros dois grupos, que sofreram mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, no estado sólido, devido a alterações das condições físicas e químicas, e como exemplo, estão os gnaisses e mármore. Estes três grandes grupos se inter-relacionam, mostrando, na formação das rochas, um caráter cíclico e dinâmico (Figura 1). Uma rocha ígnea, através do intemperismo, erosão e transporte, forma o sedimento que, por deposição e litificação, forma a rocha sedimentar. Uma rocha sedimentar, através de uma transformação, o metamorfismo, forma a rocha metamórfica, e esta, por sua vez, através de fusão, forma a rocha ígnea. O caminho inverso também ocorre: uma rocha ígnea, por metamorfose se transforma numa rocha metamórfica, que sofre um intemperismo, que forma um sedimento, que se transforma em rocha sedimentar (FRASCÁ; SARTORI, 1998).

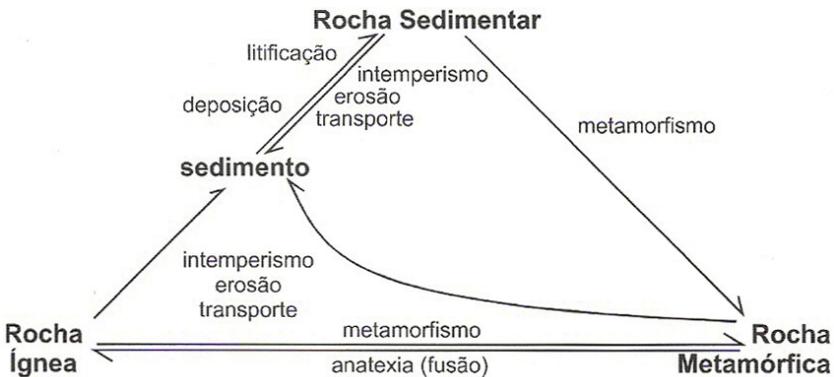


Figura 1 – Ciclo das rochas (FRASCÁ; SARTORI, 1998).

As rochas do grupo ígneas podem ser intrusivas ou extrusivas. As rochas intrusivas são aquelas solidificadas no interior da crosta terrestre. As mais comuns, do ponto de vista de transformação em agregados para construção civil, são os granitos e riolitos. As rochas extrusivas são aquelas solidificadas na superfície da crosta terrestre. As mais comuns em instalações de britagem são os basaltos, os diabásios e os riodacitos. A cor do basalto varia de cinza claro à cor escura. A cor do diabásio é sempre escura, e a cor do riodacito é cinza claro. A diferenciação entre

basalto e riódacito se dá pelo pH, que no basalto é básico e no riódacito é ácido (POPP, 1998).

As rochas sedimentares passíveis de se transformar em agregados para o uso em concretos são os calcários e dolomitos e, raramente, alguns arenitos fortemente solidificados.

As rochas do grupo metamórficas mais comuns em britagens são os gnaisses e, em menor ocorrência, os quartzitos.

Na região sul do Brasil ocorrem, de uma maneira geral e de leste para oeste, os granitos e gnaisses, os calcários, as rochas sedimentares como a extrusiva diabásio, e por último, a Formação Serra Geral, formadora dos basaltos e riódacitos.

2.2.2.2. Ensaios aplicados as rochas para produção de agregados em geral

Alguns dos ensaios de caracterização da rocha para o uso em concretos de cimento Portland, ainda na fase de aprovação da jazida escolhida, são: Los Angeles, Sanidade e Reação Alkali-Agregado. Já na fase de produção de agregados são corriqueiramente realizados os ensaios de Equivalente de Areia, Absorção, Índice de Forma, Densidade e Granulometria.

Destacam-se aqui, os ensaios de Sanidade e Los Angeles que, de acordo com ensaios realizados pelo DEINFRA-SC (Departamento Estadual de Infraestrutura), apontam a existência de uma estreita relação entre seus resultados e o percentual de material pulverulento gerado no processo de britagem.

Alguns agregados que inicialmente apresentam boas características de resistência podem sofrer processos de desintegração química quando expostos a determinadas condições ambientais. Diante disto, destaca-se o ensaio de sanidade, preconizado pela DNER-ME 089:94. O ensaio consiste basicamente em submeter uma amostra padronizada de agregado, imersa em uma solução de sulfato de sódio ou magnésio, a cinco ciclos de molhagem e secagem, como forma de promover a degradação do material. A perda de massa resultante desse ataque químico ao agregado deve ser de, no máximo, 12%.

O ensaio de Abrasão Los Angeles, regido pela NBR NM 51, mede o desgaste de um agregado por abrasão, através do impacto entre agregados e esferas de aço padronizadas. O impacto é gerado enquanto as esferas e os agregados giram em um tambor com velocidade especificada, acionado para 500 revoluções. Após isto, o agregado é peneirado na peneira de malha 1,7 mm e pesado. O percentual da

amostra total que passa nesta peneira é o número do Los Angeles da referida rocha. De acordo com o uso do material, são estabelecidos valores máximos de abrasão. O Los Angeles das rochas intrusivas variam entre 22% e 40% e o Los Angeles das rochas extrusivas variam entre 8 e 20%. Rochas com percentuais fora deste intervalo costumam apresentar valores fora de especificação em outros ensaios, o que impede o seu uso (DEINFRA).

2.3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS E SUAS INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND

Como já mencionado anteriormente, o conhecimento, não apenas das características dos agregados, mas também de como elas influenciam no comportamento e desempenho do concreto, é essencial para o desenvolvimento de concretos cada vez mais sustentáveis, econômicos e de alta qualidade. Sbrighi Neto (2000) ressalta a importância que a escolha do agregado, com base no conhecimento de suas propriedades e aplicações, pode representar na otimização da relação custo x benefício na produção de argamassas e concretos.

Vale ressaltar que algumas características dos agregados miúdos de britagem exercem notável influência na crescente aceitação deste agregado na indústria do concreto. Como já comentado anteriormente, a uniformidade da areia de britagem, quando comparada com a da areia natural, e a maior facilidade de obtenção, são suas principais vantagens de utilização.

Contudo, se não ajustada devidamente à sua aplicação, a areia de britagem pode ser um material pouco desejável no uso em concretos e argamassas. A sua distribuição granulométrica, seus altos teores de material pulverulento, a forma angulosa e, muitas vezes, lamelar das partículas, podem prejudicar o concreto, elevando a demanda de água para uma mesma trabalhabilidade e, conseqüentemente, elevando também o consumo de cimento. A elevada aspereza de seus grãos pode aumentar o atrito interno das partículas sólidas da mistura, resultando num material mais áspero e mais difícil de ser trabalhado na obra, de ser bombeado e acabado. Cabe destacar que hoje, muitas destas desvantagens podem ser amenizadas com a introdução de aditivos plastificantes e redutores de água na mistura.

Os agregados miúdos de britagem diferem dos naturais pela forma e textura superficial de suas partículas e pela granulometria do material mais fino. O material pulverulento proveniente de agregados de

britagem não é tão fino quanto aquele proveniente de areias naturais (CELIK; MARAR, 1996). Chaves (2005 *apud* BUEST, 2006) ainda acrescenta que as partículas dos agregados miúdos de britagem se diferenciam, pois suas partículas são angulosas e têm superfícies frescas, recém criadas pela britagem, superfícies estas que não estão hidratadas ou oxidadas como as superfícies das partículas dos agregados miúdos naturais que já passaram por um processo de intemperismo.

Com isso, observa-se que algumas das características da areia de britagem são devidas ao processo de britagem e outras devidas ao tipo de rocha de origem, ambas influenciando na curva granulométrica e na forma de suas partículas. Portanto, torna-se necessário entender essas características para posteriormente compreender como elas afetam as misturas de concreto, com o objetivo de encontrar meios de corrigir e ajustar os parâmetros das areias de britagem, impedindo resultados indesejáveis no seu uso na produção de concretos.

Em vista disso, os itens seguintes procuram relacionar as características dos agregados miúdos com sua influência nas propriedades do concreto de cimento Portland.

2.3.1. Composição Granulométrica

A composição granulométrica de um agregado, usualmente chamada de granulometria, pode ser definida como a distribuição de suas partículas segundo as suas dimensões (SOUZA COUTINHO, 1999 *apud* BUEST, 2006). Na prática, a análise granulométrica é feita através da separação de uma amostra de agregado em frações, cada uma delas constituída de partículas de tamanho contido em determinados limites. Estes limites são delimitados pela abertura da tela de peneiras padronizadas, dispostas umas sobre as outras, em ordem de tamanho, com a de maior abertura em cima (NEVILLE, 1997). Para agregados de concreto, a composição granulométrica é usualmente expressa em porcentagens (em massa) das frações acumuladas passantes ou retidas na malha de cada peneira padronizada.

O ensaio de determinação da composição granulométrica deve ser feito de acordo com a NBR NM 248:2003. A determinação do material pulverulento por lavagem na peneira de malha 75 μm é realizada usualmente antes do ensaio de peneiramento e de acordo com a NBR NM 46:2003. As peneiras padronizadas usadas para agregados de concreto têm aberturas quadradas e suas características constam na NBR 7211:2009, sendo classificadas em série normal e série intermediária, descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

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	-

Os resultados do ensaio de composição granulométrica podem ser representados em forma de tabela ou graficamente, por meio de curvas granulométricas.

A granulometria dos agregados exerce grande influência sobre as propriedades do concreto e em especial na trabalhabilidade e no custo (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SBRIGHI NETO, 2007). Uma curva granulométrica adequada é essencial para que se produza um concreto mais econômico, pois isso afeta a quantidade de concreto que pode ser feita com uma dada quantidade de materiais cimentícios e água.

A área superficial dos agregados está associada à sua granulometria e, portanto, é um fator determinante na quantidade de água necessária para molhagem completa dos sólidos, no volume relativo ocupado pelo agregado, na trabalhabilidade da mistura, e na tendência à segregação (NEVILLE, 1997).

Ainda segundo Neville (1997), a segregação pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme. No caso do concreto, a

segregação pode ser controlada, basicamente, por uma granulometria adequada e por cuidados no manuseio.

A composição granulométrica dos agregados influencia diretamente à coesão, exsudação, segregação e aspereza da mistura de concreto, sendo esta afirmativa um consenso na literatura. Areias muito finas, apesar de proporcionarem misturas coesivas, apresentam elevada superfície específica, aumentando a demanda de água. Além disso, o aumento da demanda de água tende a aumentar o custo do concreto para manter a mesma resistência e trabalhabilidade.

Por outro lado, areias muito grossas podem gerar concretos pouco trabalháveis, com tendência a segregação e ásperos. No entanto, normalmente, as areias mais finas demandam um teor menor de argamassa para que se possam obter características satisfatórias de coesão e trabalhabilidade, se comparadas a areias mais grossas. Contudo, este fato compensa, até certo ponto, a maior demanda de água devido à superfície específica elevada (WEIDMAN, 2008).

Vale ressaltar que é necessário buscar um equilíbrio entre os malefícios e benefícios gerados pelas diferentes granulometrias, para que se possa atingir a solução mais satisfatória tendo em vista a economia e qualidade do concreto.

Neville (1997) sustenta que não existe *uma* curva granulométrica ideal, mas que se deve procurar uma solução que combine requisitos físicos com aspectos econômicos, fazendo-se uso dos agregados disponíveis. Dessa maneira, não se pode impor limites rígidos na determinação de uma boa curva granulométrica, dificultando assim, que haja uma padronização eficiente para todos os casos. Ainda, segundo o mesmo autor, um exemplo prático que demonstra a dificuldade de se estabelecer uma curva ideal, é o fato de que agregados de diferentes origens, mesmo que nominalmente com a mesma granulometria, apresentam variações na distribuição dos tamanhos de partículas dentro de uma mesma fração, bem como em outras propriedades, como forma e textura das partículas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), agregados que não apresentam grande deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partícula, ou seja, que possuem granulometria contínua, produzem misturas de concreto mais trabalháveis e mais econômicas.

Com relação a agregados que apresentam uma curva granulométrica contínua, Hewlett (1998 *apud* BUEST, 2006) relata que uma granulometria desse tipo pode influenciar positivamente as características de um concreto e, se adicionada a partículas com uma forma adequada, é possível obter-se um concreto compacto e resistente

para um teor mínimo de cimento, reduzindo também o risco de segregação.

Em pesquisa feita por Wills (1967 *apud* GONÇALVES *et al.*, 2007), o autor constata que, dentro dos limites permitidos por norma, a granulometria do agregado miúdo exerce mais influência sobre as propriedades do concreto, principalmente sobre a trabalhabilidade, quando comparada à granulometria do agregado graúdo.

Um dos requisitos para que uma mistura seja satisfatoriamente coesiva e trabalhável é a presença de uma quantidade suficiente de material passante na peneira 300 μm . É importante lembrar que as partículas de cimento são parte desse material e, sendo assim, uma mistura mais pobre necessita de mais agregado miúdo do que uma mais rica (NEVILLE, 1997).

Kwan *et al.* (1999) destacam em seu trabalho que apenas a composição granulométrica não é suficiente para a caracterização dos agregados. Isto se deve ao fato de que partículas alongadas podem passar por peneiras de malhas inferiores (Figura 2), prejudicando a interpretação dos resultados de uma curva granulométrica, uma vez que agregados de dimensões maiores estariam em grupos de peneiras de malha menor.

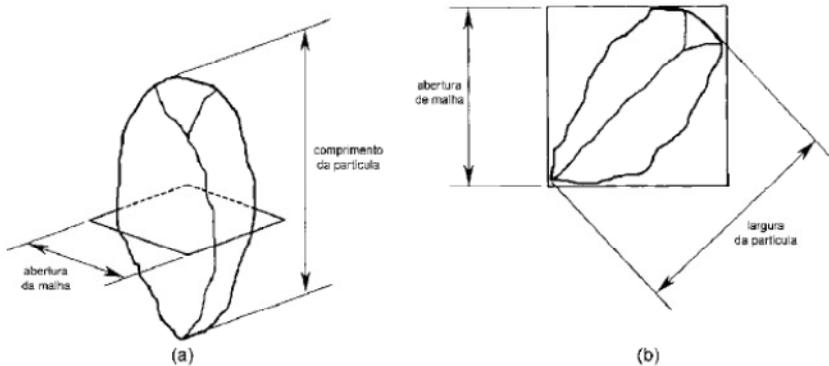


Figura 2- Partículas com comprimento (a) e largura (b) maiores que a abertura da malha da peneira (adaptado de KWAN *et al.*, 1999 *apud* C WEIDMANN, 2008).

2.3.1.1. Módulo de Finura

O módulo de finura é um único número, obtido da granulometria, muitas vezes usado como um índice de finura do agregado. É definido como a soma das porcentagens acumuladas retidas em cada uma das peneiras da série normal, sendo a soma dividida por 100. O valor do módulo de finura é tanto maior quanto mais graúdo for o agregado.

O módulo de finura é útil para detectar pequenas variações de um agregado de uma mesma origem e para dar uma indicação do comportamento provável de uma mistura feita com um agregado de certa granulometria. No entanto, não pode ser considerado um parâmetro representativo de uma distribuição granulométrica, pois um mesmo módulo de finura pode representar um número infinito de distribuições de tamanhos ou curvas granulométricas completamente diferentes (NEVILLE, 1998).

2.3.1.2. Material pulverulento

De maneira geral, um alto teor de material pulverulento presente na areia de britagem aumenta a superfície específica, requerendo mais água para uma mesma trabalhabilidade. Conseqüentemente, com o aumento da demanda de água, a qualidade do concreto é negativamente afetada (CELIK; MARAR, 1996; NEVILLE, 1997).

No entanto, muitos estudos têm sido feitos para entender o exato comportamento deste material no concreto, demonstrando que, se controlado o teor em certos limites, o material pulverulento pode contribuir para um melhor desempenho do concreto.

O material pulverulento pode agir como filer, contribuindo para a redução do total de vazios no concreto, aumentando a sua qualidade. Em estudo realizado por Celik e Marar (1996), foi observado que, em corpos-de-prova contendo agregado miúdo com material pulverulento nas porcentagens de 0% e 5%, a quantidade de partículas finas não forma pasta suficiente para preencher os vazios do agregado miúdo, obtendo-se então uma resistência inferior quando comparado aos corpos-de-prova que continham 10% de material pulverulento. No mesmo estudo, à medida que o teor de pulverulento excede o teor de 10%, a resistência diminui, pois a quantidade de material fino é tão grande que a pasta de cimento não é suficiente para cobrir todos agregados graúdos e miúdos.

Adicionalmente, partículas mais finas, mesmo possuindo elevada superfície específica, podem atuar como lubrificante, facilitando a movimentação e acomodação das partículas do concreto.

Segundo Guimarães (2005) e Neville (1997), a quantidade de material passante nas peneiras de 0,3 mm e 0,15 mm tem uma grande influência nas propriedades do concreto fresco. O agregado miúdo deve possuir certa quantidade de material passante na peneira de 0,30 mm e também na 0,15 mm, para conferir adequada coesão e trabalhabilidade ao concreto, bem como evitar segregação e exsudação e facilitar o bombeamento. É importante lembrar que para concretos com alto consumo de cimento e também com adições, podem-se utilizar agregados com menos finos.

Em contrapartida, estudos realizados por Weidman (2008), mostraram que o efeito do teor de material pulverulento não afetou significativamente o consumo de cimento em concretos. O estudo foi realizado com teores de material pulverulento de aproximadamente 7,5%, 15,0%, e 22,5%. Segundo o autor, para uma mesma relação água/cimento, as maiores resistências foram observadas para os teores intermediários, provavelmente devido a uma maior compacidade da mistura. Assim, quando considerada uma mesma resistência à compressão, apesar dos teores intermediários de material pulverulento não proporcionarem a maior redução do consumo de água, principalmente para o caso das areias lamelares, estes conduziram a consumos de cimento idênticos àqueles proporcionados pela areia com menor teor de material pulverulento.

Segundo a NBR 7211:2009, o teor máximo de material pulverulento para as areias naturais é de 3% para concreto submetido a desgaste superficial e de 5% para concreto protegido do desgaste superficial. Para as areias de britagem, estes teores podem ser aumentados para 10% e 12%, respectivamente.

2.3.1.3. O material pulverulento e o ensaio do Azul de Metileno

2.3.1.3.1. *Generalidades*

Os testes usados para determinar a qualidade dos agregados para concreto são, geralmente, granulometria, massa específica, a quantidade de material passante na peneira de malha 0,075 mm e, mesmo que de maneira empírica, a forma dos grãos. No entanto, testes utilizados para avaliar a qualidade do material pulverulento são raramente aplicados. É um consenso na literatura que a presença de materiais deletérios

presentes na fração mais fina dos agregados pode prejudicar o desempenho de concretos e argamassas. É também um consenso que as *propriedades* dos finos, especialmente os menores que 75 μm , exercem significativa influência no desempenho dos concretos.

Em termos de tamanho dos grãos, o termo argila abrange vários minerais (na maioria silicatos) com grãos menores que 2 μm , e também quartzos, feldspatos, carbonatos, etc. O termo argilo-mineral define os minerais que pertencem ao grupo dos filossilicatos (silicatos com estrutura em camadas). Nos principais tipos de materiais sedimentares (areia, silte, argila), os argilo-minerais estão geralmente presentes como partículas ainda menores do que 2 μm e, por esta razão, são identificados por meio de ferramentas analíticas, tais como análise petrográfica, química e termogravimétrica, além das técnicas mais modernas como a difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (CHIAPONE *et al.*, 2004).

A norma Americana ASTM C 33, assim como a Brasileira NBR 7211 e diversas outras, limita a quantidade de material pulverulento (passante na peneira 0,075 mm) que pode ser usado na produção de concretos. Segundo Stewart *et al.* (2006), este limite foi baseado no uso de agregados naturais pela possível presença de argilo-minerais na sua menor fração. No entanto, os agregados miúdos de britagem podem possuir uma quantidade ainda maior de material passante na peneira de 0,075 mm, quando comparado aos agregados naturais. No caso das areias de britagem, este material pulverulento pode ser composto de partículas com o tamanho de argilas e não composto de argilo-minerais efetivamente.

Diversos autores afirmam que não é a quantidade de microfios presente no agregado que pode prejudicar o concreto, mas sim a sua origem e a quantidade de argilo-minerais presente. Segundo Quiroga e Fowler (2004), o efeito prejudicial que as argilas exercem no desempenho do concreto sempre foi atribuído ao seu tamanho. No entanto, assim como Bekir e Demir (2008), Quiroga e Fowler (2004) e Stewart *et al.* (2006) expõem, estudos vêm sendo realizados para comprovar que não é sua quantidade ou sua finura que afeta o concreto, mas sim sua composição mineralógica. Da mesma forma, em 2002, associações Européias e Britânicas introduziram novas especificações para agregados para concreto, atestando que não era apenas a quantidade de finos que era significativa no desempenho do concreto, apontando a mineralogia dos finos como fator crítico.

Existem vários estudos com o objetivo de aumentar o limite de material pulverulento estabelecido por normas. Para isto, no entanto, é

preciso entender a diferença entre partículas de argilas (quanto ao tamanho) e argilo-minerais, e se estes microfinos podem ou não ser prejudiciais ao concreto. A mineralogia, o tamanho, a forma e textura deste material pulverulento são características que podem exercer importante influência no desempenho e propriedades do concreto. Sendo assim, fica clara a importância de desenvolver um procedimento para especificar a utilização dos finos no concreto, tanto do ponto de vista econômico e ambiental, quanto do ponto de vista tecnológico, pois este material pode, de fato, melhorar o desempenho do concreto, se aplicado corretamente. (AHN *et al.*, 2001; GOLDSWORTHY, 2005; STEWART *et al.*, 2006).

A Cement Concrete & Aggregates Australia (CCAA, 2007) e Ahn (2000) afirmam que uma especificação para o controle do material pulverulento deletério requer análise concomitante de ambas as características: *quantidade* e *qualidade* de finos. Simplesmente limitar a quantidade do material passante na peneira de 0,075 mm pode resultar na rejeição e inutilização de materiais com finos inertes, que poderiam atuar satisfatoriamente em concretos.

Segundo Bekir e Demir (2008), existem diferentes tipos de argilas que variam de acordo com a geologia de origem e ação do meio ambiente. As características de cada tipo de argila têm importante efeito em diferentes propriedades do concreto, como resistência e durabilidade. Alguns tipos de argila podem prejudicar o concreto mesmo se presente em pequenas quantidades, enquanto outras não exercem efeito algum no seu desempenho.

A característica mais nociva de um argilo-mineral é sua habilidade de trocar cátions facilmente. Os cátions são facilmente trocados com água e compostos orgânicos como aditivos redutores de água ou superplastificantes. Essa grande afinidade faz com que a água e o aditivo sejam “usados” pela argila, sendo preciso uma maior quantidade para lubrificar o concreto fresco. Uma maior dosagem de aditivo pode não só aumentar excessivamente o custo do concreto, mas também, em diversos casos, pode retardar a pega e reduzir a sua resistência à compressão (BEKIR; DEMIR, 2008).

Assim sendo, fica clara a existência de um consenso na literatura com relação à necessidade de analisar e entender as características dos microfinos presentes em agregados que possam ser prejudiciais a concretos e argamassas. Apesar de ser possível identificar argilo-minerais através de avançadas técnicas de caracterização tais como a difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (STEWART *et al.*, 2006; DAL MOLIN, 2007), é necessário encontrar um teste mais

simples que possa ser aplicado diariamente “em campo”. Algumas pesquisas vêm sendo realizadas nesse sentido, como as pesquisas de CCAA (2008), Stewart *et al.* (2006) e Seleem e Ei-Hefnawy (2003), onde alguns testes mais simples, como o Equivalente de Areia e o Azul de Metileno, foram aplicados e comparados com testes mais “sofisticados”. Dentre eles, o que mais se destaca como um bom indicador da presença de argilo-minerais é o Teste Azul de Metileno, que será abordado em detalhes no item 2.3.1.3.3.

Dessa forma, o Item 2.3.1.3.2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre algumas características relevantes destes microfinos e sua influência em concretos e argamassas.

2.3.1.3.2. Propriedades dos argilo-minerais e sua influência em concretos e argamassas

Argilo-minerais tendem a absorver e “segurar” mais água quando comparado a outros minerais. Isto se deve à sua estrutura e sua alta capacidade de trocar cátions. Alguns tipos de argilo-minerais absorvem mais água do que outros. As argilas podem ser divididas em três grandes grupos: caulinita, ilita e esmectita. A caulinita e a ilita são bastante similares quanto à capacidade de absorção, já a esmectita possui capacidade bastante elevada de absorver água. Alta absorção causa alta demanda de água e aditivo plastificante no concreto, afetando sua trabalhabilidade e resistência a compressão (QUIROGA; FOWLER, 2004).

Assim, como comentado anteriormente, argilo-minerais são deletérios para o concreto devido ao aumento na demanda de água e aditivo. Este aumento é devido a sua grande superfície específica e devido a sua estrutura em camadas, que os permitem inchar e absorver água, podendo comprometer a durabilidade do concreto (KOSMATKA *et al.*, 2003). Apesar de partículas de mesmo tamanho que os argilo-minerais, presentes em agregados miúdos de britagem, aumentarem a demanda de água e aditivo em algum grau, este aumento é ligado à superfície específica e não as dinâmicas de inchamento e absorção de água de argilo-minerais. (STEWART *et al.*, 2006).

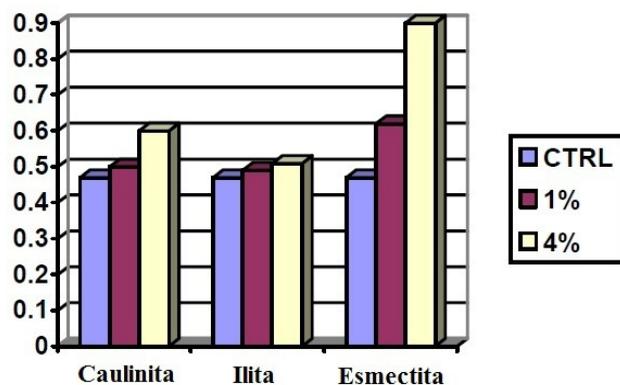
A maioria dos argilo-minerais faz parte da subclasse de minerais filossilicatos. Os filossilicatos são definidos por sua estrutura “em camadas” ou “em folhas”. Os tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ compartilham três O^{2-} da base com outros três tetraedros adjacentes, formando placas ou folhas de extensão infinita. Essas folhas são unidas por camadas de cátions. Os cátions criam uma ligação fraca entre as folhas, permitindo

que água e outros materiais como aditivos sejam incorporados na estrutura “escamosa” dos argilo-minerais. A habilidade destas folhas de absorver água e a habilidade de troca dos cátions com alguns componentes é relacionada com a quantidade e tipo dos cátions presentes no argilo-mineral. (YOOL *et al.*, 1998).

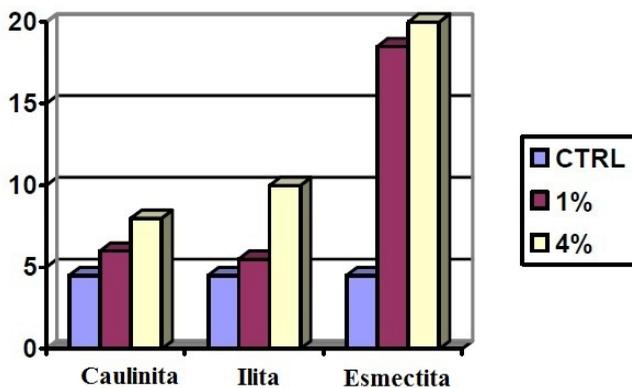
A caulinita pode ser considerada o mais comum e abundante dos argilo-minerais. A sua estrutura consiste em repetidas camadas de sílica e alumina unidas por hidrogênios. Ligações de hidrogênio são fortes, inibindo a absorção de água entre as camadas. Tanto a illita, quanto a montmorilonita, possuem uma “folha” de alumina entre duas “folhas” de sílica. As ligações da illita são constituídas de íons de potássio, o que limita a quantidade de água absorvida entre suas camadas. A esmectita não possui íons de potássio, permitindo grande quantidade de água entre camadas. Assim, mesmo possuindo a mesma estrutura, a capacidade de absorção da illita é muito menor do que a da esmectita. Segundo Yong e Warkentin (1975 *apud* STEWART *et al.*, 2006), a esmectita é o argilo-mineral com mais capacidade de absorção (YOOL *et al.*, 1998 e STEWART *et al.*, 2006).

Segundo Powers (1959 *apud* STEWART *et al.*, 2006), apesar de todos os argilo-minerais exercerem algum efeito negativo no concreto, o “pior” deles é a esmectita. A alta capacidade de absorção da esmectita proporciona uma alta demanda de água, perda de trabalhabilidade e, em alguns casos, a retração mostrou um aumento de até 70% quando minerais de esmectita estavam presentes em testes feitos em argamassas.

Com o objetivo de estudar o comportamento de microfios compostos de argilo-minerais, Stewart *et al.* (2006) realizaram diversos ensaios em argamassas, substituindo 1% e 4% do total de areia por três tipos diferentes de argilo-minerais - caulinita, illita e montmorilonita (esmectita). Os ensaios realizados mostram que a inclusão destes argilo-minerais aumenta a demanda de água e aditivo, quando comparada à argamassa de controle (sem substituições). Pôde-se observar que a argamassa com substituição por esmectita a 4% precisou de 186ml ao invés de 20 ml de aditivo plastificante para alcançar o espalhamento pré-estabelecido de (110±5) mm. Apesar de a illita ter uma maior capacidade de troca catiônica do que a caulinita, as suas ligações de potássio dificultam a absorção de água e tanto a caulinita como a illita não modificaram significativamente a demanda de água e aditivo, quando em pouca quantidade, como pode ser observado na Figura 3.



(a)



(b)

Figura 3 – (a) Relação água/cimento; (b) Dosagem de aditivo, mL (a/c constante)
 STEWART *et al.*, (2006)

O mesmo estudo realizado por Stewart *et al.* (2006), mostra que a resistência à compressão (Figura 4) e a retração por secagem (Figura 4) também foram afetadas pela substituição por argilo-minerais. Pode-se observar que alguns argilo-minerais não são tão deletérios quanto outros. A substituição de 1% de caulinita e illita apresentou resistência à compressão e retração por secagem comparáveis àquelas argamassas com a relação água/cimento variável. A montmorilonita, por outro lado, apresentou ser deletéria ao desempenho em todos os critérios avaliados

– demanda de água e aditivo, resistência à compressão e retração por secagem (STEWART *et al.*, 2006).

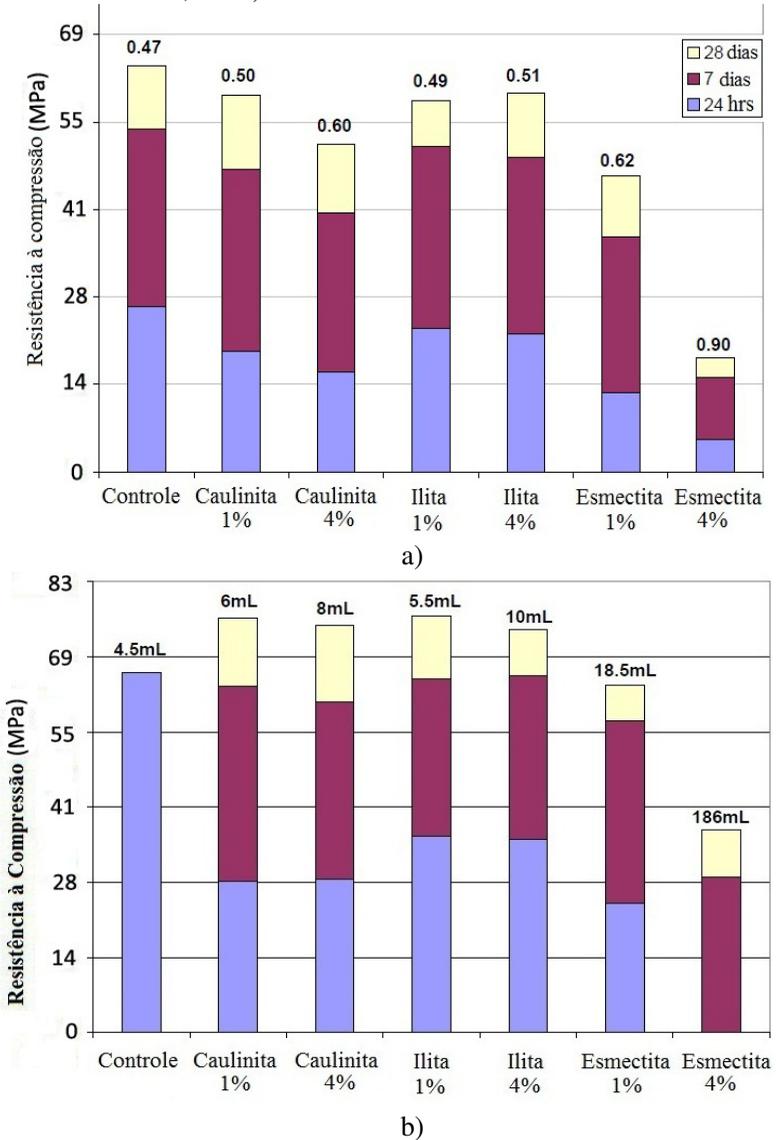


Figura 4 – a) Resistência à compressão de argamassas com substituição por argilo-minerais, relação a/c variável (a/c apresentada acima das misturas); b) resistência à compressão de argamassas com substituição

por argilo-minerais, relação a/c fixa (demanda de aditivo apresentada acima das misturas).

(Figura adaptada de Stewart *et al.*, 2006)

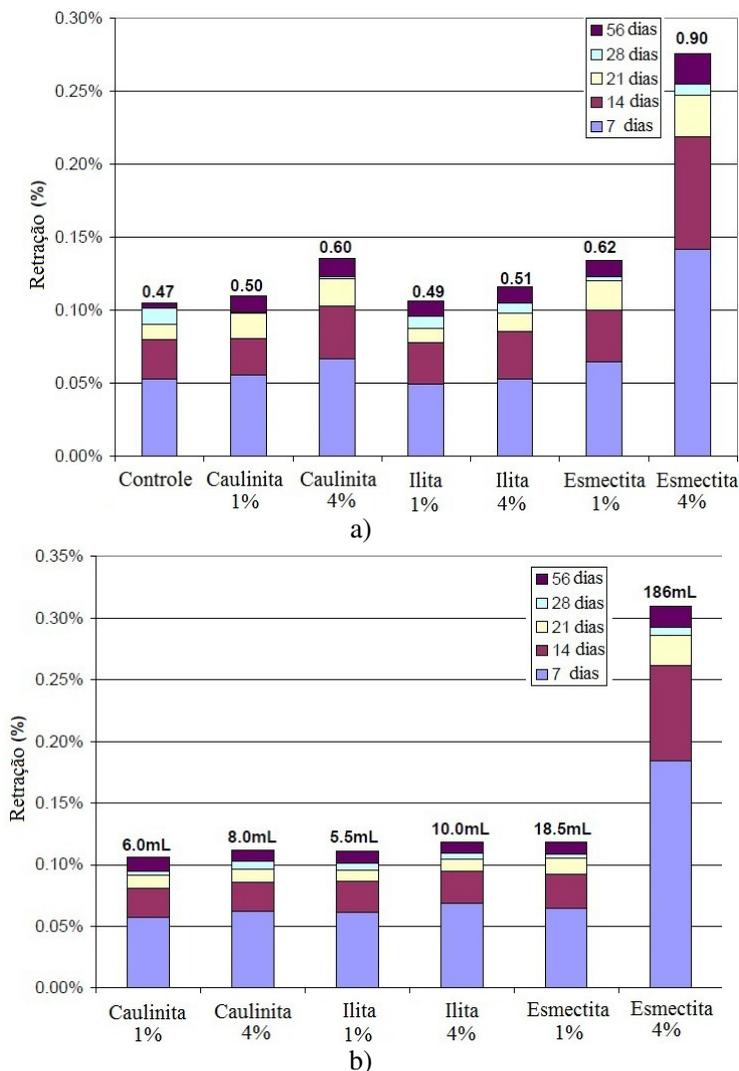


Figura 5 – a) Retração por secagem, a/c variável (a/c apresentada acima das misturas) b) Retração por secagem, a/c variável (demanda de aditivo acima das misturas, mL).

(Figura adaptada de Stewart *et al.*, 2006)

Da mesma maneira, Seleem e Ei-Hefnawy (2003) mostraram que a inclusão de argilo-minerais prejudica o desempenho do concreto, comparando concretos produzidos com determinada quantidade de material fino inerte proveniente de agregados finos de britagem, com concretos produzidos com a mesma quantidade de finos constituídos de argilo-minerais. Em determinados concretos, mantida constante a relação água/cimento, o valor do abatimento do tronco de cone para concretos com finos “inertes” foi 80% maior quando comparado ao abatimento de concretos com finos de argilo-minerais. Com relação à resistência à compressão, os autores puderam observar que acrescentando finos de natureza silicosa não houve redução da resistência à compressão, pelo contrário, observou-se um aumento na resistência contanto que a quantidade de água adicionada não fosse aumentada para compensar a redução na trabalhabilidade. Por outro lado, os finos de argilo-minerais causaram uma redução na resistência à compressão, mesmo mantida constante a relação água/cimento, de 8%, 19%, nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

Stewart *et al.* (2006), com o objetivo de comprovar que o tamanho dos argilo-minerais não é o principal fator a contribuir com seu efeito deletério em concretos, como já comentado anteriormente, realizaram uma série de testes em argamassa utilizando materiais tão finos quanto os argilo-minerais, mas que não possuíam a mesma propensão à facilidade de trocas de cátions. Estes testes substituíam o microfino da areia por um microfino composto de calcário e outro composto de sílica. Para o microfino de calcário ainda foram analisados dois materiais: fino e ultrafino. O fino era composto de 60% de material abaixo de 2 μm e o ultrafino continha 90% abaixo de 2 μm . A sílica, por sua vez, continha 96% abaixo de 5 μm . As substituições foram feitas substituindo 1% e 4% do conteúdo de areia total por microfinos. Os resultados para demanda de água e aditivo desses materiais podem ser observados na Tabela 2. A diferença na demanda de água é comparável àquela da mistura de controle sem substituições. Além disso, a demanda de aditivo diminuiu quando comparada àquela do controle.

Tabela 2 – Demanda de água e aditivo (Tabela adaptada de Stewart *et al.*, 2006)

Material	Demanda de água (a/c)	Demanda de aditivo (mL)
Controle	0,47	4,5
Sílica (1%)	0,47	*
Sílica (4%)	0,47	2,5
Calcário Fino (1%)	0,48	*
Calcário Fino (4%)	0,48	4,0
Calcário UltraFino (1%)	0,49	*
Calcário UltraFino (4%)	0,49	4,0

A Figura 6 mostra os resultados de resistência à compressão para argamassas com partículas de mesmo tamanho de argilo-minerais versus os próprios argilo-minerais, para a relação água/cimento variável com 1% e 4% de substituição. Pode-se notar que a resistência à compressão aumentou com o uso de partículas de mesmo tamanho de argilo-minerais. No entanto, esse aumento não foi tão significativo quanto à diminuição da retração por secagem. Pode-se também perceber uma diminuição na resistência à compressão nas substituições por argilo-minerais, principalmente pela esmectita (STEWART *et al.*, 2006).

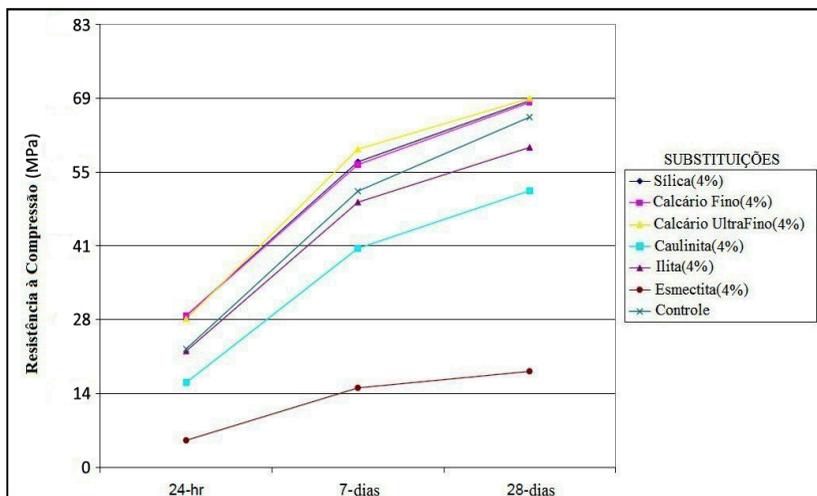


Figura 6– Resistência à compressão (4% de substituição, a/c variável) (Figura adaptada de STEWART *et al.*, 2006)

2.3.1.3.3. O ensaio do Azul de Metileno

Existem diversos métodos para estimar a quantidade e natureza de materiais deletérios presentes em microfinos de agregados. Um dos mais simples é o Teste de Azul de Metileno. O azul de metileno é uma solução catiônica que é adsorvida pela superfície de argilo-minerais devido a trocas catiônicas. Resumidamente, o teste de Azul de Metileno é a medida da capacidade da troca catiônica do material e uma indicação de atividade superficial. O método do Azul de Metileno mede a quantidade e a natureza de potenciais materiais deletérios: quanto maior o valor do azul de metileno, maior a quantidade de argilo-minerais ou certa quantidade argilo-minerais bastante reativos. Com relação aos tipos de rochas, as ígneas tendem a apresentar valores maiores de Azul de Metileno devido à constante presença de esmectita (KANDHAL; PARKER, 1998).

O Teste do Azul de Metileno determina a quantidade de uma solução constituída de água e azul de metileno que determinados microfinos podem adsorver, o que dá uma indicação da sua superfície específica. Segundo estudos realizados por Santamarina *et al.* (2002), o teste do Azul de Metileno é uma técnica simples e confiável na determinação da área específica de solos, inclusive de argilo-minerais. Algumas normas como a NBR 14949:2003, destinada a concretos asfálticos, apresentam ainda um procedimento de ensaio utilizando azul de metileno para avaliação da qualidade dos microfinos pela quantificação do teor de argilo-minerais (esmectita, caulinita e ilita), matéria orgânica e hidróxidos férreos presentes, indicando sua reatividade superficial. Outras normas internacionais, como a EN 933-9:1998, AASHTO TP-57:2000 e ASTM C 837, apresentam procedimentos semelhantes. O método é baseado na habilidade destas argilas em trocar cátions e então adsorver o azul de metileno. O valor final do Azul de Metileno pode depender de algumas características de agregado como mineralogia e tamanho das partículas (REIS, 2005; STEWART *et al.*, 2006). Os resultados do teste são apresentados como o valor do azul de metileno em miligramas de solução por grama do material passante na peneira 0,075 mm.

Existem diversas evidências de que esse teste pode ter uma boa correlação com as reduções nas resistências de concretos devidas a diversos tipos de argilo-minerais. Diversos autores citados neste capítulo afirmam que o valor do Azul de Metileno pode ser satisfatoriamente relacionado com materiais prejudiciais ao concreto (AHN *et al.*, 2001; PIKE, 1992 e BJARNASON *et al.*, 2000 *apud* STEWART *et al.*, 2006;

YOOL *et al.*, 1998; CCAA,2008). Yool *et al.* (1998) afirma que os resultados de Azul de Metileno não tem uma relação proporcional aos efeitos deletérios no concreto. Segundo ele, o Teste de Azul de Metileno não é capaz de diferenciar os três diferentes tipos de argilo-minerais (caulinita, ilita e esmectita) mais comumente presentes em agregados. Sendo assim, o autor propôs modificações ao Teste de Azul de Metileno com o objetivo de ajudar a diferenciar o tipo e quantidade do argilo-mineral em determinada amostra. Entretanto, muitos estudos vêm sendo realizados que comprovam a relação do Teste de Azul de Metileno com a presença de argilo-minerais e, sobretudo, que comprovam que seu resultado permite indicar se estão presentes microfinos pouco ou altamente nocivos.

Estudos feitos por Ahn *et al.* (2001) em concretos e argamassas, apontam que existe uma boa correlação que indica que quanto maior o valor do azul de metileno, menor a resistência à compressão, maior a demanda de água e maior a retração por secagem.

Segundo testes realizados por Stewart *et al.* (2006), o ensaio de azul de metileno também se mostrou como um bom indicador da presença de materiais deletérios. Comparando o valor do azul de metileno ao desempenho de argamassas, pôde-se constatar claramente que o teste de Azul de Metileno é capaz de identificar materiais que atuam de forma negativa em argamassas. As duas misturas com argilo-minerais menos reativos, caulinita e ilita, que apresentaram um baixo valor do Azul de Metileno, tiveram um adequado desempenho nas argamassas. Já a esmectita, considerada uma argila de alta reatividade, apresentou altos valores de Azul de Metileno, correspondendo com notável comportamento deletério no desempenho dos concretos tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Desta maneira, diversos artigos foram realizados com o intuito de determinar uma relação entre o tipo do argilo-mineral e sua atividade, obtendo resultados satisfatórios. Segundo Yool *et al.* (1998), utilizando o teste de Azul de Metileno, a proporção seria caulinita:ilita:esmectita = 1:5:20. Para a mesma relação, a CCAA (2007) encontrou valores bastante similares, apenas diferindo a proporção da ilita de 5 para 3.

A absorção de água por microfinos aumenta a demanda de água no concreto e diminui sua trabalhabilidade devido à presença de argilo-minerais ou devido apenas a sua extrema finura (Yool *et al.*, 1998). Stewart *et al.* (2007) e Richardson (2009) encontraram resultados que demonstram que o valor do Teste do Azul de Metileno aumenta com o aumento do teor de microfinos, causando maior demanda de água nos concretos. Se a quantidade de água adicionada for maior, a resistência

do concreto irá diminuir: observou-se um relacionamento inverso entre o valor do Azul de Metileno e a resistência à compressão de concretos (STEWART *et al.*, 2007; RICHARDSON, 2009).

Em estudos feitos por Bekir e Demir (2008), foi constatado, como comentado anteriormente, que a quantidade de microfinos de uma areia não determina a quantidade de argilo-minerais presente: o valor do Azul de Metileno de uma areia com baixo teor de microfinos pode ser alto. Em seus resultados, um tipo de areia contendo 5% de material pulverulento apresentou um valor de Azul de Metileno de 1,45, sendo mais alto do que o valor de 1,00 de outro tipo que continha 10% de pulverulento. Ou seja, pode-se dizer que o valor do referido teste varia independentemente do teor de microfinos. Os autores ainda indicam que existe uma relação proporcional entre o valor do Azul de Metileno e o efeito deletério de determinado argilo-mineral.

Stewart *et al.* (2006) testou diversos agregados com o Teste de Azul de Metileno, Granulometria a Laser e Difração de raios X. A maioria apresentou o valor de azul de metileno abaixo de 2,75. Um dos três agregados de granito, provenientes de diferentes regiões dos Estados Unidos, apresentou um valor de Azul de Metileno de 6,88, valor maior do que os outros dois. Esse maior valor pode indicar uma maior superfície específica, ou a presença de uma pequena quantidade de argilo-minerais. De acordo com a Figura 7, o resultado da granulometria a laser realizada é coerente com o valor mais alto de 6,88 no ensaio do Azul de Metileno, pois mostra que o agregado granítico (Granito 03) tem maior quantidade de partículas pequenas em relação ao restante. O granito 01, o granito 02 e o calcário apresentaram valores bem mais baixos de Azul de Metileno de 0,94, 1,75 e 0,75 respectivamente.

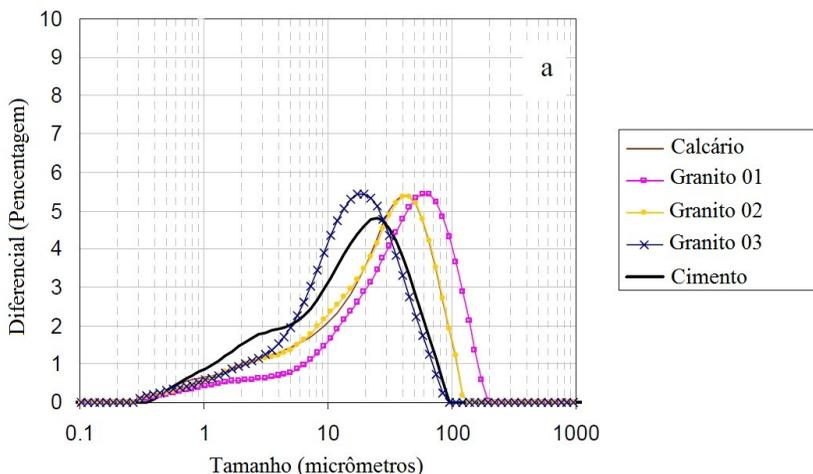


Figura 7– Resultados da Granulometria a Laser
(Figura adaptada de STEWART *et al.*, 2006)

Outro dos agregados testados por Stewart *et al.* (2006), um calcário, apresentou o alto valor de Azul de Metileno de 20. Um valor assim tão alto é indicativo da presença de altos teores de argilo-minerais. O autor realizou o ensaio de difração de raios X no material menor que $2 \mu\text{m}$ deste agregado, comprovando a presença de argilo-minerais, estando assim de acordo com o alto valor de azul de metileno apresentado.

Segundo a Cement Concrete & Aggregates Australia (CCAA), apesar de a maioria das pedreiras já terem evoluído muito na produção de areia de britagem e de seu uso em concreto já estar sendo difundido, ainda não há um consenso geral a respeito de quais testes devem ser aplicados ao produto, ou que limites devem ser estabelecidos para seu suprimento. Neste sentido, a CCAA fundou um grupo e projeto de pesquisa para estudar, desenvolver e recomendar métodos, especificações e limites para a areia de britagem usada em concretos de cimento Portland (CCAA, 2007).

Assim, o que cabe aqui ressaltar é que este projeto da CCAA (2007) demonstrou que uma combinação que identifique não apenas a quantidade de microfino, mas também a sua qualidade, parece ser a melhor opção para um controle efetivo dos finos da areia de britagem para o uso em concreto. O CCAA (2008) recomenda que sejam combinados o percentual passante na peneira $0,075 \text{ mm}$ com o valor do

azul de metileno, multiplicando-se um pelo outro. Em outras palavras, se estabeleceu um valor limite do produto desses dois parâmetros para que uma areia de britagem possa ser aceita para uso em concretos de cimento Portland. Da mesma forma, Yool *et al.* (1998) também afirma que, quando combinado com a quantidade de microfinos presentes, o valor de Azul de Metileno fornece uma eficaz indicação do conteúdo geral de argilo-minerais presentes em um agregado.

2.3.1.4. Faixas Granulométricas em uso no Brasil

O uso do agregado miúdo para concreto no Brasil é regulamentado pela NBR 7211:2009. Esta norma especifica que agregados que apresentem curva granulométrica fora dos limites expostos na Tabela 3 podem ser utilizados em concreto desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade. Outra faixa bastante usada no Brasil é a faixa preconizada pela ASTM C 33.

Tabela 3 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTAS

- 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Os limites sugeridos pela NBR 7211:2009 são baseados em experiências práticas e não apenas em considerações teóricas e, sendo assim, agregados miúdos cujas granulometrias estejam dentro dos limites especificados tendem a ser técnica e economicamente adequados.

Portanto, sempre que possível, é interessante que se façam composições de agregados miúdos de modo a se obter uma mistura com características granulométricas o mais próximo possível das especificações da Zona Ótima (NBR7211:2009) ou ASTM C 33, pois agregados miúdos fora dos limites especificados pela maioria das normas poderiam conduzir a concretos com problemas de trabalhabilidade, ou sem vantagem econômica.

2.3.1.5. Dimensão máxima característica

De acordo com a NBR 7211:2009, a dimensão máxima característica do agregado é definida como sendo a grandeza associada à abertura nominal da peneira, em mm, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%, em massa.

De maneira geral, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área específica que deve ser envolvida pela pasta de cimento, para uma dada relação água/cimento. Portanto, um agregado com diâmetro máximo menor geralmente necessita de maior quantidade de água para um mesmo abatimento de tronco de cone (MEHTA; MONTEIRO, 2008; GUIMARÃES, 2005). Logo, podendo o cimento custar de 10 a 15 vezes mais do que o preço do agregado, desde que sejam mantidas a resistência e a trabalhabilidade do concreto, qualquer medida que economize cimento pode resultar em um significativo benefício econômico (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Com relação aos agregados graúdos, a dimensão máxima exerce influência significativa na trabalhabilidade e principalmente na resistência à compressão, e é normalmente limitada por questões construtivas (tamanho da peça a ser concretada, cobrimento e distância mínima entre armaduras), ou de transporte e operação (diâmetro da tubulação de bombeamento) (WEIDMANN, 2008).

Ainda segundo Weidmann (2008), com relação aos agregados miúdos, a influência da dimensão máxima está diretamente ligada à trabalhabilidade e aspereza da mistura, principalmente se as partículas forem lamelares e alongadas. De maneira geral, quanto maior a

dimensão máxima característica de agregados miúdos de britagem, maior a aspereza de concretos e argamassas com eles produzidos.

2.3.2. Forma e Textura Superficial das Partículas

As normas atuais fazem alusão apenas aos ensaios destinados a determinar a forma geométrica dos agregados graúdos. Isto se deve à dificuldade de determinação deste parâmetro e ao fato do uso exclusivo de agregados miúdos de jazidas naturais, antes da introdução dos agregados miúdos de britagem para misturas de concreto. Contudo, a determinação da forma dos agregados miúdos revela-se extremamente importante, uma vez que esta propriedade influencia as propriedades do concreto, essencialmente no estado fresco.

De maneira geral, quanto mais angulosas, alongadas e ásperas sejam as partículas, mais pasta² será exigida para envolver a maior área específica destes grãos e para compensar dificuldades no rolamento dessas partículas, afim de produzir misturas de mesma trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Logo, a forma dos agregados exerce direta influência na trabalhabilidade do concreto. Um concreto executado com agregado anguloso necessita de maior quantidade de água para um mesmo abatimento de tronco de cone, quando comparado a um concreto executado com agregado arredondado (GUIMARÃES, 2005).

Wills (1967 *apud* GONÇALVES *et al.*, 2007), investigou o efeito da forma das partículas na demanda de água do concreto, para ambos os agregados, graúdo e miúdo. Seus resultados indicaram que a forma do agregado miúdo influencia mais significativamente na demanda de água do que a forma do agregado graúdo.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a forma dos agregados diz respeito às características geométricas, tais como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. Partículas formadas por atrito tais como areia de depósitos eólicos ou de leitos de rio, tendem a ser arredondadas pela perda de vértices e arestas.

Por outro lado, agregados de britagem provenientes de rochas intrusivas usualmente podem ser classificados como angulosos por possuírem vértices e arestas bem definidas. Estes agregados são propícios a produzir partículas equidimensionais. Já calcários

² O termo pasta se refere à mistura de cimento e água.

estratificados, arenitos e folhelho tendem a produzir fragmentos alongados e achatados.

É importante ressaltar que o formato das partículas geradas pela cominuição da rocha não depende exclusivamente das características da rocha-mãe, mas também do processo e equipamento utilizado na britagem.

Portanto, fica claro que uma das principais restrições apresentadas pelos agregados miúdos de britagem é a dificuldade de trabalhabilidade do concreto, provocada pelo formato inadequado dos seus grãos. Devido a isso, torna-se evidente a busca por alternativas e tecnologias para solucionar o problema. Um dos fatores que contribui para a crescente substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo de britagem é a disponibilidade no mercado de novos equipamentos de britagem, como os impactadores de eixo vertical (VSI), assunto que será abordado em detalhes no Item 2.4.7.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), aquelas partículas cuja espessura é relativamente pequena em relação a outras duas dimensões são chamadas de lamelares, enquanto aquelas cujo comprimento é consideravelmente maior do que as outras duas dimensões são chamadas de alongadas.

Weidmann (2008), em estudos em concreto, constatou que os agregados de britagem com forma arredondada, apesar de demandarem teores de argamassa semelhantes aos agregados de britagem lamelares para um mesmo abatimento, conduziram a redução da demanda de água, por possuírem menor superfície específica e menor atrito entre partículas. Quando feita a comparação para uma mesma resistência à compressão, pode-se observar que os concretos contendo areia de britagem com grãos mais lamelares demandaram maiores consumos de cimento. No entanto, observou-se que, em concretos com consumo de cimento mais elevado, a influência da forma dos agregados miúdos, tanto naturais como de britagem, foi minimizada.

Segundo a NBR 7225:1993, as dimensões dos agregados são denominadas comprimento(“c”), largura(“l”) e espessura(“e”). O **comprimento** é definido como a distância de dois planos paralelos que possam conter o agregado, em sua maior dimensão. A **largura** é considerada como o diâmetro da menor abertura circular através da qual o agregado possa passar. A **espessura** é a distância mínima de dois planos paralelos que possam conter o agregado. Segundo esta norma, quanto à relação de dimensões, os grãos ou fragmentos são classificados segundo as relações da Tabela 4 e Tabela 5Tabela 5:

Tabela 4 – Pedregulho e areia (NBR 7225:1993)

Pedregulho - Areia	Relação
Alongado(a)	$\frac{c}{l} > 1,5 - \frac{l}{c} - 1,5$
Esférico(a) (eqüiaxial)	$\frac{c}{l} - 1,5 - \frac{l}{c} - 1,5$
Lamelar	$\frac{c}{l} > 1,5 - \frac{l}{c} > 1,5$
Discóide (quadrático)	$\frac{c}{l} - 1,5 - \frac{l}{c} > 1,5$

Tabela 5 – Pedra britada, pedrisco e pó-de-pedra (NBR 7225:1993)

Pedra britada - Pedrisco- Pó-de-pedra	Relação
Alongado(a)	$\frac{c}{l} > 2 - \frac{l}{c} - 2$
Cúbico(a)	$\frac{c}{l} - 2 - \frac{l}{c} - 2$
Lamelar	$\frac{c}{l} > 2 - \frac{l}{c} > 2$
Quadrático (a)	$\frac{c}{l} - 2 - \frac{l}{c} > 2$

Ainda segundo a NBR 7225:1993, quanto às arestas e cantos, os grãos ou fragmentos devem ser qualificados como:

- Angulosos: grãos ou fragmentos que apresentam arestas vivas e cantos angulosos;
- Arredondados: grãos ou fragmentos que não apresentam arestas e têm cantos arredondados.

A textura superficial de um agregado pode ser definida pelo grau de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera. Esta propriedade depende da dureza, granulação e porosidade da rocha matriz e da sua subsequente exposição à ação de atrito (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), há evidências que um agregado de textura mais áspera parece favorecer a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado, podendo aumentar a resistência a flexão do concreto, pelo menos nas

primeiras idades. Em idades mais avançadas, esse efeito pode não ser tão importante, pois prevalece uma forte aderência química entre a pasta e o agregado.

A avaliação da textura superficial é regida pela NBR 7389:1992. A análise é feita visualmente, definindo o quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera.

Estudos realizados por CCAA (2008) mostram que aumentos na perda da trabalhabilidade das misturas pareceram ser associados à angularidade das partículas da areia de britagem e de sua textura superficial áspera. O fenômeno foi observado tanto em areias contendo grãos até 5 mm quanto naquelas onde foi cortada a granilha, pois inclusive areias com diâmetro máximo de 2,36 mm apresentaram uma mistura áspera e dificuldade de acabamento superficial.

2.3.2.1. Métodos para determinação da forma de agregados miúdos.

Dois dos parâmetros mais utilizados para descrever a forma dos grãos são angulosidade e esfericidade (WEIDMANN, 2008).

A angulosidade está relacionada com o arredondamento dos vértices e arestas do grão e sua determinação é bastante complexa. A maioria dos métodos de determinação está relacionada com a densidade de empacotamento das partículas, tendo como base a premissa de que, para um mesmo tamanho de grão, quanto mais arredondado este for, maior será o empacotamento de grãos. Para estes ensaios, o tamanho das partículas ensaiadas deve ser controlado em limites estreitos, o que caracteriza uma dificuldade do ensaio, além de fatores limitantes, como a dificuldade de se controlar o adensamento e a textura dos grãos. Metodologias utilizando análise de imagens e relacionando o perímetro da projeção da partícula com o perímetro de figuras que a circunscrevem ou com sua área foram propostas, porém sem resultados satisfatórios.

Por outro lado, a esfericidade está relacionada com a forma geométrica do grão e sua determinação, principalmente para agregados graúdos, é dada através de metodologias bem aceitas que, em sua maioria, consistem determinações ou medidas de dimensões realizadas em cada grão.

A norma brasileira NBR 7809:1983 define a relação entre o comprimento e a espessura do grão como Coeficiente de Forma. Segundo esta norma, o coeficiente de forma de agregados graúdos não deve ser superior a 3 para uso em concreto. A sua determinação é feita com o uso de paquímetro e recomenda-se que seja medido um total de pelo menos 200 grãos, sendo que para cada fração, a quantidade a ser

medida deve ser proporcional à respectiva porcentagem de massa retida. O índice médio de forma do agregado será dado pelo somatório do coeficiente de cada fração ponderado pela respectiva porcentagem de massa retida.

Outra norma a ser referenciada é a norma francesa AFNOR XP P18-540 (1997). Esta estabelece um coeficiente volumétrico definido pela relação entre o volume do grão e o volume da esfera que o circunscribe.

No entanto, os métodos citados acima dependem da determinação de propriedades geométricas dos grãos, e isto dificulta a determinação da forma de agregados miúdos.

A norma brasileira NBR 7389:1992 sugere a avaliação da forma dos grãos de agregados miúdos por meio de inspeção visual, a olho nu ou com auxílio de lupa, sendo cada grão comparado com uma tabela padrão de forma (Figura 8). Esta tabela padrão define em alto ou baixo o grau de esfericidade dos grãos, sendo a avaliação visual qualitativa e subjetiva.

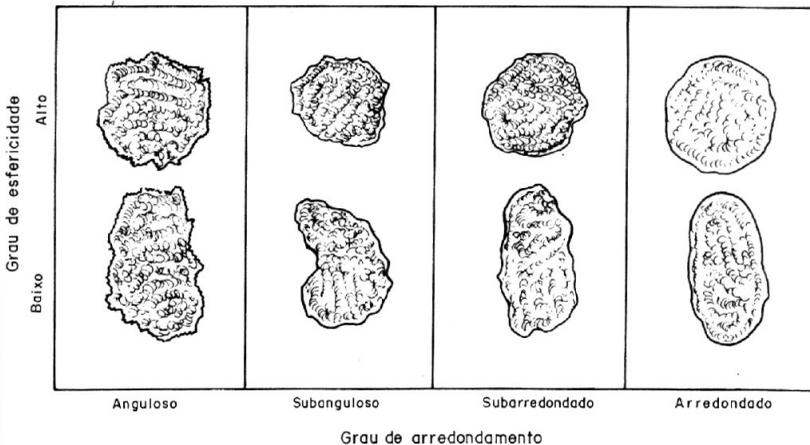


Figura 8 - Tabela para avaliação visual dos graus de esfericidade e de arredondamento (NBR7389:1992).

Técnicas de processamento e análise de imagens para determinação digital das características geométricas dos grãos dos agregados foram sendo desenvolvidas ao longo do tempo, porém a análise de imagens resultava em relações bi-dimensionais, afetando assim os resultados, pois a espessura das partículas não era medida.

Oliveira (2004) propôs uma metodologia para determinação do coeficiente volumétrico de forma de agregados miúdos, tendo como base a norma francesa AFNOR P18-540 (1997) mencionada anteriormente, e utilizando recursos computacionais e análise de imagens. Este método considera o volume real das partículas relacionando-o com o volume de esferas com diâmetro igual à maior dimensão das partículas. Segundo Weidmann (2005), foi possível perceber que a variação dos resultados de coeficiente de forma determinado com auxílio de imagens digitais está associada à própria forma do grão, pois quanto mais lamelar este for, maior a chance de sua maior dimensão estar paralela ao plano da digitalização da imagem. Em seu trabalho, Weidmann (2008) aprimorou o ensaio de Oliveira (2004), incluindo a utilização de programas computacionais de análise de imagens para a determinação automática dos parâmetros geométricos dos grãos, e a utilização de lupa estereoscópica para a avaliação, mesmo que qualitativa, da forma dos grãos das frações mais finas (passantes na malha 0,15 mm).

2.3.3. Massa Específica e Massa Unitária

Para a tecnologia do concreto, é necessário que se conheça o espaço ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas. Portanto, é suficiente determinar a massa específica aparente do agregado seco, que pode ser definida como a relação da massa de um agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis como parte do agregado.

Massa unitária pode ser definida como a massa das partículas dos agregados por unidade de volume unitário, incluindo o volume aparente dos grãos e dos vazios intergranulares. A massa unitária é muito importante na tecnologia do concreto, pois para se quantificar o agregado em volume, é preciso conhecer a quantidade de material que preenche um recipiente com capacidade igual à unidade de volume. Portanto, esta grandeza é usada para transformar quantidades em massa para quantidades em volume e vice-versa.

É válido lembrar que, para uma dada massa específica, a massa unitária depende da distribuição de tamanhos e da forma das partículas. Uma massa unitária mais alta significa que existem menos vazios a ser preenchidos por agregado mais fino e cimento (NEVILLE, 1997).

2.3.4. A aplicação de Areia de Britagem e o Efeito da Interação de suas Características nas Propriedades de Concretos e Argamassas.

Vários estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar o uso da areia de britagem em concretos e argamassas, em substituição completa ou parcial da areia natural, e a identificar eventuais características dos agregados, de natureza física e ou química, que possam prejudicar as propriedades do concreto.

Neste sentido, o item seguinte busca enriquecer esta revisão bibliográfica, contribuindo com o entendimento dos parâmetros descritos anteriormente, e suas influências nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

2.3.4.1. A composição de areia de britagem com areia natural

Conforme já mencionado em capítulos anteriores, atualmente é crescente o uso da composição de dois agregados miúdos para que se possam produzir concretos com resultados satisfatórios sob o ponto de vista técnico e econômico. Sendo assim, é possível conseguir-se um bom agregado miúdo a partir da composição de outros dois agregados considerados não tão adequados, porém mais acessíveis, em percentuais que podem variar de acordo com a aplicação do concreto.

Segundo CCAA (2008), na maioria dos casos, as centrais de concreto que utilizam areia de britagem na produção do concreto fazem uso da composição de areias (areia de britagem mais a areia natural), não utilizando 100% da areia de britagem. As razões que explicam a necessidade da realização da composição entre areias podem ser resumidas em:

- A areia natural melhora a trabalhabilidade da mistura: a forma arredondada dos grãos da maioria das areias natural e sua textura superficial lisa reduz o atrito entre partículas, melhorando a trabalhabilidade para uma mesma demanda de água;
- A composição das duas areias reduz a quantidade de material pulverulento na quantidade total de agregados miúdos, evitando os problemas causados pelo comum excesso de finos presentes nas areias de britagem. O processo de mistura é relativamente simples e de baixo custo quando comparado a outros métodos para redução do teor de pulverulento que é um dos possíveis principais

motivos que podem aumentar o consumo de água no concreto;

- Em locais onde a areia de britagem já é utilizada em proporções significativas, a maioria das pedreiras produtoras não teriam capacidade de produzir quantidade suficiente de pó-de-pedra para atender a demanda de mercado das centrais de concreto, se fosse usado 100% de areia de britagem na produção do concreto.

Vale ainda acrescentar que, como já mencionado anteriormente, além da forma mais angulosa e lamelar e a textura mais rugosa, os agregados miúdos de britagem tendem a apresentar uma granulometria diferente das areias naturais, normalmente com maior teor de microfinos, elevado teor de material retido nas malhas 1,18mm e 2,36mm e concomitante redução de grãos entre os tamanhos de 600 μm e 150 μm (WEIDMANN, 2008).

As propriedades físicas de areias de britagem, principalmente em misturas onde a quantidade de areia de britagem é maior que 50%, influenciam significativamente as propriedades do concreto. Areias naturais diferem tanto de areias de britagem que, mesmo com distribuição granulométrica parecida, as características de uma mistura irão variar significativamente (CCAA, 2008).

A quantidade de vazios intergranulares dos agregados ou sua densidade de empacotamento é diretamente relacionada com a demanda de água em misturas de concreto. Maior quantidade de vazios resultantes da granulometria do material, forma das partículas ou textura superficial, requer que a pasta preencha os vazios entre os agregados até que o concreto apresente comportamento plástico para sua aplicação.

Weidmann (2008) estudou em concretos a substituição de areia natural por areia de britagem em diversos teores e pôde observar que, para uma mesma relação água/cimento, houve redução da resistência à compressão quando aumentado o teor de areia natural. O autor acrescenta que, o maior número de partículas lisas e arredondadas da areia natural pode prejudicar a qualidade da aderência da pasta de cimento às partículas, que é função da rugosidade da superfície e da área específica das mesmas.

Ainda no mesmo estudo, Weidmann (2008) observou que, de maneira geral, quando considerada uma mesma resistência à compressão, os menores consumos de cimento foram obtidos para composições com 35% de areia natural para uma areia de britagem com forma mais arredondada, e com 50% para outra mais lamelar. Por outro

lado, dentre os teores de substituição estudados, concretos contendo apenas 20% de areia natural ficaram entre aqueles com maior consumo de cimento, independente da forma dos grãos do agregado miúdo de britagem.

A introdução da areia de britagem no concreto resultou em uma distribuição granulométrica que, na maioria dos casos, busca a minimização da quantidade de vazios. No entanto, como visto anteriormente, a natureza angular do material e uma superfície específica áspera tendem a aumentar o volume de vazios na areia. Uma maior quantidade de finos em areias de britagem resulta numa maior superfície específica, que geralmente aumenta a demanda de água no concreto. Por outro lado, microfios provenientes de areia de britagem podem agir como filler e diminuir o volume de pasta, evitando a necessidade do uso de maior quantidade de material cimentício.

O teste Flow Cone, realizado na Nova Zelândia (NZS 3111, Section 19), procura examinar a interação entre a distribuição granulométrica, forma e textura superficial das partículas em areias de britagem. O teste consta em, basicamente, passar uma determinada massa de areia através de um cone para um dado recipiente, medindo a resistência de fluir e a quantidade de vazios do agregado. O resultado do ensaio é em função do tempo que a areia leva para passar pelo cone e da quantidade de vazios calculada através do recipiente para onde a areia escoou. Assim, através deste teste foi possível demonstrar a redução na quantidade de vazios quando uma areia de granulometria uniforme é adicionada à areia de britagem. A quantidade de vazios mostrou-se correlacionada com a mudança da demanda de água em argamassas. Pôde ser observada uma correspondência entre a trabalhabilidade e a medida do tempo de escoamento através do cone (*flow time*), podendo indicar que o tempo do flow tenha relação com a forma e textura superficial da areia (CCAA, 2008).

Um importante parâmetro a ser observado é a mudança de comportamento de uma areia de britagem em concretos com menor e maior consumo de cimento. As areias de britagem, por possuírem maior teor de microfios, podem exercer influência mais relevante na resistência à compressão de concretos com menor consumo de cimento, pois os finos nelas contido possibilitam o preenchimento de vazios na mistura e um possível refinamento de poros, que proporcionam maiores valores de resistência. Já em concretos mais “ricos”, um elevado teor de material pulverulento pode acabar prejudicando a resistência, pois o cimento também atua como material fino e, um excesso deste, pode acabar aumentando a demanda de água.

Segundo estudos realizados por Drago *et al.* (2009), concretos com relação água/cimento mais elevada apresentaram maiores resistências quando usado 100% de areia de britagem. Já os concretos mais ricos com 100% de areia de britagem, apresentaram resistências mais baixas quando comparados àqueles com apenas 60% de areia de britagem. Portanto, apesar da forma mais áspera dos grãos e maior teor de finos, a areia de britagem, quando misturada à areia natural, proporciona um melhor empacotamento dos grãos de agregado miúdo, podendo aumentar a resistência à compressão, principalmente em concretos com menor consumo de cimento.

2.4. PRODUÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM

O tipo de rocha e os diversos processos de cominuição influenciam diretamente em algumas propriedades dos agregados produzidos em instalações de britagem, tais como sua granulometria, teor de microfinos, sua forma e textura superficial que, conseqüentemente, irão exercer influência no desempenho de concretos e argamassas (GONÇALVES *et al.*, 2007).

Talvez tenha sido a forma das partículas a principal restrição ao uso do pó de pedra como o agregado miúdo para os concretos. Uma máquina que melhora a forma do agregado é o moinho de martelos, porém o custo de manutenção com as peças de desgaste torna a solução quase proibitiva. A solução definitiva, por enquanto, foi a introdução na linha de britagem dos britadores tipo VSI, que produzem, pela sua concepção de projeto, um agregado cúbico.

Algumas informações sobre a abertura de pedreiras e as legislações minerária e ambiental, podem ser encontradas no Anexo 7.1.

2.4.1. Princípios de uma Britagem

Para o desenvolvimento dos temas relacionados ao funcionamento dos equipamentos de britagem, foram utilizados os diversos manuais de britagem citados na bibliografia deste trabalho.

A cominuição da rocha se faz em reduções sucessivas de tamanhos. Assim, um britador primário, que pode ser de mandíbulas ou giratório, faz a primeira redução, de dezenas de centímetros de tamanho de bloco para uma mescla bem distribuída de tamanho máximo de dezenas de milímetros. A relação entre os dois tamanhos se chama de coeficiente de redução da máquina, e primários de mandíbulas tem uma redução em torno de 1 para 4, isto é, recebem blocos, por exemplo, de

80 cm, e os reduzem, por esmagamento e fricção para baixo, a uma mistura de todos os tamanhos até o diâmetro máximo de aproximadamente 20cm.

A máquina secundária, que pode ser de mandíbulas ou de cone tem que ter a abertura de entrada necessária para receber blocos de diâmetro máximo produzido pela máquina primária, e seu coeficiente de redução fica em torno de 1 para 8.

A máquina terciária, de cone ou de tipo eixo vertical de impacto (VSI), faz a terceira redução, e três reduções geralmente são suficientes para a produção de agregados que atendem as especificações de agregados para a construção civil.

Qualquer máquina de britagem de mandíbulas ou cone, de acordo com seu manual, apresenta para cada “apf” (abertura na posição fechada), uma curva granulométrica correspondente. Assim, para cada “apf” da máquina, podem-se estimar as percentagens de cada produto resultante, bem como a sua produção horária. O percentual de pó-de-pedra vai resultar, portanto, exclusivamente do projeto da instalação da britagem, sendo que, quanto mais etapas de redução de tamanho, maior será o percentual de pó-de-pedra. É preciso se ter em conta que, quanto maior a redução de tamanho do produto final, maior é o custo de produção. A viabilidade de implantar uma instalação com o objetivo de priorizar a areia de britagem dependerá, quase que exclusivamente, do custo com que a areia natural chega à área de mercado da instalação.

Estando claro que algumas das características mais relevantes dos agregados miúdos de britagem dependem dos diversos processos da britagem bem como do funcionamento dos equipamentos utilizados na cominuição da rocha, não se pode subestimar a importância do entendimento do processo como um todo, uma vez que não são fatores isolados que irão determinar as propriedades do produto final e sim o conjunto destes. Como um exemplo da importância de se entender o funcionamento dos equipamentos, é o fato de que, além do tipo de britador, a quantidade de material usada para alimentá-lo também afeta a granulometria e a forma do produto britado.

As etapas e processos de uma britagem estão descritos em detalhes no Anexo 0.

2.4.2. Esquema Básico de uma Britagem

A planta da Figura 9, representa uma instalação de britagem, descrita no parágrafo abaixo, seguida de um fluxograma (Figura 10) que

ilustrará o processo de cominuição e classificação, com o objetivo de facilitar o entendimento.

O alimentador vibratório (**AV**) alimenta o britador primário de mandíbulas (**B1**), com apf de 100 mm, cuja descarga se faz na transportadora (**T1**) de 900 mm de largura, formando a pilha pulmão (**PP1**). No túnel sob a pilha, uma calha vibratória (**C1**) transfere o material para a correia (**T2**) de 900 mm de largura, que alimenta uma peneira (**P1**) de um deck de 75 mm de tela. O retido cai no secundário (**B2**), com 38 mm na abertura na posição fechada (apf), e o passante pela peneira e pela máquina caem na transportadora (**T3**) de 900 mm, que leva o material até a peneira (**P2**) de três decks, 44 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. O retido na primeira tela retorna pela correia (**T4**) de 500 mm para o britador secundário tipo Cone (**B2**) fechando o circuito da britagem secundária. O passante na primeira e segunda tela são conduzidos por bicas de descarga até a transportadora (**T5**), de largura 600 mm, formando a pilha pulmão (**PP2**), e o passante na última tela, de 4,8 mm, através da transportadora (**T6**), de 500 mm, forma a pilha de pó-de-pedra lamelar. Sob o túnel da pilha pulmão (**PP2**), uma calha vibratória(**C2**) transfere o material para a transportadora (**T7**), de 600 mm, que alimenta britador terciário tipo VSI (**B3**), com rotor em 1900 rpm e cuja descarga se faz na transportadora (**T8**), de 600 mm, levando o produto até a peneira final(**P3**) de decks 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. O retido na primeira tela volta para o VSI através da transportadora (**T9**) fechando o circuito. O passante na primeira tela e retido na segunda forma a pilha de brita1, através da transportadora (**T10**), de 500 mm. O passante na segunda tela e retido na segunda tela forma a pilha de pedrisco, através da transportadora (**T11**), de 500 mm. O passante na última tela forma a pilha de pó-de-pedra cúbico, através da transportadora (**T12**), de 500 mm. Detectores de metais (**D1 e D2**) estão instalados nas correias transportadoras (**T2 e T7**), correias que alimentam, respectivamente, o cone secundário e o VSI.

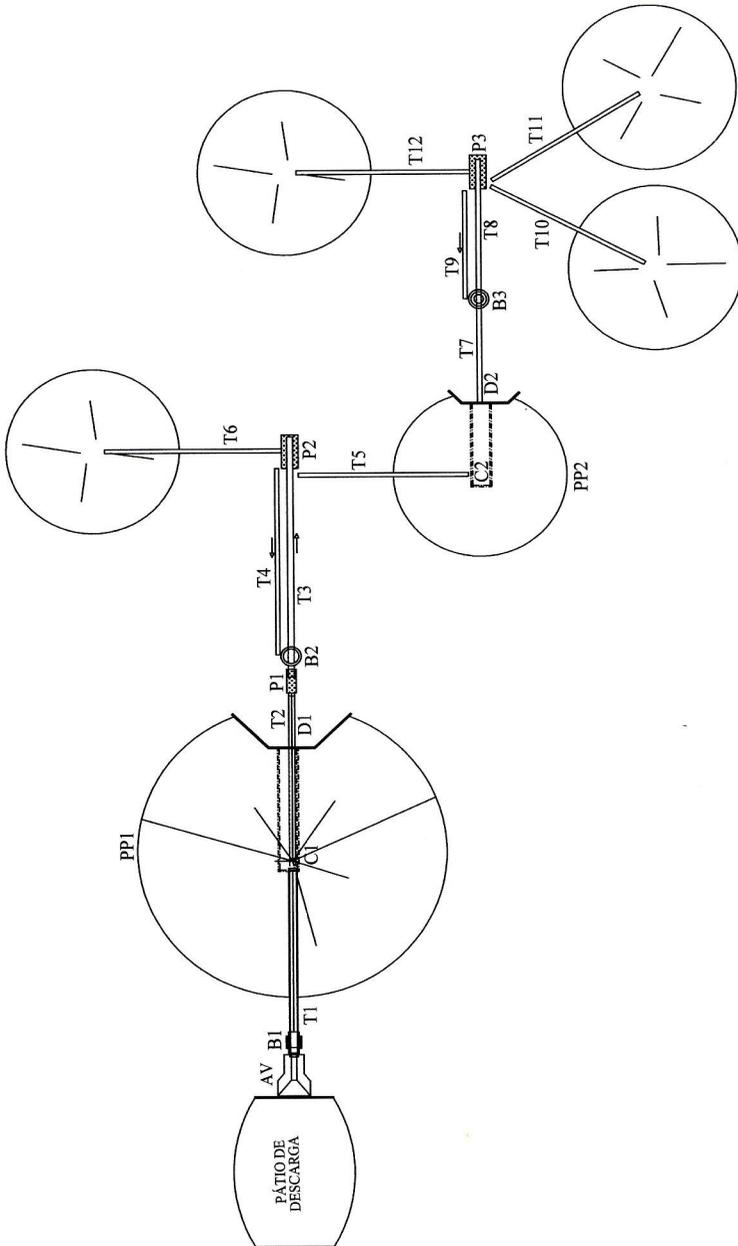


Figura 9 - Planta de esquema básico de uma britagem.

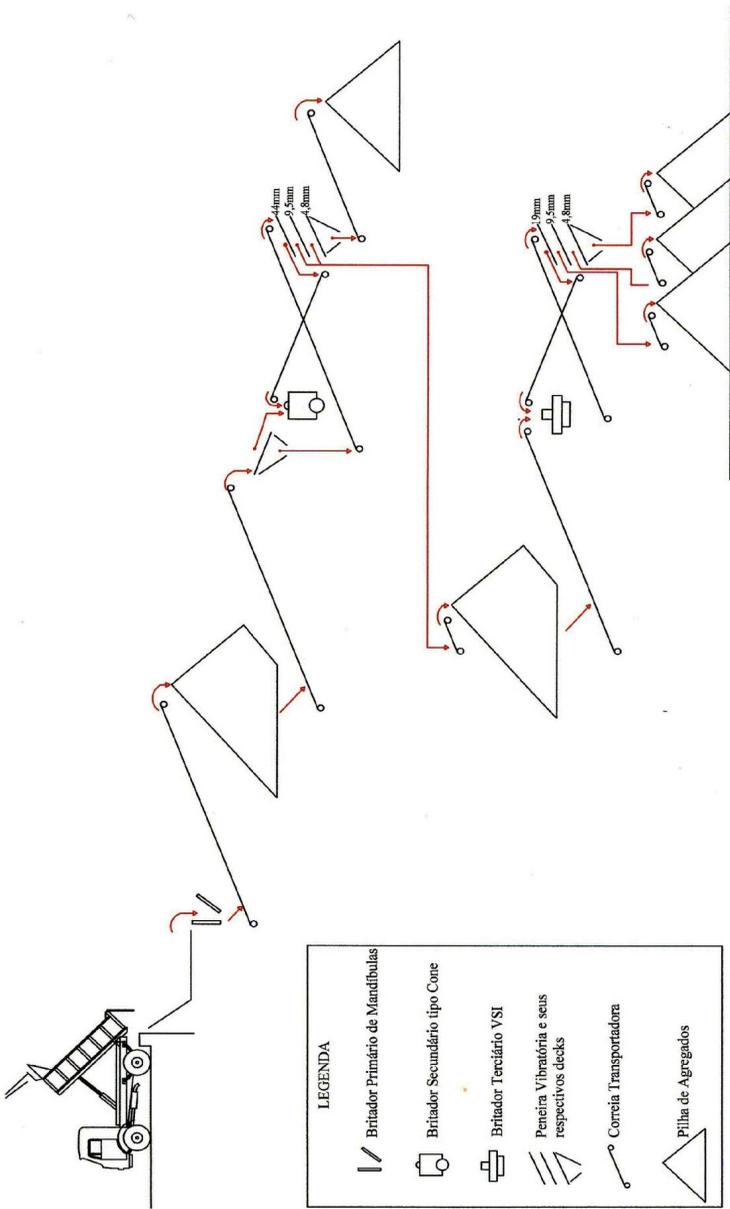


Figura 10 – Fluxograma do esquema básico de uma britagem

2.4.3. Diferenças entre Britadores Tipo VSI e Tipo Cone

As diferenças entre estas duas máquinas estão na rotação variável do VSI e fixa no Cone, na curva granulométrica do material de alimentação com seu tamanho máximo, no coeficiente de redução e na forma do produto final, além, é claro, do projeto completamente distinto de uma e de outra. A Figura 11 mostra as duas máquinas.



Figura 11 – Britador tipo Cone (á esquerda) e britador tipo VSI (à direita).

2.4.3.1. Cones

2.4.3.1.1. Generalidades

Os britadores tipo Cone funcionam com movimento oscilatório de uma peça em forma de tronco de cone contra outra peça fixa, de formato semelhante (Figura 12).

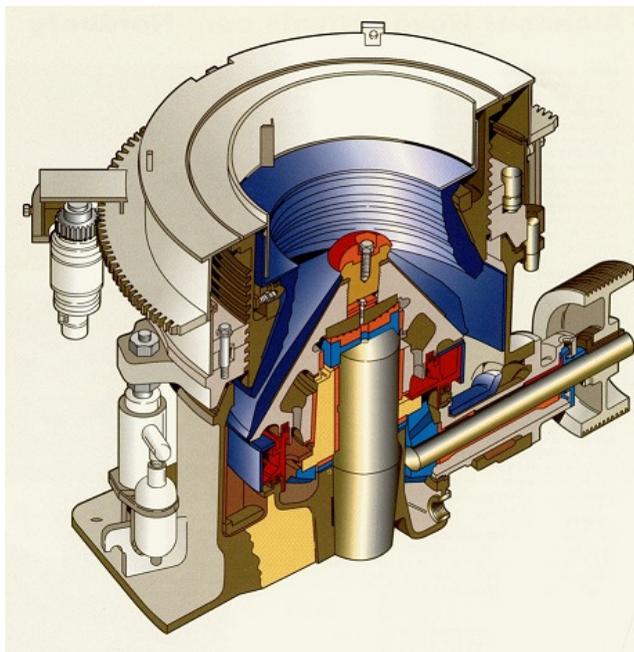


Figura 12 - Britador tipo Cone

Nos cones mais antigos, de sistema de alívio por molas, o projeto da máquina admite três tipos de revestimento, e nos cones de projeto mais recente, de sistema de alívio por balões de nitrogênio, o projeto admite seis tipos de revestimento. De acordo com os manuais de britagem, o tamanho de alimentação deve ser 80% da maior medida de entrada na máquina, e a cada tipo de revestimento se tem uma correspondente “apf”- abertura na posição fechada- que é a menor medida entre os revestimentos indicada, tomada na abertura de saída. A maior medida entre os revestimentos, no movimento oscilatório tem o nome de “apa”- abertura na posição aberta. A escolha do revestimento depende do projeto da britagem, e o projeto depende do produto final que se deseja (Figura 13).

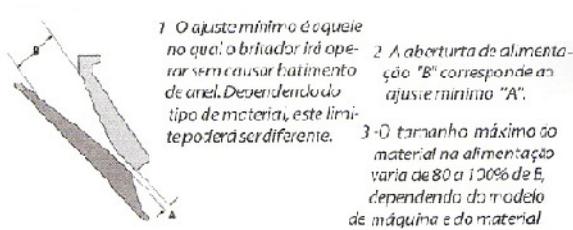


Figura 13 – Definição do revestimento, de acordo com o produto final que se deseja.

O coeficiente de redução se obtém dividindo-se o valor de 80% da maior medida de entrada, pelo tamanho máximo da curva granulométrica do material resultante na “apf” da máquina.

2.4.3.1.2. Forma do produto final

Nos cones, as lamelas surgem em três condições de operação: na situação de alimentação que não preenche por completo a câmara de britagem, no momento de enchimento da câmara e no momento de esvaziamento da câmara de britagem. Nestas ocasiões, as lamelas, vindas da pedra e britador primário, para o britador secundário, e da pedra, britador primário e britador secundário para o britador terciário, entram em queda livre no momento da “apa” -abertura na posição aberta - e não se quebram. Com uma situação de câmara cheia, fatalmente os agregados em forma de agulha ou chapa (Figura 14 e Figura 15) irão se romper, pelas posições de apoio e forças variadas sofridas na trajetória entre a entrada e a saída da máquina, uma vez que o tempo nesta trajetória é maior do que a trajetória em queda livre, quando a câmara está vazia.



Figura 14 - Exemplo de partículas em forma de agulha e chapa, formadas na situação de câmara parcialmente vazia.



Figura 15 – Comparação entre agregados resultantes das situações de câmara cheia e vazia do Cone, respectivamente.

Com câmara cheia, a lamelaridade medida no produto final, que pode ser alta ou baixa, é função exclusiva dos tipos de rocha, sendo a lamelaridade maior nas rochas extrusivas. Rochas da mesma família podem também apresentar valores muito dispares, pois os planos de fratura não são únicos para uma mesma família de rochas.

2.4.3.2. VSIs

2.4.3.2.1. Generalidades

Os britadores tipo VSI são máquinas de projeto recente com a propriedade de originar produto cúbico, onde antes a lamelalidade dos grãos independia do tipo de britador. Nestas máquinas um rotor recebe a alimentação verticalmente e a arremessa horizontalmente em alta velocidade contra um anteparo metálico ou contra uma parede formada pelo próprio material (Figura 16).

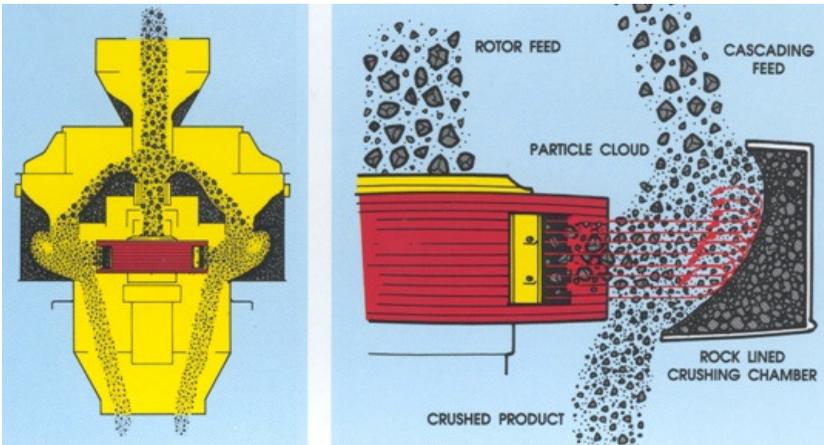


Figura 16– Modo de operação de um VSI (*Mesto Minerals, 2005*).

Ao contrário de um cone, que se permite uma muito pequena alteração em sua rotação, o VSI tem uma larga faixa de rotação, quase o dobro entre a máxima e a mínima. A alteração da rotação da máquina influencia na produção e no módulo de finura do produto resultante, como pode ser observado na Figura 17. Quanto maior a rotação, menor o módulo de finura, e menor a quantidade de material que pode passar pela máquina, diminuindo a produção. A escolha de uma determinada rotação de operação depende do material que se queira produzir, em termos quantitativos, ou depende de alguma especificação técnica que se queira alcançar.

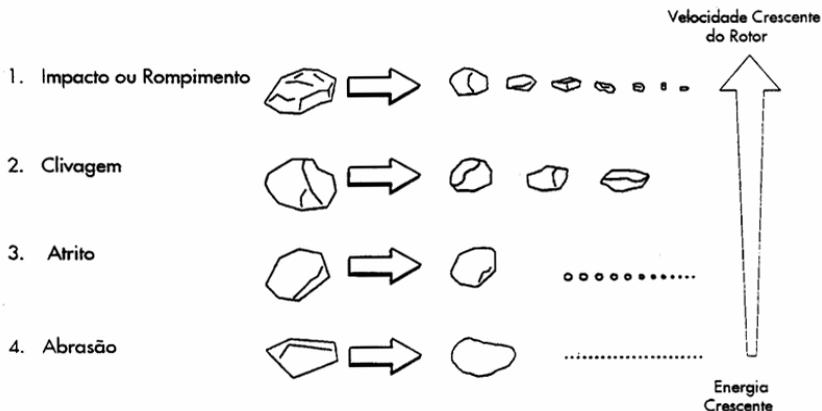


Figura 17 - Quanto maior a rotação de um VSI, maior a energia que atua nos processos de fragmentação da rocha.

A facilidade de alteração na rotação do VSI se deve a implementação de um inversor de frequência, o qual monitora as rpm do motor. Embora seu custo possa chegar a algo perto de 20% do valor do VSI, este equipamento está cada vez mais sendo usado. Com alterações na rotação deste equipamento, é possível se aumentar ou diminuir o módulo de finura do material, e isto significa alterar o percentual na peneira 0,075 μm . A rotação de um VSI não depende somente do fator teor de pulverulento que se deseja, mas também dos outros materiais produzidos e do tipo de alimentação da máquina, e o conjunto dos fatores é que determina a operacionalidade da britagem.

Conforme comentado anteriormente, um VSI opera recebendo em seu rotor uma carga contínua de material, verticalmente, e o giro do rotor expõe esta carga horizontalmente por algumas aberturas no mesmo, como já ilustrado na Figura 16.

O tamanho máximo da alimentação é função das aberturas do rotor, e quanto maior a abertura, maior o tamanho máximo. Por outro lado, quanto maior o rotor, obrigatoriamente maior a máquina. Quando comparado com a alimentação de um cone, o tamanho máximo de alimentação de um VSI é em torno de 4 a 5 vezes menor.

O coeficiente de redução não é um dado possível de se calcular, como nos cones, devido aos projetos completamente diferentes das máquinas.

2.4.3.2.2. *Forma do produto final*

A forma do produto final é a única razão da preferência dessa máquina sobre os cones terciários. Dentro de um VSI ocorre clivagem, atrito, abrasão e impacto, e estas são as razões do formato da partícula, como se pode observar na Figura 17. A máquina, como qualquer outra máquina de britagem, deve operar na amperagem indicada na placa fixada em seu motor. Só assim se estará solicitando da máquina o seu máximo. A cubicidade do produto já aparece na primeira passagem da alimentação pela máquina, e esta cubicidade será tanto maior quanto maior for o retorno para dentro dela (Figura 18). Evidentemente retornar uma brita 19 mm e um pedrisco 9,5 mm, já cúbicos, para se obter uma areia de britagem de máxima cubicidade, só faz aumentar o custo de produção, pois além de se reprocessar um produto pronto, o rompimento de uma partícula cúbica exige maior energia de britagem do que o rompimento de uma partícula em forma de agulha ou chapa.



Figura 18 –À esquerda partículas provenientes de um britador do tipo Cone. À direita o mesmo material com apenas uma passagem pelo britador VSI.

Segundo ensaios realizados por Weidmann (2008), agregados miúdos que passaram por um britador VSI apresentaram pouca ou nenhuma variação na distribuição granulométrica. No entanto, apresentaram melhora significativa na forma dos grãos. Pôde-se também observar que esta melhora foi mais significativa para frações maiores

que 0,60 mm e proporcionou alterações significativas no desempenho dos agregados miúdos de britagem, principalmente quanto à trabalhabilidade das argamassas e concretos.

2.4.4. Equipamentos de Supressão de Pulverulento

Numa cominuição de rocha, o percentual de passante na peneira 0,075 μm está ligado diretamente ao resultado do ensaio de Los Angeles, ao resultado do ensaio de Sanidade e à rotação do equipamento, se este for do tipo VSI. Se o equipamento for tipo cone, o percentual de finos dependerá exclusivamente da rocha que está sendo britada.

Estudos realizados pelo DEINFRA- Departamento de Infraestrutura, e também trabalhos em campo, mostraram que a geração de pulverulento na britagem é baixa quando os resultados dos ensaios de Los Angeles e Sanidade apresentam valores baixos, principalmente entre as rochas extrusivas, onde o valor do Los Angeles varia de 8% até 20%. Nas rochas intrusivas, com o Los Angeles variando entre 20% e 40%, a geração de pulverulento é, na maioria das vezes, maior que nas rochas extrusivas.

A adequação do teor de pulverulento apareceu no início do século passado em equipamentos que utilizaram a água, pela observação da ação desta sobre as areias naturais nos rios. A grande maioria dos equipamentos deste tipo se baseia na velocidade ascensional da água, onde, quanto maior a velocidade, maior o tamanho da partícula arrastada, e quanto menor a velocidade, menor é o tamanho da partícula carregada, que em suspensão, sofre uma força para cima, maior que a força da gravidade. Para que o equipamento possa funcionar adequadamente, é preciso uma razoável dispersão do material dentro d'água, como forma de evitar que partículas maiores que as desejáveis sejam arrastadas entre as menores.

2.4.4.1. Tipos de Equipamentos

2.4.4.1.1. Lavador de Rosca

O equipamento, ilustrado na Figura 19, tem um pequeno tanque na sua parte posterior, onde entram o material e a água, e o mesmo é rodeado por três lados por uma calha, cuja função é receber a água com as partículas carregadas. No fundo do tanque fica a parte imersa de uma rosca helicoidal, que ao girar, transporta o material decantado para cima,

até um transportador de correia, e deste, para a pilha de estocagem. Em manuais existem tabelas que indicam a quantidade de água que se tem que injetar para eliminar determinados tamanhos de partículas, sendo esta quantidade também função do tamanho do lavador.

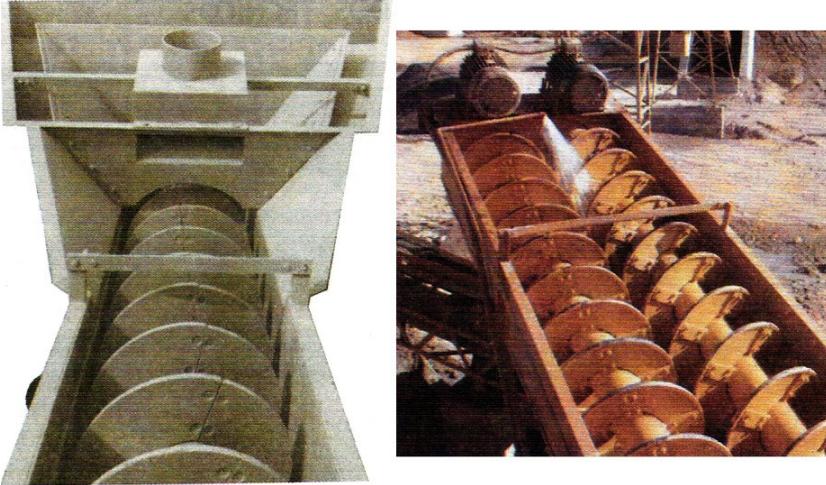


Figura 19 - Lavadores de rosca.

De funcionamento simples, este equipamento tem uma grande desvantagem, que é a baixa relação entre quantidade de água e quantidade de material, fazendo com que não haja a dispersão necessária para um corte satisfatório na curva granulométrica.

A água com o pulverulento é conduzida até tanques de decantação, onde o material decantado é coletado e destinado para algum depósito, geralmente nas cercanias da pedreira. Como o material tem uma grande umidade e é de difícil manuseio, não tem se encontrado um uso para o mesmo, gerando problemas ambientais.

2.4.4.1.2. Roda Desaguadora

Este equipamento tem seu funcionamento exatamente igual a um lavador de rosca, baseando-se na velocidade ascensional da água. Da mesma maneira calculada para os lavadores de rosca, existem tabelas que indicam a quantidade de água injetada, função do tamanho do tanque e do tamanho da partícula que se deseja eliminar da curva granulométrica do material de alimentação (Figura 20).

Entre o Lavador de Rosca e a Roda Desaguadora, este último equipamento tem sido preferido, por ter uma relação entre água e material bem maior, conduzindo a uma maior dispersão e consequentemente, a um corte mais preciso na curva granulométrica, sendo predominante entre as pedreiras que adotam sistema à úmido para o controle do material pulverulento.



Figura 20 - Roda desaguadora.

2.4.4.1.3. Tanque Classificador

Trata-se de um tanque de forma aproximadamente retangular, visto de cima, e forma trapezoidal, visto num corte transversal a maior dimensão. Possui em seu fundo, válvulas de descarga, que variam de seis a doze, e calhas laterais de escoamento na parte superior final do tanque. O material entra com a água numa extremidade, e a descarga da água com as partículas que se quer eliminar se faz pelas calhas na parte final superior do tanque. O material decanta no fundo e ao longo do tanque, caindo mais longe do ponto de entrada quanto menor for o tamanho da partícula, e mais perto quanto maior for o seu tamanho. As válvulas no fundo do tanque se encarregam de dar a descarga do

material decantado. Os materiais que saem pelas válvulas são combinados entre si, conforme as granulometrias que se queiram, e dirigidos para três calhas embaixo do tanque, obtendo-se assim, areia grossa, média e fina, ou grossa e média.

Junto de cada válvula de descarga está colocada uma hélice que gira acionada por um pequeno motor elétrico. Quando o material decantado começa a cobrir a hélice, esta tem seu movimento impedido, fazendo com que a amperagem do motor se eleve, emitindo neste instante, um sinal elétrico de acionamento da válvula de descarga. Com a hélice livre, a mesma retoma o movimento giratório, baixando a amperagem do motor, e novo sinal é emitido, fechando a válvula.

A operação deste tanque, por causa principalmente das válvulas, é um pouco complicada, além de no final resultar num único tipo de areia adequada aos concretos, e por estas razões, o equipamento tem sido eliminado das instalações. O material das válvulas de descarga possuem ainda muita água, o que faz com que seja necessário a colocação de um lavador de rosca para o desaguamento e posterior descarga em correia transportadora. Este equipamento é o ilustrado na Figura 21.



Figura 21 - Tanque classificador.

2.4.4.1.4. Equipamentos que combinam força da gravidade com força centrífuga

A grande vantagem destes equipamentos que combinam as duas forças é a pequena relação da água com o material, com um corte satisfatório na curva granulométrica.

2.4.4.1.4.1. Hidrociclones

Ao entrar a água com o agregado tangencialmente na parte superior do ciclone, a força centrífuga, combinada com a força da gravidade, provoca nas partículas de maior peso um movimento em espiral junto à parede interna do cone. Neste movimento da massa, água mais agregado, as partículas se colocam, em tamanhos crescentes, do centro para a parede interna, sendo que a parte mais perto das paredes se movimenta em círculos para baixo, desaguando no fundo do ciclone, e a parte mais fina adquire um movimento para cima, no centro do equipamento. Esta parte fina é a parte que se deseja cortar na curva granulométrica, e o ponto do corte depende do projeto geométrico do equipamento e da velocidade de entrada no mesmo. A Figura 22 ilustra este tipo de equipamento.

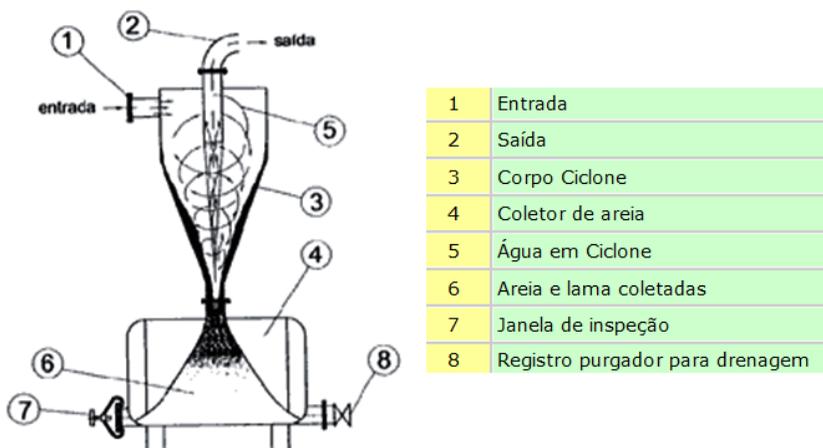


Figura 22 - Hidrociclone.

2.4.4.1.4.2. Ortner

Este equipamento funciona pelo mesmo princípio de funcionamento dos ciclones, com um “underflow” sendo o agregado miúdo para concreto, e o “overflow” sendo a água com pulverulento, destinada para um tanque de decantação. A Figura 23 ilustra este tipo de equipamento.



Figura 23 - Ortner.

2.4.4.2. Equipamentos Via Seca e suas características

O sistema de baixar o teor de pulverulento por via seca pode apresentar vantagens sobre os de via úmida por dois principais motivos: as leis ambientais e o material pulverulento úmido, que dificulta o seu manuseio e a sua conseqüente comercialização. Devido a isto, pode-se observar um crescente interesse por equipamentos capazes de retirar parte do material pulverulento via seca, pois se torna inviável secar o material úmido, até então classificado como resíduo, de modo a possibilitar o seu uso.

Nas situações de areia de britagem, atualmente, é muito difundido o uso de equipamentos via úmido, em especial a roda desaguadora, principalmente devido ao seu baixo custo, quando comparado ao custo

de instalação de equipamentos via seco. Nas usinas de asfalto, uma vantagem de se obter um material com baixo teor de pulverulento e seco, é o menor consumo de combustível exigido para elevar a temperatura dos agregados. Outra vantagem é o manuseio facilitado do pulverulento, tendo um uso que vem sendo estudado, como por exemplo, para concretos auto adensáveis. Estes usos são ainda bastante restritos e de pouco consumo, devido provavelmente à predominância dos equipamentos via úmida.

Para diminuir a formação deste pó em suspensão, gerado pela atividade de britagem, é comum a utilização de sistemas de aspersão de água, instalados nas bocas dos britadores e nas correias transportadoras (FRAZÃO, 2000). No entanto, esta aspersão de água, além de apenas atenuar o problema do pó, acaba gerando problemas devido ao pó que, com a umidade, fica aderido aos grãos, podendo causar posteriores problemas de aderência “pasta-agregado”.

Os sistemas a úmido por chuveiros ou bicos de névoa apenas mascaram a situação, porque, em se tratando de um material extremamente fino, parte da massa escapa facilmente da tentativa de captura pela água, causando, além de problemas ambientais, problemas aos trabalhadores e a vizinhança em torno da pedreira.

Assim sendo, muitas pedreiras estão adotando sistemas de remoção de finos a seco e, adicionalmente, sistemas para controlar a ascensão de pó na atmosfera, como pode ser visto na Figura 24.



Figura 24 - Tubos para a captação do pulverulento nos pontos de maior concentração.

Por via a seco o sistema compreende um equipamento de captação do pulverulento, condutos de transporte aéreo até um filtro de mangas, e novamente conduto mecânico ou aéreo até um silo de depósito.

Existem diversos estudos com o objetivo de aplicação este material fino seco. Alguns possíveis usos deste material, que pode ser ensacado, são: enriquecimento de filler no pó-de-pedra para concretos compactados a rolo, adição em concretos auto-adensáveis, isolante de cabos de fibras óticas e adição em bases e sub-bases granulares da estrutura de pavimentos rodoviários. Alguns outros estudos como o uso como fertilizante e como composições com argilas em cerâmica, estão sendo desenvolvidos.

O equipamento de captação de pulverulento mais conhecido é o aero-separador (Figura 25). Consiste num eixo, dotado na parte superior de raios metálicos com pás de angulação reguláveis nas extremidades, que giram num plano horizontal. O material entra por cima contra as pás, que promovem uma dispersão do agregado, concentrando os grãos junto à parede interna, e os miúdos no centro, pela ação da força centrífuga. Uma corrente de ar passa pelo aparelho e sai pelo centro da parte superior, sendo então conduzida para o filtro de mangas.

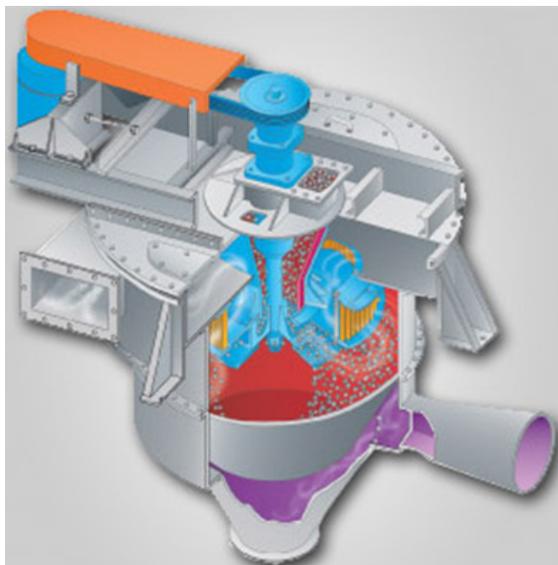


Figura 25 - Aero-separador (*STURTEVANT Inc.*).

Existem vários tipos de aeroseparadores, todos com a mesma função. São muito eficientes, com o material captado tendo menos de 5% retido na peneira 0,075 mm, e são usados na indústria de mineração, indústria de alimentos e indústria farmacêutica, que exigem rigidez nas especificações. Em contrapartida, são de baixa produtividade e de preço alto.

Aparelhos não tão sofisticados, de alta produção, como requer uma instalação de britagem, estão em desenvolvimento em vários países do mundo, inclusive no Brasil. Como exemplo, Pettingell (2008) descreve sistema em uso no Japão, com o objetivo de alcançar o emprego de 100% de areia de britagem em concretos. Este sistema consiste no uso de um VSI seguido por um sistema aeroseparador, munido de peneiras para classificação do material, e filtros de manga (Figura 26).



Figura 26 - Sistema para produção de areia de britagem utilizado no Japão (Pettingel, 2008).

O filtro de mangas é conhecido por seu uso nas usinas de asfalto. O material com ar entra por baixo, passa por mangas que retém o pulverulento, e sai limpo por cima, puxado por um exaustor e conduzido para uma chaminé. Um sistema eletrônico promove pulsos de ar, ou “tiros de ar”, para dentro das mangas, fazendo-as estufar e soltar o pó, que cai no fundo do filtro (Figura 27). Um parafuso helicoidal transporta este pó para fora e daí para um depósito.

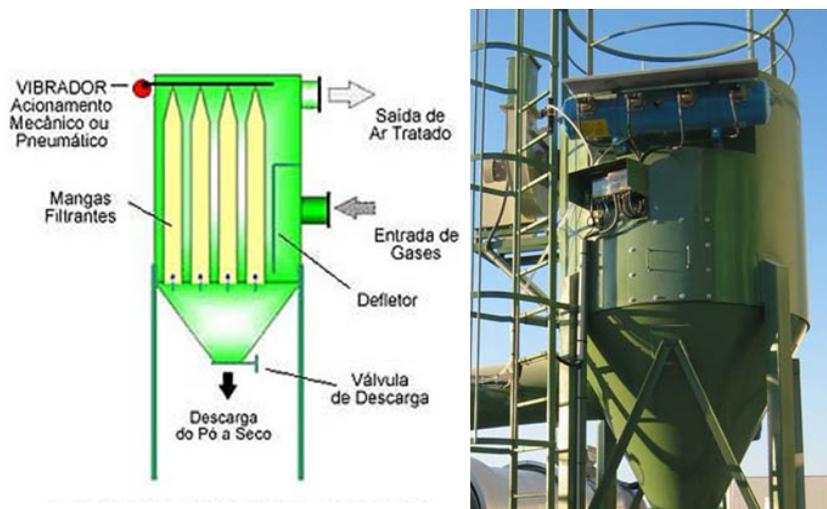


Figura 27 - Filtro de mangas.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo apresentar o programa experimental realizado, as metodologias e os parâmetros analisados, para que fossem atingidos os objetivos deste trabalho.

Para melhor organização das atividades experimentais, o programa será dividido em quatro principais etapas, de acordo com a ordem cronológica de realização. A primeira descreve os materiais empregados no estudo. A segunda apresenta como foram preparados e caracterizados os materiais, obtendo-se dados que serviram de base para toda a pesquisa. A terceira apresenta todos os parâmetros analisados. A quarta, por fim, descreve os métodos para a avaliação dos parâmetros propostos, para estudos em argamassa e, posteriormente, estudos em concreto.

3.1. MATERIAIS EMPREGADOS

Cimento e aditivo

Foi utilizado o cimento CP IV-RS, devido ao fato de que grande maioria das centrais dosadoras de concreto da região Sul do Brasil utilizam esse tipo de cimento. Por este mesmo motivo, foi adotado um aditivo plastificante polifuncional (reduzidor de água) em todas as misturas. Foi utilizado o aditivo Mira 34, fabricado pela empresa Grace.

As propriedades físicas, químicas e mecânicas, referentes às médias do mês de janeiro de 2011 são apresentadas na Tabela 6. Estas propriedades foram fornecidas pelo próprio fabricante do cimento.

Tabela 6 – Propriedades médias do cimento.

ENSAIOS FÍSICOS							
	Finura (%) - Resíduo na Peneira:		Blaine e cm ² /g	Água da Pasta de Consistência Normal (%)	Tempo de Pega (min)		Expansibilidade Le Chatelier - a quente (mm)
	0,075 mm	0,044mm m			Início	Fim	
Média	1,04	4,02	4267	30,25	230	307	0,02
D.Padrão	0,37	0,73	181	0,37	13	18	0,11
Mínimo	0,50	2,90	3940	29,60	210	280	0,00
Máximo	1,70	5,50	4570	30,80	250	355	0,50
ENSAIOS MECÂNICOS							
Resistência à Compressão (MPa)							
	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias			
Média	16,32	25,05	30,01	42,26			
D.Padrão	1,48	1,62	1,59	1,39			
Mínimo	13,60	21,70	26,60	39,50			
Máximo	18,80	27,90	32,80	44,90			
ENSAIOS QUÍMICOS							
TEORES (%)							
	Perda ao Fogo	MgO	SO ₃	Resíduo Insolúvel			
Média	3,27	4,94	2,29	25,62			
D.Padrão	0,48	0,32	0,25	2,54			
Mínimo	2,45	4,28	1,77	21,65			
Máximo	4,21	5,73	2,82	30,75			

Areia Natural

Para a composição com o agregado miúdo de britagem foi utilizada uma areia natural fina, de módulo de finura de 0,92. O motivo da escolha desta areia foi o seu bom desempenho em estudos desenvolvidos pelo GTec-USFC.

Pó-de-pedra

Para a escolha dos agregados miúdos de britagem a serem usados, os dois critérios adotados foram: os agregados deveriam ser de origens mineralógicas diferentes e as britagens escolhidas deveriam possuir em suas instalações um britador do tipo cone e outro do tipo VSI. Com estes dois tipos de britadores, seria possível realizar a comparação entre formas diferentes dos grãos para agregados de mesma origem mineralógica, pois o britador do tipo VSI produz agregados mais arredondados quando comparado ao britador cônico.

Assim, a cada uma das britagens fornecedoras, foi solicitada uma amostra do pó-de-pedra coletada na saída do britador cônico, e outra amostra coletada na saída do VSI, com os tipos de rocha: basalto, granito, gnaiss e calcário.

Agregado graúdo

Os agregados graúdos para todo o estudo em concreto são de origem granítica e de classificação 4,75/12,5 e 9,5/25, segundo a NBR 7211:2009.

3.2. PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais preparados e caracterizados são:

- Pó-de-pedra de basalto proveniente de um britador cônico;
- Pó-de-pedra de basalto proveniente de um britador do tipo VSI;
- Pó-de-pedra de granito proveniente de um britador cônico;
- Pó-de-pedra de granito proveniente de um britador do tipo VSI;
- Pó-de-pedra de gnaiss proveniente de um britador cônico;
- Pó-de-pedra de gnaiss proveniente de um britador do tipo VSI;
- Pó-de-pedra de calcário proveniente de um britador cônico;
- Pó-de-pedra de calcário proveniente de um britador do tipo VSI.

Como comentado anteriormente, no beneficiamento de areias de britagem, uma medida tomada para a produção de areias de boa qualidade para o uso em concreto é a eliminação, por peneiramento, da fração mais grossa (granilha) da curva granulométrica do pó-de-pedra. Outra medida importante é o controle do material pulverulento (material abaixo da peneira 0,075 mm).

Neste sentido, para a eliminação da fração mais grosseira, foi escolhida a peneira de malha 3,36 mm. Esta escolha pode ser justificada por trabalhos tecnológicos já desenvolvidos no GTec-UFSC, onde areias de britagem contendo em torno de 10% retido na peneira de malha 2,4 mm apresentaram melhor desempenho nos concretos. Assim, analisando a granulometria de cada agregado, esta peneira foi considerada a mais adequada. Portanto, todas as areias preparadas foram peneiradas na peneira de malha 3,36 mm.

Para o estudo da influência do teor de material pulverulento, os agregados foram submetidos à lavagem para eliminação de parte de seus microfios.

A lavagem foi realizada misturando-se o pó-de-pedra com água em uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 120 litros. O material era misturado betoneira por 3 minutos. Parava-se a betoneira e deixava-se o material parado dentro dela por mais 2 minutos, para que as partículas mais grosseiras decantassem. A água era vertida lentamente da betoneira e com ela era eliminado o material pulverulento. Para evitar a eliminação de partículas maiores, foi utilizada uma peneira de 0,075 mm, sendo a água vertida diretamente nela.

Depois de diversos testes, foi definida uma proporção base de três baldes de areia e um de água para iniciar o processo de lavagem. Logo após cada um destes ciclos, media-se o teor de pulverulento restante. Caso este ainda não estivesse atingido o teor estabelecido, o processo era repetido. Todos os agregados foram lavados até que atingissem um teor de material pulverulento entre 8% e 10%. Este teor foi o escolhido pela razão de ser um valor usual em instalações de beneficiamento de areia.

Em resumo, para cada pó-de-pedra coletado, dos quatro diferentes tipos de rocha, foram preparadas quatro tipos de areia de britagem:

- Areia proveniente do britador **cônico lavada**;
- Areia proveniente do britador **cônico original (não lavada)**;
- Areia proveniente do britador **VSI lavada**;
- Areia proveniente do britador **VSI original (não lavada)**;

Na Figura 28 pode ser observado um fluxograma da obtenção das dezesseis areias de britagem a serem estudadas.

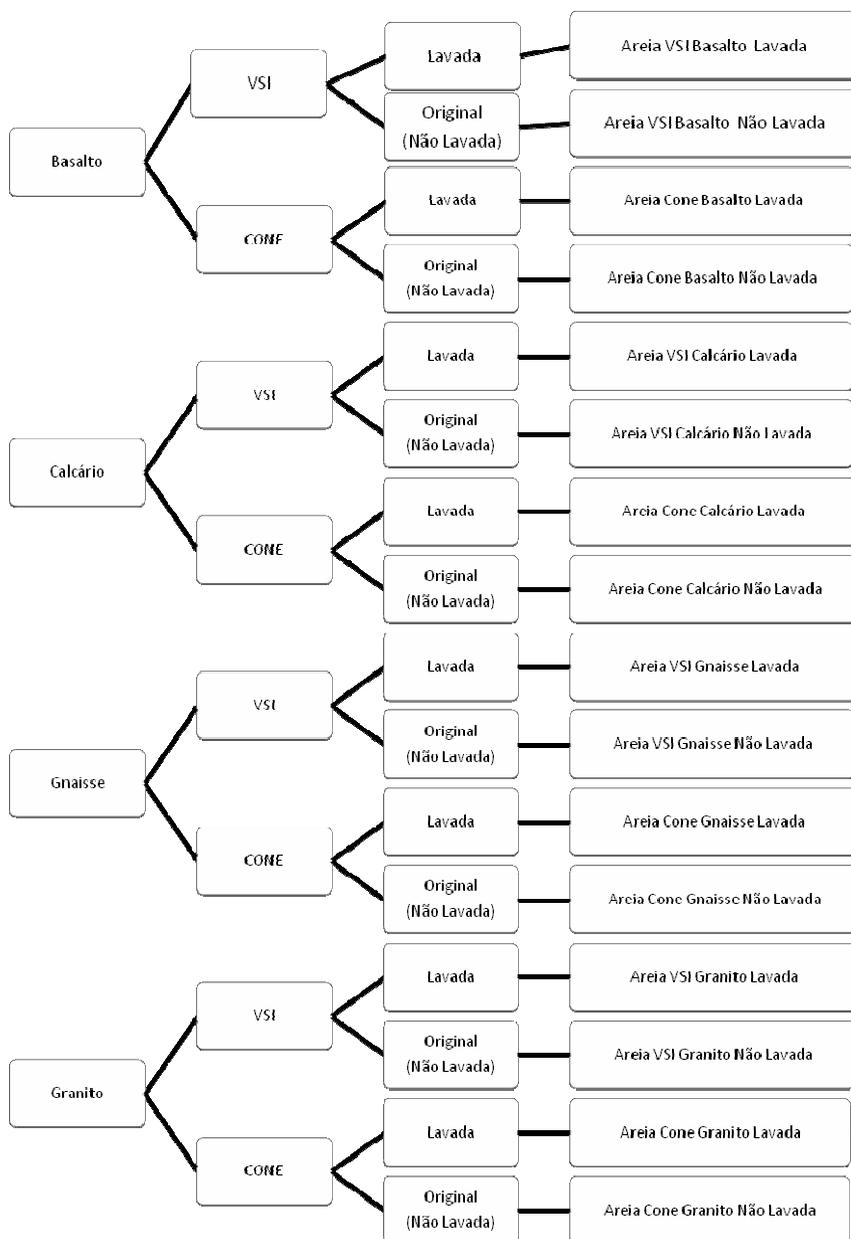


Figura 28 - Fluxograma do preparo das areias de britagem a serem estudadas.

Com os materiais secos e prontos para serem utilizados, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização:

- Composição granulométrica, de acordo com a NBR NM 248:2003;
- Material pulverulento, de acordo com a NBR NM 46:2003;
- Massa específica, de acordo com a NBR NM 52:2003.

3.3. PARÂMETROS GERAIS ANALISADOS

3.3.1. O Tipo do Britador Utilizado na Cominuição das Rochas

Diante dos resultados de caracterização dos materiais, dos estudos em concreto e argamassa e da avaliação da forma dos grãos, buscou-se, considerando agregados de mesma origem mineralógica, analisar e comparar o desempenho dos britadores cônico e VSI e sua real influência na forma dos grãos e seu conseqüente desempenho na produção de areias de britagem para uso em concretos.

Além disso, comparando-se os resultados obtidos entre os diferentes tipos de rocha, foi possível analisar o comportamento dos dois tipos de britadores para cada origem mineralógica. Este parâmetro objetivou definir como se comportam os agregados de diferentes origens quando britados nestes dois equipamentos, podendo assim estimar o quão válido pode ser a inserção de um VSI numa instalação de britagem, opção esta que pode variar de acordo com o tipo de rocha.

3.3.2. O Teor de Material Pulverulento

Analisou-se a influência do material pulverulento em dois teores:

- Teor “original”: aquele presente nas areias não lavadas, apenas peneiradas na peneira de malha 3,36 mm;
- Teor “reduzido”: aquele obtido após a lavagem, entre 8% e 10%.

Dentro deste contexto, buscou-se analisar:

- Se a influência do teor de material pulverulento varia com o tipo da rocha;
- Se o tipo do britador, ou seja, a forma dos grãos deste material muito fino exerce alguma influência nas propriedades de concretos e argamassas;

- Até que ponto a eliminação dos microfinos nas instalações de britagem pode trazer benefícios aos concretos, e em que tipo de mistura esta eliminação tem efeito predominante;
- Através de teores semelhantes de material pulverulento em tipos distintos de rochas, analisar se a origem mineralógica do pulverulento tem alguma influência no desempenho de argamassas.

3.3.3. O Teor de Areia Natural Fina

Para cada uma das 16 areias foi avaliada a influência do teor de areia natural fina no desempenho de argamassas. Para tal, foi feita uma argamassa com 100% de areia de britagem, e as substituições por areia natural foram feitas volumetricamente (volume aparente) nos teores de 20%, 30% e 40%.

3.3.4. O Tipo da Rocha e a Forma dos Agregados

Como já mencionado nos itens anteriores, estes parâmetros foram correlacionados com todos os outros, buscando-se uma inter relação, inclusive entre os próprios.

3.4. METODOLOGIA

Após a preparação e caracterização dos agregados, para cumprir com o objetivo principal deste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia de estudos que será apresentada em três principais partes. Na primeira delas, os agregados foram analisados de acordo com a forma de seus grãos, com a granulometria a laser do material passante na peneira de malha 1,2 mm e com a análise da qualidade do material pulverulento através do ensaio do azul de metileno. Na segunda parte foi realizado um estudo em argamassa, com um universo de parâmetros a serem analisados. E, por fim, na terceira parte, foi realizado um estudo em concreto.

3.4.1. Avaliação da Forma dos Grãos

Para a avaliação da forma dos grãos e sua influência nas características de concretos e argamassas, foi utilizado o método proposto por Oliveira (2004) e aperfeiçoado por Weidmann (2008),

comentado no item 2.3.2.1, que tem como base a norma francesa AFNOR XP P18-540.

Nos agregados miúdos foram avaliados os grãos retidos nas peneiras, a partir da peneira de malha 0,3 mm, até o retido na peneira de 2,8 mm. O Anexo 7.1 apresenta todas as etapas do ensaio.

3.4.2. Granulometria a Laser

Os ensaios de granulometria a laser foram realizados no NANOTEC-Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil da UFSC. O equipamento utilizado foi o *MicrotracFlex*.

O ensaio foi realizado em treze amostras, com grãos passantes na peneira de malha 1,2 mm. A Figura 29 mostra o equipamento utilizado no ensaio.



Figura 29 – Equipamento utilizado na realização do ensaio de granulometria a laser.

3.4.3. O Ensaio do Azul de Metileno

Como comentado no Item 2.3.1.3, existem diversas versões do teste do azul de metileno. A norma escolhida neste trabalho foi a AASHTO TP57(2000), por ser uma norma direcionada para microfinos de agregados de britagem e não para materiais argilosos, e também pelo fato de estar sendo utilizada para diversos estudos direcionados a agregados para concretos de cimento Portland.

As etapas do ensaio podem ser resumidas em:

- a) Colocar 10g de material seco, passante na peneira 0,075 mm, em um béquer de 500 ml;
- b) Adicionar 30 ml de água destilada no béquer contendo o material. Utilizar um misturador eletromagnético, misturando a água e o microfino durante 5 minutos;
- c) Com o auxílio de uma bureta, adicionar ao béquer 0,5 ml de solução de azul de metileno de concentração 5 g/L. Continuar agitando por mais 1 minuto;
- d) Com o auxílio de bastão de vidro, remover uma gota da mistura e colocá-la sobre o papel filtro;
- e) Observar a gota. Continuar adicionando 0,5 ml da solução de azul de metileno até que uma “aureola” azul clara apareça ao redor da gota.
- f) A auréola deverá manter-se durante 5 minutos, confirmando com o teste da gota de um em um minuto. Caso a auréola desapareça, continuar adicionando a solução.

Os resultados do teste do azul de metileno são apresentados como o valor do azul de metileno em miligramas de solução por grama do material passante na peneira 0,075 mm. A Figura 30 mostra os equipamentos sendo utilizados durante o ensaio.



Figura 30 – Equipamentos para o ensaio do azul de metileno.

3.4.4. Estudo em Argamassa

O estudo em argamassa teve como objetivo avaliar a consistência das misturas através do ensaio de espalhamento, determinação do teor de ar incorporado e determinação da resistência à compressão. De caráter comparativo, este estudo almejou investigar diversas características dos agregados e definir, de acordo com os parâmetros que serão relacionados a seguir, os agregados miúdos com melhor desempenho.

Durante os ensaios, no estado fresco, as argamassas foram avaliadas quanto à sua fluidez (através da mesa de espalhamento- *Flow Table*) e, visualmente, quanto à sua coesão, exsudação, segregação e aspereza. Essas características são de elevada importância para a aplicação desses agregados em concretos, influenciando em características essenciais como facilidade de bombeamento e acabamento superficial.

3.4.4.1. Parâmetros analisados

No estudo em argamassa, conforme comentado nos itens anteriores, foram avaliados os agregados miúdos de diferentes origens mineralógicas, provenientes de pó-de-pedra oriundo de dois tipos de britadores, ajustados de acordo com características almejadas no beneficiamento de uma areia de britagem para uso em concreto. Para tal, foi realizado o corte da granilha na peneira de malha 3,36 mm e a remoção de parte do teor de material pulverulento.

De maneira simplificada, no estudo em argamassa, foram avaliados e inter relacionados:

- Duas formas de grãos (lamelar e arredondada);
- Quatro tipos de rocha (basalto, calcário, gnaisse e granito);
- Dois teores de material pulverulento (lavado e não lavado);
- A composição com areia natural fina em nas proporções de 0%, 20%, 30% e 40%.

Além destes parâmetros, neste estudo foram elaboradas diversas composições a seguir descritas e justificadas. Os procedimentos destas composições serão posteriormente representados em um fluxograma, que pretende facilitar o entendimento do estudo em argamassa.

As amostras, como anteriormente preparadas, serão compostas de areias de britagem com tamanho máximo de 3,36 mm, dos quatro tipos de rochas, granito, gnaisse, calcário e basalto.

No fluxograma, os tipos de rocha serão denominados de R1, R2, R3 e R4 e cada uma é gerada por britadores tipo VSI e tipo Cone. Sendo assim, se obterão quatro tipos de areia por tipo de rocha: duas não lavadas (VSI e Cone), e duas lavadas (VSI e Cone).

No fluxograma, cada tipo de areia será representado por uma “pilha”. De acordo com a Tabela 7, a simbologia será:

Tabela 7 - Legenda fluxograma das argamassas: NLV, LV, NLC, LC.

	NLV: Não-lavada VSI
	LV: Lavada VSI
	NLC: Não-lavada Cone
	LC: Lavada Cone

Em estudos desenvolvidos pelo GTec-UFSC, observou-se que as argamassas têm um comportamento diferente conforme for o retido na peneira de malha 1,2 mm. Para estudar melhor este comportamento, se imaginou empobrecer o retido nesta peneira, extraindo 50% deste material. Esta retirada de massa é possível na instalação de britagem, por simples desvio de bica de descarga, como se pode observar na Figura 31.

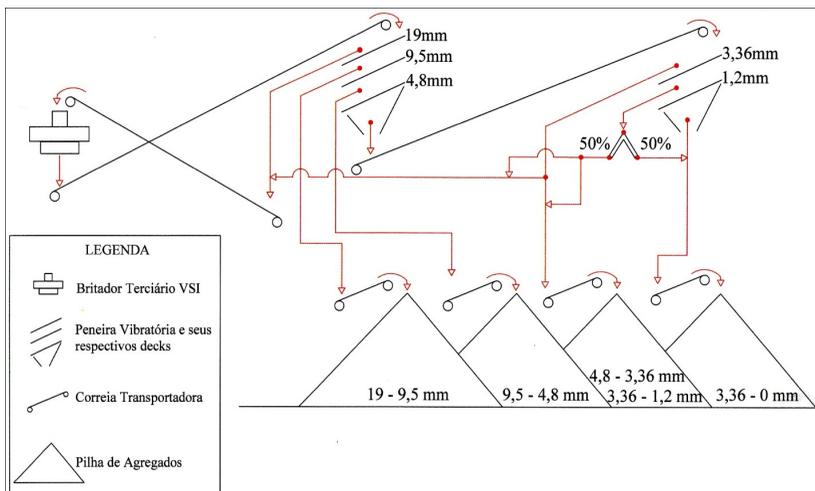


Figura 31 - Fluxograma representativo de como pode funcionar uma instalação de britagem para redução do material retido na peneira de malha 1,2 mm no produto final.

Como pode ser observado na Figura 31, uma supressão de material pulverulento, através de ar na última peneira, ou via úmida, pode ajustar o teor de material pulverulento da pilha com agregados de 3,36 mm a 0, e um desvio de 50% do retido na última tela, ocasionará nesta pilha o efeito desejado.

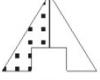
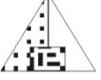
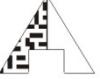
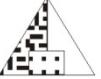
Esta pilha com menos material retido na peneira de malha 1,2 mm e com teor de pulverulento controlado, terá a simbologia de acordo com a Tabela 8. O mesmo procedimento será realizado para a possibilidade de existir um cone no lugar do VSI.

Tabela 8 - Legenda fluxograma das argamassas: 1,2LV e 1,2LC.

	1,2LV
	1,2LC

Já é um consenso na literatura que a forma dos agregados miúdos exerce grande influência nas propriedades de concretos e argamassas. No entanto, não fica claro se mesmo a forma das partículas da fração mais fina exerce igual influência. Portanto, para se estudar esta influência, o material abaixo da peneira 0,3 mm foi analisado. Para isto, imaginou-se fazer as seguintes composições: o material LV com o passante na peneira de malha 0,3 mm substituído por igual peso do passante na peneira de malha 0,3 mm do material LC. De acordo com a Tabela 9, a simbologia será:

Tabela 9 - Legenda fluxograma das argamassas: 0,3LV e 0,3LC.

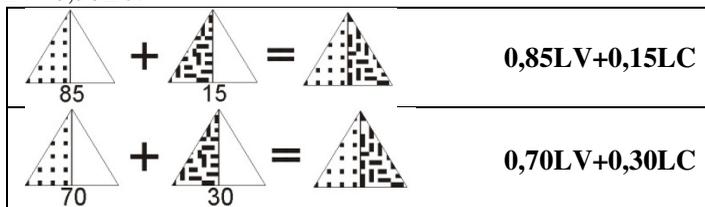
	+		=		0,3LV
	+		=		0,3LC

Nas britagens comerciais produtoras de areia que não possuem concreteira e o produto tem bom preço e boa saída, é comum a mistura de produto do cone com o produto do VSI, com o intuito de aumentar a produção para suprimir a demanda. A proporção ponderada de produção entre as duas máquinas pode ficar entre 15% e 30%, sendo este percentual a contribuição usual do cone. Quando a areia de britagem é

fabricada para uso próprio, ou existe uma exigência maior das concreteiras, a areia de britagem é preferencialmente gerada exclusivamente no VSI para que se obtenha um produto totalmente arredondado, de melhor qualidade.

Neste sentido, as misturas de LV com LC permitirão estudar este comportamento entre os dois casos, e a simbologia será de acordo com a Tabela 10:

Tabela 10- Legenda fluxograma das argamassas: 0,85LV+0,15LC e 0,70LV+0,30LC.



Todas as “pilhas”, **NLV**, **LV**, **NLC**, **LC**, **1,2LV**, **1,2LC**, **0,3LV**, **0,3LC**, **0,85LV+0,15LC** e **0,70LV+0,30LC**, em número de 10, serão ensaiadas com a substituição da areia de britagem por areia natural fina, nas proporções 0%, 20% 30% e 40%. Ao todo serão então 4 rochas, 10 “pilhas” e 4 proporções de areia natural, resultando num total de 160 argamassas estudadas.

O fluxograma da Figura 32 ilustra todo o procedimento descrito, realizado em laboratório.

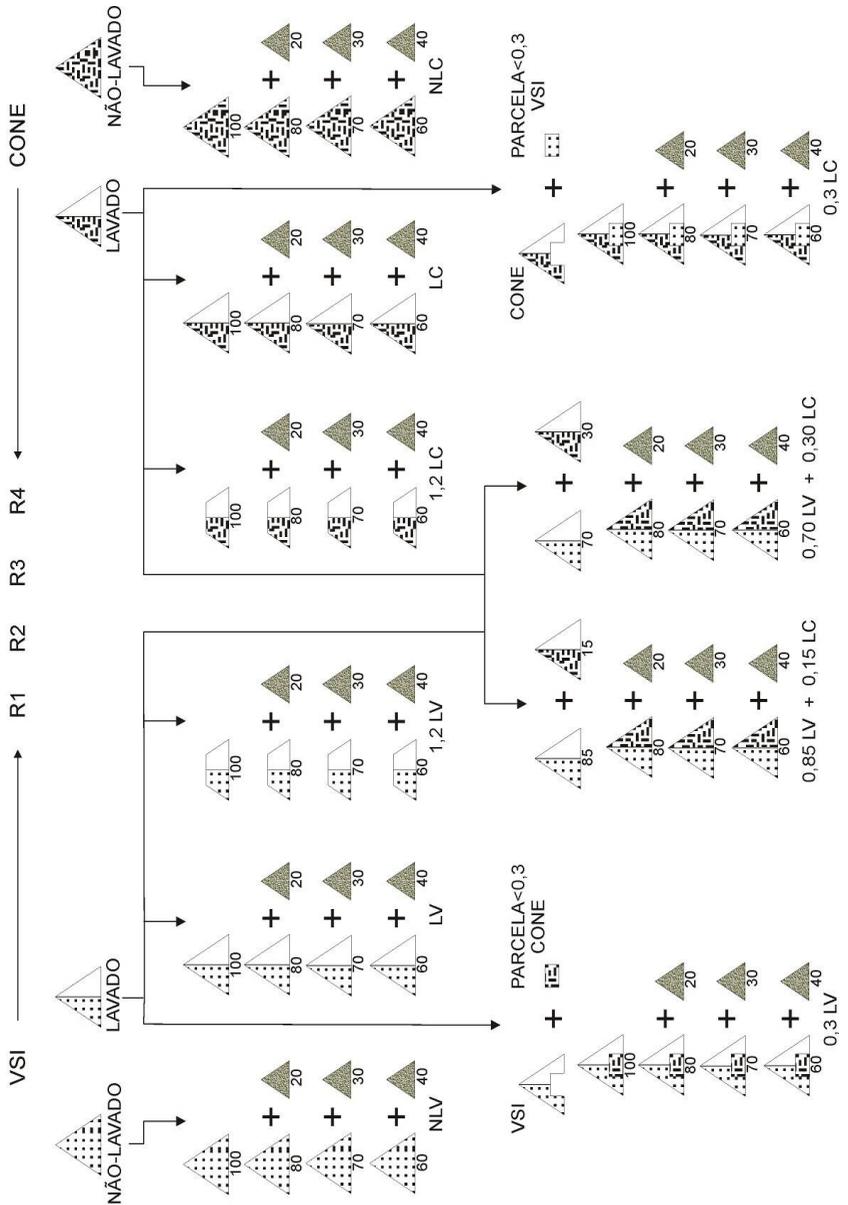


Figura 32 - Fluxograma das misturas para o estudo em argamassa.

3.4.4.2. Procedimentos

A determinação da consistência ou fluidez das argamassas é dada mediante a realização do ensaio de consistência na mesa de espalhamento- *Flow Table test* (Figura 33 e Figura 34), onde é determinado o diâmetro médio de espalhamento imediatamente após a remoção do molde tronco cônico, sem aplicação de golpes- *flow 0* (mm). Esta variação no ensaio de *Flow-Table*, prescrito pela NBR 7215 (1996), foi proposta por MARTINS (2005), para avaliação da consistência de argamassas com relações a/c próximas das empregadas em concreto e contendo aditivos redutores de água.

Para cada composição foi fixada uma relação água/cimento e medido o abatimento.

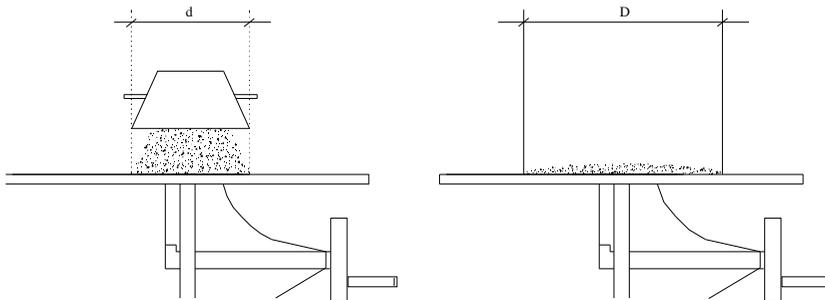


Figura 33 - Ensaio para determinação de consistência – mesa de espalhamento.



Figura 34 – Realização do ensaio, medição do espalhamento.

Para a avaliação da resistência à compressão, foram moldados dois corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura) para cada mistura, que foram rompidos aos 14 dias. A resistência à compressão é dada pelo valor potencial (máximo) obtido no ensaio de compressão axial.

A determinação do teor de ar incorporado foi realizada por meio de ensaio gravimétrico, onde se preenche, em três camadas compactadas com vinte golpes cada, um volume conhecido ($V_{\text{recipiente}} = 486 \text{ dm}^3$) com argamassa e determina-se a massa específica real da argamassa. Determinada a massa específica real, calculou-se o teor de ar incorporado através da Equação 01.

$$\% \text{Ar Incorporado} = \frac{\gamma_{\text{TEÓRICO}} - \gamma_{\text{REAL}}}{\gamma_{\text{TEÓRICO}}} \quad [\text{Eq.01}]$$

Onde:

$$\gamma_{\text{REAL}} - \text{Massa específica real} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right)$$

$$\gamma_{\text{TEÓRICO}} - \text{Massa específica teórica} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right)$$

O cálculo do teor de ar incorporado através da Eq.01 não considera a parcela relativa à absorção dos agregados, o que, por vezes, pode resultar em valores negativos de ar incorporado.

Todas as argamassas foram produzidas com o mesmo procedimento de mistura conforme apresentado abaixo:

- 0 s – 30 s :Mistura do cimento e agregados miúdos a seco;
- 30 s – 1 min 30 s :Adição de água e continuidade da mistura;
- 1 min 30 s – 2 min-30 s :Pausa para limpeza de material aderido na parede da cuba e garfo misturador;
- 2 min 30 s – 3 min :Adição de aditivo plastificante;
- 3 min – 4 min : Mistura para homogeneização da argamassa.

3.4.5. Estudo em Concreto

Com o estudo em argamassa finalizado, diante do desempenho das composições, foram escolhidas quatro areias de britagem que foram empregadas na execução de concretos. Para cada um dos quatro agregados miúdos de britagem foi feita uma curva de dosagem.

Inicialmente, ajustou-se o teor de argamassa ideal para cada agregado para posterior confecção de mais três concretos com relação água/cimento distintas, para a realização da curva de dosagem, de acordo com o método IPT/EPUSP.

A relação água/cimento inicial e a proporção entre as britas adotadas nos concretos, foram estipuladas com base em estudos tecnológicos já realizados pelo GTec-UFSC, sendo também utilizadas por centrais de concreto da Grande Florianópolis, para a obtenção de um concreto um concreto bombeável de f_{ck} 30 MPa e abatimento $1(0\pm 2)$ cm. Desse modo, o agregado graúdo utilizado foi o mesmo para todos os concretos, composto de 30% de brita 4,75/12,5 e 70% brita 9,5/25. A areia natural foi também única e no mesmo teor para todos os concretos, sendo esta a mesma utilizada nos ensaios de argamassa. Dessa maneira foi possível realizar uma melhor comparação entre os concretos, pois uniformizando-se os materiais e proporções, as diferenças são apenas decorrentes da variação dos agregados miúdos de britagem.

O principal objetivo do estudo em concretos foi encontrar correlações entre os resultados obtidos em concreto e argamassa, provando assim a viabilidade de otimizar estudos em concretos, através

de uma pré-seleção dos agregados miúdos de melhor desempenho em argamassas.

Nesta etapa foi analisado o comportamento do concreto no que diz respeito ao consumo de água, ou seja, à relação água/materiais secos. Ao contrário do estudo em argamassa, onde foi fixada uma relação água/cimento e medido o abatimento para cada mistura, nesta etapa foi adotado um abatimento de tronco de cone constante de (10 ± 2) cm para que se pudesse medir a relação água/cimento. Sendo assim, de acordo com a composição granulométrica de cada composição, foram necessários teores diferentes de argamassa.

O cimento e aditivo utilizados foram os mesmos utilizados nos estudos em argamassa.

Buscou-se avaliar neste estudo:

- O abatimento de tronco de cone (NBR NM 67:1996);
- O consumo de água;
- A massa específica no estado fresco (NM9833:1987);
- A resistência a compressão aos 28 dias. Foram moldados três corpos-de-prova com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura;
- No estado fresco, avaliação visual empírica da: segregação, coesão, aspereza e exsudação das misturas.

Com a realização das curvas de dosagem, buscou-se avaliar o consumo de materiais necessário para a produção de concretos com os diferentes agregados miúdos, podendo-se avaliar qual apresenta melhor desempenho.

Após a imprimação da betoneira, o procedimento empregado na produção dos concretos foi:

- Adicionavam-se todos os materiais na betoneira, com a umidade em que se encontravam no momento, na seguinte ordem: britas, cimento e areias;
- Ligava-se a betoneira e deixava-se misturar por 30 segundos somente com a umidade dos materiais;
- Sem interromper a mistura, adicionava-se parte da água e deixava-se misturar por mais 60 segundos;
- Acrescentava-se o aditivo, sem paralisar a betoneira e com cuidado para que este não entrasse em contato direto com as pás ou com a cuba da betoneira. Deixava-se misturar por mais 90 segundos;

- Procedia-se a adição de água até atingir aproximadamente o abatimento desejado deixando-se misturar até completar um tempo total de mistura de, no máximo 10,0 minutos;
- Religava-se a betoneira e procedia-se o ajuste final de água até obter-se o abatimento desejado.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na realização dos ensaios descritos no programa experimental.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Areia Natural

A Tabela 11 apresenta as características da areia natural utilizada.

Tabela 11 – Areia Natural: composição granulométrica, módulo de finura, massa específica e teor de material pulverulento.

Peneira (mm)	AREIA NATURAL		
	Composição Granulométrica NBR NM 248:2003		Massa Específica (g/cm ³) NBR NM 52:2003
	%Retida simples	%Retida acumulada	2,647
3,36	0,0	0	Teor de Pulverulento
2,36	0,0	0	0,06%
1,2	0,0	0	Módulo de Finura
0,6	0,0	0	0,922
0,3	2,5	3	
0,15	87,1	90	
0,075	10,3	100	
Pulverulento	0,06	100	

Pode-se observar que a areia natural é uma areia bastante fina e possui praticamente nenhum material pulverulento (0,06%).

4.1.2. Agregados Miúdos de Britagem

A Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 apresentam os valores de massa específica aparente das areias previamente preparadas, provenientes de cada tipo de rocha.

Tabela 12- Resultados de massa específica para as areias de calcário.

Material	Massa Específica (g/cm³) NBR NM 52:2003
Calcário Cone Lavada	2,77
Calcário Cone Original	2,77
Calcário VSI Lavada	2,77
Calcário VSI Original	2,78

Tabela 13- Resultados de massa específica para as areias de basalto.

Material	Massa Específica (g/cm³) NBR NM 52:2003
Basalto Cone Lavada	2,89
Basalto Cone Original	2,92
Basalto VSI Lavada	2,91
Basalto VSI Original	2,91

Tabela 14- Resultados de massa específica para as areias de gnaiss.

Material	Massa Específica (g/cm³) NBR NM 52:2003
Gnaiss Cone Lavada	2,71
Gnaiss Cone Original	2,69
Gnaiss VSI Lavada	2,72
Gnaiss VSI Original	2,72

Tabela 15- Resultados de massa específica para as areias de granito.

Material	Massa Específica (g/cm³) NBR NM 52:2003
Granito Cone Lavada	2,67
Granito Cone Original	2,65
Granito VSI Lavada	2,66
Granito VSI Original	2,67

Podem-se notar pequenas diferenças entre valores de massa específica de mesma rocha, ou seja, entre amostras da mesma pedreira. Esta diferença pode estar relacionada à frente de lavra explorada no dia da coleta, o que pode mudar um pouco as características de acordo com a área explorada.

Na Tabela 16 são apresentados os valores do teor de material pulverulento, para cada areia, todas já peneiradas na peneira de abertura 3,36 mm, antes e depois do processo de lavagem, que tinha como

objetivo reduzir o teor de pulverulento até que este ficasse entre 8% e 10%, como explicado anteriormente.

Tabela 16- Teor de material pulverulento antes e depois do processo de lavagem.

Areia	Teor de material pulverulento (%) NBR NM 46:2003	
	Original	Lavada
Calcário CONE	21,00	9,81
Calcário VSI	23,60	9,75
Basalto CONE	18,44	9,08
Basalto VSI	14,15	9,32
Gnaissé CONE	14,31	9,75
Gnaissé VSI	15,32	8,79
Granito CONE	13,38	8,67
Granito VSI	10,84	8,58

Tabela 17 - Composição granulométrica das areias de Calcário original (não lavada).

Peneira (mm)	AREIA CALCÁRIO Original NBR NM 248:2003			
	VSI		CONE	
	%Retida simples	%Retida acumulada	%Retida simples	%Retida acumulada
3,36	0,0	0	0,0	0,00
2,36	12,8	13	16,6	17
1,2	27,2	40	30,0	47
0,6	14,8	55	14,7	61
0,3	9,7	64	8,3	70
0,15	7,3	72	5,8	75
0,075	4,6	76	3,6	79
Pulverulento	23,6	100	21,0	100

A Tabela 17, a Tabela 18, a Tabela 19 e a Tabela 20 apresentam as composições granulométricas das areias originais (não lavadas), para cada tipo de rocha.

Tabela 18- Composição granulométrica das areias de Gnaiss original (não lavada).

Peneira (mm)	AREIA GNAISSE Original NBR NM 248:2003			
	VSI		CONE	
	%Retida simples	%Retida acumulada	%Retida simples	%Retida acumulada
3,36	0,0	0	0,0	0
2,36	11,5	12	11,0	11
1,2	28,5	40	30,8	42
0,6	15,3	55	15,0	57
0,3	10,8	66	10,2	67
0,15	10,4	77	10,6	78
0,075	8,1	85	7,9	86
Pulverulen	15,3	100	14,3	100

Tabela 19 - Composição granulométrica das areias de Basalto original (não lavada).

Peneira (mm)	AREIA BASALTO Original NBR NM 248:2003			
	VSI		CONE	
	%Retida simples	%Retida acumulada	%Retida simples	%Retida acumulada
3,36	0,0	0	0,0	0
2,36	13,5	13	12,0	12
1,2	32,1	46	31,9	44
0,6	17,5	63	16,5	60
0,3	10,6	74	9,8	70
0,15	7,5	81	7,0	77
0,075	4,5	86	4,3	82
Pulverulento	14,2	100	18,4	100

Tabela 20- Composição granulométrica das areias de Granito original (não lavada).

Peneira (mm)	AREIA GRANITO Original NBR NM 248:2003			
	VSI		CONE	
	%Retida simples	%Retida acumulada	%Retida simples	%Retida acumulada
3,36	0,0	0	0,0	0
2,36	10,4	10	10,2	10
1,2	28,0	38	25,7	36
0,6	19,1	57	17,6	53
0,3	14,1	72	13,8	67
0,15	11,2	83	12,2	79
0,075	6,4	89	7,1	87
Pulverulento	10,8	100	13,4	100

A Tabela 21 expõe os módulos de finura das areias lavadas e originais (não lavadas), dos quatro tipos de rocha.

Tabela 21 – Módulo de Finura das areias lavadas e originais.

Areia de Britagem		Módulo de Finura NBR NM 7217:1987	
		Original	Lavada
Calcário	CONE	2,67	3,03
	VSI	2,44	2,83
Basalto	CONE	2,64	2,91
	VSI	2,78	2,92
Gnaisse	CONE	2,55	2,67
	VSI	2,50	2,67
Granito	CONE	2,46	2,59
	VSI	2,61	2,67

Para os quatro tipos de rocha, foi possível observar uma granulometria bastante semelhante entre as areias obtidas através dos dois tipos de britadores, VSI e Cone. Não se pôde observar nenhuma relação constante entre o tipo de britador e o módulo de finura das areias. As areias de granito e basalto apresentaram um menor módulo de finura quando produzidas em britador tipo cone, ao contrário das areias de gnaisse e calcário que se apresentaram sutilmente mais finas quando provenientes do VSI.

O mesmo pode ser observado com relação ao teor de material pulverulento: não houve relação direta entre o tipo de britador e a quantidade de material pulverulento gerada. As areias de basalto e granito apresentaram um maior teor de material pulverulento quando provenientes dos britadores tipo Cone, ao contrário das areias de gnaiss e calcário. Este fato, porém, já podia ser esperado, pois as areias são provenientes de diferentes instalações de britagem, ou seja, de britadores com características diferentes e, além disso, podendo estar operando em rotações diferentes. Pois, como comentado anteriormente, aumentando a rotação de um VSI, aumenta-se a quantidade de material pulverulento gerada.

A Figura 35 apresenta as curvas granulométricas de todas as areias de britagem, com o objetivo de melhor visualizar e comparar as distribuições granulométricas das areias dos quatro tipos de rochas. Pode-se observar que nenhuma curva destoa muito das outras, sendo todas as granulometrias relativamente parecidas. Elas apresentam uma diferença mais acentuada na fração mais fina das areias. Os módulos de finura das areias ficam todos entre 2,4 e 2,8, sendo a mais fina delas a areia de calcário.

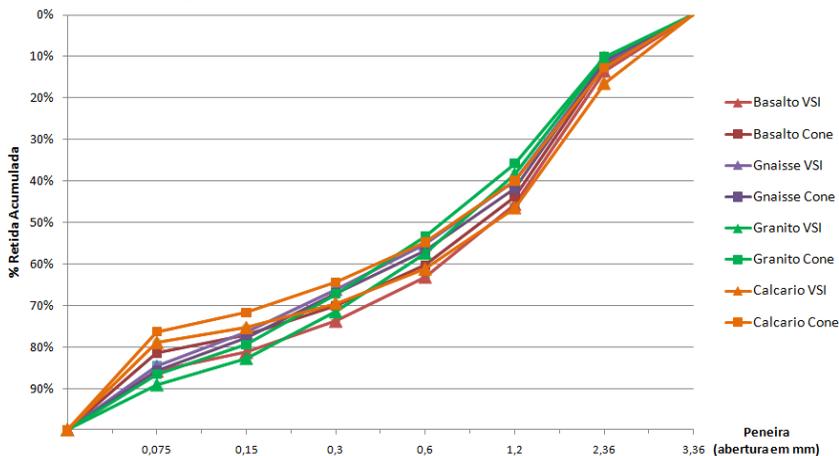


Figura 35 – Curvas granulométricas das areias de britagem.

4.1.3. Forma dos grãos

A Tabela 22, a Tabela 23, a Tabela 24 e a Tabela 25 apresentam os coeficientes volumétricos de forma de cada uma das frações e da sua

média ponderada, dos agregados provenientes do britador tipo Cone e tipo VSI.

Tabela 22– Basalto: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.

Peneira (mm)	AREIA BASALTO			
	VSI		CONE	
	%Retida Simples	CF da fração	%Retida simples	CF da fração
2,8	-	0,2320	-	0,1107
2,36	13,55	0,2321	11,96	0,1044
1,2	32,11	0,1858	31,86	0,0904
0,6	17,55	0,1748	16,54	0,0869
CF médio	0,193		0,092	

Tabela 23- Calcário: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.

Peneira (mm)	AREIA CALCÁRIO			
	VSI		CONE	
	%Retida Simples	CF da fração	%Retida simples	CF da fração
2,8	-	0,1531	-	0,0210*
2,36	12,80%	0,1356	16,60%	0,1306
1,2	27,21%	0,1350	30,00%	0,1116
0,6	14,80%	0,1160	14,70%	0,1035
CF médio	0,130		0,115	
*ponto espúrio				

Tabela 24- Gnaisse: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.

Peneira (mm)	AREIA GNAISSE			
	VSI		CONE	
	%Retida Simples	CF da fração	%Retida simples	CF da fração
2,8	-	0,1978	-	0,0960
2,36	11,50	0,1789	11,04	0,0979
1,2	28,51	0,1579	30,84	0,0983
0,6	15,30	0,0940	14,99	0,1050
CF médio	0,145		0,100	

Tabela 25- Granito: forma dos grãos de cada fração e da composição dos agregados do britador VSI e Cone.

Peneira (mm)	AREIA GRANITO			
	VSI		CONE	
	%Retida Simples	CF da fração	%Retida simples	CF da fração
2,8	-	0,2267	-	0,1286
2,36	10,38%	0,2021	10,20%	0,1447
1,2	28,01%	0,1997	25,67%	0,1435
0,6	19,07%	0,1732	17,62%	0,1270
CF médio	0,191		0,138	

Com base nas tabelas, pode-se perceber que os grãos da areia de basalto foram aqueles que apresentaram maior diferença entre os coeficientes de forma médios do VSI e do cone. Pode-se dizer que os grãos de basalto, acima da peneira 0,6mm, provenientes do VSI, apresentam uma melhora de 109,8% quando comparados aos grãos do britador tipo cone.

Além disso, a areia de basalto, com o uso do VSI, foi a que alcançou o maior coeficiente de forma. A areia de granito VSI apresentou um coeficiente de forma bem próximo ao do basalto. No entanto, a areia de granito proveniente do Cone já apresentava o maior coeficiente de forma entre os quatro tipos de rocha britados no cone.

Da mesma maneira, para os grãos acima da peneira 0,6 mm, a diferença relativa entre os coeficientes de forma médios foi de 45% para a areia de gnaiss 38,4% para a areia de granito e de 13% para a areia de calcário. Isto indica que as areias de britagem provenientes de britadores tipo VSI realmente possuem uma forma mais “arredondada” quando comparadas àquelas provenientes de britadores tipo cone.

Vale ressaltar que a areia de calcário apresentou uma diferença pequena quando comparada com as outras areias de britagem. No entanto, esta areia, mesmo proveniente do cone, já apresentava um coeficiente de forma médio 25% maior do que a de basalto, também proveniente do cone.

Como comentado anteriormente, provenientes do VSI, as areias que apresentaram melhor coeficiente médio de forma foram as de basalto e granito com valores de 0,193 e 0,191, respectivamente. As areias de calcário e gnaiss, também provenientes do VSI, apresentaram

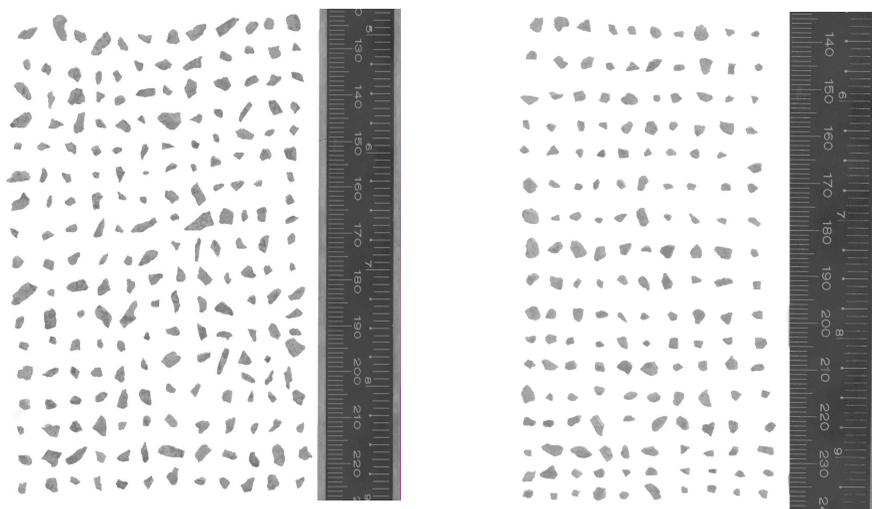
coeficientes de forma aproximadamente 50% menores, com relação às outras duas rochas.

Com relação às areias provenientes de britadores tipo Cone, a de basalto apresenta o menor valor, ou seja, apresenta os grãos menos arredondados, com um valor 50% relativamente menor do que a areia de granito, a qual apresenta o maior valor de coeficiente de forma médio, ou seja, apresenta os grãos mais arredondados dentre os quatro tipos de rocha britadas em Cones.

Vale ressaltar que foram utilizadas imagens obtidas de escâneres para a determinação do coeficiente de forma até a fração retida na peneira 0,60 mm.

É importante destacar que a forma resultante do processo de britagem pode depender não apenas do tipo da rocha e do tipo do britador, mas também das características nas quais cada britador está operando. Todavia, quanto à forma dos grãos, ainda é possível concluir que certas rochas tendem a apresentar maiores vantagens quando obtidas através de britadores tipo VSI, quando comparadas a outras que podem não apresentar mudança tão significativa entre cones e VSIs.

Na Figura 36 podem ser observados os grãos retidos na peneira de malha 1,2 mm da areia de britagem de basalto proveniente dos britadores tipo VSI e Cone.



a) Basalto Cone – retido na #1,2mm

b) Basalto VSI – retido na #1,2mm

Figura 36 – Imagens dos grãos de basalto obtidas através do escâner.

4.1.4. Granulometria a Laser

Aqui serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no ensaio de granulometria a laser, realizado na fração passante na peneira 1,2 mm das areias de britagem. Devido a problemas com alguns materiais, a granulometria a laser não foi realizada nas areias Basalto Cone Original, Calcário VSI Lavada e Granito VSI Original.

A Figura 37 apresenta as curvas granulométricas das areias de basalto do VSI lavada e original (não lavada) e do Cone lavada.

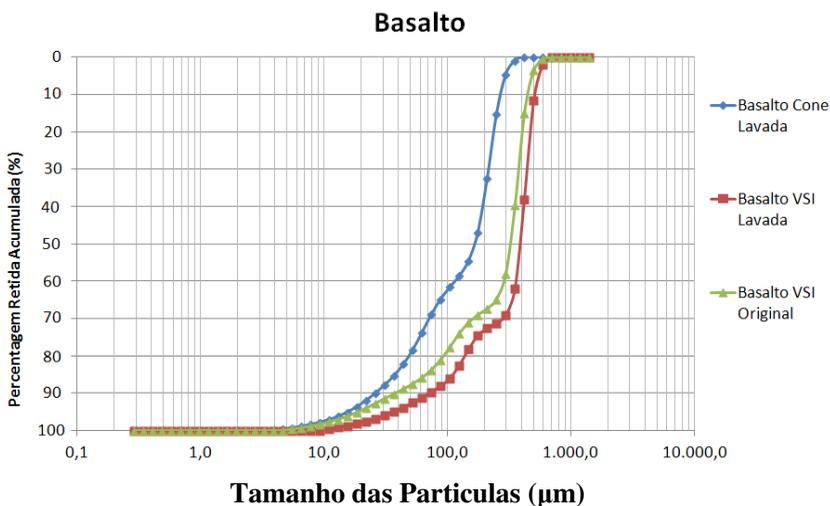


Figura 37 – Basalto: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm.

Conforme pode ser visto na Figura 37, a granulometria das partículas abaixo da peneira de 75 µm da areia de basalto VSI lavada é levemente mais grossa do que a do basalto VSI original. Isto pode ser explicado devido ao fato de que o processo de lavagem das areias de britagem para a redução do teor de material pulverulento removeu principalmente as partículas mais finas, pois depois de misturadas a areia e a água na betoneira deixava-se o conjunto em repouso por alguns minutos, para depois ser vertido em uma peneira de 75µm. Conseqüentemente, as partículas mais finas, que ainda estavam em suspensão, eram eliminadas.

Já a granulometria do basalto Cone lavada é visivelmente mais fina que as outras duas, conforme pode ser observado também na Figura

38, apesar de ter passado pelo processo de lavagem, supostamente eliminando suas partículas mais finas. Isto indica que o britador tipo Cone pode tender a produzir um material fino com uma granulometria mais fina do que o material fino produzido pelo VSI.

Na 0 podem ser observados alguns dados obtidos por meio da granulometria a laser que enfatizam o exposto anteriormente, podendo-se observar que o tamanho médio das partículas da areia VSI lavada é visivelmente maior do que o da não lavada. Além disso, vale destacar que a remoção das partículas mais finas conduziu a uma redução considerável da superfície específica do material proveniente do VSI. O valor da superfície específica da areia de basalto Cone lavada é ainda maior do que a VSI original, o que enfatiza a tendência de britadores tipo cone produzirem um material mais fino, como comentado anteriormente. É importante lembrar que o valor de superfície específica obtido por meio da granulometria a laser é apenas um valor indicativo e por isso é importante usá-lo apenas para fins de comparação, entre areias de mesma rocha.

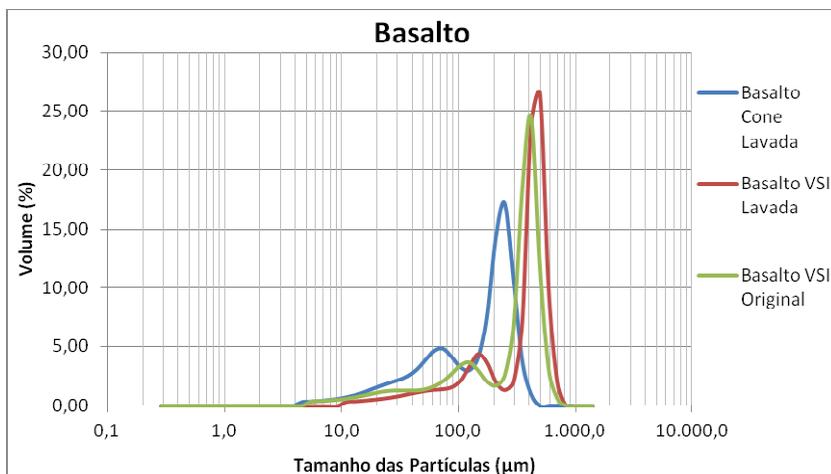


Figura 38 – Basalto: Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas no ensaio de granulometria a laser.

Tabela 26– Características dos agregados de basalto obtidas no ensaio de granulometria a laser.

PARÂMETRO	BASALTO		
	Cone Lavada	VSI Lavada	VSI Original
D10 (μm)¹	26,16	71,94	37,93
D50 (μm)²	166,4	388,1	323,7
D95 (μm)³	294	545,4	481,8
Tamanho médio (μm)⁴	151,1	336,3	275,9
Superfície específica (cm^2/g)⁵	348,3	137,9	234,5

1 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 10% das partículas

2 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 50% das partículas

3 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 95% das partículas

4 - Média do diâmetro das partículas medida pela distribuição de seu volume (μm)

5- Esse valor é apenas uma indicação da superfície específica, pois considera as partículas como sendo sólidas e esféricas.

Quanto às areias de britagem de gnaíse, a distribuição do tamanho das partículas abaixo da peneira de $75 \mu\text{m}$, é igual para as areias que passaram pelo processo de lavagem, tanto do VSI quanto do Cone. O mesmo ocorre para a distribuição das areias não lavadas, como pode ser observado na Figura 39. Como explicado para as areias de basalto, aquelas que são lavadas possuem uma granulometria do material passante na peneira $75 \mu\text{m}$ um pouco mais grosseira, provavelmente devido ao próprio processo de lavagem, que tende a eliminar as partículas mais finas. Este aspecto também pode ser observado na Tabela 27 nos valores indicativos de superfície específica, onde os valores das areias lavadas são maiores que o dobro das não lavadas, o que é uma característica bastante positiva, pois uma alta superfície específica nos agregados pode levar a um alto consumo de água e aditivo no concreto, podendo afetar negativamente sua resistência à compressão.

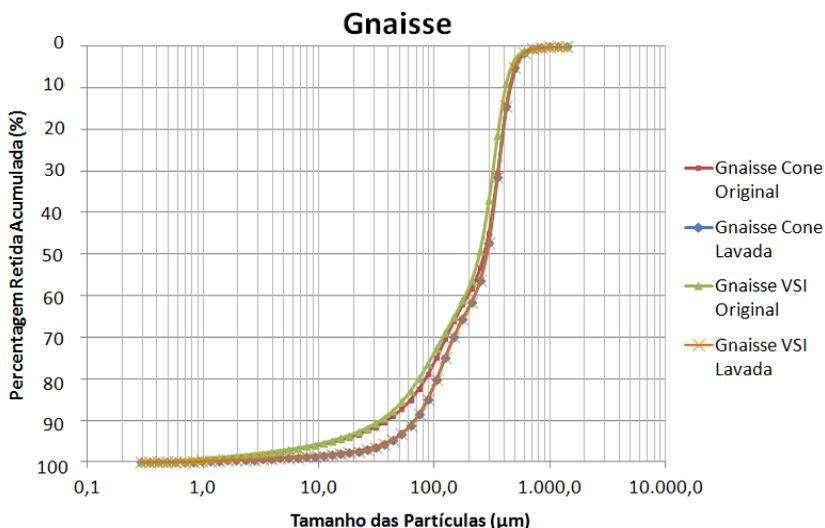


Figura 39 - Gnaisse: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm.

Tabela 27– Características dos agregados de gnaisse obtidas no ensaio de granulometria a laser.

PARÂMETRO	GNAISSE			
	Cone Lavada	Cone Original	VSI Lavada	VSI Original
D10 (µm) ¹	68,03	39,29	80,92	34,5
D50 (µm) ²	284,2	270,4	356,6	245,0
D95 (µm) ³	498,7	507,9	1113	463,1
Tamanho médio (µm) ⁴	265,8	254,4	448,1	232,3
Superfície específica (cm ² /g) ⁵	281,5	592,6	237,0	629,6

1 - Diâmetro (µm) abaixo do qual encontram-se 10% das partículas

2 - Diâmetro (µm) abaixo do qual encontram-se 50% das partículas

3 - Diâmetro (µm) abaixo do qual encontram-se 95% das partículas

4 - Média do diâmetro das partículas medida pela distribuição de seu volume (µm)

5- Esse valor é apenas uma indicação da superfície específica, pois considera as partículas como sendo sólidas e esféricas.

A Figura 40 e a Tabela 28 mostram os resultados da granulometria a laser na areia de britagem de granito Cone lavada e original e granito VSI original.

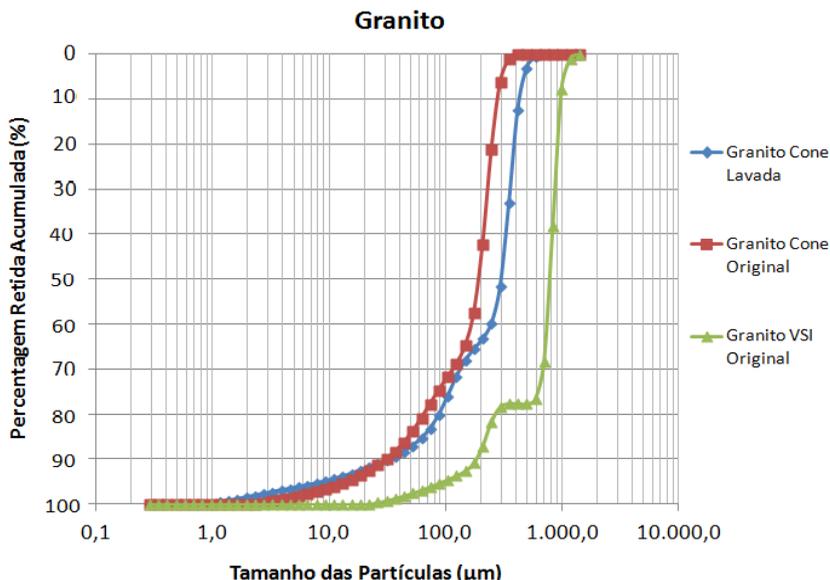


Figura 40 - Granito: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm.

Tabela 28– Características dos agregados de granito obtidas no ensaio de granulometria a laser.

PARÂMETRO	GRANITO		
	Cone Lavada	Cone Original	VSI Original
D10 (μm) ¹	33,19	31,26	185,2
D50 (μm) ²	301,5	193,7	789,2
D95 (μm) ³	471,5	304,5	1034
Tamanho médio (μm) ⁴	258,5	172,4	693,9
Superfície específica (cm^2/g) ⁵	611,1	388,9	63,0

1 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 10% das partículas

2 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 50% das partículas

3 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 95% das partículas

4 - Média do diâmetro das partículas medida pela distribuição de seu volume (μm)

5- Esse valor é apenas uma indicação da superfície específica, pois considera as partículas como sendo sólidas e esféricas.

Observando as curvas granulométricas da Figura 40, do material abaixo da peneira 75 μm , pode-se perceber que a areia granito VSI original possui uma distribuição granulométrica mais “grosseira” do que as areias do Cone, o que fica bem claro na Figura 41. A Tabela 28 também mostra isso claramente, pois a superfície específica da areia de granito VSI original é muito menor do que ambas as do Cone. Por meio do tamanho médio das partículas também se pode observar claramente que o material fino produzido pelo Cone tem partículas menores do que aquele produzido pelo VSI e, mesmo quando lavado, o material do Cone ainda fica mais de duas vezes mais fino do que o material do VSI original.

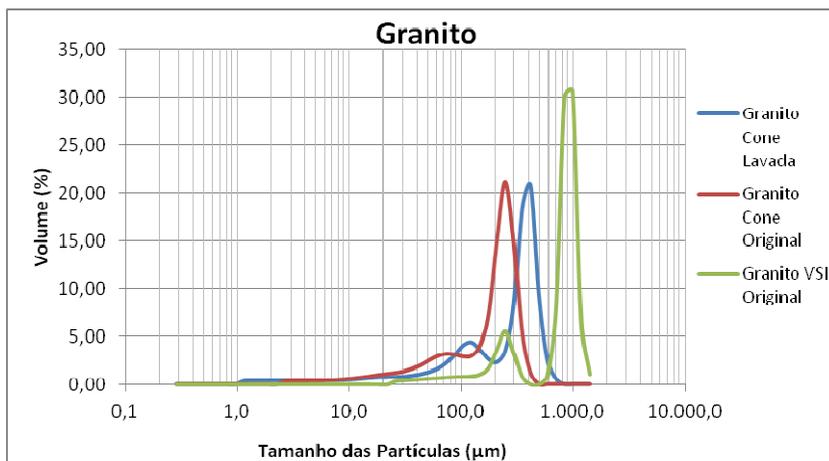


Figura 41 - Granito: Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas no ensaio de granulometria a laser.

Apesar de o valor de superfície específica da areia Cone lavada ser maior do que a do Cone original, a Figura 41 mostra que o processo de lavagem eliminou as partículas menores, quando observado o material abaixo da peneira 75 μm , assim como foi constatado anteriormente nas areias de outras rochas.

A Figura 42, a Figura 43 e a Tabela 29 exibem os resultados da granulometria a laser da areia de britagem de calcário VSI lavada e original e de calcário Cone original.

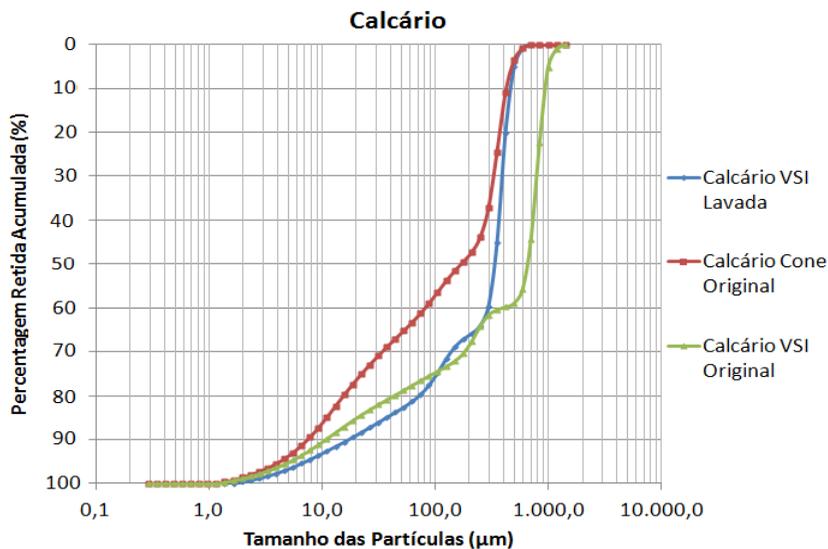


Figura 42 - Calcário: Curvas granulométricas obtidas através do ensaio de granulometria a laser realizado no material passante na peneira 1,2 mm.

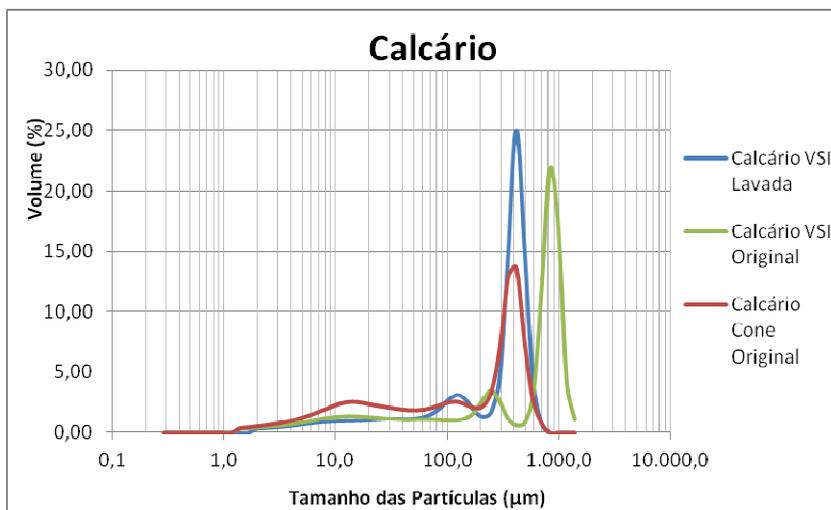


Figura 43 - Calcário: Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas no ensaio de granulometria a laser.

Tabela 29– Características dos agregados de calcário obtidas no ensaio de granulometria a laser.

PARÂMETRO	CALCÁRIO		
	VSI Lavada	VSI Original	Cone Original
D10 (μm) ¹	17,02	10,72	7,44
D50 (μm) ²	337,0	658,2	168,6
D95 (μm) ³	499,3	1002,0	474,7
Tamanho médio (μm) ⁴	277,8	517,5	198,9
Superfície específica (cm^2/g) ⁵	569,2	776,9	1119,2

1 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 10% das partículas

2 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 50% das partículas

3 - Diâmetro (μm) abaixo do qual encontram-se 95% das partículas

4 - Média do diâmetro das partículas medida pela distribuição de seu volume (μm)

5- Esse valor é apenas uma indicação da superfície específica, pois considera as partículas como sendo sólidas e esféricas.

Analisando os resultados para a areia de britagem de calcário, pode-se observar a mesma tendência do britador tipo cone produzir um material pulverulento (abaixo da peneira 75 μm) um pouco mais fino do que aquele produzido pelo VSI, o que pode ser observado com clareza na Figura 42 e na Figura 43.

A Tabela 29 mostra um resultado de tamanho médio das partículas maior para a areia do VSI original. No entanto, tanto os gráficos, analisando-se o material abaixo da peneira 75 μm , quanto o resultado da superfície específica se mostram coerentes com a tendência do processo de lavagem eliminar a fração mais fina do material pulverulento, ou seja, diminuindo a superfície específica da areia que foi lavada. O fato dos dados de tamanho médio dos grãos não estarem concordantes, pode ser explicado devido à média feita, pois são considerados todos os grãos passantes desde a peneira 1,2 mm, e não apenas o passante na peneira 0,075 mm.

Concluindo, de maneira geral, todas as areias de britagem apresentaram uma distribuição granulométrica do material pulverulento menos fina depois de submetidas ao processo de lavagem.

Com exceção da areia de britagem de gnaiss, todas as outras apresentaram um material pulverulento mais fino quando produzidas por britadores tipo Cone, quando comparadas àquelas produzidas por VSIs. A areia de britagem de gnaiss apresentou curvas granulométricas do

material abaixo da peneira 75 μm extremamente semelhantes para o Cone e o VSI.

Com o objetivo de melhor visualizar e comparar as areias de britagem dos quatro tipos de rocha, a Figura 44 destaca a fração abaixo da peneira 75 μm das curvas granulométricas obtidas através da granulometria a laser. Fica claro que as areias de calcário possuem um material pulverulento mais fino do que o das outras rochas, destacando-se a do Cone original, seguida pelo calcário VSI original e, mais próxima das curvas do restante das rochas, a areia que passou pelo processo de lavagem: a calcário VSI lavada.

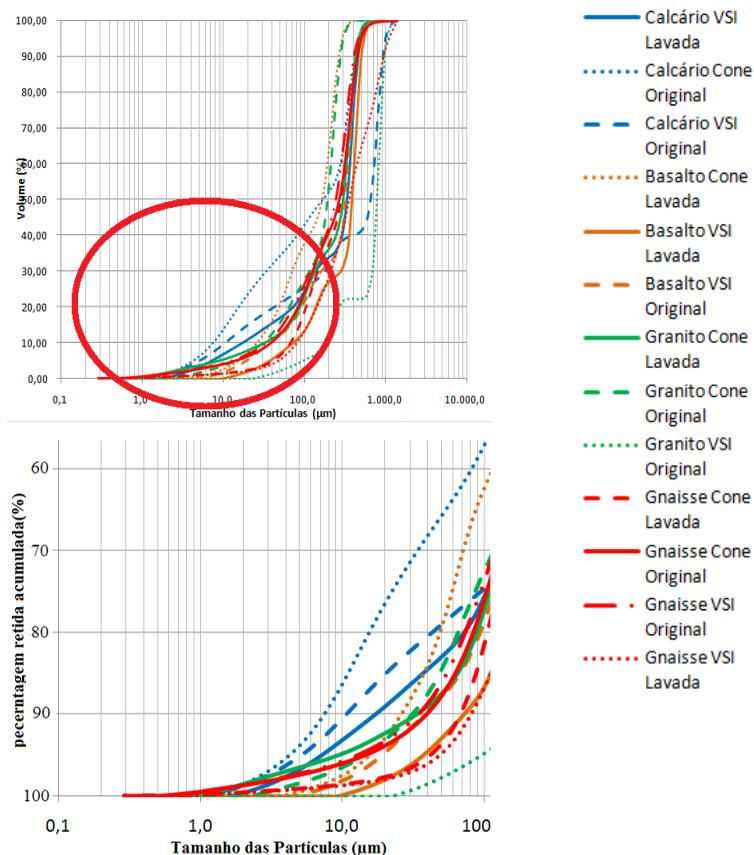


Figura 44 – Distribuição das partículas abaixo de 75 μm , obtida por granulometria a laser.

4.1.5. Azul de Metileno

Devido a problemas com alguns materiais, não foi possível realizar o teste nas areias Basalto Cone Original e Calcário VSI Lavada.

A Tabela 30 apresenta os valores obtidos no ensaio do Azul de Metileno.

Tabela 30– Valores do Ensaio do Azul de Metileno

ROCHA	TIPO	AZUL DE METILENO (mg/g)
GNAISSE	VSI Original	2,5
	VSI Lavada	1,5
	Cone Original	2,75
	Cone Lavada	2,0
BASALTO	VSI Original	9,0
	VSI Lavada	7,0
	Cone Lavada	7,75
GRANITO	VSI Original	1,75
	VSI Lavada	1,75
	Cone Original	2,25
	Cone Lavada	2
CALCÁRIO	Cone Original	3,75
	VSI Original	3,25
	VSI Lavada	2,25

A norma escolhida para a realização do ensaio, a AASHTO TP57 indica limites de valores do azul de metileno para o uso em concreto asfáltico, onde agregados com um valor menor que 6 são considerados excelentes, não causando problemas para o concreto e agregados com valor de 7 a 12 são considerados “marginalmente aceitáveis”. Neste trabalho, a maioria dos agregados apresentou um valor de azul de metileno menor do que 6, com exceção das areias de basalto, como pode ser observado na Tabela 30. No entanto vale destacar que este limite é apenas um exemplo, pois não se aplica especificamente aos concretos de cimento Portland.

As areias de calcário Cone original e VSI original apresentam valores de azul de metileno um pouco mais elevados do que o restante, com exceção do basalto, podendo ser uma indicação de uma maior superfície específica ou da presença de uma pequena quantidade de argilo-minerais. A distribuição das partículas obtida através do ensaio de granulometria a laser, exposta na Figura 44, indica que estes materiais possuem, de fato, uma maior quantidade de partículas pequenas, quando

comparados com o restante. Isto indica uma maior superfície específica e, portanto, justifica os maiores valores obtidos no ensaio.

É possível perceber uma correlação forte dos resultados do azul de metileno e da granulometria a laser com as areias lavadas ou não. Com exceção da areia de granito Cone, todas as outras apresentam um menor valor de azul de metileno após serem submetidas ao processo de lavagem. Este fato coincide também com a relação dos valores do azul de metileno e os valores de superfície específica, pois se constatou no Item 4.1.4 que o processo de lavagem aplicado nas areias acabou eliminando as partículas menores do material pulverulento.

Por outro lado, vale destacar que as areias de basalto, apesar de apresentarem uma distribuição granulométrica do material pulverulento com partículas não tão pequenas quanto as das outras areias (Figura 44), apresentaram os mais altos valores do azul de metileno, indicando assim a presença de argilo-minerais em sua composição. Este fato comprova que o valor do azul de metileno pode não depender apenas da superfície específica, mas também da presença de argilo-minerais.

No mesmo sentido, no ensaio de granulometria a laser, a areia de basalto Cone lavada apresentou uma distribuição com partículas ainda menores do que as partículas da areia de basalto VSI original. No entanto, o valor do azul de metileno desta última é maior do que o valor do Cone lavada, não correspondendo a tendência de quanto maior a superfície específica, maior o valor do azul de metileno, pois, neste caso, o material fino proveniente do Cone lavada tem superfície específica significativamente maior do que a do VSI original. Isso indica não só a influência da presença de argilo-minerais nos resultados de azul de metileno, mas também o fato de que o processo de lavagem pode não eliminar tantas partículas pequenas, a ponto de fazer com que a distribuição mais “fina” das partículas provenientes do britador tipo Cone se aproxime da distribuição do VSI, mas é capaz de eliminar maior quantidade de argilo-minerais presentes no material.

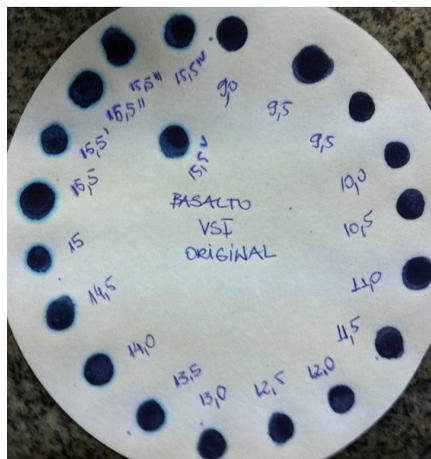
Já nas areias que possuem um baixo valor de azul de metileno, provavelmente indicando que não há argilo-minerais presentes, a superfície específica foi o parâmetro que se sobrepôs nos resultados do ensaio. Como pode ser visto na Tabela 30, os resultados para os britadores tipo Cone são levemente maiores, provavelmente devido a sua maior superfície específica observada na granulometria a laser.

A Figura 45 mostra alguns papéis-filtro sobre os quais foram realizados os ensaios. A Figura 45 a, b e c fazem parte do mesmo ensaio do basalto VSI original. Neste ensaio, a auréola azul clara que determina a saturação começa a aparecer apenas com a adição de 14,5 ml de

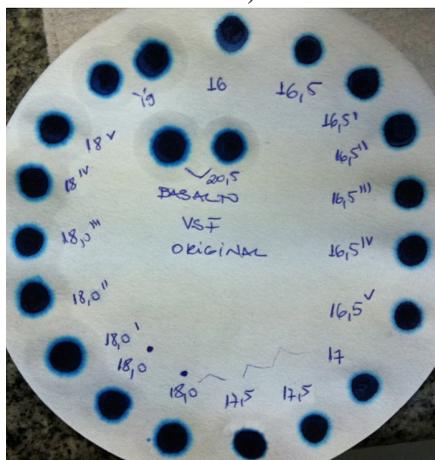
solução de azul de metileno, mantendo-se clara o suficiente, pelos 5 minutos estipulados pela norma, com 18 ml de solução adicionada. Bastante diferente, no ensaio do granito Cone original (Figura 45 d), a auréola azul clara já começa a aparecer com aproximadamente 3 ml de solução adicionada, e se fixa com apenas 4,5 ml.



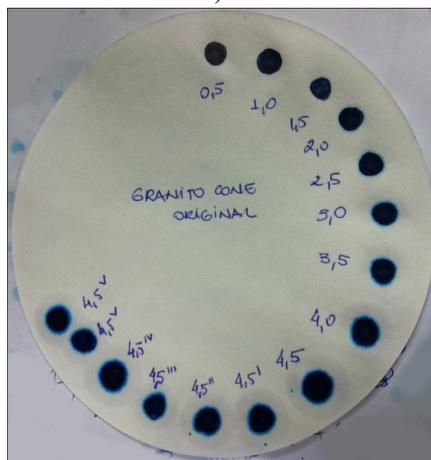
a)



b)



c)



d)

Figura 45 – Ensaio do Azul de Metileno: a), b) e c) ensaio da areia de britagem de basalto VSI original; e d) ensaio da areia de britagem de granito Cone original.

Com o objetivo de entender um pouco mais como funcionam os diferentes meios de se eliminar parte do material pulverulento, coletou-se um material de uma instalação de britagem que possuía um aereoseparador, equipamento de supressão de pulverulento via seca, comentado no Item 2.4.4.2. Para tal, foram coletados microfinos antes e depois do agregado miúdo passar pelo equipamento. O tipo de rocha do agregado é basalto (de origem diferente da rocha utilizada no decorrer deste trabalho) e a pedreira de origem da rocha encontra-se no Estado do Paraná. Os resultados estão expostos na Tabela 31.

Tabela 31– Resultados de Azul de Metileno para material pulverulento antes e depois de passar por aereoseparador.

Material Pulverulento	Valor do Azul de Metileno
Antes do aereoseparador	7,5
Depois do aereoseparador	7,5

Os resultados não apontam nenhuma diferença entre os dois materiais. Estudos complementares devem ser feitos para melhor compreensão, pois estas foram pequenas amostras, de apenas um material, evidentemente pouco significativas. No entanto, os resultados aqui obtidos indicam que o aereoseparador tende a não eliminar a fração mais fina do material pulverulento e/ou argilo-minerais presentes, ao contrário da tendência apresentada no processo de lavagem realizada neste estudo.

4.2. ESTUDO EM ARGAMASSA

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados das diversas composições em argamassas, explanadas no Item 3.4.4. Para facilitar o entendimento, os resultados e análises serão divididos em itens de acordo com os parâmetros a serem analisados. Os resultados expostos a seguir serão apresentados de forma resumida e dispostos separadamente em subitens. Uma tabela completa dos resultados pode ser encontrada no Anexo 1.1.

Para a determinação da composição inicial para a produção das argamassas, adotou-se relação água/cimento de 0,55 e determinou-se um valor para “m” de 1,75. A partir disso, foram feitas as substituições da areia de britagem pelas areias naturais finas, realizadas nos teores de 0%, 20%, 30% e 40%. Com isso, tem-se como composição inicial 1,00 : 1,75 : 0,55 (cimento:agregado miúdo:água). O teor de aditivo utilizado foi de 0,9% em relação massa de cimento. Destaca-se que foi realizada

substituição volumétrica do agregado miúdo para não modificar o volume de mistura produzido, uma vez que estes apresentam diferentes valores de massa específica.

No decorrer das análises, serão apresentados gráficos com relação ao “Índice de Fluidez” das argamassas. O Índice de Fluidez é um parâmetro estabelecido por Weidmann (2009), que significa a relação da fluidez da argamassa (diâmetro médio obtido no ensaio de *flow table*) pelo módulo de finura da composição dos agregados. Em seus estudos, Weidmann (2009) obteve boas correlações entre o Índice de Fluidez das argamassas e o comportamento dos concretos quanto ao consumo de água/m³. Este fato pode ser explicado, pois agregados com menores superfícies específicas conduzem a maiores espalhamentos em argamassa, porém podem não conduzir a menor demanda de água em concreto, pois podem aumentar significativamente o teor de argamassa dos concretos para que seja mantida uma mesma trabalhabilidade.

4.2.1. Análise Geral

Com o objetivo de facilitar a análise dos resultados, primeiramente serão analisados os dados das areias de britagem de cada uma das rochas, individualmente. Ao final será feita uma análise geral e comparativa entre os quatro tipos de rocha. Da mesma forma, analisar-se-á simultaneamente a forma dos grãos (provenientes do VSI ou cone), o teor de material pulverulento e a substituição parcial por areia natural nas argamassas, bem como a correlação com os valores do ensaio de azul de metileno.

4.2.1.1. Basalto

A Tabela 32 e a 0 apresentam os resultados das argamassas de areia de britagem de basalto, produzidas pelos britadores cone e VSI, e em dois teores de material pulverulento: o original e o lavado.

Tabela 32–Resultados argamassas da areia de britagem de basalto, do VSI, lavada e original (não lavada).

Argamassas BASALTO VSI	Flow 0 (mm)	MF da composi ção	Flow0/ Módulo de Finura	Ar Incorpor ado (%)	f_{cj} (MPa)
VSI ORIGINAL (Material Pulverulento=14,15%)					
100% VSI Original	154,5	2,78	55,7	1,2%	47,6
80% VSI + 20% A.Natural	202,5	2,43	83,2	0,0%	49,2
70% VSI + 30% A.Natural	225	2,26	99,6	-0,1%	52,1
60% VSI + 40% A.Natural	231,5	2,08	111,3	-0,3%	54,5
VSI LAVADA (Material Pulverulento=9,32%)					
100% VSI Lavada	219,5	2,78	79,1	0,4%	51,2
80% VSI + 20% A.Natural	220	2,43	90,4	-0,4%	51,6
70% VSI + 30% A.Natural	223	2,26	98,7	-0,2%	49,3
60% VSI + 40% A.Natural	232,5	2,08	111,8	-0,4%	52,7

Tabela 33- Resultados argamassas da areia de britagem de basalto, do Cone, lavada e original (não lavada).

Argamassas BASALTO CONE	Flow 0 (mm)	MF da composi ção	Flow0/ Módulo de Finura	Ar Incorpor ado (%)	fcj (MPa)
CONE ORIGINAL (Material Pulverulento=18,44%)					
100% Cone Original	123	2,64	46,7	1,9%	48,2
80% Cone + 20% A.Natural	171,5	2,32	73,9	1,9%	47,6
70% Cone + 30% A.Natural	163	2,16	75,5	0,7%	45,9
60% Cone + 40% A.Natural	175	1,99	87,9	0,2%	45,6
CONE LAVADA (Material Pulverulento=9,08%)					
100% Cone Lavada	163	2,64	61,8	1,6%	45,8
80% Cone + 20% A.Natural	193	2,32	83,2	0,1%	46,4
70% Cone + 30% A.Natural	218,5	2,16	101,3	0,1%	51,7
60% Cone + 40% A.Natural	229	1,99	115,0	-0,3%	48,5

Para melhor visualização dos resultados, a Figura 46 e a Figura 48 apresentam os resultados de espalhamento (flow 0) e resistência, respectivamente, em função dos teores de 0%, 20%, 30% e 40% de substituição da areia de britagem por areia natural.

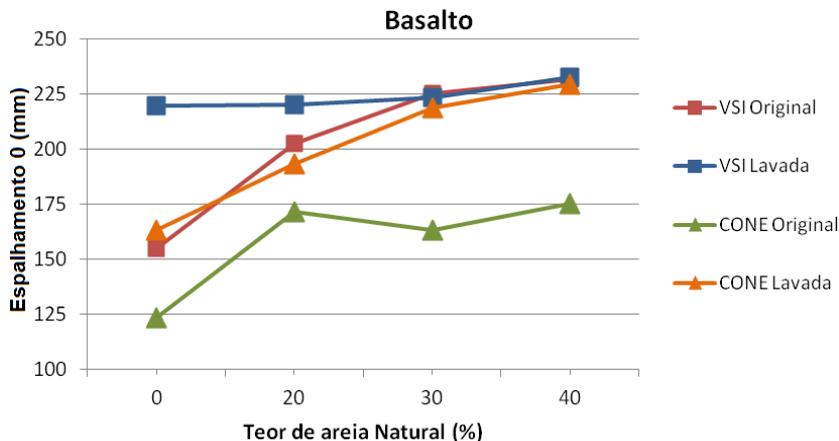


Figura 46 – Basalto: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural adicionado.

Analisando a Figura 46, fica claro que o comportamento quanto ao espalhamento é melhor nas areias lavadas, ou seja, com menos material pulverulento. Este comportamento já era esperado, pois quanto mais material pulverulento, maior a superfície específica dos agregados.

Pode-se observar que, com exceção da areia VSI lavada, o espalhamento aumenta consideravelmente à medida em que se aumenta a quantidade de areia natural. O desempenho da areia VSI lavada é inicialmente bem superior ao das outras areias. Este desempenho se mantém praticamente inalterado mesmo com as substituições por areia natural.

No entanto, de acordo com a Figura 47, que considera a variação do módulo de finura do agregado total com a adição de areia natural, o índice de fluidez da areia Basalto VSI lavada aumenta na medida em que se aumenta a substituição por areia natural.

A areia Cone Original, com 18,44% de pulverulento, inicia com um espalhamento bem abaixo das outras areias. Com a adição de 20% areia natural, seu espalhamento aumenta, mas seu valor final não é tão alto como os demais. Mesmo com as seguintes substituições por areia natural de 30% e 40%, seu espalhamento não sofre grandes alterações. Já a areia Cone Lavada, com 9,08% de pulverulento, apresentou um comportamento equivalente ao da areia VSI Original, melhorando significativamente com a adição de areia natural.

Com isso, com relação ao espalhamento, a areia de britagem de basalto mostrou que, com uma forma de grãos mais arredondada e um

controle no teor de material pulverulento (VSI Lavada), uma areia de britagem pode vir a ter um comportamento mais satisfatório. As demais areias necessitaram de maiores substituições de areia natural para alcançar o desempenho da areia VSI Lavada.

A areia VSI Original, mesmo com um alto teor de material pulverulento, com a adição de areia natural melhorou seu aspecto e aumentou o espalhamento em aproximadamente 50%, quando com 40% de areia natural: provavelmente seus grãos mais arredondados compensaram a presença de uma maior quantidade de finos, juntamente, é claro, com os grãos de forma mais arredondada da areia natural. O mesmo aconteceu com a areia Cone Lavada, no entanto a sua forma mais lamelar que provavelmente foi compensada com o controle no teor de finos. Isso pode explicar os menores valores de espalhamento obtidos pela areia Cone Original, mesmo com a adição de areia natural, além do fato de apresentar um teor de pulverulento 4% mais alto do que a VSI original.

Se observado o comportamento das argamassas Cone lavada e VSI lavada com 100% de areia de britagem, pode-se perceber que elas diferem significativamente. Sendo as curvas granulométricas e o material pulverulento de ambas bastante semelhantes, esta diferença pode ser atribuída à variação na forma dos grãos. Além da forma da fração mais graúda da areia, a granulometria do material passante na peneira 0,075 mm também pode ter exercido grande influência pois, como visto no Item 4.1.4, o material pulverulento do Cone é mais fino que o do VSI.

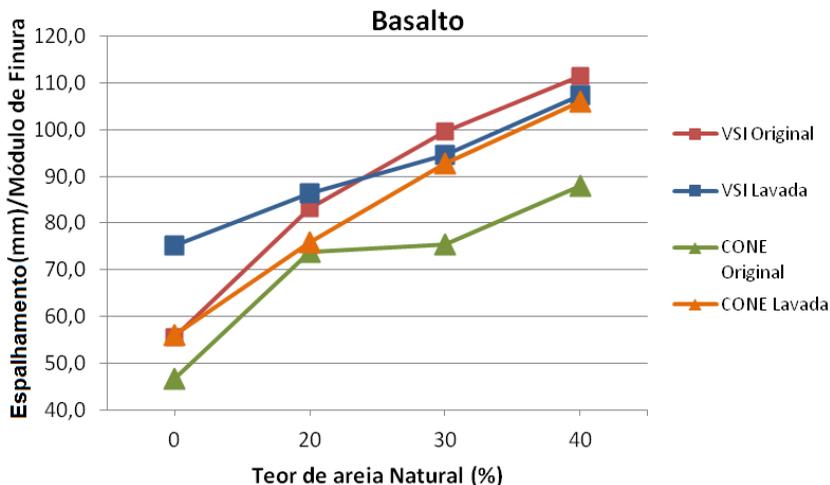


Figura 47 – Basalto: Variação do Índice de fluidez (espalhamento ou *flow 0*/módulo de finura) em função do teor de areia natural.

Com relação às resistências obtidas pouco se pode afirmar, pois não existe grande diferença entre os resultados e, além disso, foram obtidos através de apenas dois corpos de prova por mistura. No entanto, devido à tendência das resistências do VSI serem maiores que aquelas do Cone, como pode ser observado na Figura 48, foi realizada uma análise estatística baseada na comparação das duas médias: de todas as resistências relativas ao Cone e de todas as resistências relativas ao VSI. Neste caso, com 95% de confiança, não se pode afirmar que a resistência do VSI é maior que a do Cone.

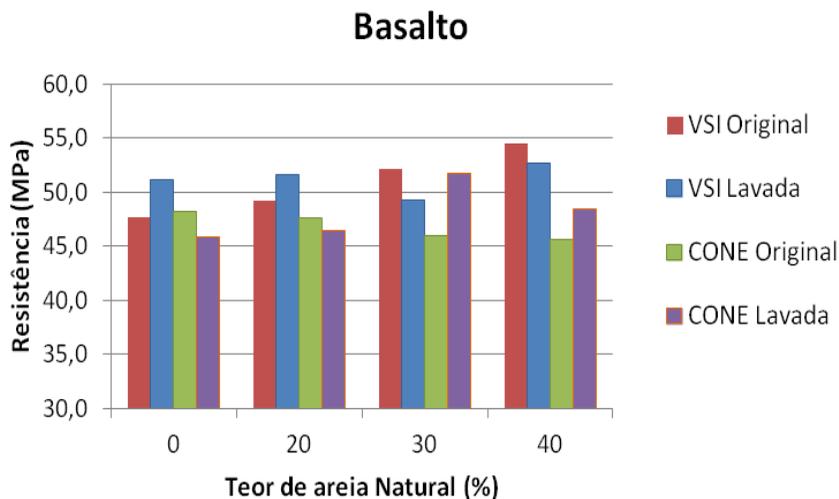


Figura 48 –Basalto: Variação das resistências à compressão em função do teor de areia natural adicionado.

4.2.1.2. Gnaisse

Os resultados da areia de britagem de gnaisse são expostos na 0 e na 0. Da mesma maneira feita com a areia de britagem de basalto, os resultados aqui expostos visam comparar as areias de gnaisse produzidas pelos britadores VSI e cone, em dois teores de material pulverulento: o original e o lavado.

Tabela 34- Resultados argamassas da areia de britagem de gnaiss, do VSI, lavada e original (não lavada).

Argamassas GNAISSE VSI	Flow 0 (mm)	MF da composi ção	Flow0/ Módulo de Finura	Ar Incorpor ado (%)	f_{cj} (MPa)
VSI ORIGINAL (Material Pulverulento=15,32%)					
100% VSI Original	162,5	2,50	65,1	0,6%	47,4
80% VSI + 20% A.Natural	185	2,19	84,6	0,4%	44,2
70% VSI + 30% A.Natural	187,5	2,03	92,2	-0,1%	44,4
60% VSI + 40% A.Natural	189,5	1,88	101,0	-0,1%	47,2
VSI LAVADA (Material Pulverulento=8,79%)					
100% VSI Lavada	278	2,50	111,4	0,0%	52,0
80% VSI + 20% A.Natural	248	2,19	113,4	-0,4%	49,9
70% VSI + 30% A.Natural	241,5	2,03	118,8	-0,2%	49,4
60% VSI + 40% A.Natural	242,5	1,88	129,2	-0,2%	48,2

Tabela 35- Resultados argamassas da areia de britagem de gnaiss, do Cone, lavada e original (não lavada).

Argamassas GNAISSE CONE	Flow 0 (mm)	MF da composi ção	Flow0/ Módulo de Finura	Ar Incorpor ado (%)	fcj (MPa)
CONE ORIGINAL (Material Pulverulento=14,31%)					
100% Cone Original	146,5	2,55	57,5	1,2%	43,8
80% Cone + 20% A.Natural	163,5	2,23	73,3	0,9%	45,1
70% Cone + 30% A.Natural	166	2,07	80,2	0,7%	45,1
60% Cone + 40% A.Natural	181	1,91	94,8	1,2%	42,4
CONE LAVADA (Material Pulverulento=9,75%)					
100% Cone Lavada	192	2,55	75,4	0,3%	43,9
80% Cone + 20% A.Natural	219,5	2,23	98,4	0,0%	42,0
70% Cone + 30% A.Natural	226,5	2,07	109,4	-0,4%	41,9
60% Cone + 40% A.Natural	211,5	1,91	110,8	-0,5%	43,5

A areia de britagem de gnaiss apresentou a mesma tendência do basalto, onde as areias originais, com maiores teores de material pulverulento, apresentam nitidamente um pior comportamento com relação às lavadas, como pode ser observado na Figura 49.

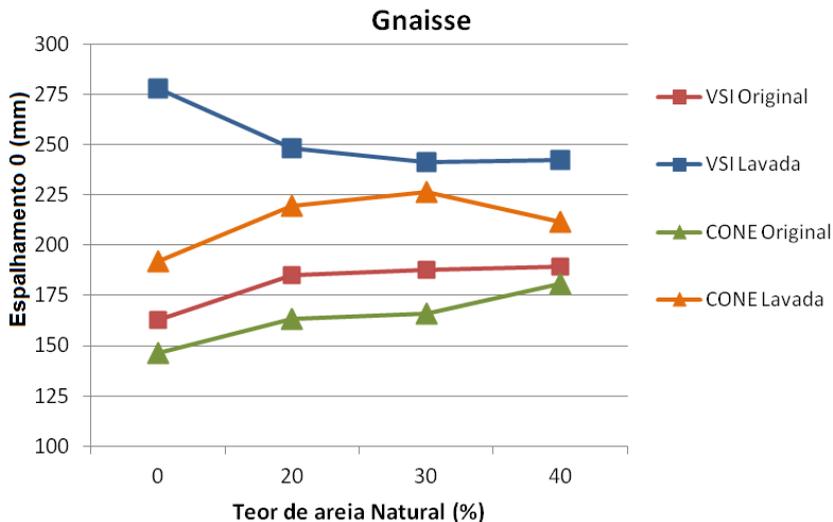


Figura 49 - Gnaisse: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural adicionado.

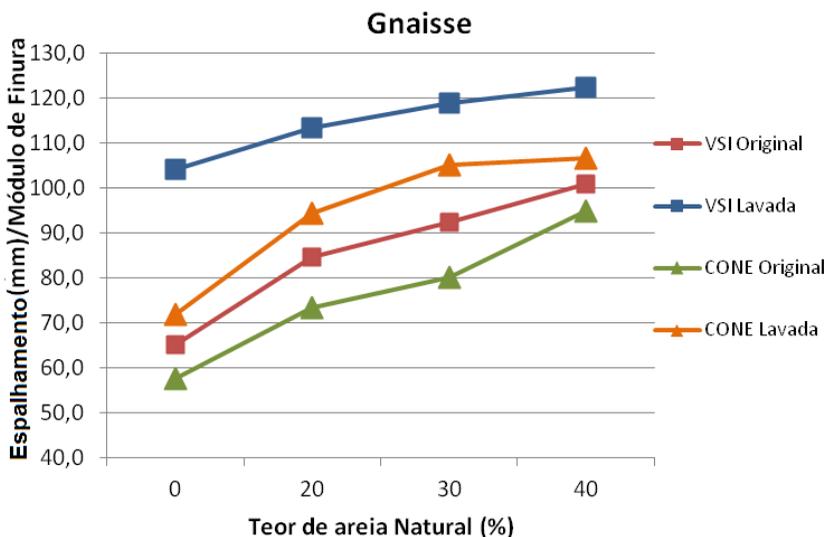


Figura 50 – Gnaisse: Variação do Índice de fluidez (espalhamento ou *flow 0*/módulo de finura) em função do teor de areia natural.

Observando o comportamento da areia Gnaisse VSI lavada na Figura 49, percebe-se que o espalhamento diminui com o aumento de

areia natural, ao contrário do restante. Isto se deve ao fato de que a superfície específica dos agregados aumenta com o aumento no teor de areia natural, diminuindo a fluidez. No entanto, de acordo com a Figura 50, quando se considera o módulo de finura do agregado total na argamassa, o seu comportamento inverte, de acordo com o esperado.

Fica claro que os dois fatores, forma e teor de pulverulento, exercem importante influência na fluidez das argamassas. Logo, a combinação de grãos mais arredondados e um menor material pulverulento propiciam um melhor resultado, com menor quantidade de areia natural. É possível perceber na Figura 50 que, mesmo com o aumento da areia natural, as areias que não combinam forma arredondada e menor quantidade de pulverulento não alcançam a fluidez da areia VSI lavada. Entretanto, é notável o aumento na fluidez com o aumento do teor de areia natural. A composição de 70% de areia de britagem e 30% de areia natural aparenta ser a mais adequada, pois com 40% de areia natural a maioria das areias apresentou a tendência de estabilizar ou até reduzir o seu espalhamento.

Vale observar que a areia gnaisse VSI original, mesmo com os grãos mais arredondados, apresentou menor fluidez quando comparada a areia mais lamelar, porém lavada. Essa tendência enfatiza a possibilidade de um menor teor de material pulverulento ser o fator mais incisivo no resultado do que a forma.

Com relação às resistências obtidas, assim como na areia de basalto, pouco se pode afirmar, pois não existe grande diferença entre os resultados e, além disto, foram obtidos através de apenas dois corpos de prova por mistura. No entanto, devido à mesma tendência das resistências do VSI serem maiores que aquelas do Cone, como pode ser observado na Figura 51, foi realizada uma análise estatística baseada na comparação das duas médias: de todas as resistências relativas ao Cone e de todas as resistências relativas ao VSI. Neste caso, com 95% de confiança, também não se pode afirmar que a resistência do VSI é maior que a do Cone. Pode-se observar também que existe uma tendência da areia VSI lavada ser mais resistente que a Cone lavada.

Gnaise

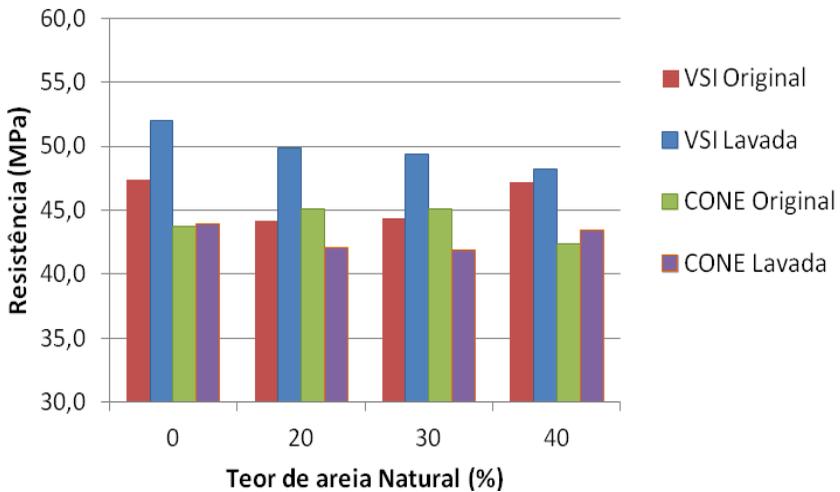


Figura 51 - Gnaise: Variação das resistências à compressão em função do teor de areia natural adicionado.

4.2.1.3. Granito

Da mesma forma apresentada nos itens anteriores, na 0 e na 0 estão expostos os resultados das argamassas com areia de britagem de granito.

Tabela 36- Resultados argamassas da areia de britagem de granito, do VSI, lavada e original (não lavada).

Argamassas GRANITO VSI	Flow 0 (mm)	MF da composi ção	Flow0/ Módulo de Finura	Ar Incorpor ado (%)	fcj (MPa)
VSI ORIGINAL (Material Pulverulento=10,84%)					
100% VSI Original	193,5	2,61	74,3	0,2%	45,6
80% VSI + 20% A.Natural	211	2,27	92,8	-0,4%	46,1
70% VSI + 30% A.Natural	219,5	2,11	104,2	-0,3%	44,6
60% VSI + 40% A.Natural	224	1,94	115,6	-0,3%	45,9
VSI LAVADA (Material Pulverulento=8,58%)					
100% VSI Lavada	197,5	2,61	75,8	-0,2%	42,6
80% VSI + 20% A.Natural	209	2,27	91,9	-0,3%	40,5
70% VSI + 30% A.Natural	219	2,11	104,0	-0,3%	42,6
60% VSI + 40% A.Natural	230,5	1,94	118,9	-0,3%	46,4

Tabela 37- Resultados argamassas da areia de britagem de granito, do Cone, lavada e original (não lavada).

Argamassas GRANITO CONE	Flow 0 (mm)	MF da composi ção	Flow0/ Módulo de Finura	Ar Incorpor ado (%)	f_{cj} (MPa)
CONE ORIGINAL (Material Pulverulento=13,38%)					
100% Cone Original	151	2,46	61,3	1,4%	43,3
80% Cone + 20% A.Natural	166	2,16	76,9	0,5%	44,7
70% Cone + 30% A.Natural	188,5	2,01	94,0	0,1%	44,7
60% Cone + 40% A.Natural	186	1,85	100,4	1,4%	44,2
CONE LAVADA (Material Pulverulento=8,67%)					
100% Cone Lavada	191,5	2,46	77,7	0,6%	42,9
80% Cone + 20% A.Natural	212,5	2,16	98,4	-0,2%	43,0
70% Cone + 30% A.Natural	221	2,01	110,2	-0,2%	44,3
60% Cone + 40% A.Natural	219	1,85	118,2	-0,2%	44,6

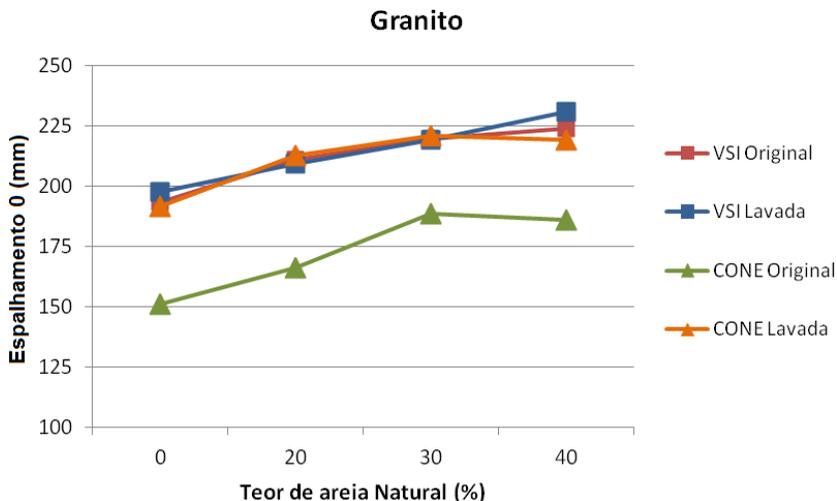


Figura 52 - Granito: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural adicionado.

Como pode ser visto na Figura 52, as areias de granito se comportaram de maneira diferente do que vem sendo observado nas demais. Com exceção da areia Cone original, que teve menor fluidez, as outras se comportaram de maneira praticamente idêntica. Mesmo se considerado o módulo de finura da composição, a diferença de comportamento, como pode ser observado na Figura 53, é mínima. Isto pode ser associado ao fato de que, no ensaio de forma, quando comparados aos grãos de gnaiss e basalto, os grãos de granito não apresentaram diferença tão significativa entre britador tipo Cone e VSI, indicando que a forma pouco se alterou. Outro fator importante é o teor de material pulverulento já bastante baixo, mesmo nas areias não lavadas. Em outras palavras, nas areias de granito, a diferença entre teores de material pulverulento das areias lavadas e originais é pequena, não alterando significativamente o comportamento das argamassas. Pôde-se observar que a maior alteração no teor de material pulverulento com o processo de lavagem ocorreu na areia do Cone, condizendo com seu comportamento, como pode ser visto na Figura 53.

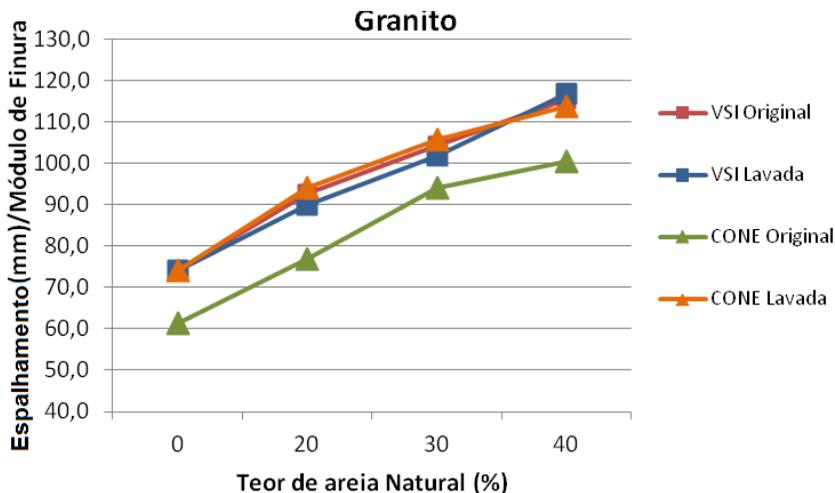


Figura 53 – Granito: Variação do Índice de fluidez (espalhamento ou *flow 0*/módulo de finura) em função do teor de areia natural.

Quanto às resistências, como pode ser visualizado na Figura 54, não há variações significativas.

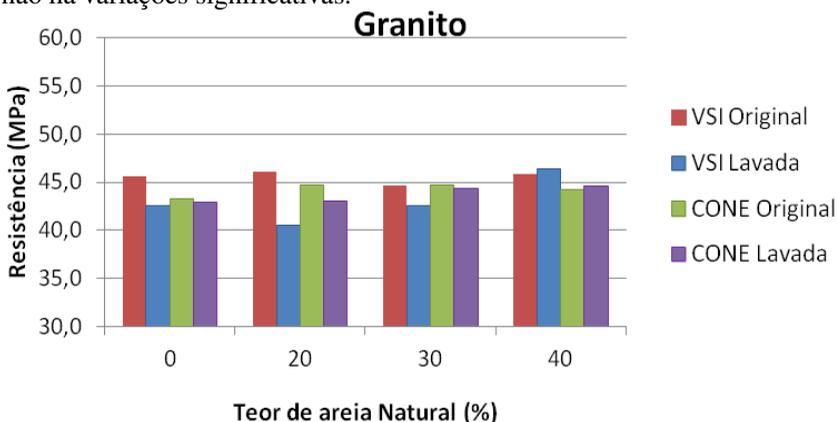


Figura 54 - Granito: Variação das resistências a compressão em função do teor de areia natural adicionado.

4.2.1.4. Calcário

Os resultados da areia de britagem de calcário são expostos na Tabela 38 e na 0.

Tabela 38- Resultados argamassas da areia de britagem de calcário, do VSI, lavada e original (não lavada).

Argamassas CALCÁRIO VSI	Flow 0 (mm)	MF da composição	Flow0/ Módulo de Finura	Ar Incorporado (%)	fcj (MPa)
VSI ORIGINAL (Material Pulverulento=21,00%)					
100% VSI Original	133,5	2,44	54,7	2,1%	39,0
80% VSI + 20% A.Natural	139	2,15	64,7	1,3%	42,6
70% VSI + 30% A.Natural	144	2,00	72,0	1,5%	42,6
60% VSI + 40% A.Natural	145,5	1,85	78,6	2,1%	41,2
VSI LAVADA (Material Pulverulento=9,81%)					
100% Cone Lavada	187	2,44	76,7	0,5%	41,5
80% VSI + 20% A.Natural	225	2,15	104,7	-0,4%	41,8
70% VSI + 30% A.Natural	240,5	2,00	120,2	-1,0%	42,5
60% VSI + 40% A.Natural	248	1,85	133,9	0,4%	41,8

Tabela 39- Resultados argamassas da areia de britagem de calcário, do Cone, lavada e original (não lavada).

Argamassas CALCÁRIO CONE	Flow 0 (mm)	MF da composiçã o	Flow0/ Módul o de Finura	Ar Incorporad o (%)	fcj (MPa)
CONE ORIGINAL (Material Pulverulento=23,60%)					
100% Cone Original	125	2,70	46,4	2,0%	0,0
80% Cone + 20% A.Natural	128,5	2,36	54,6	2,6%	39,4
70% Cone + 30% A.Natural	130	2,18	59,6	2,6%	37,7
60% Cone + 40% A.Natural	131	2,01	65,2	2,6%	40,8
CONE LAVADA (Material Pulverulento=9,75%)					
100% Cone Lavada	167	2,70	62,0	1,0%	42,0
80% Cone + 20% A.Natural	206	2,36	87,5	0,2%	42,7
70% Cone + 30% A.Natural	209,45	2,18	96,0	0,1%	42,0
60% Cone + 40% A.Natural	211,5	2,01	105,3	0,0%	43,9

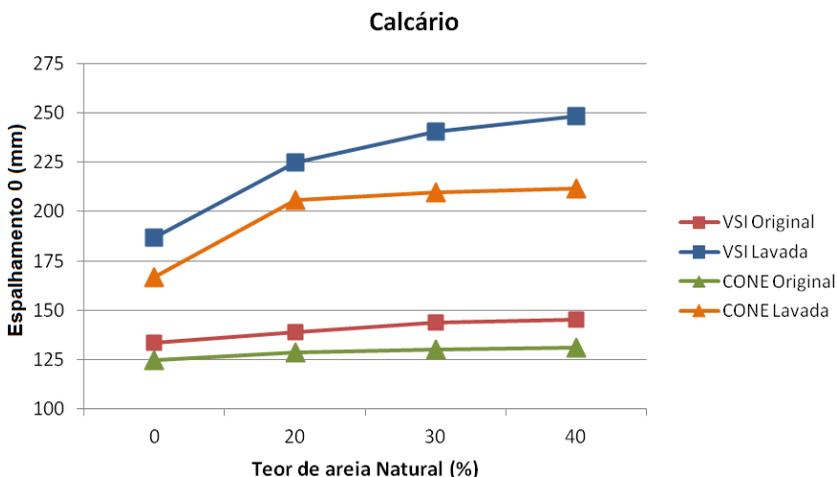


Figura 55 - Calcário: Variação do espalhamento em função do teor de areia natural.

As areias de calcário apresentaram tendências semelhantes às areias de gnaíse e basalto. A areia de melhor comportamento foi a VSI lavada, seguida da Cone lavada. As areias com maiores teores de material pulverulento apresentaram resultados bem abaixo e pouco se alteraram com os diferentes teores de areia natural, como pode ser visto na Figura 55.

Essa diferença bem acentuada entre as areias lavadas e não lavadas, provavelmente se deve ao fato de que, de acordo o ensaio de coeficiente de forma, a forma dos grãos do calcário pouco mudam entre VSI e Cone. Com isso se destaca a influência do teor de material pulverulento. Contudo, é importante destacar que, mesmo com pouca melhora na forma, as areias do VSI apresenta sempre maior espalhamento do que àquelas do Cone.

Por outro lado, a Figura 56, com os resultados em função do Índice de Fluidez, demonstra que todas as areias tendem a aumentar a fluidez, quase que proporcionalmente, na medida em que se aumenta o teor de areia natural.

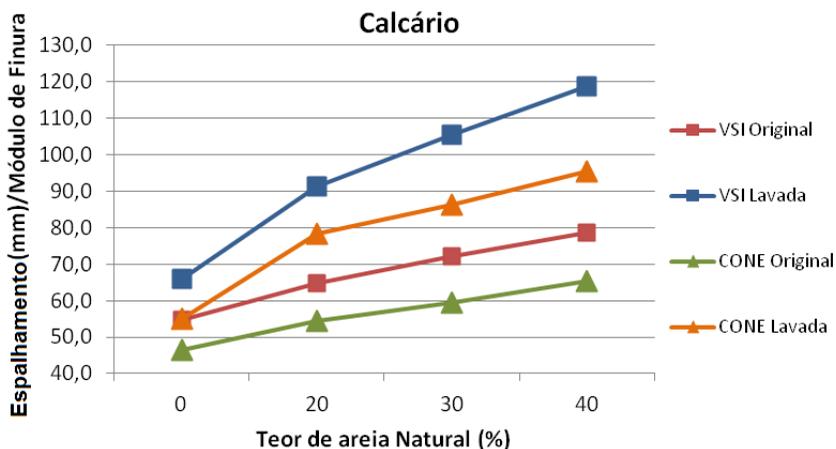


Figura 56 - Calcário: Variação do Índice de fluidez (flow 0/módulo de finura) em função do teor de areia natural.

Quanto às resistências, como pode ser visualizado na Figura 57, não há variações significativas entre elas.

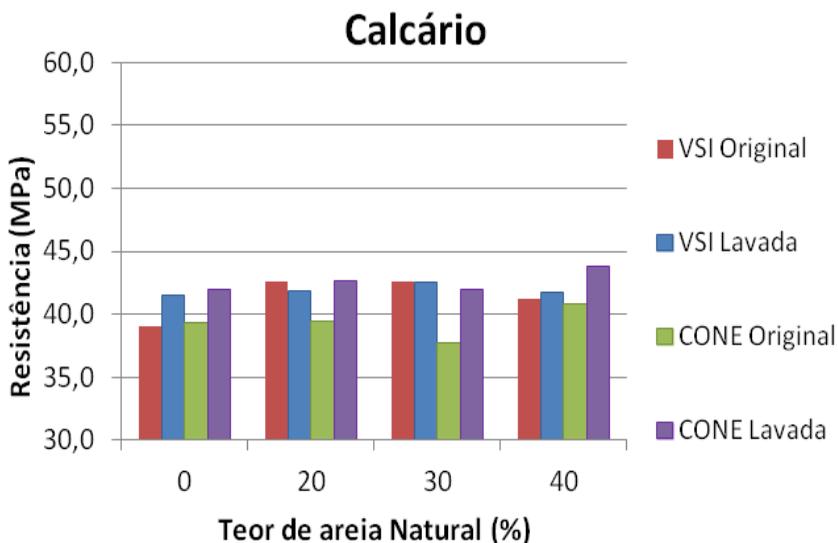


Figura 57 - Calcário: Variação das resistências à compressão em função do teor de areia natural adicionado.

4.2.2. Análise dos Quatro Tipos de Rocha

Com as análises já expostas, foi possível concluir que tanto o fator forma quanto o teor de pulverulento influenciaram significativamente no resultado das argamassas quanto à fluidez, considerando os quatro tipos de rocha. Evidentemente, os melhores resultados foram obtidos quando se combinou os dois fatores: a forma mais arredondada e o menor teor de pulverulento. No entanto, pode-se perceber que, de maneira geral, com um controle no material pulverulento, mesmo com uma forma de grão mais lamelar, é possível atingir resultados relativamente satisfatórios, com a adição de areia natural. Os resultados indicam que, mesmo com uma forma mais arredondada, se não controlado o teor de material pulverulento, a fluidez pode não ser satisfatória. Como evidência, pode-se observar nos quatro tipos de rocha, que o desempenho das areias Cone lavadas é superior àquele das areias VSI originais.

No mesmo sentido, é possível observar na Figura 58a, que as areias lavadas, tanto do VSI como do Cone, tendem a convergir no mesmo sentido, aumentando sua fluidez na medida em que se aumenta o teor de areia natural. Já as areias originais, tanto do VSI como do Cone, não apresentam essa tendência, pelo contrário, muitas delas pouco melhoram com o aumento do teor de areia natural, como pode ser observado na Figura 58b.

A combinação de 30% de areia natural e 70% de areia de britagem parece, de maneira geral, ser a mais vantajosa, pois a partir desse ponto as argamassas tendem a não apresentar grande melhora na sua fluidez.

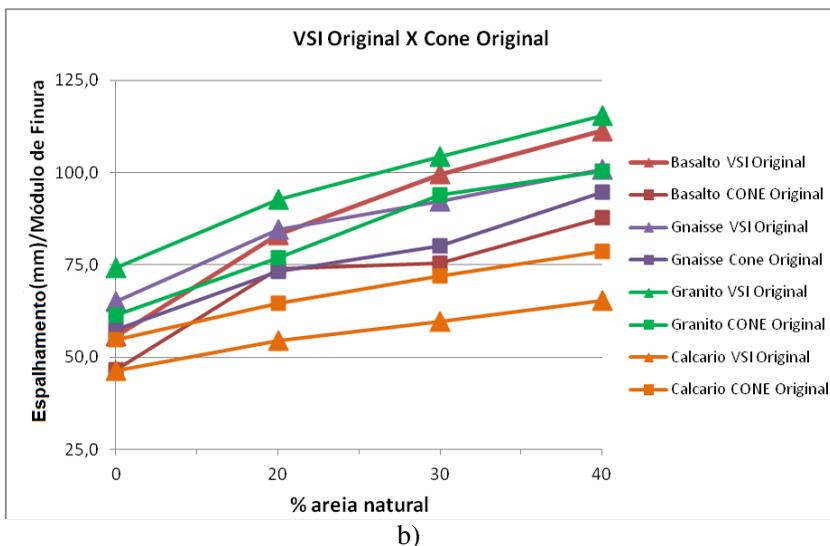
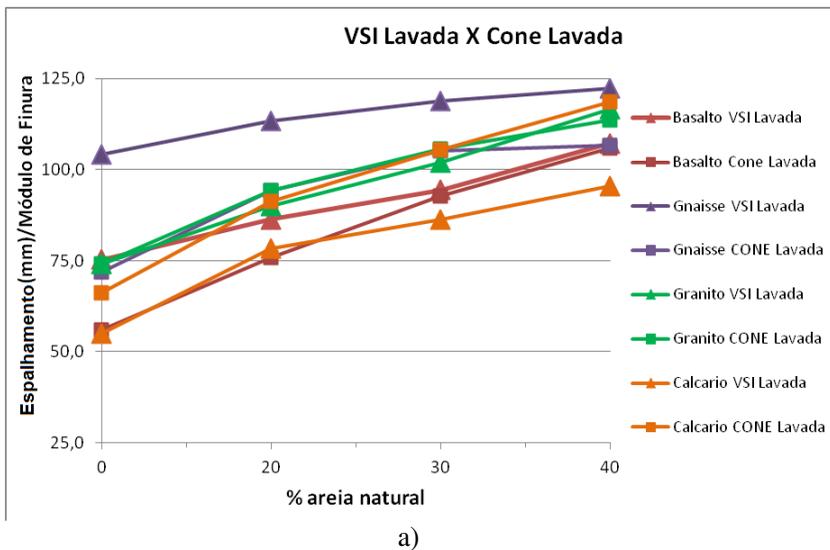


Figura 58 – Variação do Índice de Fluides (espalhamento ou *flow* 0/Módulo de Finura) em função do teor de areia natural: a) areias lavadas e b) areias originais

Com relação aos teores de ar incorporado nas argamassas, não foi observado nenhum teor acima de 3%, não sendo um número tão

significativo a ponto de exercer maiores influências nas argamassas. Entretanto, na Figura 59 pode-se ter uma idéia do comportamento do teor de ar incorporado nas diversas argamassas, apesar de não ser observada nenhuma tendência constante. É possível observar que, de maneira geral, o ar incorporado tende a ser um pouco maior nas argamassas originais (linhas pontilhadas), naquelas com forma mais lamelar (marcadores triangulares) e nas argamassas com 100% de areia de britagem. Fica evidente também que as areias de calcário originais foram aquelas que mais incorporaram ar. Vale ressaltar ainda que os valores negativos de teor de ar incorporado observado em alguns pontos pode ser consequência da própria precisão do ensaio, tendo em vista que o cálculo do teor de ar incorporado não considera a parcela relativa à absorção dos agregados.

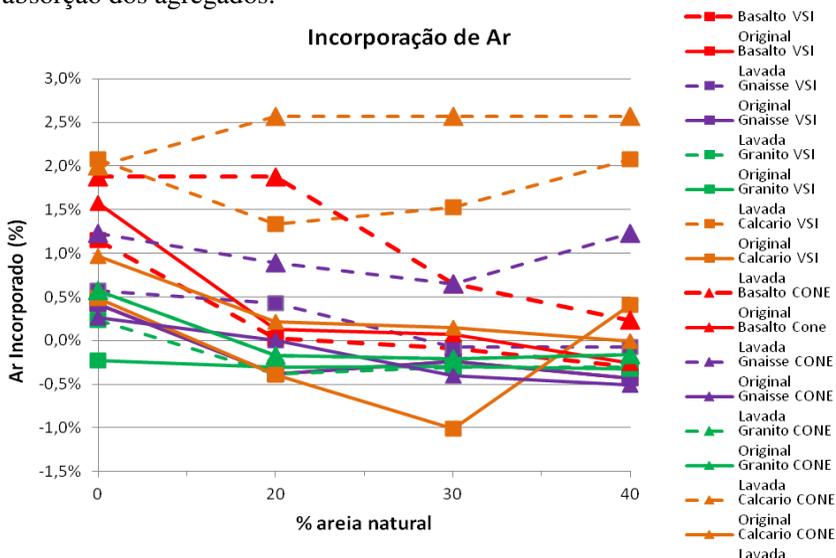


Figura 59 – Teor de ar incorporado em função do teor de areia natural.

Quanto aos valores de resistência à compressão, apesar de serem, de maneira geral, bem próximos, observou-se uma tendência dos valores das argamassas de calcário serem relativamente mais baixos com relação às outras rochas, como pode ser visto na Figura 60. Com isso, foi feita uma análise estatística de comparação múltipla de médias, onde se comparou as médias de todas as resistências VSI, Cone, lavadas e originais, obtidas para cada tipo de rocha. Os resultados mostraram que existe diferença significativa entre as médias dos grupos, podendo

afirmar, com uma confiabilidade de 95%, que a areia de calcário apresenta resistências mais baixas que as outras. Já as argamassas de areia de basalto possuem a média mais alta. Apenas as médias das areias de gnaiss e granito não diferiram entre si.

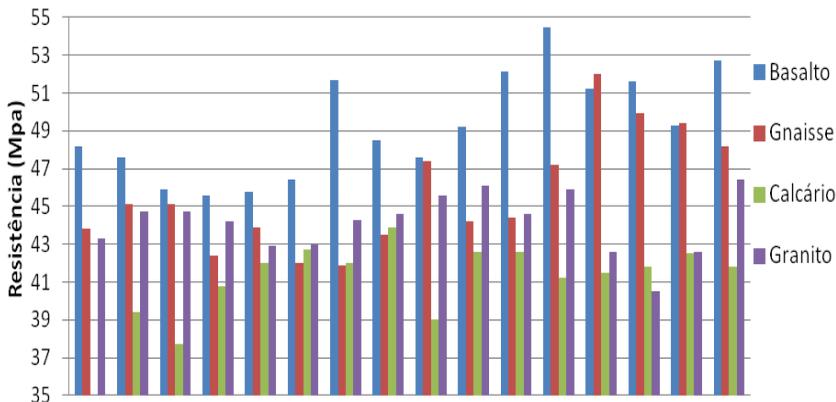


Figura 60 – Resistências das argamassas das composições feitas com as areias Cone lavada e original e VSI lavada e original.

4.2.3. Correlação entre Argamassas e o Azul de Metileno

Diante dos resultados dos ensaios em argamassas, observou-se uma possível existência de correlação entre os Índices de Fluidez de cada rocha e os valores obtidos nos ensaios do Azul de Metileno.

Assim sendo, optou-se por comparar os valores do Azul de Metileno com os Índices de Fluidez das argamassas com 100% de areia de britagem, eliminando-se assim a variável do percentual de areia natural que, neste caso, apenas tenderia a encobrir a influência dos microfinos das areias de britagem.

A Figura 61, a Figura 62, a Figura 63 e a Figura 64 apresentam gráficos para cada rocha, onde se podem observar os respectivos coeficientes de determinação R^2 .

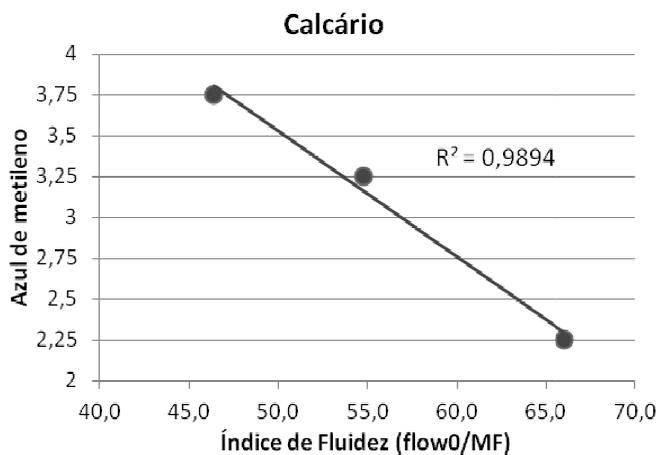


Figura 61 – Calcário: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno.

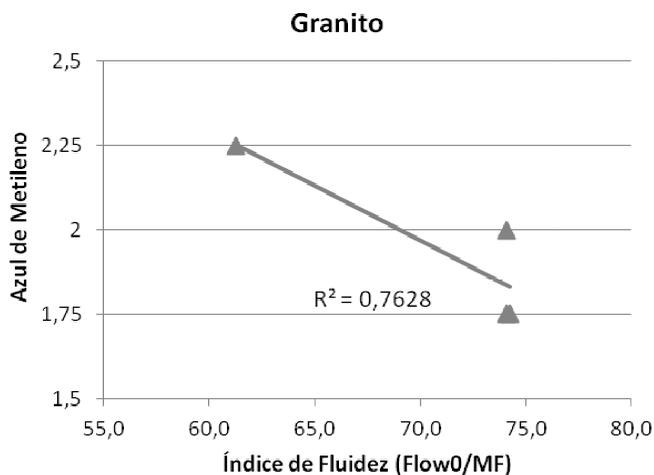


Figura 62 - Granito: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno.

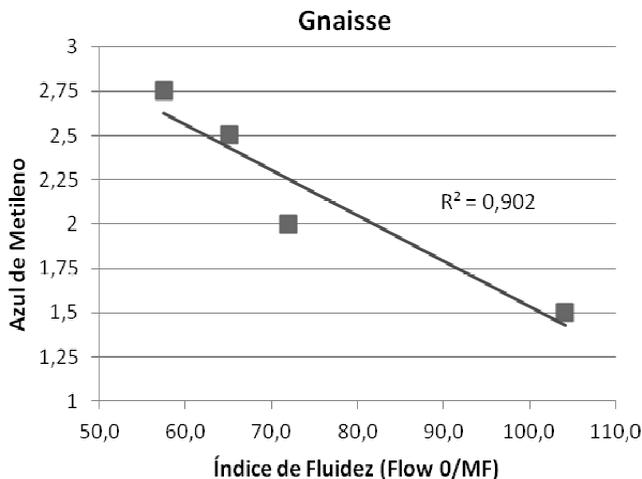


Figura 63- Gnaisse: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno.

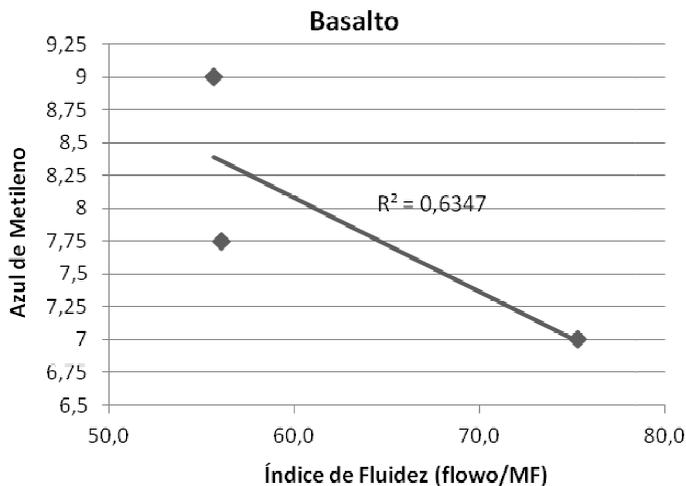


Figura 64- Basalto: Correlação entre os Índices de Fluidez e os respectivos valores de Azul de Metileno.

É possível observar que existe uma tendência clara onde na medida em que o Índice de Fluidez aumenta, os valores do Azul de Metileno se tornam menores. Esta tendência indica a coerência nos resultados do Azul de Metileno, pois como pôde ser observado

anteriormente, estes tendem a aumentar com o aumento da superfície específica dos grãos e/ou presença de argilo-minerais. Como consequência de uma maior superfície específica dos microfinos, obtém-se um menor espalhamento nas argamassas.

Os coeficientes de determinação R^2 obtidos foram bastante satisfatórios no caso do calcário e do gnaiss, e mais baixos para o granito e o basalto. Assim, com o objetivo de confirmar esta correlação, fez-se uma análise para verificação da inclinação das retas e da existência de relação entre as variáveis.

A análise, em detalhes no Anexo 7.5, mostrou que, com 95% de confiabilidade, existe relação entre os valores do Índice de Fluidez das argamassas e do Azul de Metileno nas rochas de gnaiss, granito e calcário. Não foi possível comprovar a relação das variáveis no basalto, onde já se havia comentado que os valores do azul de metileno não eram correspondentes aos resultados da granulometria a laser dos microfinos.

É pertinente observar que o basalto foi a única rocha que apresentou elevados valores de azul de metileno, indicando a presença de argilo-minerais, já que a granulometria a laser mostrou que seus microfinos não são tão finos quanto aqueles de outras rochas com menor valor de Azul de Metileno. Este fato pode ter interferência na falta de correlação entre os ensaios aqui relacionados. No entanto, cabe mostrar que o maior valor de Azul de Metileno corresponde ao menor Índice de Fluidez, obtido pela areia Basalto VSI original. Os dois outros valores são menores e apresentam Índices de Fluidez maiores, correspondendo às areias lavadas, onde parte da fração mais fina e/ou argilo-minerais podem ter sido retirados no processo de lavagem, permitindo um maior espalhamento.

4.2.4. Análise quanto à Mistura das Areias Cone e VSI

Conforme exposto na metodologia no Item 3.4.4, nas britagens é comum a mistura de produto do cone com o produto do VSI, com o intuito de aumentar a produção para suprimir a demanda. A proporção ponderada de produção entre as duas máquinas pode ficar entre 15% e 30%, sendo este percentual a contribuição usual do Cone. Nesse sentido, estudaram-se as misturas de 70% VSI com 30% Cone e de 85% VSI com 15% Cone, com o objetivo de entender o quanto isto pode afetar o comportamento em argamassas. Os resultados são expostos na Figura 65, Figura 66, Figura 67 e Figura 68. Optou-se por representar os resultados de acordo com o Índice de Fluidez (flow/módulo de finura), pois para compensar a influência das alterações dos módulos de finura

nas misturas, calculou-se o módulo do agregado miúdo total, de cada uma das composições separadamente, apresentando assim resultados mais ponderados. Os resultados podem ser consultados também no Anexo 1.1.

Quanto à areia de basalto, pode-se observar na Figura 65 que as alterações não afetaram de modo expressivo o comportamento das argamassas. Entretanto, principalmente quando observadas as composições com 100% de areia de britagem, é possível observar uma tendência onde as misturas feitas melhoram um pouco o comportamento quando comparadas a areia apenas do Cone. Com o acréscimo de areia natural todas tendem a um Índice de Fluidez bastante similar, com diferenças praticamente insignificativas.

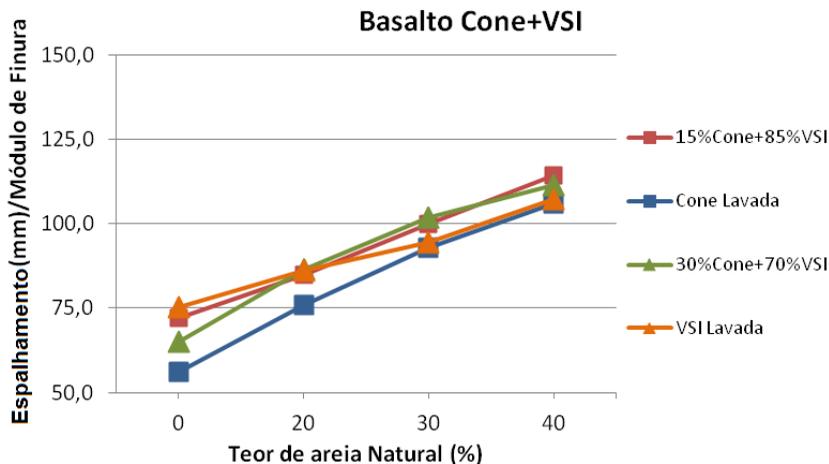


Figura 65 – Basalto: Relação Espalhamento 0/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.

A Figura 66 apresenta os resultados das areias de gnaiss, onde se pode observar um comportamento bem semelhante às de basalto, com exceção da areia VSI lavada. A areia de britagem puramente do VSI apresenta um resultado um pouco acima do restante, enquanto as outras apresentam comportamentos sem diferenças significativas na medida em que se aumenta a substituição por areia natural. Diferenças um pouco mais significativas podem ser observadas quando a mistura é feita com 100% de areia de britagem, onde os grãos arredondados da areia natural não estão presentes para diminuir o atrito interno entre as partículas, aumentando a fluidez. Cabe destacar que, apesar de predominantemente do VSI, a areia 70%VSI+30%Cone apresenta um comportamento

bastante parecido com o da areia 100% Cone, o que significa que 30% de grãos mais lamelares foram o suficiente para prejudicar a fluidez.

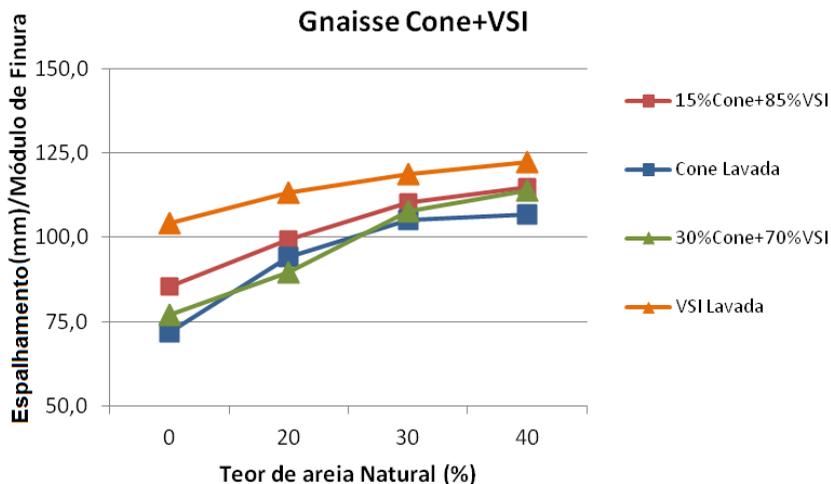


Figura 66 - Gnaiss: Relação Espalhamento 0/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.

A Figura 67, correspondente as areias de granito, apresenta um comportamento não esperado, pois as misturas apresentaram maior Índice de Fluidez do que a areia proveniente apenas do VSI, principalmente com um teor de 30% de areia natural. Este fato pode ser explicado, pois estas argamassas foram moldadas em dias diferentes, podendo ser afetadas por alguma variação na temperatura. Pode também ter ocorrido algum erro no procedimento do ensaio. No entanto, de maneira geral as diferenças são pouco significativas.

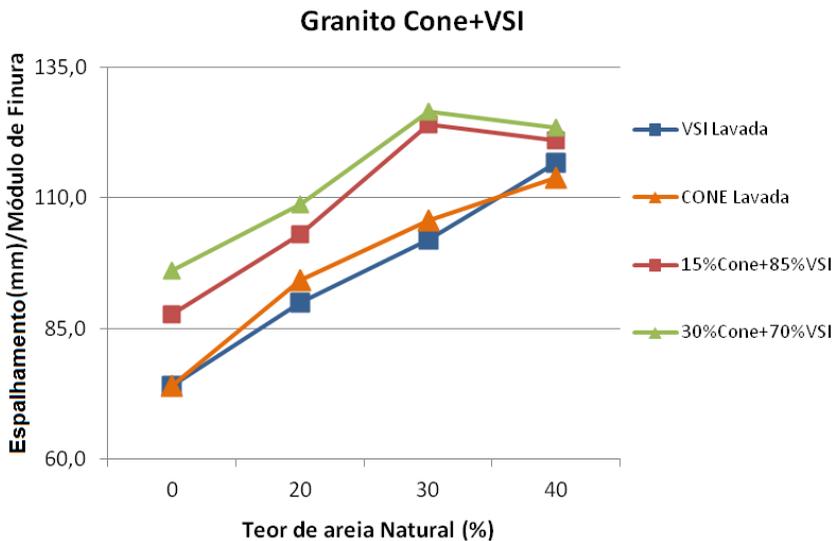


Figura 67 - Granito: Relação Espalhamento 0/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.

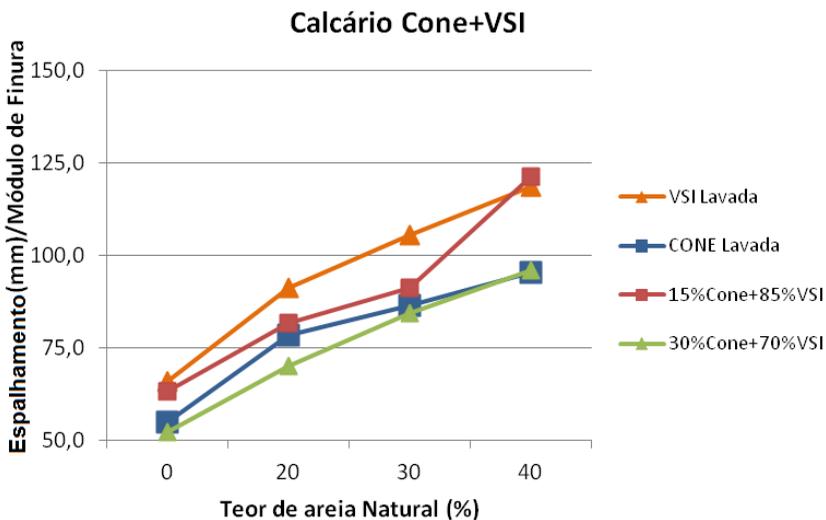


Figura 68 - Calcário: Relação Flow/Módulo de Finura da composição, pelo teor de areia natural.

A Figura 68 expõe os resultados da areia de calcário, bastante semelhantes com as tendências apresentadas nos resultados do basalto e

do gnaíse. Aqui, no entanto, a diferença no Índice de Fluidez é mínima para a composição com 100% de areia de britagem.

De maneira geral, quanto menor o teor de areia natural que se pretende adicionar às areias de britagem, maior o efeito prejudicial da presença de areias do Cone em areias apenas do VSI. Em outras palavras, na proporção estudada, a inclusão de grãos lamelares em uma areia de britagem de grãos arredondados, pode vir a afetar o resultado final. Porém é um prejuízo que pode, dependendo das características da areia, ser relativamente compensado com substituições parciais de areia natural.

4.2.5. Análise quanto à Redução do Teor de Material Retido na Peneira 1,2mm

Conforme já comentado no Item 3.4.4, em estudos anteriores desenvolvidos pelo GTec-UFSC, observou-se que as argamassas têm um comportamento diferente conforme for o retido na peneira de malha 1,2 mm. Para estudar melhor este comportamento, extraiu-se 50% deste material para a realização de argamassas. Cabe destacar que esta análise foi feita apenas com as areias lavadas, que possuíam teores de material pulverulento entre 8% e 10%. A Figura 69 ilustra os resultados obtidos. Os resultados completos podem ser encontrados no Anexo 1.1.

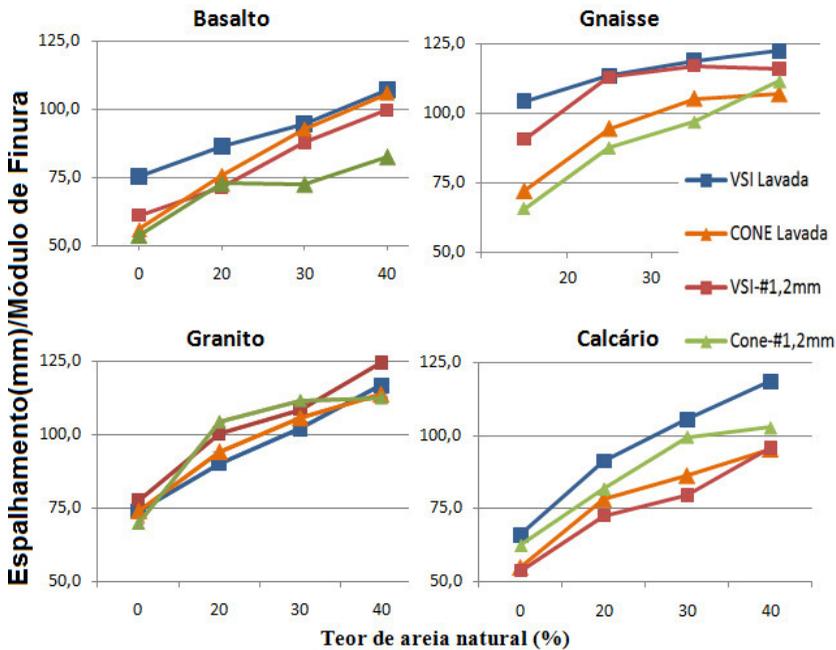


Figura 69 – Espalhamento 0/Módulo de finura em função do teor de areia natural, das areias com 50% a menos retido na peneira 1,2 mm.

Inicialmente, todas as areias de britagem continham praticamente o mesmo teor de material retido na peneira 1,2mm. De acordo com a Figura 69, não se pode observar uma tendência predominante, comum entre as quatro rochas. Contudo, nas areias de basalto e gnaisse, é possível concluir que a diminuição do teor retido na peneira 1,2 mm reduziu sutilmente ou manteve próximo o desempenho das argamassas. Na areia de granito, houve um aumento sutil no Índice de Fluidez das argamassas com o teor reduzido, com as substituições por areia natural. Na areia de calcário foi possível observar uma pequena melhora da areia Cone, principalmente com 30% de substituição de areia natural. Já para a areia calcário VSI esta redução piorou visivelmente o desempenho.

Com isso, não se pode concluir, de maneira geral, se há mudanças significativas ao diminuir o teor de material retido na peneira de 1,2 mm. Estudos mais detalhados precisam ser realizados para compreensão deste parâmetro.

4.2.6. Análise quanto à Forma dos Grãos abaixo da Peneira 0,3 mm.

Com o objetivo de estudar se mesmo a forma das partículas da fração mais fina exerce influência no comportamento de argamassas, a areia do VSI teve o passante na peneira de malha 0,3mm substituído por igual massa do passante na peneira de malha 0,3mm da areia do Cone, e vice-versa. Cabe observar que esse estudo foi feito apenas com as areias lavadas, as quais possuem material pulverulento entre 8% e 10%. A tabela completa com os resultados encontra-se no Anexo 1.1.

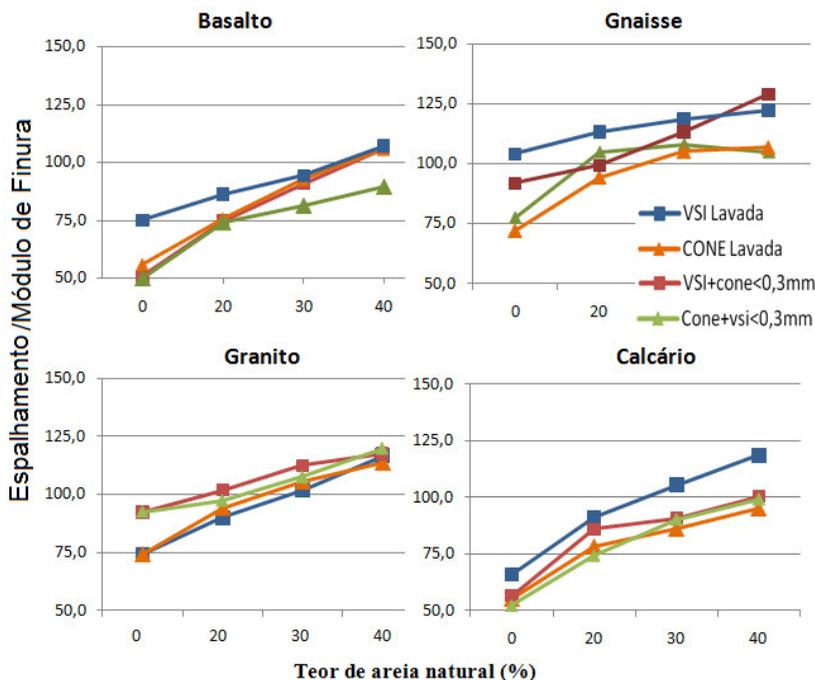


Figura 70 – Espalhamento 0/Módulo de finura em função do teor de areia natural, das areias com o material abaixo da peneira 0,3 mm invertido.

Ao se observar a Figura 70, é possível perceber que, de maneira geral, o comportamento da areia VSI apresenta uma redução na fluidez quando se substitui o material abaixo da peneira 0,3 mm pelo material do Cone. No entanto, esta piora não segue uma tendência para todas as rochas. No basalto e no gnaisse, só é possível notá-la nos teores de 0% a 20% de areia fina, pois a partir de 30% seus comportamentos se

igualam. Isto deve ocorrer quando os grãos de areia natural são suficientes para anular o efeito dos grãos mais lamelares da fração mais fina. No calcário acontece o contrário: inicialmente o Índice de Fluidez das argamassas do VSI é semelhante, e nos teores de 30% e 40% de areia natural é que se pode perceber uma maior diferença. Apesar da diferença no calcário não ter sido constante, os teores maiores de areia natural podem não ter compensado a forma mais lamelar do material abaixo da peneira 0,3 mm, pois o calcário, na granulometria a laser, se destacou por apresentar uma granulometria abaixo da peneira 1,2 mm mais fina que a dos outros materiais.

Ainda com relação às areias VSI e VSI com o fino do Cone, o comportamento do granito foi o oposto do restante. Os resultados de granulometria a laser são iguais para as areias VSI e Cone lavadas, bem como o resultado de fluidez das argamassas. Isto pode ter auxiliado neste comportamento diverso, pois as diferenças no Índice de Fluidez, de maneira geral, não são extremamente significativas.

No que se refere às areias do Cone, também não há uma tendência constante no comportamento entre as rochas. No basalto pode ser observada uma piora quando o material abaixo da peneira 0,3 mm é substituído pelo material do VSI. Este comportamento não está de acordo com o esperado, pois nos resultados de granulometria a laser, a areia do Cone mostrou-se mais fina. Com isso, era esperado que a substituição da fração abaixo da 0,3 mm por um material com menos superfície específica fosse aumentar a fluidez desta composição.

No calcário não houve diferença significativa entre o Índice de Fluidez dos materiais do Cone. No granito uma melhora pode ser observada apenas quando a mistura é realizada com 100% de areia de britagem, onde não há influência dos grãos da areia natural. No gnaiss há uma pequena melhora apenas com 20% de areia natural, podendo esta não ser significativa.

Diante do exposto, considerando que os resultados de granulometria a laser, coerentes com os resultados de azul de metileno, onde as areias provenientes dos britadores tipo Cone apresentaram uma granulometria da fração abaixo da peneira 1,2 mm consideravelmente mais fina, pode-se dizer que não existe uma tendência clara que indique que uma diferença entre os materiais de VSIs e Cones abaixo de 0,3 mm, exerça grande influência na fluidez das argamassas.

4.3. ESTUDO EM CONCRETO

4.3.1. Definição dos Concretos

O principal objetivo desta etapa foi encontrar correlações entre os resultados dos ensaios em argamassas e os concretos realizados, provando assim a viabilidade de otimizar estudos em concretos, através de uma pré-seleção dos agregados miúdos de melhor desempenho em argamassas.

Nesse sentido, foram escolhidas, a partir do Índice de Fluidiez, quatro areias de britagem com características distintas. Estas foram: **basalto VSI lavada, basalto VSI original, basalto Cone lavada e granito VSI lavada.**

Todos os concretos foram produzidos com uma composição de agregados miúdos de 70% de areia de britagem e 30% de areia natural fina. Este teor foi escolhido por, de maneira geral, apresentar bons resultados nas argamassas e também por ser um teor aplicável na prática, já utilizado por concreteiras.

4.3.2. Teores de Argamassa

Para cada uma das quatro composições de agregados foi definido o teor ideal de argamassa para um concreto de abatimento (10 ± 1) cm. Este teor ideal de argamassa foi definido como sendo o menor teor de argamassa necessário para que o concreto apresentasse boa coesão e consistência, de acordo com o abatimento estipulado. Para isto, eram adicionados cimento, areia e água a um concreto de traço inicial em massa de 1:5 (1:m- somatório dos agregados em relação ao cimento), aumentando sucessivamente o teor de argamassa do concreto, de 1% em 1%, de acordo com o necessário. Foi utilizado um teor de aditivo de 0,9% em relação à massa de cimento, pois este teor era o empregado na central de concreto de onde foi obtido o cimento, os agregados graúdos e a areia natural. Na Tabela 1 são apresentados os teores de argamassa definidos para as areias de britagem, juntamente com o abatimento obtido e a relação água/cimento final. É importante lembrar que a relação água/cimento e o valor do abatimento apresentados aqui, são relacionados apenas aos concretos realizados para a definição do teor de argamassa ideal.

Tabela 40– Características dos concretos no ajuste do teor de argamassa ideal.

AREIA	Teor de argamassa ideal	Abatimento (cm)	a/c	Cimento	TRAÇO em massa			
					Areia de Britagem	Areia Natural	Brita 4,75/12,5	Brita 9,5/25
Basalto VSI Lavada	52%	9,5	0,45	1	1,48	0,64	0,86	2,02
Basalto VSI Original	50%	10	0,46	1	1,4	0,6	0,9	2,1
Basalto Cone Lavada	51%	9,5	0,45	1	1,44	0,62	0,88	2,06
Granito VSI Lavada	53%	10,5	0,46	1	1,53	0,65	0,85	1,97

Conforme pode ser observado na Tabela 1, os teores de argamassas definidos não foram de acordo com o esperado, pois a areia de britagem com maior teor de material pulverulento, a basalto VSI original, foi a que apresentou o menor teor de argamassa exigido, para espalhamento semelhante. Esse resultado também não está de acordo com o obtido nos ensaios de argamassas, onde as areias lavadas apresentaram, de maneira geral, melhor desempenho. A mesma falta de coerência foi observada para a areia de britagem do Cone onde, devido aos seus grãos mais lamelares, esperava-se um maior teor de argamassa exigido para obter-se um concreto coeso e trabalhável. No entanto, o concreto realizado com a areia Basalto Cone lavada demandou um menor teor de argamassa do que aquele produzido com a areia Basalto VSI lavada, de grãos mais arredondados. Nenhuma hipótese admissível foi encontrada para explicar tais comportamentos. Cabe lembrar que a determinação do teor de argamassa é feita por critérios subjetivos e pequenas diferenças nos valores encontrados podem acontecer por dificuldade de se manter o critério, de mistura para mistura.

4.3.3. Curvas de Dosagem

Definidos os teores de argamassa para cada concreto com diferentes areias de britagem, foram produzidos os concretos para determinação das curvas de dosagem, de acordo com o método IPT/EPUSP. Foram feitos três concretos para cada uma das quatro areias de britagem, nos traços em massa de 1:3,5, 1:5 e 1:6,5, resultando assim em 12 concretos analisados. Para cada um destes, foi avaliado o abatimento (NBR NM 67:1996), os consumos de água e cimento, e a massa específica no estado fresco (NBR9833:1987) para posterior cálculo do teor de ar incorporado. Além disso, para cada concreto, foram moldados três corpos-de-prova para avaliação da resistência à compressão aos 28 dias.

A Tabela 1 apresenta os resultados dos concretos produzidos. As resistências à compressão apresentadas são relativas ao valor máximo obtido entre os três corpos de prova moldados.

Tabela 41 – Resultados obtidos nos concretos.

Parâmetro Agregado	Traço (m)	Abatimento (mm)	a/c	Teor de ar incorporado (%)	Consumo de água/m ³	Consumo de cimento/m ³	Resistência à compressão (MPa)
Granito VSI Lavada	1:3,5	10	0,38	-1,0	190,0	494,0	38,9*
	1:5,0	9,5	0,46	-0,4	172,7	374,2	48,7
	1:6,5	9,5	0,52	3,6	151,0	291,9	43,3
Basalto VSI Original	1:3,5	11	0,40	-0,6	194,1	489,5	66,5
	1:5,0	10	0,45	0,3	168,9	373,0	49,4
	1:6,5	9	0,52	0,7	155,7	300,9	39,1
Basalto VSI Lavada	1:3,5	9,5	0,36	0,0	179,4	494,4	65,3
	1:5,0	10	0,42	0,3	159,6	377,0	55,1
	1:6,5	11	0,54	-0,6	162,9	302,9	41,5
Basalto Cone Lavada	1:3,5	9,5	0,35	2,9	170,6	482,2	65,2
	1:5,0	9,5	0,45	0,5	167,1	372,7	55,1
	1:6,5	11	0,57	0,2	169,6	297,6	42,1

*Valor espúrio

Conforme pode ser visto na Tabela 1, todos os abatimentos ficaram dentro do limite de (10 ± 1) cm, fixado anteriormente.

Com relação ao teor de material pulverulento, se comparados os consumos de água dos concretos das areias de basalto VSI lavada e original, é possível observar uma tendência de haver um limite no traço até o qual certa quantidade de material pulverulento pode melhorar o desempenho do concreto. Nos concretos mais “ricos” (1:3,5 e 1:5), uma maior quantidade de material pulverulento aumentou o consumo de água. Este comportamento se inverte nos concretos mais “pobres”, ou seja, naqueles com menor quantidade total de finos. Este comportamento pode ser explicado, pois um concreto com maior quantidade de cimento já possui material fino suficiente, e os finos provenientes do agregado miúdo podem vir a ser excessivos, necessitando de maior quantidade de água. Já nos concretos com menor quantidade de cimento, os finos dos agregados não “competem” com o cimento e auxiliam na coesão e trabalhabilidade do concreto.

Cabe observar que a dosagem de aditivo de 0,9% sobre a massa de cimento, pode ter sido um pouco elevada, pois seu efeito notável pode ter encoberto parte dos efeitos dos diferentes agregados miúdos nas características dos concretos. Como exemplo, o efeito da forma do agregado não exerceu a influência esperada, como se pode notar inicialmente na definição do teor de argamassa ideal, onde os agregados com grãos mais arredondados do VSI demandaram um maior teor de argamassa para um mesmo abatimento e consistência.

Contudo, quanto à influência da forma dos grãos no consumo de água por metro cúbico de concreto, comparando-se as areias de basalto VSI e Cone, nos concretos mais pobres (1:5,0 e 1:6,5) é possível perceber um menor consumo naqueles com agregados de grãos mais arredondados, provenientes do VSI. No entanto, para o concreto mais rico (1:3,5), os agregados provenientes do Cone demandaram menos água do que àqueles provenientes do VSI.

Vale observar que, de maneira geral para o basalto, com a mudança da forma dos grãos esperava-se uma diferença mais significativa na demanda de água, pois o ensaio de coeficiente de forma realizado nestas areias de britagem mostrou que os grãos de basalto foram os que apresentaram maior melhora com o uso de britadores tipo VSI.

Observando os resultados dos concretos de traço 1:6,5, pode-se perceber que, mesmo com o maior teor de argamassa (53%), o consumo de água por metro cúbico no concreto da areia de granito VSI lavada é inferior àqueles apresentados pelo restante das areias de britagem. De

acordo com o ensaio de coeficiente de forma, a forma da fração acima da peneira de 0,3 mm não aparentou ter sido o fator determinante para um menor consumo de água da areia de granito, mesmo com um maior teor de argamassa, o que poderia ter demandado maior quantidade de água para mesmo abatimento. Da mesma maneira, sendo semelhantes os teores de material pulverulento das areias VSI lavadas, tanto de granito como de basalto, este não seria um fator determinante no comportamento da demanda de água da areia de granito. Logo, cabe aqui observar a correlação entre os resultados do ensaio de Azul de Metileno e a diferença na demanda de água dos concretos produzidos com a areia de granito, onde os valores de Azul de Metileno do basalto são claramente maiores, significando uma possível presença de argilominerais e/ou um pulverulento mais fino, que tendem a aumentar a demanda de água. Assim, os baixos valores de Azul de Metileno podem estar relacionados ao fato da areia de granito ter “compensado” o seu maior teor de argamassa e exigido menos água, quando comparada às areias de basalto.

Quanto à influência das características dos agregados miúdos no teor de ar incorporado nos concretos, observa-se que não houve um comportamento nítido quanto aos parâmetros de forma dos grãos e teor de material pulverulento.

Ainda na Tabela 1 pode-se observar que o resultado da resistência à compressão para o concreto de traço 1:3,5 de areia de granito não é coerente com o restante dos resultados. Este valor abaixo do esperado, de 38,9 MPa, ocorreu devido a erros na moldagem dos corpos de prova, que puderam ser observados após a desmoldagem através de falhas na parte inferior de todos os exemplares. Diante disto, para que fosse realizada a curva de dosagem do concreto da areia de granito VSI lavada, plotou-se todos os pontos relativos às resistências obtidas nos demais concretos e seus respectivos valores de relação água/cimento, como pode ser observado na Figura 71. A partir deste gráfico, excluindo-se o ponto espúrio, foi traçada uma nova curva de Abrams, através da linearização dos pontos e posterior recálculo dos coeficientes pertinentes. A partir da nova curva foi obtido um novo valor de resistência à compressão referente à relação água/cimento de 0,38, como pode ser observado na Figura 72.

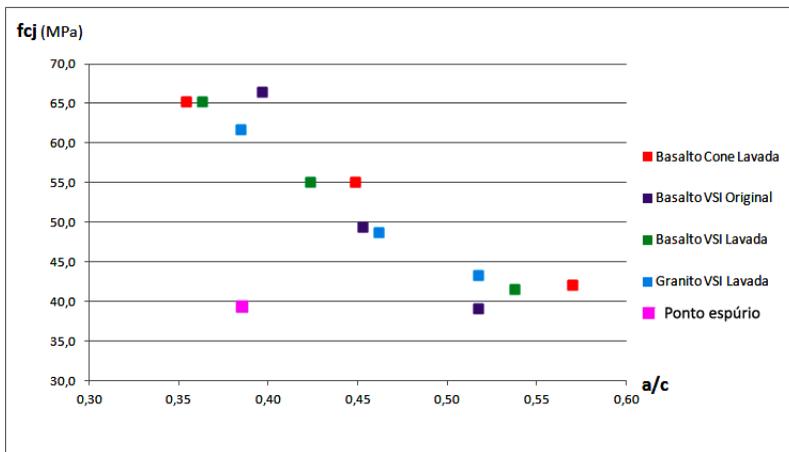


Figura 71 – Pontos relativos às resistências à compressão dos concretos e suas respectivas relações água/cimento

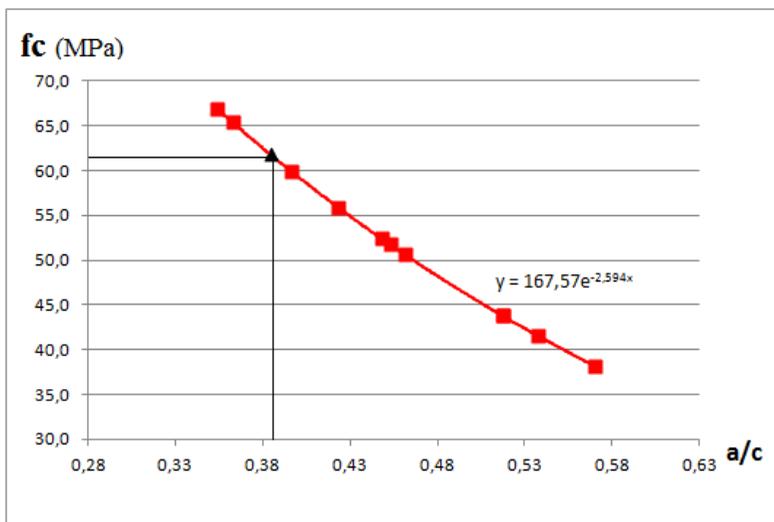


Figura 72 – Curva de Abrams para estimativa de resistência à compressão.

Assim, a curva de dosagem dos concretos de areia de granito foi traçada através do valor estimado de resistência à compressão de 61,8 MPa, para o concreto de m=3,5. As quatro curvas de dosagem são apresentadas na Figura 73.

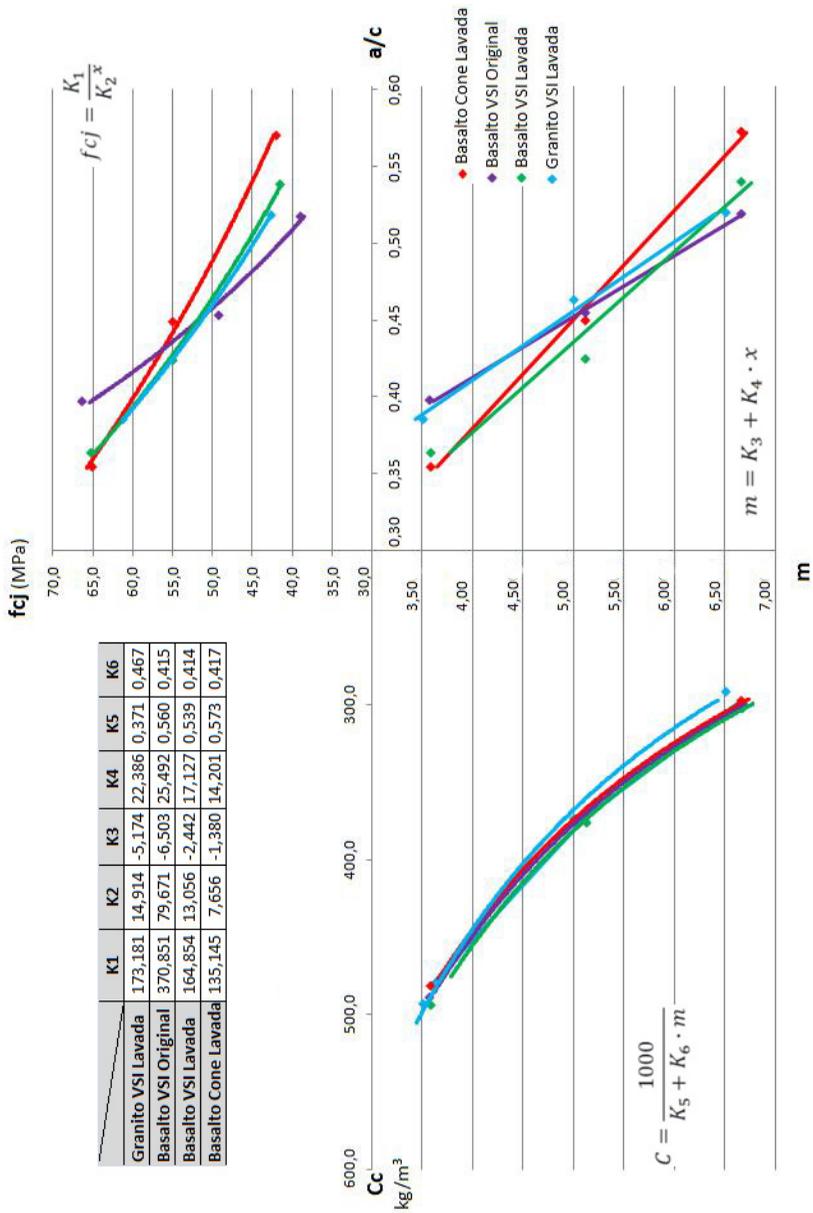


Figura 73 – Curvas de dosagem dos concretos.

Com base nas curvas de dosagem da Figura 73, foram estimados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, para três diferentes relações água/cimento, como pode ser observado na Tabela 42. Foram escolhidas as relações água/cimento de 0,40, 0,45 e 0,50, para abranger o maior intervalo de resultados possíveis, sem que extrapolasse nenhuma curva

Tabela 42– Resistência à compressão (MPa) para relações água/cimento fixas.

Areia de Britagem	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
	Relação água/cimento		
	0,40	0,45	0,50
Granito VSI Lavada	58,8	51,3	44,9
Basalto VSI Original	64,4	51,7	41,5
Basalto VSI Lavada	59,0	51,9	45,6
Basalto Cone Lavada	59,9	54,1	48,9

Apesar de os valores das resistências serem altos, estando bastante acima do f_{ck} 30 almejado muitas vezes em concretos convencionais, conforme pode ser observado na Tabela 42, comparativamente foi possível estabelecer algumas observações. Quando comparados os concretos das areias de britagem de basalto lavadas do VSI e do Cone, as resistências à compressão são levemente maiores para a areia proveniente do britador tipo Cone. No entanto, o esperado seria uma tendência de maior resistência em concretos feitos com areias de grãos mais arredondados, onde arestas e planos de fratura mais frágeis tendem a ser menos frequentes devido à sua eliminação no processo de cominuição. Uma possível explicação para tal comportamento pode estar relacionada à aderência da pasta de cimento aos grãos, que é função da rugosidade da sua superfície e da área específica. Sendo assim, grãos mais arredondados podem não favorecer a resistência à compressão dos concretos por apresentarem menor aderência, pois possuem menor superfície específica e uma superfície menos rugosa devido aos atritos sofridos no processo de britagem.

Com relação ao teor de material pulverulento, para a relação água/cimento mais baixa de 0,40, pode-se notar uma maior resistência no concreto realizado com mais microfinos. Isto deve estar associado a um melhor empacotamento dos grãos, proporcionado pela presença dos microfinos. Este comportamento tende a inverter quando se aumenta a relação água/cimento, quando o efeito do empacotamento se torna menos determinante provavelmente devido à maior disponibilidade de água para a hidratação dos grãos de cimento.

Com base nas curvas de dosagens apresentadas na Figura 73, foram também realizadas simulações de consumo de cimento para os concretos com diferentes areias de britagem. Para isto, determinou-se uma resistência à compressão de 43 MPa, pois esta é a mínima resistência para que não haja extrapolação nas curvas de dosagem, sendo a mais próxima das resistências utilizadas comumente em concreteiras na produção de concretos convencionais. Adicionalmente foram também realizadas simulações nas resistências de 35 MPa e 50 MPa com objetivo de comparar e analisar as tendências do comportamento dos materiais. Vale ressaltar que estas simulações são válidas para as resistências aos 28 dias apresentadas neste estudo, com seus respectivos materiais e para abatimento de 10 ± 1 cm.

A Tabela 43 apresenta os consumos de cimento por metro cúbico de concreto para as resistências de 35 MPa, 43 MPa e 50 MPa, aos 28 dias.

Tabela 43– Consumo de cimento por metro cúbico de concreto, para resistências fixas.

Areia de Britagem	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)		
	Resistência à Compressão (MPa)		
	35	43	50
Granito VSI Lavada	245	300	361
Basalto VSI Original	282	325	368
Basalto VSI Lavada	279	308	352
Basalto Cone Lavada	258	301	345

Conforme pode ser observado na Tabela 43, para uma mesma resistência à compressão, a areia Basalto VSI original foi a que apresentou maior consumo de cimento. Em outras palavras, as areias lavadas, independentemente do tipo de rocha, demandaram menor consumo de cimento para uma mesma resistência. Para a resistência de 43 MPa, a areia Basalto VSI lavada obteve um consumo de cimento 5,5% menor do que a Basalto VSI original.

Ao contrário do esperado, houve redução no consumo de cimento para os concretos produzidos com a areia Basalto Cone, ou seja, com a areia de grãos mais lamelares. Esta redução pode estar relacionada ao ganho de resistência devido à aderência da pasta de cimento aos grãos, como comentado anteriormente. Percebe-se que a diferença nos consumos de cimento é maior para a resistência à compressão de 35 MPa, chegando a uma diferença de 8,1% entre as areias basalto VSI e Cone lavadas. Já para as resistências maiores esta diferença diminui para aproximadamente 2%. Isto indica que talvez haja uma tendência na

qual em concretos de maior resistência, onde o consumo de cimento é maior, a influência da forma dos agregados miúdos de britagem é minimizada. É possível que parte deste comportamento, onde concretos com areias de grãos mais lamelares consomem menos cimento, esteja ligado à aderência da pasta de cimento aos grãos, que é função da rugosidade da sua superfície e da área específica, como mencionado anteriormente.

Com relação à origem mineralógica dos agregados, pode-se observar que existe mudança no consumo de cimento quando se altera a rocha. Comparando-se os consumos dos concretos feitos com as areias de Granito VSI lavada e Basalto VSI lavada se pode ter uma melhor idéia da influência apenas do tipo de rocha, como comentado anteriormente, pois estas duas areias possuem material de pulverulento entre 8% e 10% e possuem coeficientes de forma praticamente iguais de 0,191 para o granito e 0,193 para o basalto. É possível observar, na Tabela 43, que para a resistência mais baixa, onde o consumo de cimento é menor, a diferença entre os consumos é a mais elevada (13,9%). Para a resistência de 43 MPa esta diferença diminui e para a maior resistência este comportamento chega a inverter. Resumidamente, da mesma maneira ocorrida para a influência da forma dos grãos no consumo de cimento, quanto maior a resistência e conseqüentemente maior quantidade de cimento na mistura, a influência do tipo de rocha tende a não ser significativa. No entanto, para resistências usuais mais baixas esta diferença pode ser significativa.

Da mesma forma observada anteriormente nos consumos de água dos concretos, cabe observar a relação entre os resultados do ensaio de Azul de Metileno e os consumos de cimento para dada resistência à compressão, tendo em vista as características físicas semelhantes das areias de britagem de granito e basalto, ambas do VSI e lavadas. Uma possível influência da qualidade do material pulverulento pode estar ligada ao maior consumo de cimento obtido para o basalto para a resistência de 35 MPa, sendo o valor de azul de metileno do basalto VSI lavado igual a 7, e o valor do azul de metileno do granito VSI original igual ou menor a 1,75. Cabe lembrar que não foi possível realizar o ensaio de azul de metileno para a areia Granito VSI lavada, mas considerando que a tendência é um maior valor para areias não lavadas, é possível assumir que o valor do azul de metileno é igual ou menor do que o obtido para a mesma areia não lavada.

Cabe aqui ressaltar que o comportamento da areia de basalto Cone lavada, que possui grãos mais lamelares, foi o contrário do esperado quanto ao consumo de cimento por metro cúbico de concreto

para dadas resistências, principalmente para resistências mais baixas. Como já comentado, a única explicação plausível encontrada aqui, pode estar relacionada à aderência da pasta de cimento aos grãos dos agregados, onde grãos mais arredondados podem não favorecer a resistência à compressão dos concretos por apresentarem menor aderência, pois possuem menor superfície específica e uma superfície menos rugosa devido aos atritos sofridos no processo de britagem.

No entanto, é preciso ponderar que, com relação ao consumo de água por metro cúbico de concreto das areias lavadas basalto VSI e Cone, com exceção do concreto mais rico em cimento, foi possível perceber um menor consumo naqueles concretos com agregados de grãos mais arredondados, provenientes do VSI.

Diante desta coerência nos consumos de água, é necessário considerar que possa ter ocorrido algum erro na execução do ensaio, no que diz respeito à moldagem ou rompimento dos corpos de prova, pois as análises de consumo de cimento são feitas com base nas curvas de dosagem, onde erros nos valores de resistência afetam diretamente o consumo de cimento. Assim sendo, fez-se uma nova análise com base em uma única curva de Abrams para todos os concretos, considerando todos os resultados, como feito anteriormente para estimativa de uma resistência (Figura 71 e Figura 72). Como o valor do coeficiente de determinação R^2 desta curva foi satisfatório, não foi necessário excluir nenhum ponto eventualmente espúrio. Como resultado obteve-se as curvas de dosagens da Figura 74, onde a curva de Abrams é única para todos os concretos.

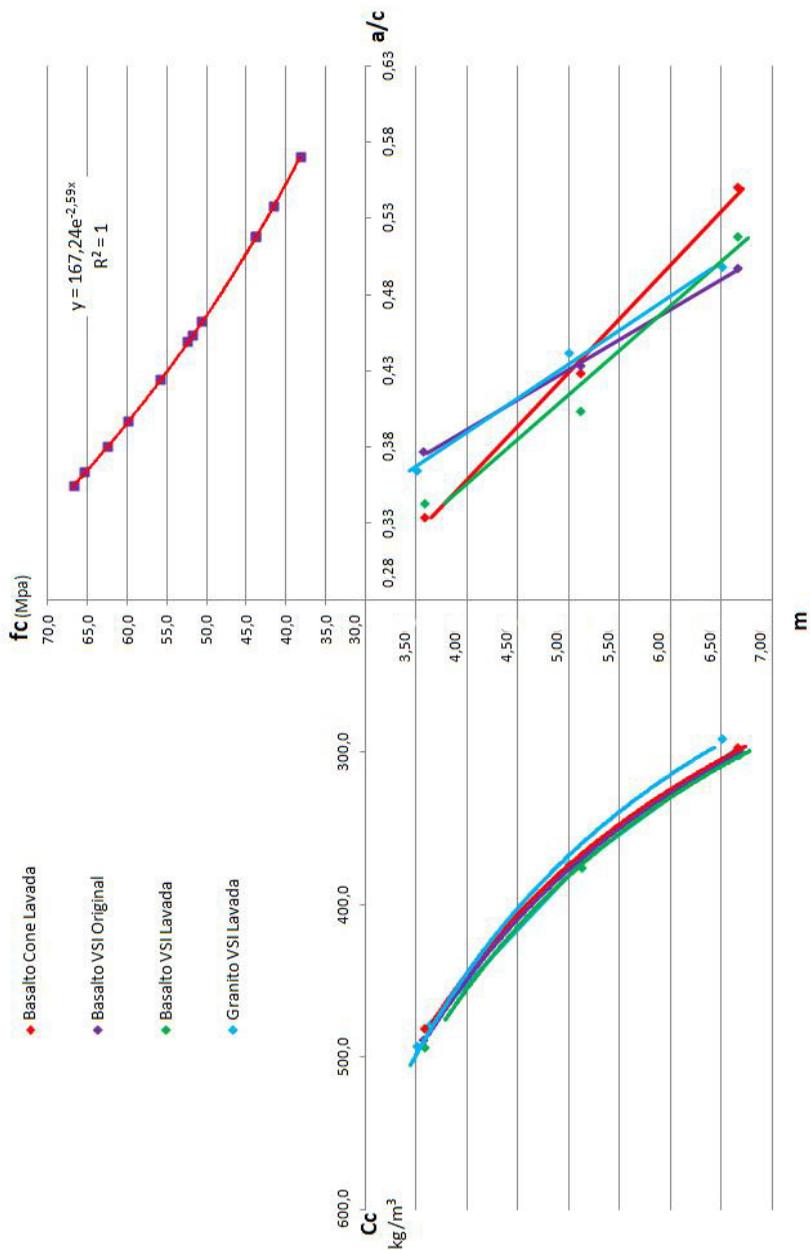


Figura 74 – Curvas de dosagem com uma única curva de Abrams estimada através de todos os resultados.

Com base nas curvas da Figura 74 obtiveram-se os resultados de consumo de cimento por metro cúbico de concreto apresentados na Tabela 44.

Tabela 44– Novos consumos de cimento por metro cúbico de concreto, para resistências fixas.

Areia de Britagem	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)			
	fc 35	fc 43	fc 50	fc 60
Granito VSI Lavada	238	292	353	478
Basalto VSI Original	240	295	356	489
Basalto VSI Lavada	264	308	351	426
Basalto Cone Lavada	285	322	361	426

Diante dos resultados, é possível observar que o comportamento dos concretos com areias de britagem de basalto lavadas, provenientes do VSI e do Cone, inverteu-se de modo que os concretos com areia de grãos lamelares demandaram um maior consumo de cimento por metro cúbico de concreto, para os valores de f_c de 35 MPa, 43 MPa e 50 MPa. Como já observado anteriormente nos resultados da Tabela 43, na medida em que crescem as resistências, a diferença entre comportamentos devido à forma dos grãos diminui, chegando a zero para a resistência de 50 MPa. Assim fica clara a tendência na qual em concretos de maior resistência, onde o consumo de cimento é maior, a influência da forma dos agregados miúdos de britagem é minimizada. Isto se deve, provavelmente, ao papel dos microfios na lubrificação da mistura, diminuindo o atrito interno entre os grãos, auxiliando assim na trabalhabilidade. Ou seja, em concretos com alto teor de cimento existem microfios o suficiente para envolver os grãos mais lamelares e “lubrificar” a mistura, de tal modo que o efeito da forma deixa de ser predominante.

Quanto à influência da forma dos grãos nos consumos de cimento para uma mesma resistência, foi possível concluir que um erro na moldagem ou rompimento dos corpos de prova pode ter levado ao comportamento atípico demonstrado anteriormente, sendo os resultados da Tabela 44 mais coerentes, onde uma areia de grãos mais lamelares tende a aumentar o consumo de cimento por metro cúbico de concreto.

Quanto à influência do teor de material pulverulento, quando comparados os concretos com areia de basalto VSI lavada e original, pode-se perceber que o consumo de cimento para a areia com maior teor de material pulverulento foi 10% menor para a resistência de 35 MPa e apenas 4,4% menor para 43 MPa. Este comportamento inverte na

medida em que se aumenta a resistência, onde o concreto com areia original passa a consumir mais cimento, chegando a um consumo de 14,8% maior do que aquele para a areia lavada. Esta mesma tendência foi observada nos consumos de água por metro cúbico de concreto, onde para concretos com menor quantidade de cimento, as areias não lavadas apresentaram um menor consumo de água.

Assim, da mesma maneira, este comportamento pode ser explicado, pois um concreto de maior resistência e conseqüentemente maior quantidade de cimento, já possui material fino suficiente, e os microfinos provenientes do agregado miúdo podem vir a ser excessivos, necessitando de maior quantidade de água e cimento. Já nos concretos com menor quantidade de cimento, os finos dos agregados não “competem” com o cimento e auxiliam na coesão e trabalhabilidade do concreto, levando também a um melhor empacotamento dos grãos (efeito fíler).

Com tudo o que foi exposto neste item, é importante que se faça uma análise do ponto de vista econômico. Assim, analisar-se-á aqui influência do teor de material pulverulento e da forma dos grãos, pois, como pôde ser observado, a simples substituição de uma areia de britagem com grãos lamelares ou alto teor de material pulverulento, por outra com um teor controlado e grãos mais arredondados, pode trazer benefícios econômicos. É importante lembrar que existem outros fatores que podem trazer benefícios, tais como adequação do teor de areia natural na composição e o tipo de rocha.

Com relação à forma dos grãos, considerando as areias lavadas de basalto VSI e Cone para a resistência de 35 MPa, a diferença entre os consumos de cimento é de 21 kg ou 8%. Adotar-se-á um exemplo de central dosadora de concreto onde o fornecimento é de 8 mil metros cúbicos de concreto por mês, que consome cerca 2520 toneladas de cimento por mês, com base em dados atuais referentes a concreteira de porte médio de Florianópolis. O cimento utilizado é o CP IV-RS, o mesmo empregado em todas as etapas deste trabalho, com um preço de aproximadamente R\$ 345 por tonelada de cimento.

Desse modo, a diferença na forma dos agregados poderia representar uma economia de aproximadamente R\$ 70.000,00 mensais em consumo de cimento. Do ponto de vista dos produtores de agregados, a inserção de um britador tipo VSI na sua produção viabiliza a produção de uma areia de qualidade a partir do pó-de-pedra, valorizando e aumentando sua venda, além de evitar que haja desperdício com sobra de materiais, evitando também problemas ambientais.

Com relação ao teor de material pulverulento, os resultados indicam que o teor ideal irá depender da quantidade de cimento presente no concreto. Nos resultados aqui obtidos, para resistências em torno de 35 MPa, areias lavadas não trariam nenhum benefício econômico, pelo contrário, aumentariam o consumo de cimento. Do ponto de vista das pedreiras, submeter areias de britagem ao processo de lavagem só seria vantajoso para concretos de maiores resistências. Cabe aqui observar que o material pulverulento das areias foi retirado através de um único processo no qual, de acordo com os ensaios de granulometria a laser, foi eliminada a fração mais fina do material pulverulento. Assim sendo, não se pode descartar a possibilidade desta fração mais fina, retirada ao lavar, possuir algum efeito semelhante ao da microssilica que, quando presente, pode vir a auxiliar na resistência dos concretos.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, outra limitação na conclusão do teor de material pulverulento ideal seria o fato dos concretos serem avaliados por meio do ensaio do abatimento do tronco de cone, onde além de influências do operador, podem estar presentes outros equívocos na avaliação. Especificamente, por meio do ensaio do abatimento do tronco de cone é possível avaliar o abatimento do concreto em cm e sua aparência logo que retirado o cone. No entanto, o concreto precisa ter trabalhabilidade e coesão suficiente para que possa ser bombeado e vibrado no seu destino, o que não fica claro no abatimento do tronco de cone. Diante disto, é possível que concretos com pouca quantidade de microfinos aparentem coesos na retirada do tronco de cone, mas não coesos o suficiente para serem bombeados e vibrados sem que haja segregação.

Logo, hipóteses precisam ser levantadas e estudadas antes de afirmar se é ou não vantajoso obter areias com baixo teor de material pulverulento para o uso em concretos.

4.3.4. Correlações entre Concretos e Argamassas

O objetivo desta etapa foi encontrar correlações entre os resultados dos ensaios em argamassas e os concretos realizados, provando assim a viabilidade de otimizar estudos em concretos, através de uma pré-seleção dos agregados miúdos de melhor desempenho em argamassas.

De acordo com a Tabela 1, pode-se observar que, de maneira geral, os consumos de água nos concretos foram relativamente baixos, resultando em resistências bem acima da usualmente almejada na produção de concretos convencionais, principalmente nos traços mais

ricos (1;3,5 e 1:5). Isto pode ter ocorrido devido ao alto teor de aditivo utilizado, que melhorou muito o desempenho dos concretos, levando a consumos de água mais baixos do que o esperado. Diante disso, vale ressaltar que um menor teor de aditivo poderia ter sido mais vantajoso para que a influência dos agregados no concreto fosse mais visível. Assim sendo, optou-se por comparar os concretos de traço 1:6,5, pois estes apresentaram características mais de acordo com aquelas almeçadas inicialmente e também utilizadas na prática, para que se atinja concretos bombeáveis de f_{ck} de 30,0 MPa, como comentado no Item 3.4.5.

Para facilitar a análise comparativa entre os resultados dos ensaios em argamassa e concreto, na Tabela 45 é possível observar um resumo dos resultados pertinentes.

Tabela 45– Resumo dos resultados dos ensaios em argamassas e concretos.

Areia de britagem		Argamassa	Concreto			
	MF*	Flow/MF	α	Traço	a/c	Ca (kg/m ³)
Granito VSI Lavada	2,67	101,90	53%	1:6,5	0,52	151,0
Basalto VSI Original	2,78	99,60	50%	1:6,5	0,52	155,7
Basalto VSI Lavada	2,92	4,50	52%	1:6,5	0,54	162,9
Basalto Cone Lavada	2,91	92,8	51%	1:6,5	0,57	169,6

*MF: módulo de finura da composição de agregados miúdos (70% de areia de britagem + 30% de areia natural).

A Figura 75 apresenta a relação entre o consumo de água por metro cúbico de concreto ($m=6,5$) e o flow 0 da mistura dos agregados correspondentes, medido nos ensaios de argamassa. Já a Figura 76 apresenta a relação entre o consumo de água por metro cúbico de concreto ($m=6,5$) e o Índice de Fluidez das argamassas correspondentes. A Figura 75 demonstra que praticamente não houve correlação entre o consumo de água e apenas o flow 0 das argamassas. Por outro lado, quando relacionados os consumos de água e o Índice de Fluidez, que nada mais é do que o *flow 0* dividido pelo módulo de finura da composição de agregados, obteve-se uma boa correlação ($R^2=0,9679$), como pode ser observado na Figura 76. A melhora nesta correlação indica que é importante considerar o módulo de finura da composição dos agregados miúdos, pois o resultado do flow por si só desconsidera a

granulometria, a qual atua diretamente no comportamento das argamassas.

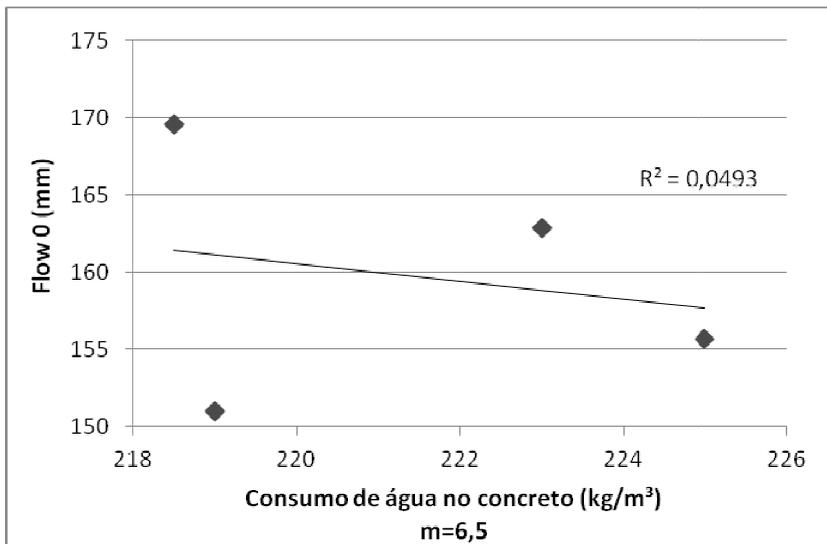


Figura 75 - Relação entre o consumo de água por metro cúbico dos concretos de m=6,5 e os resultados dos espalhamentos (flow 0) das argamassas correspondentes, com os mesmos agregados miúdos.

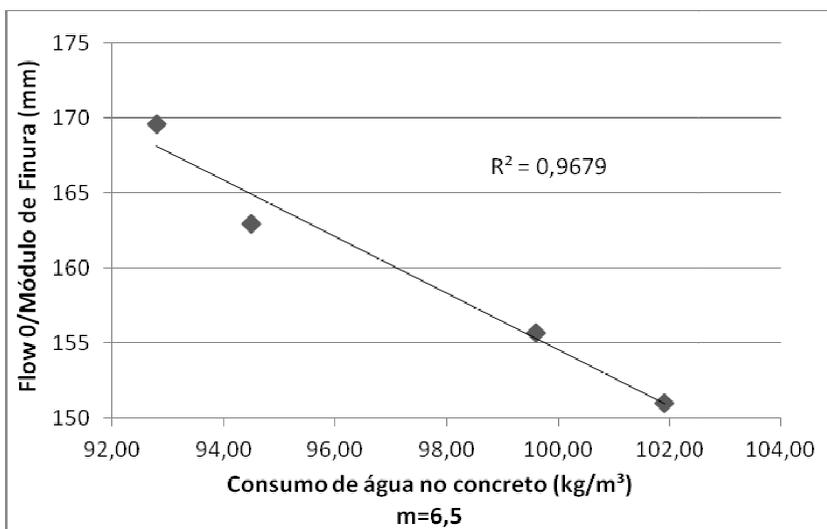


Figura 76 – Relação entre o consumo de água por metro cúbico dos

concretos de $m=6,5$ e o Índice de Fluidez das argamassas correspondentes, com os mesmos agregados miúdos.

Da mesma maneira, como pode ser visto na Figura 77, obteve-se uma boa correlação entre a relação água/cimento dos concretos ($m=6,5$) e o Índice de Fluidez das argamassas correspondentes.

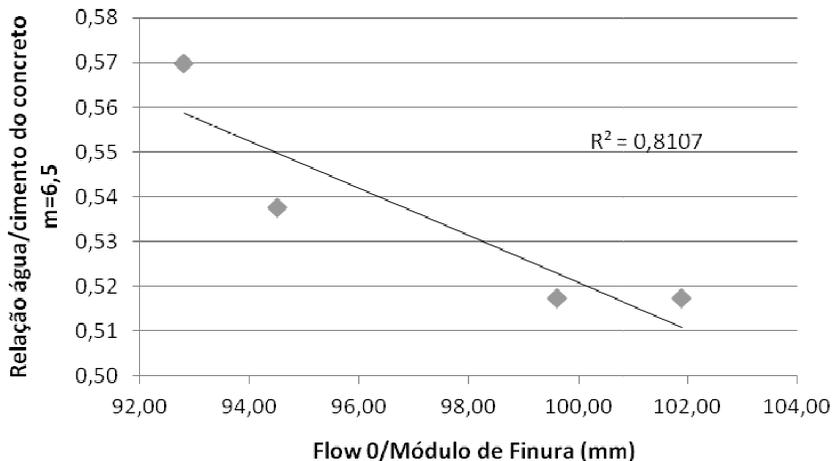


Figura 77 - Relação entre as relações água/cimento dos concretos de $m=6,5$ e os resultados dos Índices de Fluidez (flow/MF) das argamassas correspondentes, com os mesmos agregados miúdos.

Com estas correlações não se pretende prever de forma direta o comportamento de concretos com base em argamassas. Contudo, é possível estabelecer quais composições de agregados tendem a dar melhores resultados em concretos, facilitando assim o estudo experimental, através de pré-seleções. Com isto possibilita-se também uma análise muito mais abrangente, pois os ensaios em argamassa são mais dinâmicos, demandando menos tempo e material.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nesta dissertação, é possível compor algumas conclusões com relação à influência de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland.

Os ensaios de caracterização dos agregados indicaram, para os quatro tipos de rocha, curvas granulométricas semelhantes para agregados obtidos através dos dois tipos de britadores, VSI e Cone. Entretanto, a forma dos agregados foi significativamente afetada pelo tipo do britador. Os ensaios de forma apontaram que as areias de britagem provenientes de britadores tipo VSI possuem uma forma mais equidimensional quando comparadas àquelas provenientes de britadores tipo cone, independentemente do tipo da rocha. Todavia, algumas rochas apresentaram melhoras mais significativas do que outras. Os grãos da areia de basalto foram aqueles que apresentaram maior diferença entre os coeficientes de forma médios do VSI e do cone, seguidos pelos de granito, gnaisse e calcário. É importante destacar que a forma resultante do processo de britagem pode depender não apenas do tipo da rocha e do tipo do britador, mas também das características nas quais cada britador está operando. Entretanto, ainda é possível concluir que certas rochas tendem a apresentar maiores vantagens quando obtidas através de britadores tipo VSI, quando comparadas a outras que podem não apresentar mudança tão significativa.

Quanto ao teor de material pulverulento, não foi possível observar nenhuma tendência com a mudança do tipo do britador, para cada tipo de rocha, pois este parâmetro depende de outras variáveis, como características dos equipamentos e modos de operação.

Nos ensaios de granulometria a laser, de maneira geral, todas as areias de britagem apresentaram uma distribuição granulométrica menos fina do material pulverulento depois de submetidas ao processo de lavagem, indicando a tendência deste processo de eliminar a fração mais fina do material abaixo de 75 μm . Observou-se também que, com exceção da areia de britagem de gnaisse, que apresentou curvas semelhantes, todas as outras apresentaram um material pulverulento mais fino quando produzidas por britadores tipo Cone, quando comparadas àquelas produzidas por VSIs.

Foi possível perceber uma forte relação entre os resultados do Azul de Metileno e da granulometria a laser. As areias de calcário Cone original e VSI original apresentam valores de azul de metileno mais

altos do que o restante, podendo ser uma indicação de uma maior superfície específica ou da presença de uma pequena quantidade de argilo-minerais. O ensaio de granulometria a laser mostra que estes materiais possuem, de fato, uma maior quantidade de partículas pequenas, quando comparados com o restante. Isto indica uma maior superfície específica e, portanto, justifica os maiores valores obtidos no ensaio.

A relação entre os resultados de Azul de Metileno e granulometria a laser também é observada entre as areias lavadas e originais. Com exceção da areia de granito Cone, todas as outras apresentam um menor valor de Azul de Metileno após serem submetidas ao processo de lavagem. Da mesma maneira, de acordo com a granulometria a laser, o processo de lavagem aplicado nas areias acabou eliminando as partículas menores do material pulverulento. Por outro lado, vale destacar que as areias de basalto, apesar de apresentarem uma distribuição granulométrica do material pulverulento com partículas não tão pequenas quanto as das outras areias, apresentaram os mais altos valores do Azul de Metileno, podendo indicar a presença de argilo-minerais em sua composição. Isto fundamenta o princípio do ensaio, no qual o valor do Azul de Metileno pode não depender apenas da superfície específica, mas também da presença de argilo-minerais.

Quanto aos ensaios em argamassa, ficou claro que tanto o fator forma quanto o teor de pulverulento influenciaram significativamente no desempenho das argamassas dos quatro tipos de rocha. Logo, a combinação de grãos mais arredondados e um menor teor de material pulverulento resultou em melhores desempenhos, com menor quantidade de areia natural.

Contudo, pôde-se perceber que, de maneira geral, com um controle no material pulverulento, mesmo com uma forma de grão mais lamelar, é possível atingir resultados relativamente satisfatórios, com a adição de areia natural. Os resultados indicaram que mesmo com uma forma mais arredondada, se não controlado o teor de material pulverulento, a fluidez pode não ser satisfatória, tendo em vista que, para todas as rochas, o desempenho das areias Cone lavadas é superior àquele das areias VSI originais.

Quanto ao teor de areia natural na composição, a combinação de 30% de areia natural e 70% de areia de britagem parece, de maneira geral, ter sido a mais vantajosa pois, a partir desse ponto, as argamassas tendem a não apresentar grande melhora na sua fluidez.

Quanto aos valores de resistência à compressão das argamassas, observou-se uma tendência dos valores das argamassas de calcário

serem relativamente mais baixos com relação às outras rochas. Esta tendência foi comprovada através de comparação múltipla de médias onde, com 95% de confiabilidade, areia de calcário apresentou resistências mais baixas que as outras. Já as argamassas de areia de basalto apresentaram a média mais alta. Apenas as médias das areias de gnaiss e granito não diferiram entre si.

É preciso salientar que não se pretende afirmar que qualquer calcário irá provocar resistências mais baixas ou que qualquer basalto provocará maiores resistências, assim como melhor ou pior forma diante dos processo de cominuição. O objetivo é mostrar que podem existir diferenças significativas entre agregados de diferentes origens e até mesmo tendências que precisam ser analisadas com cautela.

Diante dos resultados dos ensaios em argamassas foi possível observar que existe uma tendência clara onde na medida em que o Índice de Fluidiez aumenta, os valores do Azul de Metileno se tornam menores. Através dos resultados das argamassas com 100% de areia de britagem, comprovou-se que, com 95% de confiabilidade, existe relação entre os valores dos dois ensaios nas rochas de gnaiss, granito e calcário. Não foi possível comprovar a relação das variáveis no basalto, onde já se havia comentado que os valores do azul de metileno não eram correspondentes aos resultados da granulometria a laser dos microfinos. No entanto, cabe observar que o maior valor de azul de metileno para o basalto correspondeu ao menor Índice de Fluidiez, obtido pela areia Basalto VSI original. As areias lavadas apresentaram menor valor de azul de metileno, onde parte da fração mais fina e/ou argilo-minerais pode ter sido retirada no processo de lavagem, resultando em maior espalhamento.

Quanto às composições realizadas com 70% e 85% de areia do VSI e 30% e 15% de areia do Cone, respectivamente, de maneira geral, quanto menor o teor de areia natural a ser adicionada às areias de britagem, maior o efeito prejudicial da presença de areias do Cone em areias apenas do VSI. Em outras palavras, na proporção estudada, a inclusão de grãos lamelares em uma areia de britagem de grãos arredondados, pode vir a afetar o desempenho. Porém é um prejuízo que pode, dependendo das características da areia, ser prontamente compensado com substituições parciais de areia natural.

Quanto à análise em argamassa da redução de 50% do retido na peneira de 1,2 mm, não foi possível concluir, de maneira geral, se há mudanças significativas ao diminuir o teor de material retido na peneira de 1,2 mm, pois não pôde ser observada nenhuma tendência no comportamento das argamassas.

Da mesma maneira, quanto à análise em argamassa da influência da forma do material abaixo da peneira de 0,3 mm, não foi possível observar uma tendência clara. Considerando os resultados de granulometria a laser, coerentes com os resultados de azul de metileno, onde as areias provenientes dos britadores tipo Cone apresentaram uma granulometria da fração abaixo da peneira 1,2 mm consideravelmente mais fina, esperava-se uma influência evidente no comportamento das argamassas.

Quanto aos estudos em concretos, foi possível observar que as misturas com areias de britagem de areia de grãos lamelares, provenientes do Cone, demandaram um maior consumo de cimento por metro cúbico de concreto, para resistências de até aproximadamente 40 MPa. Na medida em que cresceram as resistências, a diferença entre comportamentos devido à forma dos grãos diminuiu, chegando a zero para a resistência de 50 MPa. Assim sendo, observou-se a tendência na qual em concretos de maior resistência, onde o consumo de cimento é maior, a influência da forma dos agregados miúdos de britagem é minimizada. Isto se deve, provavelmente, ao papel dos microfinos na lubrificação da mistura, diminuindo o atrito interno entre os grãos, auxiliando assim na trabalhabilidade. Ou seja, em concretos com alto teor de cimento existem microfinos o suficiente para envolver os grãos mais lamelares e “lubrificar” a mistura, de tal modo que o efeito da forma deixa de ser predominante.

Quanto à influência do teor de material pulverulento, os resultados indicam que o teor ideal irá depender da quantidade de cimento presente no concreto, dependendo assim da resistência almejada. Pôde-se perceber que para concretos com baixo consumo de cimento, um maior teor de material pulverulento pode beneficiar o desempenho de concretos, diminuindo o consumo de cimento por metro cúbico, auxiliando na sua coesão e trabalhabilidade. Entretanto, para concretos de resistências mais altas, onde o consumo de cimento é maior, um excesso de material pulverulento torna-se prejudicial, demandando mais água e mais cimento para uma mesma trabalhabilidade.

Esta mesma tendência foi observada nos consumos de água por metro cúbico de concreto onde, para concretos com menor quantidade de cimento, as areias não lavadas apresentaram um menor consumo de água. Sendo assim, em concretos mais ricos em cimento, a importância de se diminuir o teor de material pulverulento tende a ser mais evidente.

Assim sendo, cabe observar que, apesar de nos estudos em argamassas ter havido uma tendência de melhor desempenho quando

lavada (em relação à influência da forma), na prática, em concretos mais pobres, onde o material fino não é tanto, pode haver problemas na trabalhabilidade e coesão dos concretos. Com isso, tendo em vista que o traço empregado nas argamassas foi extremamente rico em cimento, é pertinente sugerir que um estudo com argamassas mais pobres e com menor teor de aditivo se faça necessário, para melhor compreensão da influência destas características em argamassas e concretos.

Com relação à origem mineralógica dos agregados, pôde-se observar que houve mudança no consumo de cimento quando se alterou a rocha. Comparando os consumos dos concretos feitos com as areias de Granito VSI lavada e Basalto VSI lavada se pôde ter uma melhor idéia da influência apenas do tipo de rocha, onde percebeu-se que, da mesma maneira ocorrida para a influência da forma dos grãos no consumo de cimento, quanto maior a resistência e conseqüentemente maior quantidade de cimento na mistura, a influência do tipo de rocha tende a não ser significativa. No entanto, para resistências usuais mais baixas esta diferença pode ser significativa.

Com base nos resultados dos ensaios em argamassa e concreto, foi possível observar uma correlação significativa entre o Índice de Fluidez das argamassas e o consumo de água nos concretos. É importante salientar que, com estas correlações, não se pretende prever de forma direta o comportamento de concretos com base em argamassas. Contudo, é possível estabelecer quais composições de agregados tendem a dar melhores resultados em concretos.

Diante de todas as considerações apresentadas, torna-se clara a importância de cada característica dos agregados miúdos, pois estes exercem direta influência nas propriedades dos concretos, em função da resistência, aplicação ou trabalhabilidade almejada. Do ponto de vista econômico e tendo em vista a crescente importância da sustentabilidade, foi possível observar que, entendendo-se o papel dos agregados miúdos, torna-se possível otimizar sua aplicação em concretos, sem o desperdício de materiais nas pedreiras, com economia e diminuição nos consumos de cimento.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados e conclusões, torna-se possível tecer algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Com o diferente comportamento dos concretos de acordo com seu consumo de cimento diante das características dos

agregados miúdos, sugere-se a realização de argamassas com diferentes traços (mais ricos e mais pobres em cimento);

- Realização de maior quantidade de ensaios de Azul de Metileno, com o objetivo de melhor entender sua relação com o comportamento de concretos e argamassas. Ensaios petrográficos também poderiam complementar o estudo;
- Analisar areias de britagem provenientes de diferentes processos para supressão do material pulverulento, como aeroseparadores e rodas desaguadoras;
- Analisar a viabilidade de algum outro tipo de ensaio adicional ao abatimento do tronco de cone para avaliação da trabalhabilidade e coesão dos concretos no estado fresco.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO TP57-99. **Standard Test Method for Methylene Blue Value of Clays Mineral Fillers, and Fines.** AASHTO Standards. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2000.

AHN, N. **An Experimental Study on the Guidelines for Using Higher Contents of Aggregate Micro Fines in Portland Cement Concrete.** Dissertação Ph.D. The University of Texas at Austin, 2000.

AHN, N.; PHELAN, T.; FOWLER, D.W.; HUDSON, B. **The Effects of High Fines on the Properties of Cement Mortar and Concrete.** International Center for Aggregates Research (ICAR). 9th Annual Symposium Research Papers, 2001.

ALLIS MINERAL SYSTEMS. **Curso de Britagem.** 1ª Edição. São Paulo, 1997.

ALLIS MINERAL SYSTEMS. **Manual de Britagem Faço.** 5ª Edição. São Paulo, 1994.

ALMEIDA, S.L.M. e SAMPAIO, J.A. **Obtenção de Areia Artificial com Base em Finos de Pedreiras.** Ed. Areia e Pedra, n.20, p.32-36, São Paulo, 2002.

ALMEIDA, S.L.M.; SILVA, V.S. **Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM C 33:** Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, 2003.

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

_____. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

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

_____. **NBR 7251:** Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7389:** Apreciação petrográfica de materiais naturais para utilização como agregados em concreto. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **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 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 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 49:** Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

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

BARBER-GREENE. **Manual de pavimentação betuminosa.** 1ª Edição. São Paulo, 1986.

BARBER-GREENE. **Manual Telsmith para processamento de Minérios e Agregados.** 1ª Revisão. São Paulo, 1982.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 2ª Edição. Rio de Janeiro, 1985.

BEKIR, I.; DEMIR, A. **Relationship between methylene blue values of concrete aggregate fines and some concrete properties.** Canadian Journal of Civil Engineer, Vol. 35, pp. 379-383. 2008.

BUEST NETO, B.T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland.** Dissertação. Universidade Federal do Paraná, 2006.

CCAA, CEMENT & CONCRETE AGGREGATES AUSTRALIA. **Manufactured Sand,**

National test methods and specification values. Research Report. Austrália, 2007.

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

CELIK, T.; MARAR, K. **Effects of crushed stone dust on some properties of concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 26. 1996.

CHIAPPONE, A.; MARELLO, S.; SCAVIA, C.; SETTI, M. **Clay mineral characterization through the methylene blue test: comparison with other experimental techniques and applications of the method.** Canadian Journal of Geotechnology, J. 41, pp. 1168-1178. 2004.

CUNHA, E.R.; TAVARES, L.M.M.; GONÇALVES, J.P.; TOLEDO FILHO, R.D.; ALMEIDA, S.L.M. **Produção de areia manufaturada em usina piloto.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

DRAGO, Cristina; VERNEY, José Carlos Krause de; PEREIRA, Fernanda Macedo. **Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland.** Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, Sept. 2009. Disponível em: www.scielo.br

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, **Anuário Mineral Brasileiro**, v.30, 404 p. Brasília, 2001.

FRASCÁ, M.H.B.O.; SARTORI, P. L. P. **Minerais e Rochas.** In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A., eds. Geologia de engenharia. São Paulo, ABGE, 1998. Cap. 2, p.15-38.

FRASCÁ, M.H.B.O. **Rocha como Material de Construção.** In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712p.

FRAZÃO, E.B. **Panorama da produção e aproveitamento de agregados para construção.** In: Programa de Capacitação de Gestores

de Empresas Mineradoras de Agregados para a Construção Civil, 2005. Disponível em: www.cetec.br

FRAZÃO, E.B.; PARAGUASSU, A.B. **Materiais rochosos para construção.** In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A., eds. Geologia de engenharia. São Paulo, ABGE, 1998. Cap. 20, p.331-342.

GOLDSWORTHY S. **Manufactured sands in portland cement concrete – the New Zealand experience.** International Center for Aggregates Research (ICAR). 13th Annual Symposium Research Papers, 2005.

GONÇALVES J.P.; TAVARES L.M.; TOLEDO FILHO R.D; FAIRBAIRN E.M.R; CUNHA E.R. **Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars.** Cement and Concrete Research, Vol. 37. 2007.

GUIMARÃES, A. T. C. **Propriedades do concreto fresco.** In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. 1600p.

HELENE, P.R.L. **Dosagem dos Concretos de Cimento Portland.** In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. 1600p.

HELENE, P.R.L; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland.** In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712p.

HERRMANN, C. **Manual de Perfuração de Rocha.** 1ª Edição. São Paulo, 1968.

ISSA - International Slurry Seal Association. **Test Method for Determination of Methylene Blue Absorption Value (MBV) of Mineral Aggregate Fillers and Fines.** *ISSA Bulletin 145.* 1989.

KANDHAL, P.; PARKER, F. **Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements.** *NCHRP 405,* Transportation Research Board. Washington, D.C, 1998.

KANDHAL, P.S.; LYNN, C.Y.; PARKER, F. **Tests for Plastic Fines in Aggregates Related to Stripping in Asphalt Paving Mixtures.** *NCAT Report No. 98-3.* Auburn, Alabama, 1998.

KOSMATKA, S.W.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W.C. **Design and Control of Concrete Mixtures**, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.

KWAN, A.K.H.; MORA, C.F.; CHAN, H.C. **Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing**. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1403-1410. 1999.

KWAN, A.K.H.; MORA, C.F.; CHAN, H.C. **Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles**. Cement and Concrete Research, Vol. 53, pp. 91- 100. 2001.

LEGISLAÇÃO AMBIENTAL APLICADA À MINERAÇÃO. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/>.

LCPC- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Publication, mai 2000.

LIMA, R.C.; ALMEIDA, S.L.M. **Areia Artificial: uma alternativa para uso em construção civil**. In: XIII Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Anais.

LODI, V.H. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó-SC**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

MARTINS, V. C.; **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos**. Florianópolis, 2005. 186p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e materiais**. Ibracon, 3ed, São Paulo: 2008.

MENOSSEI, R.T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. Dissertação. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2004.

METSO MINERALS. **Brochure N° 1123-05-04-CSR**. Matamata (New Zealand), 2004.

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

MORA, C.F.; KWAN, A.K.H. **Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing.** Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 351-358. 2000.

MINDESS, S. **Concrete constituent materials.** In: Nawy, E. G. Concrete Construction Engineering Handbook, 2nd edition. New Jersey, 2008, Ch. 1, pp.14-26.

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

NORDBERG PROCESS MACHINERY. Reference Manual. 2^a Ed. USA, 1983.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

PETTINGELL, H. **An effective dry sand manufacturing process from Japan potencial to replace natural sand entirely in concrete.** Quarry Management Magazine. United Kingdom, June 2008.

POPP, J. H. **Geologia Geral.** 5^aEdição. São Paulo, 1998.

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.

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.

REIS, M. **Um estudo da influência da granulometria dos agregados no desempenho do microrrevestimento asfáltico a frio quanto ao deslocamento lateral e vertical.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2005.

RICHARDSON, D. N. **Quick Test for Percent of Deleterious Material.** Report No. RI07-052. Missouri University of Science and Technology & Missouri Department of Transportation Organizational Results. Missouri, 2009.

SANTAMARINA, J.C.; KLEIN, K.A.; WANG, Y.H.; PRENCKE, E. **Specific surface: determination and relevance.** Canadian Journal of Civil Engineer, Vol. 39, pp. 233-241. 2002.

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 para concreto.** In: ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. V.1, p.323-343.

SELEEM, H.E.H.; EI-HEFNAWY, A. **Evaluating the Effects of Gravel Fine Impurities on Concrete Performance.** Journal of Engineering and Applied Science, Vol. 50, No. 6, pp. 1073-1089. 2003.

STEWART, J.; NOVELL, J.; JUENGER, M.; FOWLER, D.W. **Characterizing Minus No. 200 Fine Aggregate for Performance in Concrete.** Report No. 107. International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin. 2006.

WEIDMANN, D. F.; OLIVEIRA, A. L.; PRUDÊNCIO JR., L. R. **Emprego de pó-de-pedra na produção de agregado miúdo para concreto dosado em central – Estudo de caso.** In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Fortaleza, 2009.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.

WEIDMANN, D.F. **Contribuição para determinação de metodologia de avaliação da forma de agregados e análise da influência desta propriedade em argamassas.** Trabalho e Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.

YOOL, A.I.G; LEES, T.P.; FRIED, A. **Improvements to the methylene blue dye test for harmful clay in aggregates for concrete and mortar.** Cement and Concrete Research, Vol. 28, Nº 10, pp. 1417-1428. 1998.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO: ABERTURA DE PEDREIRAS

- **Abertura de Pedreiras**

A abertura de novas pedreiras acontece em locais onde o mercado permite, ou por ocasião de obras de volume significativo, como barragens e pavimentação de rodovias, como forma de diminuir os custos de transporte e de produção.

Escolhido o local, procede-se a sondagem rotativa, em número de furos necessários conforme o volume de rocha necessário, normalmente superior a cinco. Com o material recolhido se analisa a aparência visual da rocha, e com a britagem em laboratório dos testemunhos se procedem os ensaios de Abrasão Los Angeles, Sanidade, Absorção, Densidade e Análise Petrográfica.

- **Legislação Minerária**

Os direitos minerais no Brasil são regidos pelo Código de Mineração e regras adicionais, emitidas pelo Departamento Nacional de Produção Mineral do Brasil (“DNPM”), que é o órgão governamental que controla as atividades de mineração em todo o país. Cada requerimento para pesquisa exploratória ou Alvará de Pesquisa é representado por um processo mineral submetido ao DNPM.

De acordo com a Constituição Brasileira, o sub-solo pertence à União, e a ela cabe legislar sobre os bens minerais. Por bens minerais entende-se todo o material existente no sub-solo, passível de ser extraído e processado de maneira econômica. De todos os bens minerais, apenas o petróleo, até recentemente monopólio da União, e os materiais radioativos, por razões de segurança nacional, não podiam ser explorados por terceiros.

Podem requerer o uso do sub-solo todo o cidadão brasileiro, pessoa física, e toda a empresa, pessoa jurídica, desde que 51% do capital esteja na mão de brasileiros. A forma de se obter o uso do sub-solo pode ser feita de duas maneiras: por requerimento, mais simples, onde é necessário a anuência do proprietário da terra e a licença da prefeitura, e por pesquisa, mais complexo, independente de proprietário e prefeitura. Em ambos os casos os pedidos são feitos em formulários

próprios, e encaminhados ao DNPM, que deverá conceder, controlar, fiscalizar e incentivar a produção mineral.

- **Meio Ambiente**

Definida a questão minerária, é feito um projeto visando atender a legislação ambiental quanto ao uso do solo, regulamentado por um órgão estadual e o Ibama – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. No projeto, se trata principalmente das águas próximas, da emissão de particulados, da vegetação e da recomposição vegetal.

Como requerido pela Política Nacional Brasileira de Meio Ambiente, estabelecida em 31 de Agosto de 1981 pela Lei Federal n.6.938, todas as atividades potencialmente ou efetivamente poluidoras são objetos de um processo de licenciamento ambiental. As regras relativas aos procedimentos de licenciamento estão estabelecidas pela resolução n.237 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (“CONAMA”), em 19 de Dezembro de 1997. A agência reguladora determina as condições, limites e medidas para o controle e uso dos recursos naturais e as licenças de instalação e implementação do projeto. A licença é emitida por agências federais, estaduais ou municipais. A autoridade que deve emitir a licença é baseada da extensão territorial do impacto proposto e geralmente segue as regras estabelecidas pela Resolução n237/97 do CONAMA.

Para toda a atividade onde o impacto ambiental pode ser considerado significativo, um estudo de impacto ambiental, o EIA/RIMA, deve ser apresentado à agência ambiental reguladora. Adicionalmente, a agência governamental e o proprietário do empreendimento, devem apresentar todas as informações relativas ao projeto, para discussão e aprovação em audiências públicas, de acordo com a legislação vigente.

7.2. ANEXO: ETAPAS E PROCESSOS BÁSICOS DE UMA BRITAGEM

ETAPAS E PROCESSOS BÁSICOS DE UMA BRITAGEM

O processo de produção de brita se inicia na pedreira, explorada em bancadas. Uma bancada é composta de praça e frente, sendo praça a parte plana onde se efetua o carregamento do material detonado (Figura 79), e frente, a parte moderadamente inclinada que é desmontada pela força do explosivo (Figura 78) (HERRMANN, 1968).

Fragmentada pela detonação, a rocha é carregada, transportada e basculada num alimentador vibratório. O alimentador vibratório é um equipamento projetado para receber a descarga da rocha e dosar, por vibração, a alimentação adequada para a próxima máquina, que é o britador primário.



Figura 78 – Furação do maciço rochoso para posicionar o explosivo.



Figura 79 – Carregamento do material detonado.

As máquinas e componentes que compõem uma britagem para a produção de agregados para a construção civil são:

- **Alimentador vibratório:** Recebe a descarga do caminhão e dosa a alimentação do britador primário. Uma estrutura metálica ou uma caixa de concreto suporta o impacto da descarga e no fundo, uma placa metálica vibratória impele o material até a boca do britador. Existem três tamanhos básicos, para instalações pequenas, médias e grandes.
- **Alimentador de esteiras:** Menos usados, estes alimentadores possuem, no lugar da placa vibratória, uma esteira, tipo esteira de trator, que leva o material até o britador.
- **Britador primário de mandíbulas** (Figura 80): Nesta máquina, uma mandíbula é fixa e outra é móvel, e a boca de entrada dos fragmentos é retangular. A mandíbula móvel é acionada por um eixo excêntrico na parte superior, causando um movimento circular que, ao mesmo tempo que comprime o fragmento de rocha contra a mandíbula

fixa, o empurra para baixo, aumentando a capacidade produtiva da máquina.

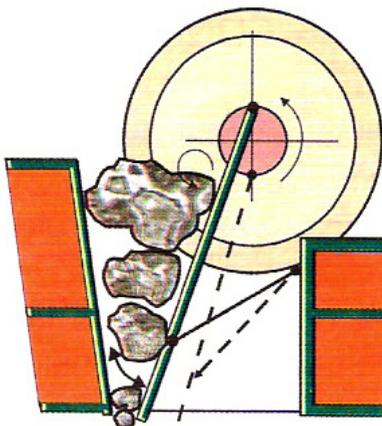


Figura 80 - Britador de mandíbulas (Metso Minerals, 2005).

- **Britador primário giratório:** Pelo seu grande porte, dispensa o alimentador, recebendo a descarga direto do caminhão, e também pelo seu porte, é usado em grandes minerações. É uma máquina de funcionamento semelhante aos britadores de cone.
- **Calha vibratória:** Colocada num túnel sob a pilha pulmão, transfere, por vibração, o material da pilha para uma correia transportadora.
- **Peneira intermediária:** O material proveniente do primário é recebido por esta peneira, de um ou dois decks, cuja função é separar o material em duas frações, onde o retido cai no britador secundário e o passante segue para outras fases. A separação anterior ao secundário é necessária, porque não teria sentido passar por esta máquina um material já pronto, o qual diminuiria a capacidade da máquina e provocaria um desgaste, que desta forma, é evitado.
- **Pilha pulmão:** Pilha de agregados britados colocadas entre duas ou mais partes do conjunto de britagem. Atuam para separar fases da britagem, de modo que o funcionamento de uma fase seja independente da outra.
- **Britador secundário de mandíbulas:** Tem seu funcionamento igual ao primário de mandíbulas, com boca

de entrada também retangular, podendo trabalhar com maior coeficiente de redução e maior rotação no volante.

- **Britador secundário de cone:** Máquina que gradativamente substituiu o secundário de mandíbulas pela sua maior produtividade. Funciona com movimento oscilatório de uma peça em forma de tronco de cone contra outra peça fixa, de formato semelhante (Figura 12). A abertura de entrada deve ser dimensionada para receber o material do primário. As peças de desgaste que constituem o revestimento, graduando o tamanho da boca de entrada e fixando o limite da boca de saída, são em número de três modelos nos cones mais antigos, e seis modelos nos cones de projeto mais recentes.
- **Britador terciário de cone:** Máquinas iguais aos secundários, com aberturas de entrada e saída mais estreitas para efetuar o terceiro estágio de redução.
- **Britador de eixo vertical (VSI):** Máquina de projeto recente com a propriedade de originar produto cúbico, onde antes a lamelaridade dos grãos independia do tipo de britador. Nesta máquina um rotor recebe a alimentação verticalmente e a arremessa horizontalmente em alta velocidade contra um anteparo metálico ou contra uma parede formada pelo próprio material (Figura 16).
- **Moinho de martelos, moinho de barras e moinhos de bolas:** São máquinas do estagio quaternário, muito raramente usadas na produção de agregados para construção civil, estando mais presentes na engenharia de minas.
- **Peneira final:** Peneira vibratória de três ou quatro decks, usada na classificação final dos agregados (Figura 81).



Figura 81 - Peneira vibratória.

- **Transportadoras de correias:** Tem a função de transportar o material entre os equipamentos e de formação de pilhas de agregados.
- **Detector de metais:** Acusam e suspendem automaticamente o movimento de correias, impedindo que o metal entre nos britadores.
- **Eletro-ímã:** Atraem e prendem peças metálicas antes destas caírem em câmeras de britagem das máquinas. Tem a vantagem de não interromper a produção e a desvantagem do custo de aquisição e do mais alto custo da energia elétrica.

7.3. ANEXO: MÉTODO GTEC-UFSC PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE FORMA DE AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS.

MÉTODO GTEC-UFSC PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE FORMA DE AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS. (WEIDMANN, 2008)

O método GTec-UFSC para determinação do coeficiente volumétrico de forma dos grãos de agregados graúdos e miúdos foi inicialmente proposto por Oliveira (2004). Desde então este método vem sendo utilizado em trabalhos desenvolvidos por este grupo de pesquisa, tendo sofrido alguns aperfeiçoamentos. Weidmann (2005) validou este método frente determinações manuais da forma de grãos de agregados graúdos, utilizando paquímetro, e avaliou a variabilidade dos resultados obtidos com este método proposto. A seguir são descritos os equipamentos necessários e as etapas da metodologia.

a) Equipamentos necessários:

- Jogo de peneiras para ensaio de granulometria de agregados, de acordo com NBR 7211:2005;
- Balança com precisão mínima de 0,1g para a determinação da massa das frações de agregados graúdos e de 0,0001g para agregados miúdos. Balanças com menor precisão podem limitar a fração mínima de análise ou exigir a medição de um maior número de grãos;
- Picnômetro de 50ml para determinação da massa específica de agregados miúdos. Para agregados graúdos, aconselha-se utilizar picnômetros de 500ml ou processo da balança hidrostática;
- Placas de vidro de tamanho mínimo de 100x100x2mm para agregados miúdos e 250x350x2mm para agregados graúdos;
- Escâner com capacidade mínima de resolução de 1000dpi;
- Escala com precisão milimétrica, sendo aconselhável paquímetro convencional ou papel milimetrado;
- Aparato para iluminação dos grãos e/ou câmara escura.

b) Seqüência de ensaio:

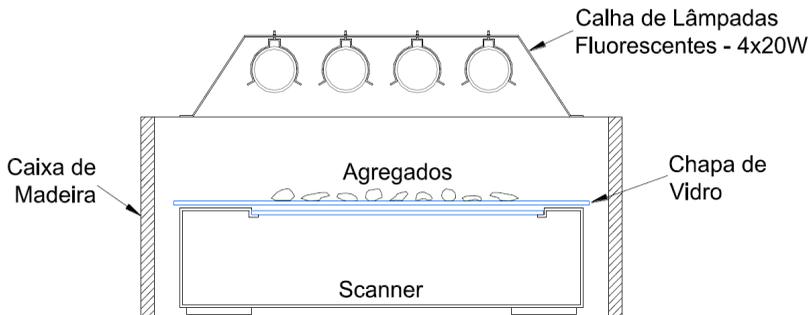
- 1) Peneirar o agregado, segundo as recomendações da NBR NM 248:2003, para separação das frações e determinação das

respectivas porcentagens retidas. Cada fração corresponde aos grãos retidos em determinada peneira;

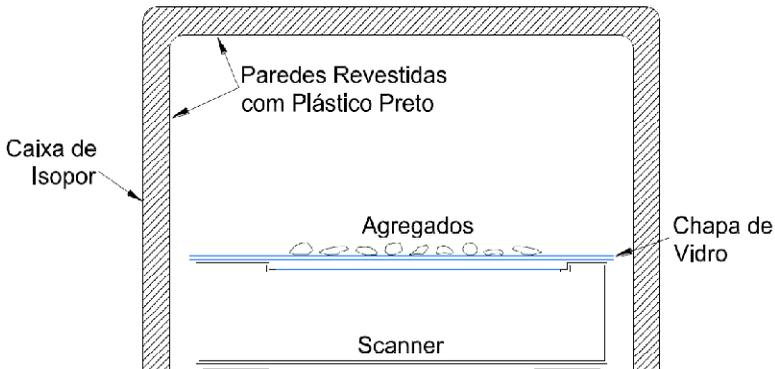
- 2) Determinar a massa específica de cada fração (dfração) empregando-se os procedimentos sugeridos anteriormente (do picnômetro para frações passantes na peneira 6,3mm e picnômetro ou da balança hidrostática para frações retidas em peneiras acima da malha 6,3mm). Recomenda-se que o valor da massa específica seja proveniente da média de três determinações com diferença máxima de 0,5% entre o maior e o menor valor encontrado;
- 3) Pesar certo número de grãos de determinada fração anotando-se a massa (mfração). Este número de grãos deve ser maior ou igual a 100 para frações retidas na peneira 4,8mm e 200 grãos para as frações passantes. A massa deste número de grãos deve ser 100 vezes maior que a precisão da balança utilizada, caso contrário, o número mínimo de grãos será determinado em função da precisão da balança;
- 4) Despejar cuidadosamente os grãos pesados na etapa 3 sobre uma chapa de vidro evitando contato direto entre grãos. Sempre que necessário, separar os grãos para que não fiquem encostados;
- 5) Colocar a chapa de vidro no escâner e posicionar a escala métrica para posterior calibração no programa de análise;
- 6) Posicionar o aparato para iluminação dos grãos (vide Figura 82a) ou a câmara escura (vide Figura 82b) e digitalizar a imagem. Estes aparatos são utilizados para conferir o máximo contraste possível entre o fundo da imagem e os grãos que serão analisados. Sugere-se que as aquisições das imagens sejam feitas com as resoluções mínimas apresentadas na 0 em função do tamanho dos grãos. Vale ressaltar que a resolução mínima de digitalização para cada fração deve ser determinada para cada tipo de escâner, ficando a 0 apenas com caráter de orientação e para casos em que não se possua tal determinação. Esta definição para cada tipo de escâner se faz necessária porque cada equipamento pode conferir diferente resolução real para determinada resolução de aquisição;

Tabela 46– Resolução mínima de aquisição das imagens em função do tamanho dos grãos.

Fração Retida na Peneira (mm)	Resolução de Aquisição (dpi)
9,5	300
4,8	500
2,4	700
1,2	700
0,6	900
0,3	1000
0,15	1000



a) Caixa com lâmpadas



b) Câmara escura

Figura 82 - Aparatos utilizados para auxiliar na aquisição das imagens para análise do coeficiente de forma: a) caixa com lâmpadas; b) câmara escura.

- 7) Carregar a imagem no programa de análise de imagens procedendo-se a calibração da mesma com auxílio da escala métrica inserida na etapa 5. Em alguns programas, esta calibração não é salva automaticamente para toda a análise, devendo-se, nestes casos, salvá-la em arquivos isolados para posterior utilização. Nesta dissertação foi utilizado o programa *Image Tool 3.0*, o qual foi desenvolvido pela University of Texas Health Science Center at San Antonio – UTHSCSA e encontra-se disponível gratuitamente na página eletrônica desta instituição;
- 8) Recortar a imagem retirando-se a escala métrica, de modo que a nova imagem contenha apenas os grãos a serem analisados. Definir o limiar de tons de cinza (*threshold*) observando o ponto mais adequado para a manutenção dos contornos e da forma do grão. Imagens com bastante contraste entre o fundo da imagem e os grãos facilitam enormemente esta operação. Caso necessário, antes da definição do limiar (*threshold*), podem ser utilizados filtros de imagens que auxiliem na eliminação de ruídos da imagem e/ou na definição dos contornos. Nesta dissertação, em algumas imagens foi utilizado um filtro de mediana, de máscara 3x3, para estas correções. Alguns programas possuem também outras ferramentas que auxiliam nesta etapa, como a definição do tamanho, em pixels, do objeto mínimo a ser considerado na imagem, eliminando possíveis ruídos da seleção;
- 9) Proceder à análise da imagem, obtendo as propriedades geométricas de cada objeto (grão). Em alguns programas, é necessária uma etapa intermediária em que são definidos os objetos na imagem e posteriormente procede a análise das propriedades destes objetos;
- 10) Exportar os dados de maior dimensão (L) de cada grão (cada objeto identificado na imagem) para uma planilha eletrônica;
- 11) Calcular o coeficiente de forma de cada fração, com base na AFNOR XP P18-540 (1997), conforme equação abaixo:

$$cf_{\text{fração}} = \frac{\frac{m_{\text{fração}}}{d_{\text{fração}}}}{\pi/6 \cdot \sum L^3}$$

onde: $m_{\text{fração}}$ = massa de todos os grãos contidos na imagem;
 $d_{\text{fração}}$ = massa específica da fração analisada;

L = comprimento de cada grão determinado com auxílio do programa de análise de imagens.

12) Calcular o coeficiente de forma do agregado que é definido pela seguinte expressão:

$$cf_{\text{agregado}} = \frac{\sum (\text{cf de cada fração} * \text{respectiva \%ret})}{\sum \text{das \%ret}}$$

7.4. ANEXO: RESULTADOS DO ESTUDO EM ARGAMASSA

Tabela 47 – Resultados dos ensaios em argamassa da areia de basalto

RESUMO RESULTADOS ARGAMASSAS BASALTO									
Argamassa	Flow 0 (mm)	Flow 5 (mm)	MF	Flow 0 /MF	Ar Incorporado	fcj (MPa)			
1- 100% VSI Original	152	234	2,78	55,7	1,15%	47,6			
2- Natural 20%	208	270	2,43	83,2	0,02%	49,2			
3- Natural 30%	225	284	2,26	99,6	-0,09%	52,1			
4- Natural 40%	227	294	2,08	111,3	-0,30%	54,5			
5- 100% VSI Lavada	218	283	2,92	75,3	0,41%	51,2			
6- Natural 20%	221	278	2,55	86,3	-0,38%	51,6			
7- Natural 30%	226	287	2,36	94,5	-0,24%	49,3			
8- Natural 40%	233	285	2,17	107,3	-0,43%	52,7			
9- 100% VSI Lavada - #1,2	166	252	2,71	61,2	0,68%	48,3			
10- Natural 20%	170	248	2,38	71,4	0,77%	48,0			
11- Natural 30%	189	260	2,21	87,9	-0,15%	48,2			
12- Natural 40%	198	275	2,04	99,8	0,03%	53,1			
17- 100% CONE Original	107	201	2,64	46,7	1,88%	48,2			
18- Natural 20%	177	250	2,32	73,9	1,87%	47,6			
19- Natural 30%	164	239	2,16	75,5	0,65%	45,9			
20- Natural 40%	174	243	1,99	87,9	0,23%	45,6			
21- 100% CONE Lavada	159	233	2,91	56,1	1,57%	45,8			
22- Natural 20%	192	264	2,54	75,9	0,12%	46,4			
23- Natural 30%	219	282	2,35	92,8	0,07%	51,7			

24- Natural 40%	230	228	282	279	2,16	105,9	-0,26%	48,5	46,1
25- 100% CONE Lavada-#1,2	145	147	219	214	2,71	54,0	2,02%	45,8	45,3
26- Natural 20%	169	178	243	233	2,38	73,0	0,95%	45,9	45,8
27- Natural 30%	156	165	236	235	2,21	72,7	0,70%	47,7	46,0
28- Natural 40%	165	172	245	247	2,04	82,8	0,59%	49,5	47,8
33- 15% CONE + 85% VSI	213	207	271	265	2,92	72,0	0,36%	46,9	46,4
34- Natural 20%	220	212	281	272	2,55	84,8	0,05%	48,3	48,0
35- Natural 30%	236	235	289	287	2,36	99,8	-0,51%	48,7	48,2
36- Natural 40%	245	250	294	301	2,17	114,3	-0,49%	47,8	47,3
37- 30% CONE + 70% VSI	188	191	255	260	2,91	65,0	0,49%	45,3	45,1
38- Natural 20%	222	219	283	277	2,55	86,6	0,31%	46,7	45,5
39- Natural 30%	235	245	287	296	2,36	101,8	-0,37%	46,7	47,4
40- Natural 40%	246	237	292	282	2,17	111,5	-0,55%	47,4	44,0
41- CONE,+vsi <#0,3	146	146	215	215	2,91	50,2	1,77%	44,8	42,7
42- Natural 20%	189	189	257	259	2,54	74,4	-8,21%	45,1	44,8
43- Natural 30%	193	191	262	255	2,35	81,6	0,50%	46,4	45,2
44- Natural 40%	194	194	259	255	2,16	89,8	0,44%	47,2	45,5
45- VSI + cone <#0,3	148	150	221	219	2,92	51,1	0,92%	48,1	42,9
46- Natural 20%	198	184	268	256	2,55	74,9	0,02%	48,9	46,0
47- Natural 30%	218	211	274	266	2,36	90,9	-0,16%	48,5	48,0
48- Natural 40%	229	230	286	281	2,17	105,9	0,32%	50,7	48,7

Tabela 48— Resultados dos ensaios em argamassa da areia de gnaissse

RESUMO RESULTADOS ARGAMASSAS GNAISSSE							
Argamassa	Flow 0 (mm)	Flow 5 (mm)	MF	Flow 0 /MF	Ar Incorporado	fcj (MPa)	
1- 100% VSI Original	165	240	2,50	65,13	0,57%	46,3	47,36
2- Natural 20%	183	256	2,19	84,56	0,43%	43,2	44,18
3- Natural 30%	185	260	2,03	92,23	-0,07%	44,4	44,36
4- Natural 40%	190	256	1,88	100,95	-0,07%	44,5	47,21
5- 100% VSI Lavada	280	310	2,67	104,12	0,00%	52,0	52,00
6- Natural 20%	254	295	2,19	113,35	-0,38%	45,3	49,86
7- Natural 30%	240	294	2,03	118,79	-0,15%	44,1	49,35
8- Natural 40%	244	295	1,98	122,27	-0,16%	45,5	48,18
9- 100% VSI Lavada - #1,2	220	276	2,45	90,47	-0,08%	46,7	48,05
10- Natural 20%	245	289	2,15	112,77	-0,19%	46,4	46,45
11- Natural 30%	232	284	2,00	117,00	-0,22%	44,0	46,52
12- Natural 40%	215	272	1,85	115,75	-0,11%	44,8	46,68
17- 100% CONE Original	146	218	2,55	57,52	1,23%	40,5	43,77
18- Natural 20%	164	238	2,23	73,33	0,89%	42,0	45,10
19- Natural 30%	166	245	2,07	80,21	0,65%	42,7	45,10
20- Natural 40%	181	245	1,91	94,83	1,23%	41,5	42,37
21- 100% CONE Lavada	193	261	2,67	71,96	0,26%	41,2	43,88
22- Natural 20%	218	276	2,33	94,31	0,00%	41,8	42,04
23- Natural 30%	224	277	2,16	105,09	-0,40%	40,1	41,92
24- Natural 40%	213	270	1,98	106,69	-0,51%	43,4	43,47
25- 100% CONE Lavada-#1,2	159	235	2,43	65,56	0,29%	41,9	46,45

26- Natural 20%	183	190	259	250	2,13	87,49	0,28%	43,4	43,72
27- Natural 30%	196	188	257	252	1,98	96,79	0,31%	45,1	45,79
28- Natural 40%	204	205	267	265	1,83	111,46	-0,06%	45,9	46,07
33- 15% CONE + 85% VSI	227	229	285	276	2,67	85,40	-0,29%	45,3	46,47
34- Natural 20%	229	234	282	276	2,33	99,42	-0,67%	0,0	0,00
35- Natural 30%	239	237	288	286	2,16	110,37	-0,57%	44,9	46,58
36- Natural 40%	225	231	283	273	1,98	114,97	-0,18%	46,7	48,00
37- 30% CONE + 70% VSI	205	206	266	262	2,67	76,98	-0,12%	46,0	46,29
38- Natural 20%	188	189	253	253	2,33	89,55	-0,16%	45,6	46,01
39- Natural 30%	235	230	276	276	2,16	107,83	0,00%	43,1	45,07
40- Natural 40%	230	221	272	282	1,98	113,72	0,00%	47,5	49,61
41- CONE,+vsi <#0,3	207	206	272	272	2,67	77,39	0,28%	43,4	43,44
42- Natural 20%	244	244	296	292	2,33	104,84	0,06%	40,9	41,00
43- Natural 30%	233	233	286	288	2,16	108,10	-0,30%	42,0	42,25
44- Natural 40%	207	209	264	267	1,98	104,93	0,22%	42,3	42,55
45- VSI + cone <#0,3	245	246	298	292	2,67	91,95	-0,09%	49,7	49,91
46- Natural 20%	233	230	291	292	2,33	99,41	-0,22%	44,1	45,17
47- Natural 30%	244	245	292	294	2,16	113,38	-0,76%	44,8	45,84
48- Natural 40%	261	251	299	307	1,98	129,08	-0,48%	45,4	46,04

Tabela 49– Resultados dos ensaios em argamassa da areia de granito

RESUMO RESULTADOS ARGAMASSAS GRANITO									
Argamassa	Flow 0 (mm)	Flow 5 (mm)	MF	Flow 0 /MF	Ar Incorporado	f _{cj} (MPa)			
1- 100% VSI Original	194	258	2.606	74,2517268	0,24%	45,63			
2- Natural 20%	210	264	2,273086	92,8253553	-0,38%	46,09			
3- Natural 30%	219	280	2,105908	104,230598	-0,30%	44,61			
4- Natural 40%	224	275	1,938246	115,568429	-0,30%	45,89			
5- 100% VSI Lavada	198	260	2,666419	74,069375	-0,23%	42,60			
6- Natural 20%	207	265	2,321561	90,0256502	-0,31%	40,46			
7- Natural 30%	216	279	2,148384	101,937075	-0,29%	42,58			
8- Natural 40%	231	278	1,974707	116,726188	-0,32%	46,42			
9- 100% VSI Lavada - #1,2	191	259	2,449032	77,7858222	0,34%	44,97			
10- Natural 20%	216	271	2,14715	100,365621	-0,13%	44,84			
11- Natural 30%	217	272	1,995554	108,491169	-0,20%	45,79			
12- Natural 40%	227	279	1,84352	124,490093	-0,30%	46,09			
17- 100% CONE Original	150	219	2,464	61,2824675	1,43%	43,29			
18- Natural 20%	167	240	2,159158	76,8818156	0,48%	44,74			
19- Natural 30%	190	252	2,006077	93,9644964	0,14%	44,74			
20- Natural 40%	187	251	1,852553	100,402003	1,43%	44,23			
21- 100% CONE Lavada	188	262	2,585201	74,0754751	0,58%	42,91			
22- Natural 20%	213	270	2,250399	94,1766177	-0,17%	43,01			
23- Natural 30%	217	281	2,091285	105,676643	-0,21%	44,31			
24- Natural 40%	218	275	1,925694	113,725229	-0,16%	44,59			

25- 100% CONE Lavada-#1,2	166	166	244	238	2,376695	69,8448807	0,90%	43,19	43,0
26- Natural 20%	218	218	277	276	2,089113	104,350509	0,33%	41,63	40,4
27- Natural 30%	214	220	272	265	1,944699	111,585406	0,26%	43,98	42,0
28- Natural 40%	199	206	266	256	1,799867	112,508325	-0,05%	43,77	42,3
33- 15% CONE + 85% VSI	230	236	287	283	2,654236	87,7841914	-0,38%	40,54	40,5
34- Natural 20%	236	240	292	281	2,311786	102,950693	-0,35%	44,89	44,9
35- Natural 30%	262	269	311	312	2,139819	124,075896	0,13%	41,25	39,8
36- Natural 40%	236	240	288	282	1,967355	120,974613	0,16%	42,65	35,9
37- 30% CONE + 70% VSI	252	256	300	294	2,642054	96,137333	0,21%	38,17	35,7
38- Natural 20%	250	250	297	288	2,302012	108,600649	-0,02%	41,15	41,0
39- Natural 30%	270	269	307	307	2,131254	126,451347	0,20%	41,33	39,0
40- Natural 40%	239	245	291	281	1,960003	123,469198	-0,41%	43,32	42,2
41- CONE+vsi <#0,3	234	245	299	288	2,585201	92,642696	0,41%	40,57	39,7
42- Natural 20%	220	220	276	273	2,256399	97,5004984	-0,19%	42,37	41,7
43- Natural 30%	224	226	278	270	2,091285	107,589342	-0,13%	43,42	43,2
44- Natural 40%	230	232	281	276	1,925694	119,956749	-0,73%	43,54	43,3
45- VSI + cone <#0,3	247	246	294	292	2,666419	92,4460807	0,07%	38,88	36,2
46- Natural 20%	234	239	280	290	2,321561	101,871131	-0,51%	42,04	41,9
47- Natural 30%	243	240	280	284	2,148384	112,410063	-0,54%	43,54	43,4
48- Natural 40%	232	232	281	286	1,974707	117,485794	-0,88%	44,49	43,7

Tabela 50— Resultados dos ensaios em argamassa da areia de calcário

RESUMO RESULTADOS ARGAMASSAS CALCÁRIO							
Argamassa	Flow 0 (mm)	Flow 5 (mm)	MF	Flow 0 /MF	Ar Incorporado	fcj (MPa)	
1- 100% VSI Original	125	149	2,44	54,74	2,07%	39,0	37,0
2- Natural 20%	128	172	2,15	64,70	1,34%	42,6	36,2
3- Natural 30%	130	183	2,00	71,97	1,53%	42,6	37,7
4- Natural 40%	131	192	1,85	78,58	2,07%	41,2	40,2
5- 100% VSI Lavada	167	239	2,83	66,06	0,49%	41,5	37,9
6- Natural 20%	207	264	2,47	91,27	-0,39%	41,8	41,7
7- Natural 30%	213,3	264,8	2,28	105,51	-1,01%	42,5	42,0
8- Natural 40%	211	269	2,09	118,56	0,41%	41,8	43,1
9- 100% VSI Lavada - #1,2	142	210	2,66	53,73	1,09%	40,9	40,4
10- Natural 20%	169	236	2,33	72,59	0,48%	43,3	39,5
11- Natural 30%	173	241	2,16	79,67	0,66%	42,3	41,6
12- Natural 40%	189	251	1,99	95,84	-0,47%	43,4	41,6
17- 100% CONE Original	133	180	2,70	46,38	2,00%	39,3	38,6
18- Natural 20%	139	204	2,36	54,56	2,57%	39,4	39,1
19- Natural 30%	146	213	2,18	59,56	2,57%	37,7	29,0
20- Natural 40%	146	221	2,01	65,22	2,57%	40,8	38,9
21- 100% CONE Lavada	188	251	3,03	55,04	0,97%	42,0	41,3
22- Natural 20%	223	272	2,63	78,34	0,21%	42,7	41,4
23- Natural 30%	238	286	2,42	86,41	0,15%	42,0	40,8
24- Natural 40%	245	288	2,22	95,43	-0,01%	43,9	41,7
25- 100% CONE Lavada-#1,2	179	243	2,88	62,49	0,31%	43,2	39,0

26- Natural 20%	206	204	259	262	2,51	81,82	0,36%	40,6	36,9
27- Natural 30%	229	232	276	283	2,31	99,58	-0,06%	37,5	36,6
28- Natural 40%	215	221	266	276	2,12	102,72	0,22%	39,5	38,2
33- 15% CONE + 85% VSI	181	182	253	259	2,86	63,43	0,24%	38,3	38,3
34- Natural 20%	204	203	265	260	2,49	81,73	0,00%	39,0	38,4
35- Natural 30%	210	210	262	265	2,30	91,26	-0,47%	39,0	38,7
36- Natural 40%	253	259	295	305	2,11	121,30	-0,23%	38,8	38,7
37- 30% CONE + 70% VSI	150	152	225	226	2,89	52,22	0,40%	41,6	39,8
38- Natural 20%	174	178	252	253	2,51	69,99	-0,13%	41,4	39,1
39- Natural 30%	194	198	256	265	2,32	84,38	-0,10%	42,1	41,8
40- Natural 40%	205	204	263	270	2,13	96,05	-0,45%	42,8	42,6
41- CONE,+vsi <#0,3	159	158	231	234	3,03	52,24	1,05%	39,9	39,7
42- Natural 20%	206	185	245	258	2,63	74,35	0,08%	42,6	41,8
43- Natural 30%	216	222	267	271	2,42	90,35	-0,04%	42,0	41,4
44- Natural 40%	220	220	272	276	2,22	99,27	-0,16%	42,8	34,1
45- VSI + cone <#0,3	160	160	233	237	2,83	56,52	0,50%	40,9	39,6
46- Natural 20%	210	214	266	266	2,47	86,00	0,18%	42,5	41,7
47- Natural 30%	208	206	258	261	2,28	90,81	0,09%	43,4	40,8
48- Natural 40%	209	211	265	269	2,09	100,40	-0,73%	45,2	44,8

7.5. ANEXO: CORRELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE FLUIDEZ DAS ARGAMASSAS E OS VALORES DE AZUL DE METILENO: VERIFICAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

Tabela 51 – **Basalto:** Verificação da existência de relação entre as variáveis através da inclinação da reta

	Flow/MF	AM	Sxx	2,042	b	-8,8316	Coef. Angular		
	Y	X'	Syy	250,907	a	132,24	Coef Linear		
	55,66	9	Sxy	-18,031					
	75,25	7							
	56,06	7,75							
			Σx	23,75	Significância da relação				
			Σy	186,97				t= b/Sbl	1,318
			Σxy	1462,11				k-2	1
Média	62,32183	7,916667	Σx²	190,06	t (5%)	6,314			
Desvio	11,20061	1,010363	Σy²	11902,94	Como $t < t(5\%)$, com 95% de confiabilidade, não se pode provar que existe uma relação entre as variáveis.				
Nx=Ny	3	3							
K	3								
			Se	9,574					
			Sa	53,332					
			Sb	6,700					

Tabela 52– **Gnaisse:** Verificação da existência de relação entre as variáveis através da inclinação da reta

	Flow/MF	AM	Sxx	0,875	b	-3 ,772	Coef. Angular
	65,1	2,5	Syy	1250,094	a	160,577	Coef Linear
	104,1	1,5	Sxy	-33,050			
	57,5	2,75					
	72,0	2					
			Σx	6,7 0	Significância da relação $t = b/Sb $ 26,794 k-2 2 (5%) 2,920 Como $t > t(5\%)$, com 95% de confiabilidade, se pode afirmar que existe uma relação entre as variáveis.		
Média	75,591	2,250	Σy	226,772			
Desvio	25,001	0,661	Σxy	477,186			
Nx=Ny	4	4	Σx^2	16,063			
K	4		Σy^2	18391,88			
			Se	1,319			
			Sa	2,825			
			Sb	1,410			

Tabela 54-- **Calciário:** Verificação da existência de relação entre as variáveis através da inclinação da reta

Flow/MF	AM	Sxx	195,647	b	-0,077	Coef. Angulr								
Y	X	Syy	1,167	a	7,366	Coef Linear								
3,250	54,700	Sxy	-15,033	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Significância da relação</th> </tr> <tr> <td>t= b/Sb </td> <td>10,015</td> </tr> <tr> <td>k-2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>t (5%)</td> <td>6,314</td> </tr> </thead> </table> <p>Como $t > t(5\%)$, com 95% de confiabilidade, se pode afirmar que existe uma relação entre as variáveis.</p>			Significância da relação		t= b/Sb	10,015	k-2	1	t (5%)	6,314
Significância da relação														
t= b/Sb	10,015													
k-2	1													
t (5%)	6,314													
2,250	66,100	Σx	167,200											
3,750	46,400	Σy	9,250											
		Σxy	500,500											
Média	3,083	55,73333												
Desvio	0,764	9,891												
Nx=Ny	3	3												
K	3													
		Σx^2	9514,260											
		Σy^2	29,688											
		Se	0,107											
		Sa	0,432											
		Sb	0,008											