

PAULO ROBERTO NIEBEL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO NO ESTADO FRESCO DE
ARGAMASSAS COM AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS
UTILIZANDO CURVAS GRANULOMÉTRICAS PARABÓLICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação
em Construção Civil, da Universidade Federal do
Paraná, como parte das exigências para a obtenção do
título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Coney Campiteli

CURITIBA
2008

Niebel, Paulo Roberto

Avaliação do desempenho no estado fresco de argamassas com agregados miúdos britados utilizando curvas granulométricas parabólicas. / Paulo Roberto Niebel – Curitiba, 2008.

xxxf.:il (algumas color.) 29cm

Orientador: Vicente Coney Campiteli

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

1. 2. Título.

CDD
CDU

TERMO DE APROVAÇÃO

PAULO ROBERTO NIEBEL

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO NO ESTADO FRESCO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS UTILIZANDO CURVAS GRANULOMÉTRICAS PARABÓLICAS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Vicente Coney Campiteli (Doutorado USP/SP)
Programa de Pós-graduação em Construção Civil – UFPR

Prof.a. Dra. Berenice Toralles Carbonari (Doutorado UPC/ES)
Universidade Politécnica da Catalunya, UPC – (Espanha)
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. José Adelino Krüger (Doutorado UFSC)
Programa de Pós-graduação em Construção Civil – UFPR

Curitiba, 14 de março de 2008.

*À minha esposa Haedy, que sempre me motivou
para a realização deste trabalho,
por sua dedicação e carinho.
Aos meus filhos Rafael, Isabela e Gustavo,
que são o motivo da realização deste sonho
e de meu crescimento profissional.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Vicente Coney Campiteli, pela orientação ao longo desses dois anos, sempre prestativo, contribuindo para o desenvolvimento da dissertação, possuidor de entusiasmo e a crença na inovação.

Ao Paulo, laboratorista da Universidade Estadual de Ponta Grossa, que, com paciência, sempre me ajudou nos ensaios realizados.

Ao Dr. Isac Silva, coordenador do laboratório da Votorantim Cimentos Brasil, por ter cedido os equipamentos e o espaço para a execução e a análise dos ensaios.

Aos Engenheiros Marcelo Lass e Alexander Capela Andras, da empresa Votorantim Cimentos Brasil, pelo apoio à realização do mestrado.

Ao Engenheiro Maurício Bianchini, da empresa Engemix, que também contribuiu para a execução dos ensaios.

Ao laboratorista Márcio e ao futuro tecnólogo Tiago da empresa Votorantim Cimentos Brasil, que sempre me ajudaram a realizar os ensaios, estando sempre dispostos no auxílio desta pesquisa.

Aos amigos Cláudio e Mozart, que também participaram do programa de pós-graduação, os quais tiveram a oportunidade de conhecer e que sempre apoiaram e souberam incentivar a continuidade deste trabalho e do de outros colegas.

Ao Mestre Engenheiro Guilherme Buest, por ter sido o maior incentivador à minha inscrição no Mestrado.

E a todos dos professores e colaboradores do Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Paraná, que dedicaram horas de trabalho para que este dia acontecesse.

E por último, porém o mais importante, a Deus, que com sabedoria guiou-me durante esses anos para que eu pudesse empreender este trabalho.

*"Por trás de uma pedra estão escondidos milhões de anos de evolução,
onde, através da inteligência do homem, foi destinada a ela
uma importante missão: a de construir e dar sempre mais conforto,
segurança e progresso às cidades e às pessoas que nela vivem."
(citação na revista Areia & Brita n. 2, sem autoria)*

RESUMO

O esgotamento das jazidas de areia próximo aos grandes centros urbanos e a dificuldade na obtenção de novas licenças ambientais está levando os consumidores a buscar novas alternativas para a substituição da areia natural por outro tipo de agregado miúdo. O presente trabalho consiste na avaliação de reologia de concretos com agregados miúdos britados, utilizando granulometrias parabólicas. Preparou-se argamassas no traço 1:3:0,5 (cimento, agregado total e água), onde a fração de agregados foi composta baseada no modelo de Füller, variando o expoente em 0,2 – 0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,6 – 0,7 e 0,8. Aos agregados com o expoente de 0,4 a 0,8 assim preparados, adicionou-se finos (passante pela peneira de 0,075 mm) nos teores de 0, 3, 6, 9 e 12% em massa sobre o agregado (retido na peneira de 0,075 mm). A avaliação de reologia baseou-se nos ensaios de Índice de Consistência (mesa de consistência), no *mini slump* e em documentação fotográfica. Os parâmetros reológicos foram a tensão de escoamento e a viscosidade plástica. Os resultados demonstraram a viabilidade da avaliação proposta, possibilitando a definição de granulometrias ótimas, segundo as necessidades de utilização de argamassas.

Palavras-chave: argamassas; granulometria parabólica; reologia; agregado miúdo britado.

ABSTRACT

The sand deposits' exhaustion near great urbane centers and the difficulty in getting new environmental licenses are taking consumers to look for new alternatives when substituting natural sand for another type of small lodger. The present work consists on the rheology evaluation of concrete with small crushed fines, using the parabolic particles size distribution. Mortel with the 1:3:0.5 aspect (cement, total aggregate and water) was prepared with the fraction collected based on Füller's model, varying the exponent in 0.2 – 0.3 – 0.4 – 0.5 – 0.6 – 0.7 and 0.8. For the lodgers with an exponent varying from 0.4 to 0.8 when prepared, fines were added (0.075 mm sieve passers-by) in the 0, 3, 6, 9 and 12% mass tenors over the lodger (retained on the 0.075 mm sieve). The rheology evaluation was based on the flow table tests, on the mini-slump tests and on photographic documentation. The rheology parameters were the yield stress and the plastic viscosity. The results demonstrated the viability of the proposed evaluation, allowing definitions of best particles size distributions according to each mortel use necessity.

Keywords: mortel, parabolic particle size distribution, rheology, fines aggregates.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - DETALHE DE UM BRITADOR VSI – “VERTICAL IMPACT SHAFT” | 31 |
| FIGURA 2 - MAPA GEOLÓGICO COM A LOCALIZAÇÃO DA MINA..... | 40 |
| FIGURA 3 - PERFURATRIZ ATLAS COPCO..... | 43 |
| FIGURA 4 - DETALHE DOS ACESSÓRIOS UTILIZADOS PARA A DETONAÇÃO..... | 44 |
| FIGURA 5 - BRITADOR PRIMÁRIO..... | 45 |
| FIGURA 6 - BRITAGEM SECUNDÁRIA COM BRITADOR CANICA VSI 155..... | 46 |
| FIGURA 7 - DETALHE DO BRITADOR CANICA VSI 155..... | 47 |
| FIGURA 8 - DETALHE DA PENEIRA VIBRATÓRIA MNS-60024..... | 48 |
| FIGURA 8 - DETALHE DA FORMA DOS GRÃOS..... | 56 |
| FIGURA 10 - TIPOS DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS | 70 |

LISTA DE FOTOGRAFIAS

| | |
|---|----|
| DF 1 - PILHA DE AGREGADOS ONDE O MATERIAL FOI COLETADO..... | 74 |
| DF 2 - SECAGEM DAS AMOSTRAS..... | 74 |
| DF 3 - BALANÇA TOLEDO UTILIZADA PARA A PESAGEM DOS MATERIAIS..... | 78 |
| DF 4 - DETALHE DO EQUIPAMENTO da mesa de CONSISTÊNCIA..... | 81 |
| DF 5 - DETALHE DO TESTE DE “MINI-SLUMP” | 81 |
| DF 6 - DETALHE DOS MOLDES NA CÂMARA ÚMIDA..... | 83 |
| DF 7 - DETALHE DOS CORPOS DE PROVA NO BANHO..... | 83 |
| DF 8 - DETALHE DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO..... | 83 |
| DF 9 - DETALHE DO ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA..... | 83 |
| DF 10 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A01..... | 89 |
| DF 11 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA e <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A02..... | 89 |
| DF 12 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A03..... | 89 |
| DF 13 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A04..... | 90 |
| DF 14 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A05..... | 90 |
| DF 15 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A06..... | 90 |
| DF 16 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A07..... | 91 |
| DF 17 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA A08..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| DF 18 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA COM AGREGADO NATURAL..... | 91 |
| DF 19 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B04.03..... | 97 |
| DF 20 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B04.06..... | 97 |
| DF 21 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B04.09..... | 97 |
| DF 22 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B04.12..... | 98 |
| DF 23 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B05.03.... | 102 |
| DF 24 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B05.06.... | 102 |
| DF 25 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B05.09.... | 103 |
| DF 26 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B05.12.... | 103 |
| DF 27 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B06.03.... | 108 |
| DF 28 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B06.06.... | 108 |
| DF 29 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B06.09.... | 108 |
| DF 30 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B06.12.... | 109 |
| DF 31 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B07.03.... | 113 |
| DF 32 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B07.06.... | 113 |
| DF 33 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B07.09.... | 113 |
| DF 34 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B07.12.... | 114 |
| DF 35 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B08.03.... | 118 |
| DF 36 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B08.06.... | 118 |
| DF 37 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B08.09.... | 118 |
| DF 38 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E <i>MINI SLUMP</i> PARA A AMOSTRA B08.12.... | 119 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| GRÁFICO 1 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE, OTIMIZADO BRITADO <i>IN NATURA</i> E NATURAL | 85 |
| GRÁFICO 2 - PORCENTAGENS RETIDAS INDIVIDUAIS DOS AGREGADOS TOTAIS | 86 |
| GRÁFICO 3 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 04 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO <i>IN NATURA</i> | 94 |
| GRÁFICO 4 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X <i>MINI SLUMP</i> DA SÉRIE B04 | 95 |

| | |
|---|-----|
| GRÁFICO 5 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B04 | 95 |
| GRÁFICO 6 - RELAÇÃO <i>MINI SLUMP</i> X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B04 | 95 |
| GRÁFICO 7 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 05 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO <i>IN NATURA</i> | 99 |
| GRÁFICO 8 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X <i>MINI SLUMP</i> DA SÉRIE B05 | 100 |
| GRÁFICO 9 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B05 | 100 |
| GRÁFICO 10 - RELAÇÃO <i>MINI SLUMP</i> X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B05 | 101 |
| GRÁFICO 11 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 06 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO <i>IN NATURA</i> | 104 |
| GRÁFICO 12 -RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X <i>MINI SLUMP</i> DA SÉRIE B06 | 105 |
| GRÁFICO 13 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B06 | 106 |
| GRÁFICO 14 - RELAÇÃO <i>MINI SLUMP</i> X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B06 | 106 |
| GRÁFICO 15 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 07 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO <i>IN NATURA</i> | 110 |
| GRÁFICO 16 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X <i>MINI SLUMP</i> DA SÉRIE B07 | 111 |
| GRÁFICO 17 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B07 | 111 |
| GRÁFICO 18 - RELAÇÃO <i>MINI SLUMP</i> X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B07 | 112 |
| GRÁFICO 19 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 08 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO <i>IN NATURA</i> | 115 |
| GRÁFICO 20 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X <i>MINI SLUMP</i> DA SÉRIE B08 | 116 |
| GRÁFICO 21 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B08 | 116 |
| GRÁFICO 22 - RELAÇÃO <i>MINI SLUMP</i> X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B08 | 116 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS..... | 34 |
| TABELA 1 - LIMITE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO..... | 50 |
| TABELA 2 - LIMITE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO | 51 |
| TABELA 3 - CONJUNTO DE PENEIRAS DAS SÉRIES NORMAL E INTERMEDIÁRIA (ABERTURA NOMINAL)..... | 53 |
| TABELA 4 - PEDREGULHO E AREIA..... | 53 |
| TABELA 5 - PEDRA BRITADA, PEDRISCO E PÓ DE PEDRA..... | 54 |
| TABELA 6 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS QUANTO À TEXTURA..... | 55 |
| TABELA 7 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA DOS AGREGADOS..... | 57 |
| TABELA 8 - LIMITES MÁXIMOS ACEITÁVEIS DE SUBSTÂNCIAS NOCIVAS NO AGREGADO MIÚDO COM RELAÇÃO À MASSA DO MATERIAL..... | 61 |
| TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO BRITADO <i>IN NATURA</i> | 75 |
| TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO NATURAL | 75 |
| TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO CIMENTO CII-Z | 76 |
| TABELA 12 - PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS PARA OS EXPOENTES – q SEM MATERIAL PULVERULENTO | 77 |
| TABELA 13 - MATERIAL UTILIZADO PARA COMPOSIÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS EM MASSA (g)..... | 78 |
| Tabela 14 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS UTILIZADOS..... | 85 |
| TABELA 15 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, <i>MINI</i> <i>SLUMP</i> E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA..... | 87 |
| TABELA 16 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA AOS 7 E 28 DIAS | 92 |
| TABELA 17 - PORCENTAGEM RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DA CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 04 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%..... | 93 |
| TABELA 18 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE índice de consistência <i>E MINI</i> <i>SLUMP</i> E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA..... | 94 |
| TABELA 19 - PORCENTAGEM RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DA CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 05 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%..... | 98 |
| TABELA 20 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE, <i>MINI SLUMP</i> E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B05.03 A B05.12..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 21 - PORCENTAGEM RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DA CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 06 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%..... | 104 |
| TABELA 22- RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE índice de consistência, <i>MINI SLUMP</i> E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B06.03 A B06.12 | 105 |
| TABELA 23 - PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 07 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%..... | 109 |
| TABELA 24 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, <i>MINI SLUMP</i> E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B07.03 A B07.12 | 110 |
| TABELA 25 - PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 08 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%..... | 114 |
| TABELA 26 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE índice de consistência, " <i>MINI SLUMP</i> " E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B08.03 A B08.12 | 115 |
| TABELA 27 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B04.03 A B04.12..... | 119 |
| TABELA 28 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B05.03 A B05.12..... | 119 |
| TABELA 29 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B06.03 A B06.12..... | 119 |
| TABELA 30 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B07.03 A B07.12..... | 120 |
| TABELA 31 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B08.03 A B08.12..... | 120 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ABNT | - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS |
| A01 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado <i>in natura</i> |
| A02 | - Argamassa confeccionado com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,2$), sem material pulverulento |
| A03 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,3$), sem material pulverulento |
| A04 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,4$), sem material pulverulento |
| A05 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,5$), sem material pulverulento |
| A06 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,6$), sem material pulverulento |
| A07 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,7$), sem material pulverulento |
| A08 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,8$), sem material pulverulento |
| B04.03 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,4$), com a adição de 3% de material pulverulento |
| B04.06 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,4$), com a adição de 6% de material pulverulento |
| B04.09 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,4$), com a adição de 9% de material pulverulento |
| B04.12 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,4$), com a adição de 12% de material pulverulento |
| B05.03 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,5$), com a adição de 3% de material pulverulento |
| B05.06 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,5$), com a adição de 6% de material pulverulento |
| B05.09 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,5$), com a adição de 9% de material pulverulento |
| B05.12 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,5$), com a adição de 12% de material pulverulento |

| | |
|---------------|--|
| B06.03 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,6$), com a adição de 3% de material pulverulento |
| B06.06 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,6$), com a adição de 6% de material pulverulento |
| B06.09 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,6$), com a adição de 9% de material pulverulento |
| B06.12 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,6$), com a adição de 12% de material pulverulento |
| B07.03 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,7$), com a adição de 3% de material pulverulento |
| B07.06 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,7$), com a adição de 6% de material pulverulento |
| B07.09 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,7$), com a adição de 9% de material pulverulento |
| B07.12 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,7$), com a adição de 12% de material pulverulento |
| B08.03 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,8$), com a adição de 3% de material pulverulento |
| B08.06 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,8$), com a adição de 6% de material pulverulento |
| B08.09 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,8$), com a adição de 9% de material pulverulento |
| B08.12 | - Argamassa confeccionada com agregado miúdo britado otimizado com granulometria contínua segundo modelo parabólico de Füller (1901) ($q = 0,8$), com a adição de 12% de material pulverulento |
| CaO | - Óxido de Cálcio |
| CIB | - INTERNATIONAL COUNCIL FOR BUILDING |
| CPII-Z – 32 | - Cimento Portland Composto, classe de resistência 32 MPa |
| d | - Dimensão máxima da partícula |
| DF | - Documento Fotográfico |
| dmáx | - Dimensão máxima característica do agregado (mm) |
| NBR | - NORMA BRASILEIRA REGISTRADA |
| NM | - NORMA MERCOSUL |
| MPa | - Mega Pascal |
| SNIC | - Sindicato Nacional da Indústria de Cimento |
| μm | - micron (unidade de medida, milésima parte do milímetro) |
| VSI | - “Vertical Shaft Impact” |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 PROBLEMA..... | 22 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL..... | 22 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 22 |
| 1.4 HIPÓTESES..... | 23 |
| 1.5 JUSTIFICATIVAS..... | 23 |
| 1.6 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL..... | 25 |
| 1.7 MEIO AMBIENTE..... | 25 |
| 1.8 TECNOLOGIA..... | 26 |
| 1.9 ASPECTOS SOCIAIS..... | 27 |
| 1.10 LIMITAÇÕES..... | 27 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 28 |
| 2.1 Classificação geral dos agregados..... | 28 |
| 2.1.1 Classificação dos agregados quanto à origem (NBR 7211/2005)..... | 29 |
| 2.2 PROPRIEDADES MINERALÓGICAS..... | 32 |
| 2.3 AGREGADOS MINERAIS..... | 32 |
| 2.3.1 Rochas Ígneas ou Magmáticas..... | 33 |
| 2.3.2 Rochas Sedimentares..... | 33 |
| 2.3.3 Rochas Metamórficas..... | 33 |
| 2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS..... | 34 |
| 2.5 NORMAS TÉCNICAS DE AGREGADOS PARA CONCRETO..... | 34 |
| 2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS EM FUNÇÃO DA DIMENSÃO DOS GRÃOS..... | 37 |
| 2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS QUANTO À MASSA UNITÁRIA..... | 37 |
| 2.8 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS..... | 37 |
| 2.9 OBTENÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS BRITADOS NA REGIÃO DE CURITIBA..... | 39 |
| 2.9.1 Geologia Geral da Região..... | 39 |
| 2.9.2 Histórico da Mina Saivá..... | 40 |
| 2.9.3 Trabalhos de Pesquisa e Avaliação da Mina..... | 41 |
| 2.9.4 Geologia Geral do Minério..... | 42 |
| 2.9.5 Etapas de Lavra..... | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 2.9.5.1 Planejamento Mensal de Lavra..... | 43 |
| 2.9.5.2 Perfuração | 43 |
| 2.9.5.3 Desmonte..... | 44 |
| 2.9.5.4 Carregamento e Transporte..... | 45 |
| 2.9.5.5 Britagem Primária..... | 45 |
| 2.9.5.6 Britagem Secundária e Terciária..... | 46 |
| 2.9.5.7 Britagem Quaternária com Britador Canica VSI 125 | 47 |
| 2.9.5.8 Peneira Vibratória MNS-60024 para a Produção de Areia..... | 47 |
| 2.10 Obtenção das Areias Naturais..... | 48 |
| 2.11 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA..... | 49 |
| 2.12 DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS..... | 52 |
| 2.13 FORMA E TEXTURA SUPERFICIAL..... | 53 |
| 2.14 RESISTÊNCIA MECÂNICA..... | 56 |
| 2.15 ABSORÇÃO E UMIDADE SUPERFICIAL..... | 58 |
| 2.16 SUBSTÂNCIAS NOCIVAS AO AGREGADO MIÚDO..... | 58 |
| 2.17 ÁGUA | 61 |
| 2.18 PROPRIEDADE DOS CONCRETOS | 62 |
| 2.18.1 Propriedades do Concreto Fresco | 62 |
| 2.18.1.1 Aspectos Reológicos..... | 62 |
| 2.18.1.1.1 Aspectos Reológicos sobre o Ensaio de Abatimento no Tronco de Cone..... | 64 |
| 2.18.1.2 Trabalhabilidade do Concreto..... | 65 |
| 2.18.1.3 Coesão do Concreto..... | 66 |
| 2.18.1.4 Segregação e Exsudação..... | 66 |
| 2.18.1.5 Massa Específica | 67 |
| 2.18.2 Concreto Endurecido..... | 68 |
| 2.18.2.1 Resistência do Concreto..... | 68 |
| 2.18.2.2 Porosidade | 69 |
| 2.18.2.3 Permeabilidade e Absorção..... | 69 |
| 2.20 CURVAS GRANULOMÉTRICAS..... | 69 |
| 2.20.1 Granulometria Contínua | 71 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 73 |
| 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 73 |
| 3.2 COLETA DOS MATERIAIS | 74 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.1 Agregado Miúdo Britado..... | 74 |
| 3.2.3 Cimento | 76 |
| 3.3 PROCEDIMENTOS INICIAIS – DETERMINAÇÃO DAS CURVAS EXPERIMENTAIS OTIMIZADAS – SEM FINOS..... | 77 |
| 3.4 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO E DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA | 79 |
| 3.5 PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO | 79 |
| 3.5.1 Procedimentos – Condições Ambientais..... | 79 |
| 3.5.2 Materiais | 79 |
| 3.5.3 Mistura..... | 80 |
| 3.5.4 Ensaio da Mesa de Consistência (<i>Flow Table Test</i>)..... | 80 |
| 3.5.5 Ensaio de Mini Cone | 81 |
| 3.5.6 Ensaio de Massa Específica no Estado Fresco..... | 82 |
| 3.5.7 Moldagem dos Corpos de Prova..... | 82 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 84 |
| 4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS BRITADOS..... | 84 |
| 4.2 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO FRESCO DAS AMOSTRAS DA SÉRIE A E AREIA NATURAL..... | 87 |
| 4.2.1 Documentos Fotográficos com as Amostras da Série A e Areia Natural..... | 89 |
| 4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO ENDURECIDO DAS AMOSTRAS DA SÉRIE A E AGREGADO BRITADO “ <i>IN NATURA</i> ” E AREIA NATURAL | 92 |
| 4.4 RESULTADOS OBTIDOS COM A ADIÇÃO DE 3 , 6, 9 E 12% DE MATERIAL PULVERULENTO | 93 |
| 4.4.1 Características Físicas das Amostras da Série B04..... | 93 |
| 4.4.1.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B04..... | 94 |
| 4.4.1.2 Documentos Fotográficos dos Ensaios com as Amostras da Série B04 | 96 |
| 4.4.2 Características Físicas das Amostras da Série B05 | 98 |
| 4.4.2.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B05..... | 99 |
| 4.4.2.2 Documento Fotográfico dos Ensaios com as Amostras da Série B05..... | 102 |
| 4.4.3 Características Físicas das Amostras da Série B06 | 103 |
| 4.4.3.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B06..... | 105 |
| 4.4.3.2 Documento Fotográfico dos Ensaios com as Amostras da Série B06..... | 107 |
| 4.4.4 Características Físicas das Amostras da Série B07 | 109 |
| 4.4.4.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B07..... | 110 |
| 4.4.4.2 Documento Fotográfico dos Ensaios dos com as Amostras da Série B07 | 113 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.5 Características Físicas das Amostras da série B08..... | 114 |
| 4.4.5.2 Documento Fotográfico dos Ensaios com as Amostras da Série B08..... | 117 |
| 4.5 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO ENDURECIDO DAS AMOSTRAS SÉRIES B04 A B08..... | 119 |
| 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 122 |
| 5.1 CONSIDERAÇÕES..... | 122 |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 123 |
| REFERÊNCIAS | 124 |
| ANEXO 1: CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS | 132 |

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, a utilização dos insumos minerais para o emprego na construção civil sempre esteve presente na maioria das grandes obras. As Muralhas da China, as Pirâmides do Egito, as antigas ruínas das cidades Incas e Astecas comprovam que o agregado sempre foi um material utilizado em grande escala. Ainda hoje, sua utilização vem contribuindo decisivamente para o desenvolvimento humano no mundo inteiro, com a construção de barragens, estradas, portos e principalmente na construção das cidades em todo o mundo. É praticamente impossível imaginar o surgimento, bem como o crescimento destes, sem que sua utilização seja necessária.

O consumo comercial de agregados para a construção civil está diretamente ligado ao consumo de cimento no Brasil e no mundo, utilizado para a produção de concretos. Estima-se que para esta finalidade, o seu consumo seja na ordem de três a quatro vezes o da produção de cimento.

Segundo a ABCP (2007), o Brasil, no fim do século XIX, importava anualmente 40 mil toneladas de cimento da Europa, e em 1888, o Eng^o. Louis Felipe Alves da Nóbrega e o Comendador Antônio Prost Rodovalho começaram os trabalhos de prospecção no Nordeste brasileiro e em São Paulo, respectivamente. O Eng^o. Louis Nóbrega visou à utilização dos calcários expostos nos arredores da capital do Estado da Paraíba. Já o Comendador Rodovalho idealizou o aproveitamento das reservas calcárias de grandes pedreiras situadas nas vizinhanças de Sorocaba.

O primeiro a produzir cimento no Brasil, portanto, foi o Eng^o. Louis Nóbrega, por um curto período de três meses, no ano de 1892. A Usina Rodovalho funcionou até 1904, produzindo o cimento “Santo Antonio”. Em 1907, retornou à atividade lançando no mercado os produtos com as marcas “Lage”, “Torquês” e “Meia Lua”, tendo sido definitivamente extinta em 1918. Naquele momento, graças à visão empreendedora e ao pioneirismo de empresários de diversas partes do País, o setor conseguiu enfrentar a concorrência do produto importado e mostrar à população brasileira que fabricava produtos de qualidade e dignos de confiança.

Esta divisão histórica fica clara quando se analisam os números da época. Até 1926, o Brasil importava de países como Estados Unidos, Inglaterra, França,

Alemanha, Dinamarca, Bélgica e Argentina cerca de 97% do cimento que consumia. Naquela época, a importação já chegava à marca das 400 mil toneladas anuais, enquanto a produção local não passava de 13 mil toneladas por ano.

Um símbolo dessa fase é a inauguração, em 1926, da Companhia Brasileira de Cimento Portland, em Perus, a 23 quilômetros da cidade de São Paulo. A instalação da nova fábrica representou o início do processo de crescimento da produção brasileira de cimento, que saltou imediatamente de 13 mil toneladas em 1926 para 54 mil em 1927, 88 mil em 1928 e 96 mil em 1929. O cimento Perus havia conquistado o mercado e superado todas as desconfianças dos consumidores.

O advento da Segunda Guerra Mundial foi um marco para a indústria nacional de cimento, que havia se consolidado no Brasil pouco antes do conflito. Com as naturais dificuldades de importação, as empresas brasileiras floresceram e registraram um acelerado ritmo de crescimento da produção. A quantidade de cimento fabricado no Brasil passou de 697 mil toneladas em 1939 para 810 mil toneladas em 1944.

Com o crescimento industrial do País, principalmente na cidade de São Paulo, tornou-se difícil a extração de seixos rolados devido à sua escassez, tornando necessária a utilização do agregado graúdo (britas) na confecção de concretos, normalmente utilizado como bases para pavimento. Já o agregado natural fino, ou seja, areia natural, ainda persiste como um dos principais insumos na dosagem de concretos, porém o crescimento das cidades, a poluição dos rios com o despejo de esgotos, resíduos industriais e as atuais restrições ambientais para a exploração de insumos naturais dificultam a sua extração e comercialização (SNIC, 2007).

Segundo Almeida (2005), os recursos de agregados naturais para construção civil no Brasil são abundantes e, em geral, estão próximos aos grandes centros consumidores, cujas regiões geológicas são favoráveis à existência de reservas com qualidade adequada às aplicações na construção civil.

Segundo levantamento do DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral, há mais de 20 anos a mineração de areia e brita tornou-se uma das mais importantes do setor nacional. Atualmente o volume de 150 milhões de toneladas anuais de areia e brita no Brasil equipara-se ao da produção de minério de ferro (MINEROPAR, 2007).

Apesar da grande produção anual dos insumos minerais, seu consumo *per capita* é pequeno se comparado com o dos países desenvolvidos, como os Estados

Unidos, onde o índice de produtividade do setor gira em torno de 1.500 a 2.000 m³/homem/mês; no Brasil, este índice fica em torno de 250 m³/homem/mês para brita e 200 m³/homem/mês para areia.

Segundo Bucher (1986), os agregados representam de 75% a 85% da composição dos concretos. Estima-se que o consumo atual mundial de concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas/ano (METHA & MONTEIRO, 1994) para um consumo mundial de cimento estimado na época em 1,376 bilhões de toneladas (SNIC, 2003), sendo que o Brasil contribui atualmente com o consumo na ordem de 36 milhões de toneladas.

1.1 PROBLEMA

A UTILIZAÇÃO TOTAL DE AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS PRODUZIDOS NA REGIÃO DE CURITIBA A PARTIR DE UM BRITADOR VSI EM SUBSTITUIÇÃO À AREIA NATURAL CONDUZ À DOSAGEM DE ARGAMASSAS COM MELHOR DESEMPENHO NO ESTADO FRESCO?

1.2 OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem por objetivo verificar o desempenho no estado fresco de argamassas com agregados britados miúdos, através de curvas granulométricas parabólicas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, devem ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

- a) A partir do modelo parabólico de Füller, estabelecer a composição granulométrica dos agregados miúdos que conduza ao melhor desempenho relológico, representada pelos ensaios de abatimento do tronco de cone (*mini-slump*) e ensaio de índice de consistência;
- b) Verificar as características de trabalhabilidade, coesão e resistências de argamassas, a partir das diversas distribuições granulométricas obtidas;
- c) Comparar os resultados no estado fresco obtidos com argamassas, utilizando o agregado britado com distribuição granulométrica otimizada, agregado britado “*in natura*” otimizada granulometricamente e o agregado natural com granulometria não otimizada.

1.4 HIPÓTESES

- O emprego de agregados miúdos britados produzidos a partir de um britador VSI e otimizados granulometricamente possibilita a substituição integral do agregado natural na produção de concretos de cimento Portland com desempenho similar ou superior.

- A granulometria contínua de agregado miúdo baseado no modelo parabólico de Füller possibilita a obtenção de concretos com desempenho igual ou superior à obtida com agregados naturais.

1.5 JUSTIFICATIVAS

A dificuldade cada vez maior de se obter agregados miúdos naturais, principalmente no entorno dos grandes centros, tem obrigado os consumidores a buscarem novos tipos de soluções para a sua substituição. Uma das soluções é a substituição do agregado miúdo natural pelo artificial.

Percebe-se ainda que os estudos tecnológicos dos agregados caminham de forma lenta se comparado com os estudos feitos no desenvolvimento de equipamentos, cimentos, concretos e aditivos, não obstante eles participarem com

mais de 75% do resultado final. Felizmente já está sendo percebida sua importância no desenvolvimento de argamassas mais baratas, e principalmente mais duráveis, pois as características de texturas, módulo de deformação, materiais deletérios, composição granulométrica, porosidade, absorção, propriedades mecânicas, químicas ou físicas podem influenciar não apenas no desempenho da argamassa no estado fresco como também no desempenho do estado endurecido.

Este conhecimento fica explícito e se faz evidente nos estudos dos agregados, pois a seleção e a utilização inadequada no concreto podem levar a patologias desagradáveis e de difícil solução como, por exemplo, reação álcalis agregados, que normalmente ocorre de forma lenta em função da expansão dos concretos ou de reações expansivas existentes entre alguns minerais silicosos reativos e o sódio ou potássio presente no cimento, provocando fissurações ou deformações irreparáveis, podendo, em alguns casos, ocorrer até o colapso da estrutura.

1.6 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como uma forma de desenvolvimento econômico que “emprega os recursos naturais e o meio ambiente, não apenas em benefício do presente, mas também das gerações futuras” (SJÖSTRÖM, 1996).

A totalidade da cadeia produtiva da construção civil apresenta importantes impactos ambientais em todas as etapas. Qualquer sociedade seriamente preocupada deve colocar como uma das suas prioridades o aperfeiçoamento da construção civil (JONH, 1995).

Estima-se que a construção civil consuma algo em torno de 20 a 50% do total de recursos naturais utilizados pela sociedade (SJÖSTRÖM, 1996).

Segundo Kilbert e Coble (1995), o impacto da demanda ambiental sobre a construção civil não pode ser subestimado, e para isso os autores propõem seis princípios:

- 1) minimizar o consumo de recursos (Conservar);
- 2) maximizar a reutilização de recursos (Reuso);
- 3) usar recursos renováveis ou recicláveis (Renovar/Reciclar);
- 4) proteger o meio ambiente (Proteção da Natureza);
- 5) criar um ambiente saudável e não-tóxico (Não-tóxicos);
- 6) buscar a qualidade na criação do ambiente construído (Qualidade).

1.7 MEIO AMBIENTE

Nos dias de hoje, a dificuldade em se obter areias naturais com qualidade oriundas dos leitos dos rios, para a utilização na preparação de concretos de cimento Portland, concretos betuminosos, argamassas viradas em obra ou argamassas industrializadas, está diretamente influenciada pelo crescimento do consumo da areia natural, principalmente nos grandes centros, e também pelas restrições ambientais (BASTOS, 2005).

A expansão urbana ocupando antigas áreas produtoras, deslocando a extração para áreas mais longínquas, o aumento de áreas de pobreza nas periferias dos grandes centros, normalmente próximas às várzeas, leitos dos rios, prejudicam ou inibem a extração (VASCONCELOS & REIS, 2003).

No Brasil, os principais locais de produção de areias ainda são os leitos dos rios, as várzeas, os depósitos lacustres, os mantos de decomposição de rochas, arenitos e pegmatitos decompostos. Noventa por cento da produção ainda é extraída dos leitos dos rios. Em São Paulo já existe uma mudança, quarenta e cinco por cento é proveniente de várzeas e trinta e cinco por cento dos leitos dos rios; o restante vem de outras fontes. O esgotamento das reservas próximas da capital faz com que a areia natural seja transportada de distâncias superiores a 100 km, implicando enorme consumo de energia e geração de poluição. O setor envolve processos intensivos em energia, geradores de poluição e, dada sua dispersão espacial, transporte a grandes distâncias. Cerca de 80% da energia utilizada na produção de um edifício é consumida na produção e no transporte de materiais (INDUSTRY AND ENVIROMENT, 1996).

Assim, ainda há a possibilidade de obtenção de areia natural em abundância em várias regiões do Brasil, porém isto não mais ocorre próximo a grandes centros, como São Paulo, obrigando a produção a deslocar-se para fora desses grandes centros, gerando, portanto, enormes dificuldades como as citadas acima (SOARES *et al.*, 1997).

1.8 TECNOLOGIA

A elaboração de edificações cada vez mais altas, estruturas mais esbeltas, utilização de concretos com agregados graúdos de menor dimensão, como brita zero, brita um, com elevados teores de pasta e ambientes cada vez mais agressivos fazem com que as matérias-primas para a fabricação de concretos necessitem ser constantemente aperfeiçoadas (SILVA, 2003). A utilização de cimentos Portland com adição de pozolana ou cimentos Portland de alto forno com adição de escória geram menor calor de hidratação, maior resistências a sulfatos e conseqüentemente menor impacto ambiental, em função da utilização de resíduos industriais na adição. A

fabricação de agregados britados graúdos e miúdos classificados, a inserção cada vez maior de aditivos nos concretos, a atualização das normas e a necessidade de redução de custos demonstram que existe a preocupação em se buscar novas tecnologias que permitam que os concretos de cimento Portland apresentem maior desempenho e durabilidade.

1.9 ASPECTOS SOCIAIS

Infelizmente, cada vez mais, é a sociedade que paga o alto preço pelo desconhecimento, pela má aplicação, pela falta de manutenção ou pelo descaso, principalmente no setor público e no setor privado da construção civil.

O número cada vez maior de patologias em concretos pode ser facilmente observado em obras de infra-estrutura, obras marítimas ou em grandes centros.

A dosagem de concretos com o menor número de variáveis desconhecidas (cimentos, agregados com distribuição granulométrica adequada, aditivos, tempo de mistura, menor relação água/cimento possível), tende a propiciar concretos menos porosos, mais duráveis com menor consumo de aglomerante e, conseqüentemente, a redução desses importantes recursos para a recuperação ou construção de novas obras.

1.10 LIMITAÇÕES

Neste trabalho serão verificadas as influências das distribuições granulométricas dos agregados miúdos, na consistência (ensaio de mesa e *mini-slump*) e na resistência dos concretos no estado endurecido aos 7 e 28 dias das amostras sem material pulverulento, e 7 dias para as amostras com adição de 3, 6, 9 e 12% de material pulverulento.

A utilização de reômetros não foi possível, embora tenha-se o conhecimento de que o ensaio do abatimento de cone mostra-se deficiente quanto à caracterização reológica, não possibilitando o fornecimento de informações relacionadas ao fluxo de material, limitando-se o estudo a correlacionar os parâmetros reológicos com os ensaios acima descritos. Por esta razão, adotou-se documentação fotográfica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS AGREGADOS

Segundo Neville (1997), todas as partículas de agregados são originárias de fragmentação de rochas, seja por meios naturais através de intemperismo e abrasão, seja a partir da fragmentação de rochas por meio de britagem. Isto faz com que muitas das propriedades dos agregados dependam inteiramente das propriedades da rocha-mãe, como cor, densidade, composição química e mineralógica, características petrográficas, densidade de massa, dureza, resistência, estabilidade química e física e estrutura dos poros. Em contrapartida, existem algumas propriedades dos agregados que não dependem da rocha-mãe, como a forma e o tamanho das partículas, a textura superficial e a absorção. Estas propriedades podem ter influência positiva ou negativa na qualidade tanto dos concretos frescos como endurecidos. Porém, um agregado cujas propriedades sejam satisfatórias não necessariamente poderá produzir bons concretos, isso porque é necessário que se faça uma avaliação quanto ao desempenho do concreto.

A NBR 7211/2005 “Agregado para Concreto – Especificação” adota as seguintes definições para os agregados:

- *agregado miúdo* – pode ser oriundo de processo de britagem a partir de rochas estáveis ou naturais que são os encontrados na natureza, ou até da mistura de ambos, cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075;
- *agregado graúdo* – são denominados pedregulhos ou britas provenientes de rochas estáveis ou mistura de ambos, porém seus grãos devem passar pela peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm.

Também faz parte da definição do agregado a dimensão máxima característica associada à distribuição granulométrica do mesmo, correspondente à abertura de malha quadrada, a qual corresponde a uma porcentagem retida e acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. E, por último, a

necessidade de se conhecer o módulo de finura, que é a soma das percentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Segundo a NBR 9935/1987 “Agregado – Terminologia”, a palavra agregado é definida como um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto.

A mesma norma também define que o agregado natural é aquele que pode ser utilizado conforme é encontrado na natureza, necessitando apenas de lavagem e seleção. Já o agregado artificial é aquele resultante de um processo industrial, incluindo-se a britagem de rocha ou pedregulho.

Isto se confirma, pois, até algum tempo atrás, o agregado no concreto era tido apenas como um material granular, inerte, que servia de preenchimento e ficava disperso na pasta de cimento. Atualmente pode-se considerar o agregado como um material de construção ligado em um todo coesivo por meio de uma pasta de cimento. Já sabe-se que o agregado não é um material inerte, pois suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes, químicas, têm influência no desempenho dos concretos (NEVILLE, 1997).

2.1.1 Classificação dos agregados quanto à origem (NBR 7211/2005)

A classificação dos agregados é dada em função de sua origem, podendo ser:

- *naturais* – o agregado é classificado como natural quando o mesmo pode ser utilizado na forma em que se encontra, sem qualquer beneficiamento que não seja a lavagem, podendo também ser classificado em função da granulometria;
- *britados* – são todos os agregados que passam por um processo de cominuição do minério visando liberar da matriz rochosa as incrustações minerais, ou seja, reduzir o agregado de maneira que possa ser utilizado em concretos como pedra britada, pedrisco, pedregulho britado;

- *artificiais* – são todos os agregados oriundos de processos artificiais, tais como argila expandida, vermiculita etc.;
- *reciclados* – são todos aqueles agregados derivados a partir de resíduos industriais, como entulhos de construção civil, entulhos de demolições, escória de alto-forno, porém devem possuir propriedades adequadas para o uso em concretos.

Os agregados naturais são provenientes de rochas que existem na crosta terrestre, as quais estão sujeitas ao intemperismo, resultado dos gradientes de temperatura que ocorrem durante o dia e à noite, pela umidade das chuvas, pelos efeitos dos ventos etc.

Os sedimentos provenientes do intemperismo podem formar três grandes grupos de solos, diferenciados pela composição granulométrica e pela natureza dos grãos de solos que o compõem. São eles:

- os *solos argilosos*, compostos essencialmente por argilominerais, com granulometria extremamente fina, como, por exemplo, os solos de mangue;
- os *solos arenosos*, compostos predominantemente de minerais de natureza não-argilosa, com granulometria acima de 0,075 mm, como, por exemplo, os solos dos desertos ou os solos de praias ou dunas;
- por último, os *solos argilo-arenosos* ou *areno-argilosos*, que são compostos por uma mistura com predominância de um dos dois tipos anteriormente citados; por exemplo: solos em climas temperados tendo rocha-mãe granítica.

Os agregados britados, oriundos do processo de cominuição das rochas, possuem diversas aplicações na construção civil. Normalmente são utilizados como bases de pavimento, concretos e asfaltos, podendo também ser utilizados em barragens com enrocamento em concreto ou mole.

Segundo Gomes *et al.* (2007), para obter condições de utilização, o agregado passa por um processo de beneficiamento na pedreira, cuja seqüência é a seguinte: desmonte, britagem primária, britagem secundária e terciária (dependendo da necessidade de cominuição) e pelo beneficiamento.

O primeiro passo para o desenvolvimento da pedreira é a remoção do material estéril, ou seja, toda camada de solo ou vegetação que está cobrindo a rocha sã. Após a retirada desta cobertura, podem-se executar as perfurações espaçadas para a colocação dos explosivos, os quais, detonados, irão gerar grandes fragmentos de rochas para posterior cominuição no britador. Este trabalho requer um estudo aprofundado das rochas, a fim de se obterem blocos com tamanhos apropriados, e, para isso, são utilizadas várias profundidades e espaçamentos distintos para a colocação dos explosivos.

Existem diversos tipos de britadores que são responsáveis pela fragmentação das rochas. Os principais são os de mandíbula (normalmente utilizados como britador primário), cônicos, cilíndricos, de martelo e o VSI “*Vertical Shaft Impact*”, que permite produzir agregados com forma mais equidimensional, em função do seu princípio autógeno de rocha para rocha para cominuir o agregado. O desenho abaixo mostra com mais detalhes o britador VSI.

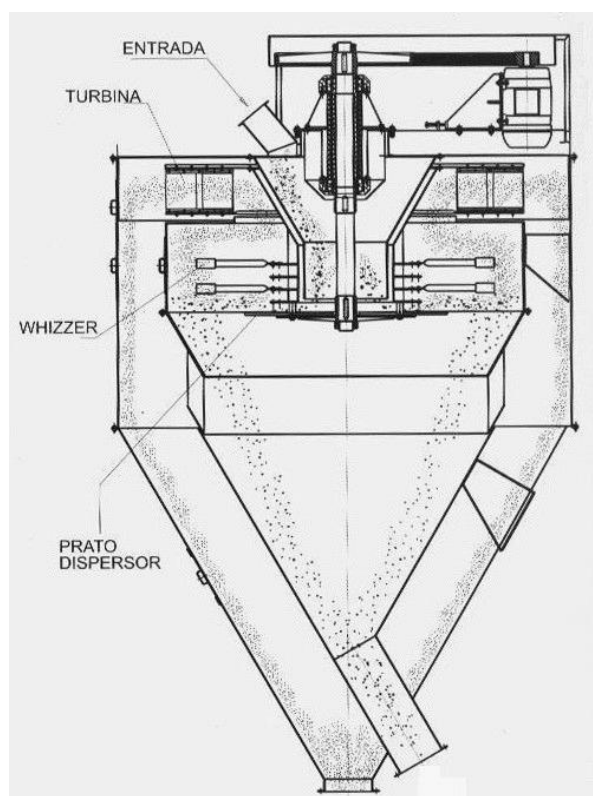


FIGURA 1 - DETALHE DE UM BRITADOR VSI – “*VERTICAL IMPACT SHAFT*”.
FONTE: Votorantim

Por último, existem os agregados artificiais, produzidos industrialmente por processos complexos que permitem a obtenção de propriedades especiais, tais como a baixa massa unitária e o isolamento térmico.

2.2 PROPRIEDADES MINERALÓGICAS

Em geral, os agregados são compostos por uma combinação de vários minerais. Todos têm suas características, porém dentre os mais de dois mil minerais existentes na natureza, apenas alguns são formadores de rocha, podendo-se citar como os mais importantes os minerais de sílica (quartzo), os feldspatos (ortoclásio, plagioclásio), os minerais ferromagnésicos (moscovita, vermiculita), os minerais carbonatados (calcita, dolomita) e os minerais argílicos (ilita, caulinita e montmorilonita).

Segundo Neville (1997), do ponto de vista petrográfico, os agregados naturais ou britados podem ser divididos em diversos grupos de rochas com características comuns. Essa classificação não implica que os agregados de um ou outro grupo sejam mais adequados para o concreto, podendo ser encontrado material inadequado em qualquer grupo, embora em alguns desses grupos seja encontrada uma tendência de materiais de melhor qualidade.

2.3 AGREGADOS MINERAIS

Segundo Frascá e Sartori (1998), dez elementos totalizam cerca de 99% da composição da crosta terrestre. O oxigênio (46,6%) e o silício (28,2%) são os elementos mais comuns nos minerais formadores de rochas, chamados de silicatos. Os demais são: Alumínio (8,2%), Ferro (5,6%), Cálcio (4,2%) e outros (Sódio, Potássio, Magnésio, Ti e P).

2.3.1 Rochas Ígneas ou Magmáticas

São aquelas resultantes da solidificação de material rochoso, parcial ou totalmente fundido, denominado magma, gerado no interior da crosta terrestre. As rochas formadas em profundidade no interior da crosta terrestre são chamadas plutônicas ou intrusivas e as que são formadas na superfície terrestre pelo extravasamento da lava são chamadas de vulcânicas ou extrusivas (FRASCÁ & SARTORI, 1998).

Segundo Frascá e Sartori (1998), as rochas magmáticas são as mais utilizadas na construção civil, seguidas dos granitos e dos basaltos.

2.3.2 Rochas Sedimentares

São aquelas resultantes da consolidação de sedimentos, como partículas minerais provenientes da desagregação e do transporte de rochas preexistentes ou da precipitação química, ou ainda da ação biogênica. Constituem uma camada relativamente fina ($\pm 0,8$ km) da crosta terrestre. Os folhelhos, arenitos e calcários constituem 95% das rochas sedimentares e compõem as bacias sedimentares como as do Paraná e do Amazonas, entre outras (FRASCÁ & SARTORI, 1998).

2.3.3 Rochas Metamórficas

São derivadas de outras preexistentes que, no decorrer dos processos geológicos, sofreram mudanças mineralógicas, químicas e estruturais, no estado sólido, em resposta a alterações das condições físicas (temperatura, pressão) e químicas, impostas em profundidades abaixo das zonas superficiais de alteração e cimentação, ou seja, no domínio das transformações diagenéticas (FRASCÁ & SARTORI, 1998).

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS

Abaixo segue a classificação dos agregados naturais de acordo com o tipo de rocha.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS

| MINERAIS | | ROCHAS ÍGNEAS | ROCHAS SEDIMENTARES | ROCHAS METAMÓRFICAS |
|-----------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------------|
| Silicatos | Não Silicatados | Granitos | Dentríticas | |
| Neossilicatados | | Riolitos | Ruditos | |
| Olivinas | | Dioritos | Conglomerados | |
| | | | Brecha | |
| | | Andesitos | Arenito | |
| | | Sienitos | Quartzo | |
| | | Traquitos | Arenito | |
| | | | Arcósio | |
| | | Fonólitos | Grauvaca | |
| | | Basaltos | | |
| | | Grabos | | |
| | | Diabásios | | |
| | Anortositos | | | |
| | Perioditos | | | |
| | Piroxenitos | | | |
| | Piroclásticas | | | |

FONTE: O autor (2007)

No Brasil, todas as rochas, de acordo com a ocorrência, são usadas como agregados, e todos podem reagir com os álcalis do cimento, dependendo dos constituintes, da granulometria e da deformação da estrutura cristalina (NEVILLE, 1977).

2.5 NORMAS TÉCNICAS DE AGREGADOS PARA CONCRETO

No Brasil, as Normas Técnicas da ABNT definem os detalhes de execução dos métodos de ensaio e procedimentos para caracterização dos agregados para concreto e seus limites.

A seguir são citadas as principais normas atuais que tratam do assunto, bem como algumas normas internacionais.

- NBR 6467:1987 – Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo.
- NBR 7211:2005 – Agregados para concreto – Especificação.
- NBR 7217:1987 – Agregados – Determinação do teor de argila.
- NBR 7218:1987 – Agregados – Determinação de teor de torrões de argila e materiais friáveis.
- NBR 7221:1987 – Ensaio de qualidade de areia – Método de Ensaio.
- NBR 7251:1982 – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária – Método de ensaio.
- NBR 7389:1992 – Apreciação petrográfica de agregados – Procedimento.
- NBR 7809:1983 – Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo paquímetro – Método de ensaio.
- NBR 9917:1987 – Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis – Método de ensaio.
- NBR 9773:1987 – Reatividade potencial de álcalis em combinação cimento-agregado – Método de ensaio.
- NBR 9775:1987 – Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio.
- NBR 9776:1987 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio.
- NBR 9935:1987 – Agregados – Terminologia.
- NBR 9936:1987 – Agregados – Determinação do teor de partículas leves – Método de ensaio.
- NBR 9937:1987 – Agregados – Determinação da absorção e massa específica de a NBR 9938:1987: Agregados – Determinação agregado graúdo – Método de ensaio.
- NBR 9938:1987 – Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos – Método de ensaio.
- NBR 9939:1987 – Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem, por agregado graúdo.

- NBR 10341:1988 – Agregados – Determinação do módulo de deformação estático e coeficiente de Poisson de rocha – Método de ensaio.
- NBR 12042:1996 – Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão – Método de ensaio.
- NBR 12655:1996 – Agregados – Concreto – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.
- NBR 12695:1992 – Agregados – Verificação do comportamento mediante a ciclagem natural – Método de ensaio.
- NBR 12696:1992 – Agregados – Verificação do comportamento mediante a ciclagem artificial água-estufa – Método de ensaio.
- NBR 12697:1999 – Agregados – Verificação do comportamento mediante a ciclagem acelerada com etilenoglicol – Método de ensaio.
- NBR NM 26:2000 – Agregados – Amostragem.
- NBR NM 27:2000 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaio laboratório.
- NBR NM 30:2000 – Agregado Miúdo – Determinação da absorção de água.
- NBR NM 46 – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm por lavagem.
- NBR NM 49: 2001 – Agregado Miúdo – Determinação de impurezas orgânicas.
- NBR NM 51:2001 – Agregado Graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”.
- NBR NM 52:2003 – Agregado Miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.
- NBR NM 53:2003 – Agregado Graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água – Método de ensaio.
- NBR NM 66:1998 – Agregados – Constituintes Mineralógicos dos agregados naturais – Terminologia.
- NBR NM 248:2003 – Determinação da composição granulométrica
- NBR NM ISO 3310 – (1:1996) – Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Parte 1 – Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico.
- ASTM C 33:2001 – Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM C 123:1998 – Standard Test Method for Lightweight Particles in Aggregates.
- ASTM C 1260:2001 – Standard Test Method for Potencial Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).

2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS EM FUNÇÃO DA DIMENSÃO DOS GRÃOS

Segundo a norma técnica NBR 7211 (ABNT, 2005), os agregados são classificados segundo a dimensão dos grãos. Agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 152 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm são classificados como agregados graúdos. Agregados que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075 mm são classificados como agregado miúdo. Todos os ensaios para a classificação dos agregados quanto à dimensão devem ser realizados de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987), sendo que as peneiras utilizadas devem seguir as recomendações da norma NBR ISO 3310-1 (ABNT, 1996).

2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS QUANTO À MASSA UNITÁRIA

Na natureza, a maioria dos agregados apresenta massa unitária na faixa de 1.500 a 1.700 kg/m³. A maioria dos concretos produzidos no Brasil e no mundo utiliza agregados dentro da faixa descrita, porém, em casos especiais, é possível a utilização de agregados leves ou pesados, dependendo da necessidade. A norma NBR 9935 (ABNT, 1987) define esta classificação. Normalmente os agregados leves são aqueles produzidos a partir da expansão térmica da argila, escória, vermiculita, ardósia. Já os agregados pesados comumente utilizados são barita, hematita (minério de ferro), limonita (crostas hidratadas de minerais ferruginosos) (IBRACON, 2005).

2.8 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS

Dentre as características dos agregados que podem influenciar no desempenho dos concretos estão a sua forma e a rugosidade, a sua morfologia, a

massa específica, a presença de materiais deletérios, a absorção de água, a reação com os álcalis do cimento e a composição granulométrica. Vários autores citam que estas propriedades têm correlação direta com as propriedades nos estados fresco e endurecido do concreto.

A forma lamelar e angulosa tem correlação direta com a quantidade de vazios dos agregados (METSU MINERALS, 2005).

A mudança da forma angular dos agregados tem grande influência na trabalhabilidade dos concretos tanto quanto a sua forma lamelar (KAPLAN, 1958; JÄRVENPÄÄ, 2001).

Conforme Basílio (1980) afirma, a área específica de um agregado influencia praticamente todas as propriedades do concreto, sendo que pequenas variações granulométricas no agregado miúdo podem acarretar mais diferenças no desempenho de uma mistura do que uma grande alteração na granulometria do agregado graúdo.

Segundo Coutinho (1973), a área superficial pode atingir o triplo ou o quádruplo da área de uma esfera de volume correspondente, sendo esta variação atribuída à rugosidade da superfície do grão.

Aitcin e Midness (1998) comentam ainda existirem poucos estudos relacionando a influência das propriedades dos diferentes tipos de agregados britados.

A determinação da forma em frações pequenas é muito difícil e tem alto custo. A maneira mais comum de se obter a forma das partículas é através de microscópio e o uso de *softwares* computacionais (BENGTSSON; EVERTSSON, 2006).

Bucher (1986) identifica, de forma bem clara e objetiva, os três grupos de fatores que podem influenciar as propriedades e as características exigíveis dos agregados para atender às especificações técnicas dos concretos:

- a) *propriedades funcionais* – massa específica aparente, dimensão máxima característica;
- b) *propriedades básicas* – resistência mecânica, resistência à deformação, resistência química, resistência ao transporte de energia; e, por último,
- c) *propriedades secundárias* – distribuição granulométrica, textura superficial, índice de forma e os contaminantes; materiais pulverulentos, matéria orgânica, material leve, material argiloso e sais nocivos.

2.9 OBTENÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS BRITADOS NA REGIÃO DE CURITIBA

2.9.1 Geologia Geral da Região

As mais importantes camadas de calcário calcítico ou dolomítico no Estado do Paraná ocorrem no denominado grupo Açungui do pré-cambriano paranaense (MINEROPAR, 2007).

Esta unidade geológica é caracterizada pela idade proterozóica superior (1000 a 570 milhões de anos) com metamorfismos de baixo a médio grau, daí a denominação dessas rochas de meta-calcários ou mármore calcíticos e metadolomitos ou mármore dolomíticos.

O grupo Açungui é subdividido nas seguintes unidades: Formação Capiru, Formação Votuverava, Seqüência Antinha, Formação Itaiacoca e Seqüência Abapã, a seguir discriminadas:

- a) a Formação Capiru ocorre principalmente na região metropolitana de Curitiba. É composta essencialmente de filitos, quartzitos e por meta-calcários dolomíticos ($MgO > 18\%$);
- b) a Formação Votuverava ocorre ao norte da Formação Capiru, separada desta por uma falha que percorre mais de 20 km de extensão denominada de Falha da Lancinha. É composta por filitos, quartzitos, metaconglomerados e principalmente por meta-calcários calcíticos (minas Itaretama, Santo Olavo e Bromados). Nessa formação Votuverava está localizada também a lente de calcário da mina Saivá (cujo agregado miúdo é o objeto deste estudo), exatamente ao norte da falha da Lancinha;
- c) a Seqüência da Antinha é constituída de metarritimitos, meta-calcários, metarenitos e mais raramente metaconglomerados;
- d) a Formação Itaiacoca ocorre junto com a Seqüência Abapã entre os complexos graníticos Três Córregos e Cunhaporanga, sendo composta por mármore dolomíticos e filitos intercalados;

e) a Seqüência Abapã é composta por metarenitos feldspáticos com intercalações de rochas metavulcânicas.

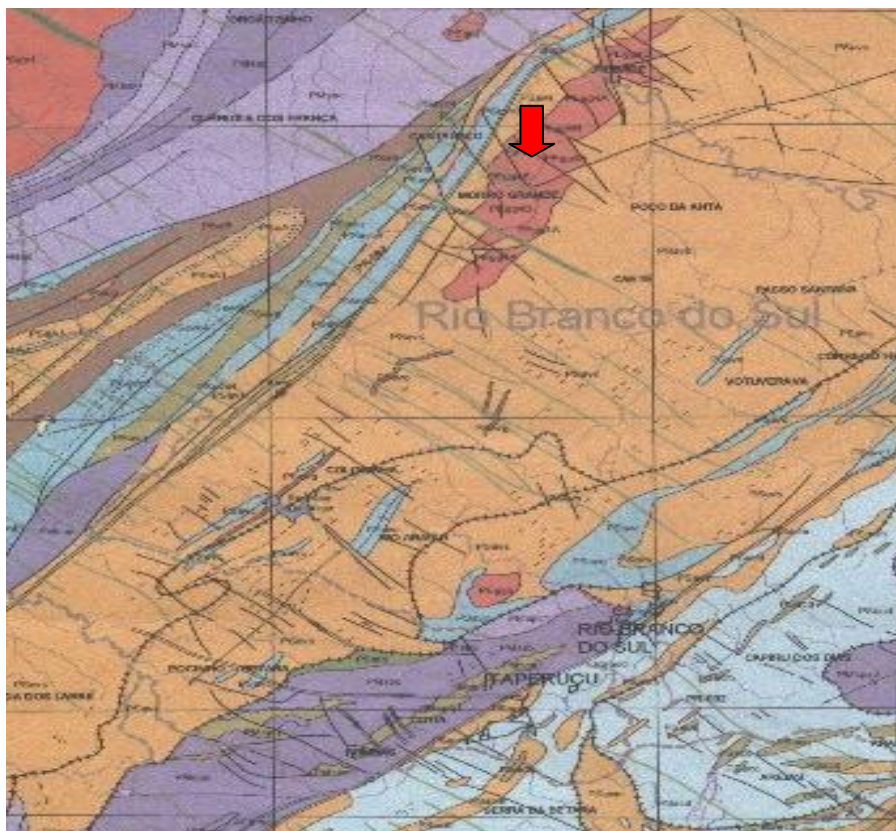


FIGURA 2 - MAPA GEOLÓGICO COM A LOCALIZAÇÃO DA MINA.
 FONTE: Gomes et al. (2007)

2.9.2 Histórico da Mina Saivá

Segundo Gomes *et al.* (2007), a mina de calcário calcítico denominada de Saivá, de propriedade da Votorantim Cimentos Brasil, foi pesquisada no final da década de 70 e no início da década de 80, visando atender à demanda por esta matéria-prima em sua unidade de fabricação de cimento no município de Rio Branco do Sul, no Paraná.

O início da produção se deu em 1982, com aproximadamente 80 mil toneladas por mês, após a instalação da unidade de britagem ao lado da mina.

Atualmente a mina produz 4,8 milhões de toneladas de calcário calcítico com teor médio de 4,5% de MgO para a produção de cimento, corretivo de solo, calcário para a indústria cerâmica e agregado graúdo e fino para construção civil.

2.9.3 Trabalhos de Pesquisa e Avaliação da Mina

Os principais trabalhos realizados durante a pesquisa da jazida e o desenvolvimento da mina foram:

- a) *levantamento topográfico*, composto da abertura de perfis de pesquisa, mapeamento topográfico planialtimétrico, locações preliminar e definitiva de furos de sondagem e de levantamentos geofísicos, amarrações de pontos de controle geológicos e elaboração de modelos topográficos digitais em *softwares* específicos;
- b) *levantamento geofísico*, que significa o levantamento de perfis de resistividade elétrica (método elétrico), visando o mapeamento da cobertura de solo e os contatos geológicos, e levantamentos de variações do campo magnético (método magnetométrico), objetivando a localização de diques de diabásio;
- c) *sondagem*, que para o estudo mineralógico foram executados 11.020,00 metros de sondagem rotativa, objetivando a coleta de informações geológicas e a elaboração de modelo geológico e de teores da mina;
- d) *geologia*, que foi planejada da seguinte maneira:
 - caminhamento geológico de superfície ao longo dos perfis topográficos levantados e mapeamento geológico de superfície;
 - estudo de locação dos furos de sondagem, descrição, amostragem e documentação fotográfica dos testemunhos de sondagem;
 - interpretação e correlação dos perfis de sondagem, geologia da mina e de teores médios;
 - estudos de caracterização litológica e geomecânica a partir dos testemunhos de sondagem, visando estudos de geotecnia para a elaboração de projeto de lavra.
- e) *amostragem e análise química*, sendo em todas as amostras de superfície e testemunhos de sondagem determinados os teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , Na_2O , SO_3 e perda ao fogo;

- f) *modelo de teores*, em que foi utilizado o programa “*Datamine Sofwatere Ltd.*”, através do qual foi elaborado um modelo de bloco computacional de geologia e de teores através de estudos de geoestatística.

2.9.4 Geologia Geral do Minério

- a) O calcário é uma rocha sedimentar formada em ambiente marinho, por precipitação de soluções salinas e acúmulo de restos de minerais carbonáticos de organismos de ambientes marinhos. São compostos basicamente por carbonato de cálcio – calcita, podendo ocorrer minerais considerados como impurezas, tais como o quartzo, a sercicita e a biotita;
- b) A metamarga é uma rocha composta por níveis carbonáticos milimétricos intercalados por níveis de igual espessura de minerais impuros (biotita e sercicita). Sua estrutura é foliada (rocha lamelar) e há ocorrência de pirita nos níveis de foliação;
- c) O dolomito utilizado para a fabricação de cimento é composto basicamente por carbonato de cálcio, calcita e de magnésio – dolomita em que o teor de MgO deve ser menor do que 8,5%.
- d) O dolomito utilizado para confecção de agregados tem o teor de MgO maior que do 8,5%.

2.9.5 Etapas de Lavra

O projeto final de lavra consiste em:

- método: lavra a céu aberto em bancadas e em cava;
- altura das bancadas: 30 metros;
- largura das bermas: 12 metros;
- ângulo de talude individual: 75°;
- ângulo de talude final: 75°;
- largura de rampas: 15 metros.

2.9.5.1 Planejamento Mensal de Lavra

O planejamento mensal da lavra consiste em:

- avaliação do modelo geológico e de teores das frentes, para avanço da lavra a cada detonação;
- localização de frentes de avanços (perfuração);
- definição dos volumes e dos teores médios necessários;
- definição do volume de material estéril a ser removido.

2.9.5.2 Perfuração

A perfuração é executada através de uma perfuratriz da Atlas Copco, modelo L-8. Esta perfuratriz trabalha com alta pressão de fundo (25 Bar).

O martelo utilizado é um COP 54, com diâmetro de 5,5 polegadas, com um comprimento total de 16,5 metros (1,5 metros de subfração) e uma inclinação de 15°. A malha de perfuração é de 5 x 8 metros.

Por ser um equipamento de alta performance, alcança a velocidade de 50m/h, sem considerar as manobras entre furos.



FIGURA 3 - PERFURATRIZ ATLAS COPCO.
FONTE: Votorantim

2.9.5.3 Desmonte

No desmonte primário é usada emulsão bombeada, fornecida pela empresa ORICA, sendo o transporte da base e a sua aplicação no interior do furo feitos por uma unidade de bombeamento, com razão da carga de 150g/ton.

A emulsão utilizada é à base de nitratos, óleo, emulsificantes e agentes gaseificadores. Até ser colocada no furo, é considerada um produto químico oxidante. Na aplicação no interior do furo é que a emulsão torna-se explosiva, devido à adição de gaseificantes, alterando a sua densidade a valores sensíveis.

A quantidade de explosivos em cada furo é de 230 kg, sendo a carga de espera na detonação de no máximo 2 furos, isto é, 460 kg de explosivos.

Como acessório é usado o sistema não-elétrico, tanto na amarração entre furos (HTD) quanto no seu interior, permitindo o controle de tempos entre furos. Na iniciação da emulsão explosiva é usado um reforçador (*booster*) de 250 gramas, e para a queima inicial um espoletim.

O material com granulometria maior do que 1 metro de diâmetro é separado para o desmonte secundário. Este desmonte é feito por um rompedor hidráulico, e, por questão de segurança, os fogachos não estão sendo realizados.



FIGURA 4 - DETALHE DOS ACESSÓRIOS UTILIZADOS PARA A DETONAÇÃO.
FONTE: Votorantim

2.9.5.4 Carregamento e Transporte

A retirada das rochas é feita com o auxílio de máquinas retroescavadeiras de grande porte, que pesam entre 55 e 75 toneladas; o transporte é via caminhões fora de estrada (CAT 773), com capacidade para 60 toneladas, para o britador primário.

2.9.5.5 Britagem Primária

Como pode ser verificado na figura 5, a seguir, a britagem primária é constituída de um alimentador vibratório modelo FAÇO 5 x 20, um britador de mandíbulas modelo FAÇO 150 x 120, que é alimentado com uma granulometria máxima de 1 metro de diâmetro, sendo sua produtividade nominal com abertura máxima de 12" de 1242 t/h e uma correia transportadora de 42" e 4 lonas.

O sistema de britagem em sua câmara ocorre entre a mandíbula fixa e a mandíbula móvel.



FIGURA 5 - BRITADOR PRIMÁRIO.
FONTE: Votorantim

2.9.5.6 Britagem Secundária e Terciária

Como pode ser verificado na figura 6, a britagem secundária é composta por um britador secundário giratório 16 x 50, modelo FAÇO, com sistema de lubrificação a óleo, com pressão de trabalho entre 80 PSI (mínimo) a 320 PSI (máximo). O sistema de britagem de calcário ocorre entre o revestimento da manta (eixo principal) e o revestimento da carcaça. Sua pressão de trabalho (abertura da máquina) é feita através da bomba de óleo do *Hydroset*, que bombeia óleo para o cilindro (eixo principal) ou retira-o, havendo, então, o fechamento ou a abertura da câmara de britagem.

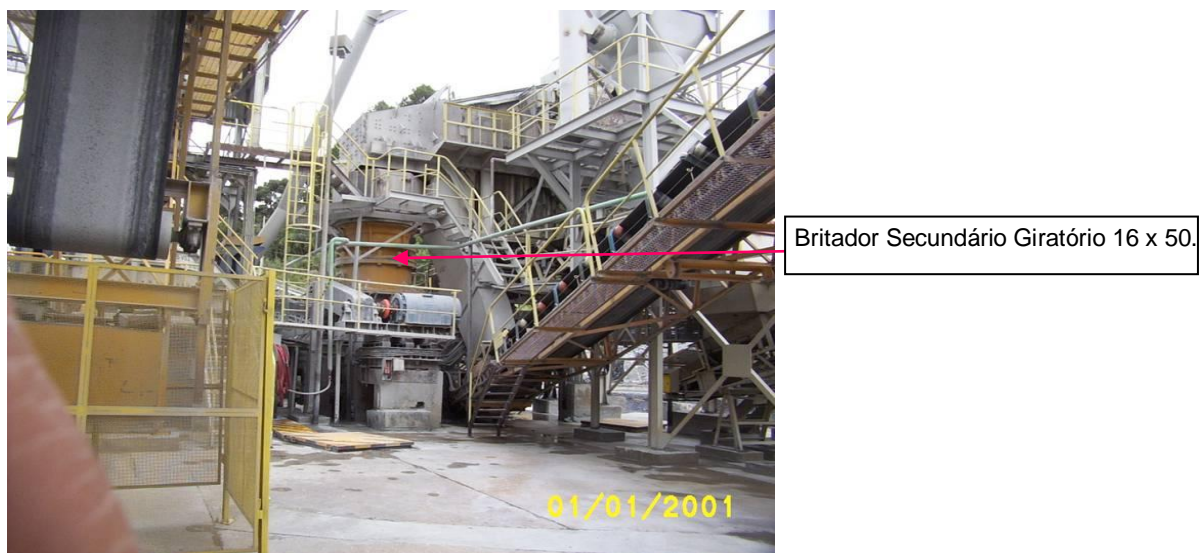


FIGURA 6 - BRITAGEM SECUNDÁRIA COM BRITADOR CANICA VSI 155
FONTE: Votorantim.

O britador CANICA VSI 155 conforme detalha na figura 7, possui rotação no sentido anti-horário de 760 RPM. O material é alimentado através de um tubo, que é distribuído no prato de distribuição/mesa giratória, sendo o mesmo arremessado no *Anvills*, ocasionando a quebra do material (calcário).

A produtividade média é de 500 t/h, produzindo agregados com dimensões menores do que seis polegadas.



Britador CANICA VSI 155.

FIGURA 7 - DETALHE DO BRITADOR CANICA VSI 155.
FONTE: Votorantim.

2.9.5.7 Britagem Quaternária com Britador Canica VSI 125

O britador VSI 125 funciona da mesma forma que o britador VSI 155, porém sua produtividade nominal é de 450 t/h, com granulometria menor do que 3½ polegadas.

2.9.5.8 Peneira Vibratória MNS-60024 para a Produção de Areia

Este equipamento é composto de dois *decks* com telas de vergalhões em malha de aço no primeiro *deck* com medidas de ¾ polegada, e, no segundo, telas de borracha, com 73 módulos de 6 mm e 11 módulos de 7 mm, cuja função básica é a separação do material e a fabricação de areia, como pode ser verificado na figura 8, a seguir.



FIGURA 8 - DETALHE DA PENEIRA VIBRATÓRIA MNS-60024.
FONTE: Votorantim.

2.10 OBTENÇÃO DAS AREIAS NATURAIS

Atualmente pode-se verificar que a extração das areias naturais ainda é feita de forma artesanal, e normalmente a sua comercialização não é precedida de qualquer beneficiamento. Para este tipo de atividade são reconhecidos quatro tipos de jazidas de agregados naturais:

- o leito dos rios – de onde a areia ou o cascalho é removido através de equipamentos de dragagem, que nada mais são que bombas de sucção que aspiram os sedimentos existentes no leito dos rios, e, posteriormente, através de mangueiras, esses sedimentos são depositados em barcaças ou na própria na margem dos rios;
- as cavas imersas – são camadas localizadas às margens dos rios ou lagos, as quais são exploradas também por dragas. Normalmente a classificação é feita por peneiramento antes da estocagem do material em pilhas;
- as cavas secas – também são camadas de areia ou cascalho, encontradas em taludes. Sua extração é feita por desmonte, através de mangueiras hidráulicas de alta pressão;

- o solo de alteração – são áreas de solo com areia ou cascalho em terrenos planos. A extração também é feita com equipamento hidráulico de alta pressão, porém o material retirado é submetido a processos de lavagem para que haja a separação do material fino, como o silte e a argila.

Além das jazidas acima citadas, existe outro tipo de exploração de agregado natural, que é a retirada de areias de dunas. Apesar de esta prática ser ilegal, ainda existem regiões do Brasil, principalmente no Nordeste, onde esta prática é comum.

2.11 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para Coutinho (1999), granulometria é a distribuição das partículas de um agregado segundo as suas dimensões. Essa distribuição influi nas propriedades dos concretos.

A granulometria pode ser contínua, significando que as partículas estão distribuídas uniformemente por todas as dimensões, tanto a menor quanto a maior. Se, além da granulometria contínua, as partículas possuírem uma forma adequada, será possível obter um concreto compacto e resistente para um teor mínimo de cimento, reduzindo conseqüentemente o risco de segregação (HEWLETT, 1998).

A área de superfície específica é a razão entre a área de superfície total e o volume das partículas de um agregado, sendo este um dos fatores determinantes da quantidade de água necessária para a mistura. Em geral, quanto maior a dimensão das partículas de um agregado menor é a área de superfície específica.

A granulometria é um parâmetro físico e pode ser obtida através do ensaio da composição granulométrica, cujo objetivo é mostrar a distribuição dos grãos que constituem a amostra de agregados a ser utilizada. A obtenção de concretos com diversas características só é possível em função dos diferentes tamanhos de agregados, que podem estender-se de menos de um décimo a dezenas de milímetros. De maneira geral, a distribuição é expressa em porcentagens individuais ou em percentuais de acumulados retidos em cada uma das peneiras da chamada série normal ou intermediária, as quais são definidas pela NBR 7211 (2005).

A dimensão máxima do agregado e o módulo de finura também são utilizados como referência. Ambos são definidos pela NBR 7211 (2005). Dimensão máxima característica é a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Já o módulo de finura corresponde à soma das porcentagens retidas acumuladas, em massa, de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

A NBR 7211 (2005) mostra as curvas de distribuição granulométricas correspondentes à zona utilizável e à zona ótima, as quais especificam os limites granulométricos dos agregados para concretos convencionais, determinados segundo a ABNT NBR NM 248:01. Existem diversas razões para tais limitações, entre elas a importância quanto à trabalhabilidade e o custo.

A Tabela 1, a seguir, estabelece os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo, porém é permitida a utilização de agregados miúdos para concreto, materiais com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem a sua aplicabilidade.

TABELA 1 - LIMITE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO

| Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1) | Porcentagem, em massa, retida acumulada | | | |
|--|---|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| | Limites inferiores | | Limites superiores | |
| | Zona utilizável ² | Zona ótima ¹ | Zona ótima ¹ | Zona utilizável ³ |
| 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 2,2 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.

FONTE: NBR 7211 (ABNT, 2005).

Diferentes curvas poderão ter o mesmo módulo de finura, e os agregados respectivos terão comportamentos diversos, por isso a importância da distribuição granulométrica, pois, via de regra, agregados miúdos grossos podem produzir misturas de concreto ásperas e de difícil trabalhabilidade, porém o inverso conduz ao aumento do consumo de água (portanto, o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento) e são economicamente inviáveis. Assim, uma distribuição granulométrica equilibrada produzirá misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas e principalmente proporcionará estruturas mais duráveis, pois este tipo de concreto permite um menor volume de vazios, diminuindo assim os espaços por onde podem penetrar os agentes agressivos ao concreto na forma de líquidos, gases ou vapores (IBRACON, 2005).

A NBR 7211 (2005) também apresenta os limites granulométricos recomendáveis para a utilização do agregado graúdo, conforme pode ser observado na Tabela 2, a seguir.

TABELA 2 - LIMITE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO

| Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) | Porcentagem, em massa, retida acumulada | | | | |
|--|---|-------------------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | Zona granulométrica d/D ¹⁾ | | | | |
| | 4,75/12,5 | 9,5/25 | 19/31,5 | 25/50 | 37,5/75 |
| 75 mm | - | - | - | - | 0 – 5 |
| 63 mm | - | - | - | - | 5 – 30 |
| 50 mm | - | - | - | 0 – 5 | 75 – 100 |
| 37,5 mm | - | - | - | 5 – 30 | 90 – 100 |
| 31,5 mm | - | - | 0 – 5 | 75 – 100 | 95 – 100 |
| 25 mm | - | 0 – 5 | 5 – 25 ²⁾ | 87 – 100 | - |
| 19 mm | - | 2 – 15 ²⁾ | 65 ²⁾ – 95 | 95 – 100 | - |
| 12,5 mm | 0 – 5 | 40 ²⁾ – 65 ²⁾ | 92 -100 | - | - |
| 9,5 mm | 2 – 15 ²⁾ | 80 ²⁾ – 100 | 95 -100 | - | - |
| 6,3 mm | 40 ²⁾ – 65 ²⁾ | 95 -100 | - | - | - |
| 4,75 mm | 80 ²⁾ – 100 | 95 – 100 | - | - | - |
| 2,36 mm | 95 – 100 | - | - | - | - |

Notas:

- 1) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensão do agregado graúdo.
- 2) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com ²⁾. Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

FONTE: NBR 7211 (ABNT, 2005).

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 1987),

- “d” corresponde à menor dimensão do agregado, definida pela maior abertura da peneira da série normal ou intermediária em que fica retida a fração mais fina da distribuição granulométrica do agregado;
- “D” corresponde à maior dimensão do agregado, definida pela menor abertura de peneira das séries de todas as granulométricas;
- d/D define a zona granulométrica do agregado. É a zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensão do agregado graúdo.

2.12 DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS

Os agregados são definidos conforme os seus tamanhos, podendo ser classificados como:

Agregado miúdo – é denominado de areia e pode ser de origem natural ou resultante de processo industrial de fragmentação e trituração, ou mistura de ambas. É o material cujas partículas passam pela peneira 4,75 mm e ficam retidas na peneira com abertura de malha 150 μ m, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela NBR NM ISO 3310-1.

Agregado graúdo – também conhecido como brita ou pedregulho; pode ser de origem natural (pedregulho) ou resultantes de processo industrial de fragmentação e trituração (brita). É o material cujas partículas passam por uma peneira de malha 75 mm e ficam retidas na peneira com abertura de malha 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248:01, com peneiras definidas pela NBR NM ISO 3310-1.

A NBR 7211 (2005) também apresenta o conjunto de peneiras das séries normal e intermediária, conforme observado na tabela 3.

TABELA 3 - CONJUNTO DE PENEIRAS DAS SÉRIES NORMAL E INTERMEDIÁRIA (ABERTURA NOMINAL)

| Série Normal | Série Intermediária |
|--------------|---------------------|
| 75 mm | - |
| - | - |
| - | 50 mm |
| 37,5 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 | - |

FONTE: NBR 7211 (ABNT, 2005).

2.13 FORMA E TEXTURA SUPERFICIAL

Segundo Prentice (1990), os agregados podem ser dispostos em seis categorias: muito angular, angular, subangular, subarredondado, arredondado e bem arredondado.

A NBR 7225 – “Materiais de pedra e agregados naturais – Terminologia”, define a forma de grão ou fragmento de agregados como a feição exterior que o grão ou fragmento apresenta quanto à relação de dimensões, às arestas, cantos e faces, conforme especificado a seguir:

- a) quanto à relação de dimensões, os grãos ou fragmentos devem ser classificados conforme as relações das tabelas abaixo;

TABELA 4 - PEDREGULHO E AREIA

| 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) | $\frac{C}{l} - 1,5 - \frac{l}{C} > 1,5$ |

FONTE: NBR 7225

TABELA 5 - PEDRA BRITADA, PEDRISCO E PÓ DE PEDRA

| 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) | $\frac{C}{l} - 2 - \frac{l}{C} > 2$ |

FONTE: NBR 7225

- b) quanto às arestas e cantos, os grãos ou fragmentos devem ser qualificados como:
- i. angulosos – grãos ou fragmentos que apresentam arestas vivas e cantos angulosos;
 - ii. arredondados – grãos ou fragmentos que não apresentam arestas e têm cantos arredondados.
- c) quanto às fases, os grãos ou fragmentos devem ser qualificados como:
- i. conchoidal – grão ou fragmento que apresenta uma ou mais faces côncavas;
 - ii. defeituoso – grão ou fragmento que apresenta partes com seções delgadas ou enfraquecidas em relação à forma geral do agregado.

Petrucci (1973) já tinha uma opinião bem elaborada a respeito da forma geométrica dos agregados graúdos, que, segundo ele, envolvem três dimensões espaciais das partículas dos agregados, denominando de grãos normais aqueles que apresentam todas as dimensões muito próximas com qualquer relação entre as três dimensões menor que dois. Já os grãos lamelares são aqueles que apresentam grande variação na ordem de grandeza das três dimensões, os quais são divididos em três categorias:

- a) os alongados ou em forma de agulha, quando o comprimento é muito maior do que as outras dimensões, que, por sua vez, são muito próximas;

- b) os discóides ou em forma de disco, quando a espessura é muito menor do que as outras dimensões, que, por sua vez, são muito próximas;
- c) os planos ou em forma de placa, quando as três dimensões diferem muito entre si.

Segundo Shergold (*apud* NEVILLE, 1997), o percentual de vazios decresce quando se aumenta a proporção de agregado arredondado influenciando diretamente na massa específica do concreto.

A forma das partículas dos agregados miúdos tem influência sobre as propriedades da mistura, sendo que partículas angulosas exigem mais água para a mesma trabalhabilidade, porém ainda não existe um método objetivo de medir esta influência.

A textura dos agregados é baseada no grau em que as superfícies das partículas se apresentam – polidas, opacas, lisas ou ásperas –, e tem grande influência na sua aderência à pasta de cimento e também na demanda de água, principalmente o agregado miúdo.

A textura superficial depende da dureza, granulação e características dos poros da rocha-mãe – as rochas duras, densas e com granulação fina geralmente têm superfícies de fraturas lisas.

Segundo a BS 812: Parte 1:1975 pode-se adotar a seguinte classificação em relação à textura:

TABELA 6 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS QUANTO À TEXTURA

| Grupo | Textura | Característica | Exemplos |
|-------|------------|--|---|
| 1 | Vítrea | Fratura conchoidal | Calcedônia, escória vitrificada |
| 2 | Lisa | Erodido por água, ou devido à fratura de cristais finos ou laminares | Seixo, ardósia, mármore e alguns riolitos |
| 3 | Granulosa | Fratura mostrando grãos uniformes mais ou menos arredondados | Arenito, olito |
| 4 | Áspera | Fratura áspera de rochas finas ou grosseiramente granuladas com cristais não facilmente visíveis | Basalto, felsito, calcário |
| 5 | Cristalina | Com poros e cavidades visíveis | Granito, grabo, gnaisse |
| 6 | Alveolar | | Tijolo, pedra pome, espuma de escória, clínquer, argila expandida |

FONTE: Ibracon (2005)

A forma e a textura do agregado têm considerável influência sobre a resistência do concreto. A resistência à flexão é mais influenciada do que a resistência à compressão, e os efeitos da forma e da textura são particularmente significativos no caso de concretos de alta resistência.

As figuras abaixo mostram o arredondamento descrito por Powers (1953).

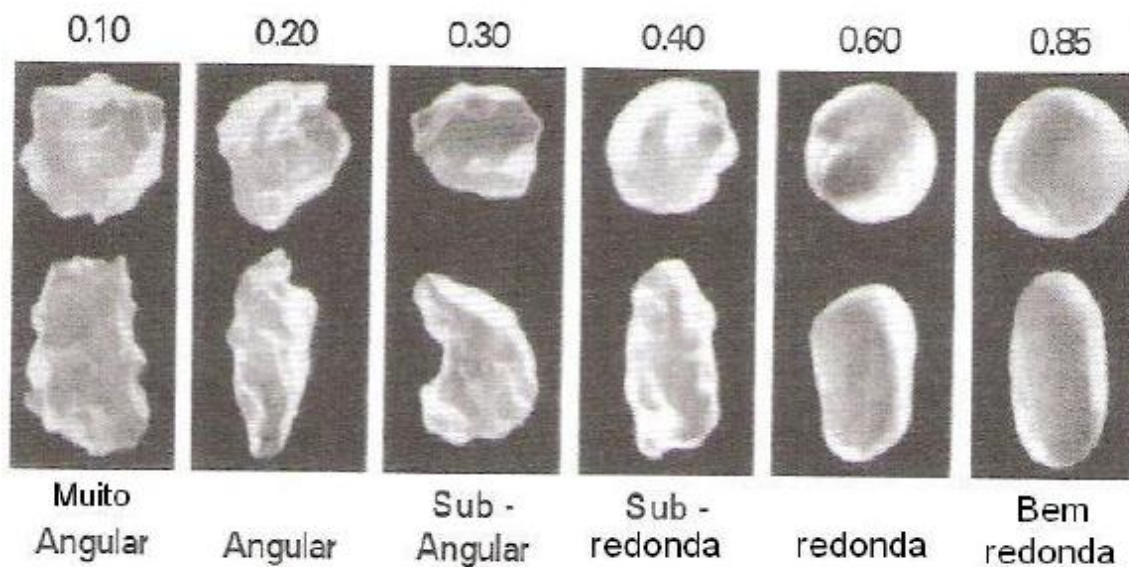


FIGURA 8 - DETALHE DA FORMA DOS GRÃOS.
 FONTE: Ibracon (2005)

2.14 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Apesar da dificuldade em se ensaiar a resistência à compressão das partículas de agregados isoladamente, pode-se observar que a influência sobre a resistência do concreto é qualitativamente igual, quaisquer que sejam as proporções da mistura, tanto em ensaios de tração como de compressão.

Uma forma de se observar a resistência à compressão dos agregados em um concreto é verificar se, após a ruptura do corpo de prova, os agregados aparecem rompidos. Caso isto ocorra, pode-se concluir que a resistência do agregado é menor do que a resistência à compressão nominal desse concreto.

Existe a possibilidade de outras características também influenciarem a resistência do concreto, além da resistência mecânica do agregado, como, por exemplo, a absorção e a característica de aderência.

A resistência média à compressão do agregado é de cerca de 200 MPa, porém muitos agregados com excelente desempenho têm resistências de até 80 MPa. Na Tabela 8, a seguir, pode-se observar a resistência de algumas rochas encontradas na América do Norte e percebe-se que a resistência dos agregados é suficientemente superior à dos concretos utilizados na maioria das obras, porque as tensões na interface das partículas podem ser muito maiores do que a tensão nominal aplicada.

TABELA 7 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA DOS AGREGADOS

| Resistências Médias à Compressão em Mpa | | |
|--|---------------------------|--------------------|
| Tipo de Rocha | Número de Amostras | Valor Médio |
| Granito | 278 | 181 |
| Felsito | 12 | 324 |
| Basalto | 59 | 283 |
| Calcário | 241 | 159 |
| Arenito | 79 | 131 |
| Mármore | 34 | 117 |
| Quartzito | 26 | 252 |
| Gnaisse | 36 | 147 |
| Xisto | 31 | 170 |

FONTE: (2005)

Agregados com módulo de elasticidade moderados ou baixos podem ser importantes para a integridade dos concretos. Agregados mais compressíveis tendem a gerar menores tensões internas nos concretos, ao passo que agregados rígidos podem resultar na fissuração da pasta que os envolve.

A relação de dependência entre módulo de elasticidade e resistência de diferentes agregados não existe. É importante ressaltar que a influência dos resultados depende muito do tamanho da rocha que é feito o ensaio. No caso de corpos de prova cilindros, esta influência pode estar na presença de planos de clivagem da rocha, porém este fato não vai ser significativo após a fragmentação da rocha em agregados utilizados nos concretos.

Outro ensaio que pode ser executado para avaliar a durabilidade da rocha é a relação de resistência de amostras secas e molhadas, medindo-se o efeito de amolecimento e, quando esta relação é alta, deve-se suspeitar da durabilidade.

2.15 ABSORÇÃO E UMIDADE SUPERFICIAL

O agregado pode ser utilizado na produção do concreto em diversas condições de umidade.

Quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não há sequer uma película de água na superfície, diz-se que o agregado está na condição de saturado com superfície seca (SSS). Mas, se estiver saturado, e houver umidade livre na superfície, o agregado estará na condição saturada. Quando toda água evaporável for removida por aquecimento à temperatura de 100 °C em estufa, diz-se que está na condição seco em estufa. Se for colocado ao ar livre e entrar em equilíbrio com a umidade ambiente, estará na condição de seco ao ar.

A capacidade de absorção é definida como a quantidade total de água requerida para levar o agregado da condição seca em estufa para a condição SSS, enquanto a absorção efetiva é definida como a quantidade de água requerida para levar o agregado da condição de seco ao ar para a condição SSS.

Já a umidade superficial é definida como a quantidade de água presente no agregado, além daquela requerida para alcançar a condição SSS.

Os dados de absorção, absorção efetiva e umidade superficial são necessários para a correção da proporção de água do traço de concreto, em misturas realizadas a partir de materiais estocados sujeitos a variações climáticas ou mesmo a variações da umidade relativa do ar.

De maneira geral, os agregados gerados a partir de rochas de boa qualidade e utilizados nos concretos mostram valores de absorção muito baixos (até 1%), enquanto aqueles mais porosos ou alterados por intemperismo podem mostrar valores de absorção elevados (>3%).

2.16 SUBSTÂNCIAS NOCIVAS AO AGREGADO MIÚDO

- impurezas que interferem no processo de hidratação do cimento (ácidos húmicos sais minerais);

- substâncias envolventes do agregado, formando películas que impedem sua aderência à pasta de cimento (argilas, silte).

As substâncias nocivas ou deletérias aos agregados podem ser agrupadas em:

- a) impurezas de origem orgânica na forma de húmus ou fragmentos vegetais, carbonizados ou não, podendo ser ramos, folhas e outros tecidos vegetais. Podem interferir nas reações de hidratação do cimento (húmus). Podem também interferir na resistência mecânica por apresentarem baixa resistência mecânica ou ainda provocar manchas superficiais nos concretos ou argamassas de revestimento. Os materiais carbonosos são limitados a 0,5% pela NBR 7211 (ABNT, 2005), em massa, para concretos aparentes, e em 1% para os demais concretos;
- b) torrões de argila e materiais friáveis podem ser determinados pelo método de ensaio NBR 7218 (ABNT, 1987). O teor máximo permitido pela especificação de agregados para concreto (NBR 7211). Considerando agregado miúdo é de 3%, em massa, enquanto para agregado graúdo é limitado a 1% em concreto aparente, 2% em concreto sujeito ao desgaste superficial e 3% para os demais concretos;
- c) material pulverulento é constituído por partículas com dimensão inferior a 75 µm, inclusive por materiais solúveis em água. A presença excessiva dessas partículas pode afetar a trabalhabilidade e provocar fissuração no concreto, aumentando conseqüentemente o consumo de água no concreto. A NBR 7211 (ABNT, 2005) também limita o agregado miúdo, a 3% em massa do agregado, para o concreto submetido ao desgaste superficial, e 5% em concretos protegidos do desgaste superficial. No agregado graúdo, o limite é de 1%. Porém, quando se tratar de finos oriundos de britagem de rocha com absorção de água inferior a 1%, este limite passa para 2%.
- d) a NBR 7211 (ABNT, 2005) introduz o conceito de agregado total e amplia o limite do material pulverulento de 3% para 10% (porcentagem total de material pulverulento, considerando proporcionalmente a contribuição do

agregado miúdo/agregado graúdo), para concreto submetido a desgaste superficial e de 5% para 12% para concreto protegido do desgaste superficial, desde que seja possível comprovar, por apreciação petrográfica realizada de acordo com a NBR 7389 (ABNT, 1992), que os grãos constituintes não interferem nas propriedades dos concretos. São exemplos de materiais inadequados os materiais micáceos, ferruginosos e argilominerais expansivos.

- e) minerais álcalis-reativos são formas de sílicas com diversos graus de cristalinidade, variando desde o quartzo (forma cristalina) até o opala (forma amorfa). Esses minerais podem reagir com os álcalis presentes nos cimentos, tornando-os expansivos, ou também inseridos por outro constituinte (aditivos, água etc.) do concreto.
- f) impurezas salinas são comuns principalmente em obras próximas à orla marítima. Os responsáveis são os cloretos, sulfatos, nitratos e sulfeto no agregado miúdo, que podem provocar alterações na hidratação do cimento Portland, surgimento de eflorescências, expansões e principalmente acelerar a corrosão das armaduras. No caso dos cloretos que podem ser provenientes da água do mar, a NBR 9917 (ABNT, 1987) determina a quantificação destes sais.
- g) resíduos industriais podem ser comumente encontrados na forma de contaminantes orgânicos (óleos, graxas, solventes etc.), podendo formar uma película em torno dos grãos, prejudicando a aderência com a pasta de cimento Portland. Essas matérias podem contaminar o solo, a ponto de atingir o lençol freático, as águas dos rios, ou mesmo materiais inorgânicos, podendo assim, atingir as jazidas produtoras de areia, o que acaba prejudicando a hidratação do cimento, alterando o tempo de pega e a resistência mecânica da pasta.

A tabela a seguir determina os limites máximos aceitáveis de substâncias nocivas no agregado miúdo com relação à massa do material.

TABELA 8 - LIMITES MÁXIMOS ACEITÁVEIS DE SUBSTÂNCIAS NOCIVAS NO AGREGADO MIÚDO COM RELAÇÃO À MASSA DO MATERIAL

| Determinação | Método de ensaio | Quantidade máxima relativa à massa do agregado miúdo % | |
|--|------------------|---|------|
| Torrões de argila e materiais friáveis | ABNT NBR 7218 | 3,0 | |
| Materiais carbonosos ¹⁾ | ASTM C 123 | Concreto aparente | 0,5 |
| | | Concreto não-aparente | 1,0 |
| Material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento) | ASTM NBR NM 46 | Concreto submetido a desgaste superficial | 3,0 |
| | | Concretos protegidos do desgaste superficial | 5,0 |
| Impurezas orgânicas ²⁾ | ABNT NBR NM 49 | A solução obtida no ensaio deve ser mais clara do que a solução padrão | |
| | ABNT NBR 7221 | Diferença máxima aceitável entre os resultados de resistência à compressão comparativos | 10 % |

Notas:

¹⁾ Quando não for detectada a presença de materiais carbonos durante a apreciação petrográfica, pode-se prescindir do ensaio de quantificação dos materiais carbonos (ASTM C 123).

²⁾ Quando a colocação da solução obtida no ensaio for mais escura do que a solução padrão, a utilização do agregado miúdo deve ser estabelecida pelo ensaio previsto na ABNT NBR 7221.

FONTE: NBR 7211 (ABNT, 2005)

2.17 ÁGUA

Via de regra, uma água imprópria para beber não é necessariamente imprópria para o amassamento de concreto. Do ponto de vista de resistência do concreto, água ácida, alcalina, salgada, salobra, colorida ou com mau cheiro não deve ser rejeitada imediatamente. Isto deve ser levado em consideração porque as águas recicladas de operações industriais podem ser usadas seguramente como água de amassamento para o concreto. Para isso, o melhor método seria o de determinar a aptidão de uma água de desempenho desconhecido e compará-la com

o tempo de pega do cimento e a sua influência na resistência de corpos de prova de argamassas feitas com esta água e uma conhecida (METHA, MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville (1997), impurezas contidas na água podem influenciar negativamente na resistência do concreto, causar manchas em sua superfície, resultar corrosão na armadura etc. Por essas razões, deve-se dar atenção à qualidade da água para o amassamento e para a cura do concreto. Portanto, deve-se adotar águas com pH variando entre 6,0 a 9,0 para a confecção de concretos.

2.18 PROPRIEDADE DOS CONCRETOS

2.18.1 Propriedades do Concreto Fresco

Para Aitcin (2000) enquanto o concreto apresentar uma consistência plástica este é definido como estado fresco do concreto. Para ele são duas as razões principais que revelam a importância de se controlar as propriedades neste estado. Uma delas é que o concreto pode ser facilmente lançado e a outra é que quando as propriedades no estado fresco estão sob controle, provavelmente no estado endurecido haverá um material com as propriedades iguais às desejadas.

2.18.1.1 Aspectos Reológicos

A reologia é definida como o estudo da deformação e do escoamento da matéria. Sua aplicação se justifica a partir do momento em que se podem classificar os materiais, analisar seus comportamentos frente a um campo de tensão, relacionar estes comportamentos com a estrutura de cada material, bem como prever o desempenho destes em outros estágios de tensão, deformação, tempo e temperatura (TANNER, 1998).

Para Hoppe Filho *et al.* (2007), a reologia, ciência que estuda o comportamento dos fluidos, pode ser empregada como ferramenta para analisar o

comportamento do concreto no estado fresco e permite amplo conhecimento da alteração decorrente da hidratação em evolução para o estado endurecido.

As argamassas são formadas principalmente pela dosagem, em proporções adequadas, de materiais como agregados, aglomerantes e água. Na maioria dos casos, assume-se que estas composições são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (no caso, a pasta). Neste contexto, é comum considerar que tais concentrações escoam como um fluido, sendo aplicada a teoria clássica que envolve o escoamento de fluidos. Quando uma força de cisalhamento é aplicada em um fluido, um gradiente de velocidade é induzido nesse fluido. Nesta configuração, o fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente é chamado de viscosidade.

A viscosidade expressa a resistência do fluido ao escoamento (em situação de fluxo), podendo ser considerada como o atrito interno, que ocorre quando uma película do fluido é forçada a mover-se em relação à outra adjacente. Para a maior parte dos líquidos puros, e para muitas soluções e dispersões, a viscosidade (μ), é uma grandeza bem definida a uma dada temperatura e pressão.

A reologia dos concretos no estado fresco e das propriedades mecânicas das primeiras idades pode ser ligeiramente percebida em função da forma do agregado. Isso ocorre porque existe um grande contraste na reologia e nas propriedades elásticas entre a matriz e os agregados (GARBOCZI; DOUGLAS; BOHN, 2006).

Segundo Dal Molin (2005), o concreto pode ser caracterizado, do ponto de vista reológico, por grandezas como coesão e viscosidade. A coesão do concreto é responsável por sua capacidade de se manter na posição original, quando pequenas tensões são aplicadas, e a viscosidade caracteriza a estabilidade do concreto, que envolve sedimentação e segregação, agindo como restrição ao movimento relativo dos grãos. Essas duas grandezas, oriundas basicamente dos fenômenos de superfície devido aos grãos menores da mistura, são afetadas pela incorporação de adições minerais, principalmente quando seu diâmetro médio é inferior ao do cimento, como é o caso da sílica ativa e, geralmente, do metacaulim e da cinza de casca de arroz.

Mesmo quando o diâmetro médio das adições minerais é semelhante ao do cimento, como no caso da cinza volante, sua menor massa específica faz com que o volume da pasta de cimento mais cinza normalmente exceda o volume da pasta de

cimento dos concretos sem adição. O aumento da relação do volume de sólidos para o volume de água produz uma pasta com maior plasticidade e maior coesão.

A reologia está intrinsecamente ligada à distribuição granulométrica e vários estudos têm sido realizados com o objetivo de entender essas relações (OLIVEIRA *apud* PILEGGI, 2002).

A literatura considera os concretos como materiais bifásicos, uma vez que são compostos por uma matriz (domínio dos fenômenos de superfície) e agregados (domínio dos fenômenos de massa). A variação da extensão granulométrica e do coeficiente de distribuição granulométrica, segundo modelo de Andreasen, normalmente altera o quociente matriz/agregado. Tal fato pode modificar a relação de domínios de forças internas que agem nesses materiais. A redução do diâmetro máximo da partícula geralmente aumenta o teor da matriz, resultando em concretos dominados por forças de origem superficial. Por outro lado, o aumento dessas variáveis reduz o teor de matriz com conseqüente aumento no teor do agregado, deixando o concreto mais susceptível aos fenômenos de massa. Essas variações de forças influenciam tanto as características de fluidez desses materiais quanto o seu comportamento reológico em fluxo (TOPCU & KOCATASIN *apud* PILEGGI, 2002).

2.18.1.1.1 Aspectos Reológicos sobre o Ensaio de Abatimento no Tronco de Cone

Segundo Hoppe *et al.* (2007), o princípio físico da medida do tronco de cone está em, ao retirar o molde, o concreto fluir em função da viscosidade aparente se o seu próprio peso superar a tensão de escoamento, parando quando a tensão por unidade de área se igualar à tensão de escoamento. Não se pode atribuir, porém, o comportamento sob fluxo de concretos distintos apenas pela mensuração da sua tensão de escoamento.

Ferraris e Larrard (*apud* PILEGGI, 2002) fizeram a combinação experimental dos resultados do abatimento e os resultados da tensão de escoamento, obtida em reômetro BTRHEON, e desenvolveram o modelo que correlaciona esses parâmetros, porém para concretos com abatimento superior a 100 mm, ou seja:

$$T_0 = \frac{P}{347} \times (300-s) + 212$$

Onde:

T_0 – tensão de escoamento (Pa)

S – abatimento (mm)

P – densidade do concreto fresco (kg/m^3)

2.18.1.2 Trabalhabilidade do Concreto

Ao ser lançado e adensado, o concreto deve atingir a maior compacidade possível. O mesmo não deve desagregar e manter-se nessa condição até o seu acabamento final.

Segundo a ASTM C 125-93 (*apud* METHA e MONTEIRO, 2005), define trabalhabilidade como a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável da homogeneidade.

A trabalhabilidade do concreto depende do atrito interno da mistura, e a caracterização dessa propriedade é dada pela quantidade de trabalho interno necessário para se obter o adequado adensamento (NEVILLE, 1997).

Para Andriolo (1984), existem vários fatores que alteram a trabalhabilidade das misturas, sendo que alguns deles podem ser controlados:

1. temperatura;
2. quantidade de água;
3. quantidade de aglomerante e sua qualidade;
4. quantidade e qualidade de agregado;
5. tipos de aditivos e quantidades adicionadas.

Segundo Prudêncio Jr. (*apud* LODI, 2006), a trabalhabilidade é uma propriedade do concreto fresco. É esta propriedade que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda de homogeneidade. Na abordagem da trabalhabilidade, devem-se avaliar os fatores internos que caracterizam a reologia do concreto. Esses fatores são a consistência (oposto da fluidez) e a coesão (oposto da segregação). A consistência ocorre em

função da quantidade de água adicionada ao concreto ou da presença de aditivos. Já a coesão é a propriedade que reflete a capacidade do concreto em manter a sua homogeneidade durante o processo de adensamento, sendo essa a função da quantidade de finos presente na mistura, além de aditivos, e também da granulometria dos agregados graúdo e miúdo e da proporção entre eles.

2.18.1.3 Coesão do Concreto

Para Dal Molin (2005), a coesão do concreto é responsável por sua capacidade de se manter na posição original sob pequenas tensões.

Para Campiteli (2004), os componentes da mistura são aglutinados graças à coesão, determinada pela presença de finos, porém a sua quantidade apenas deve proporcionar a quantidade de argamassa suficiente para a obtenção de acabamento superficial no concreto.

Para que isso ocorra, devem ser verificados, no ensaio de abatimento, o travamento da mistura e a coesão. Com a coesão adequada encontra-se o abatimento verdadeiro, caso contrário, pode ocorrer desmoronamento por cisalhamento ou desagregação (CAMPITELI, 2004).

Segundo Guimarães (2005), quanto maior a coesão do concreto maior será a tensão inicial de escoamento (E_0), ou seja, a coesão é diretamente proporcional à E_0 .

O concreto necessita de uma tensão mínima para iniciar o seu escoamento (E_0), devido à força resistente a esse movimento, que é composta pelo atrito e pela coesão dos materiais que o compõem (GUIMARÃES, 2005).

2.18.1.4 Segregação e Exsudação

Para Sobral (1984), a segregação é a propriedade característica de uma mistura de concreto em que ocorre a separação de seus constituintes. A ocorrência é devida a fatores relacionados com os insumos, como tamanhos de partículas muito

diferentes do conjunto dos grãos, e da variação da massa específica entre seus constituintes. Ela é prejudicial, pois interfere no processo de obtenção do concreto, afetando a qualidade do produto final em relação à porosidade e às características de comportamento anisotrópico do material. Podem ocorrer ninhos de agregados graúdos localizados ou superfícies sem acabamento.

Existem duas formas de identificar a possibilidade de segregação. Uma é a tendência de os agregados graúdos se separarem por deslocamento ao longo de declives ou sedimentar mais que os agregados menores. Isto ocorre em misturas pobres e secas. A segunda é a tendência da pasta de concreto se separar dos agregados e isso ocorre pelo excesso de água (GUIMARÃES, 2005).

Para Dal Molin (2005), a exsudação é o surgimento da água na superfície do concreto após o mesmo ter sido lançado e adensado, porém, antes de iniciar a pega, e a segregação ocorre quando existe a separação dos constituintes do concreto fresco, de forma que sua constituição deixa de ser uniforme, podendo ser reduzido em função do maior volume de finos e menor consumo de água para uma dada trabalhabilidade.

Para Male (1989), as pequenas partículas, em grande número, agem como bloqueadoras de poros, aumentando o contato sólido-sólido. Com isso, os concretos com adições tendem a ser mais coesos, com redução considerável da tendência à segregação e exsudação, quando comparados a um concreto sem adição.

2.18.1.5 Massa Específica

A massa específica do concreto fresco pode ser um parâmetro importante, por, entre outras coisas, avaliar indiretamente o teor de ar incorporado (aprisionado) no material. Esse teor, se elevado, pode levar a reduções significativas na resistência do concreto. A massa específica do concreto pode ser determinada pela razão entre a massa do concreto e volume de recipiente, o qual fornecerá o valor da massa.

2.18.2 Concreto Endurecido

A escolha de um material de engenharia, para uma aplicação específica, deve levar em conta a sua capacidade de resistir a uma força aplicada. Tradicionalmente, a deformação decorrente de cargas aplicadas é expressa em deformação específica, definida como mudança do comprimento por unidade de comprimento. A carga é expressa em tensão, definida como a força por unidade de área.

Segundo Paulon (2005), o concreto endurecido pode ser considerado como uma rocha artificial. As propriedades desse material heterogêneo, em particular suas características mecânicas, elásticas, físicas e químicas, as quais condicionam os seus empregos, dependem de um grande número de fatores relativos à pasta em si, aos agregados utilizados e, enfim, da ligação entre esses dois elementos essenciais.

2.18.2.1 Resistência do Concreto

O comportamento mecânico do concreto é influenciado por vários fatores, como a granulometria dos agregados, a resistência mecânica dos agregados, o tipo de cimento, a relação água/cimento, a zona de transição, a idade do concreto, a forma, as dimensões, o teor de ar incorporado, as adições, os aditivos minerais, as formas de mistura, a cura, a temperatura etc.

Segundo Metha (1996a), na dosagem do concreto e no controle de qualidade, a resistência à compressão axial é geralmente a única propriedade especificada. Isso ocorre pela simplicidade de sua obtenção e de seu fácil entendimento, pois as outras propriedades do concreto, como durabilidade, impermeabilidade e módulo de elasticidade estão diretamente relacionadas com a resistência e, portanto, podem ser deduzidas a partir desta. Por ser a maior, a resistência axial é aceita universalmente como valor geral de resistência à compressão do concreto.

2.18.2.2 Porosidade

São vários os fatores que influenciam a porosidade do concreto, que está diretamente associada à pasta de cimento endurecida, à porosidade da zona de transição, à porosidade do agregado, aos vazios capilares devido à exsudação e ao ar aprisionado. Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos sólidos da pasta de cimento, oriundos da evaporação da água de mistura excessiva que não teve participação nas reações de hidratação (MINDESS & YOUNG *apud* CAMPITELLI, 1987).

2.18.2.3 Permeabilidade e Absorção

A permeabilidade pode ser a possibilidade de um determinado material se deixar atravessar por um fluido (líquido ou gasoso).

A absorção capilar é um dos mecanismos de transporte que mais afeta a durabilidade das edificações, especialmente as expostas à chuva e sujeitas a ciclos de umedecimento e secagem.

2.20 CURVAS GRANULOMÉTRICAS

O resultado da análise granulométrica é fácil de ser interpretado graficamente com o auxílio de curvas granulométricas, nas quais as ordenadas representam as porcentagens acumuladas passantes e a abscissa mostra a abertura das peneiras ou o diâmetro dos grãos em escala logarítmica. Vale lembrar que as aberturas das peneiras da série normal obedecem a uma progressão geométrica de razão 2 e, portanto, ficam igualmente espaçadas num gráfico logarítmico.

Diz-se que a granulometria é contínua quando apresenta partículas de todos os diâmetros intermediários, desde um valor mínimo (d_0) até um valor (D), e a forma de um “S” suave e alongado na horizontal.

Em contrapartida, diz-se que a curva é descontínua – “*gap graded*” – quando faltar alguma fração intermediária. Nesse caso, tende a apresentar um patamar horizontal na fração ausente. Uma curva é dita uniforme quando a maior parte das partículas pertence a apenas uma fração granulométrica, com d_o igual a $0,5 \times D$.

Curvas uniformes apresentam uma forma de integral \int , ou um S alongado na vertical.

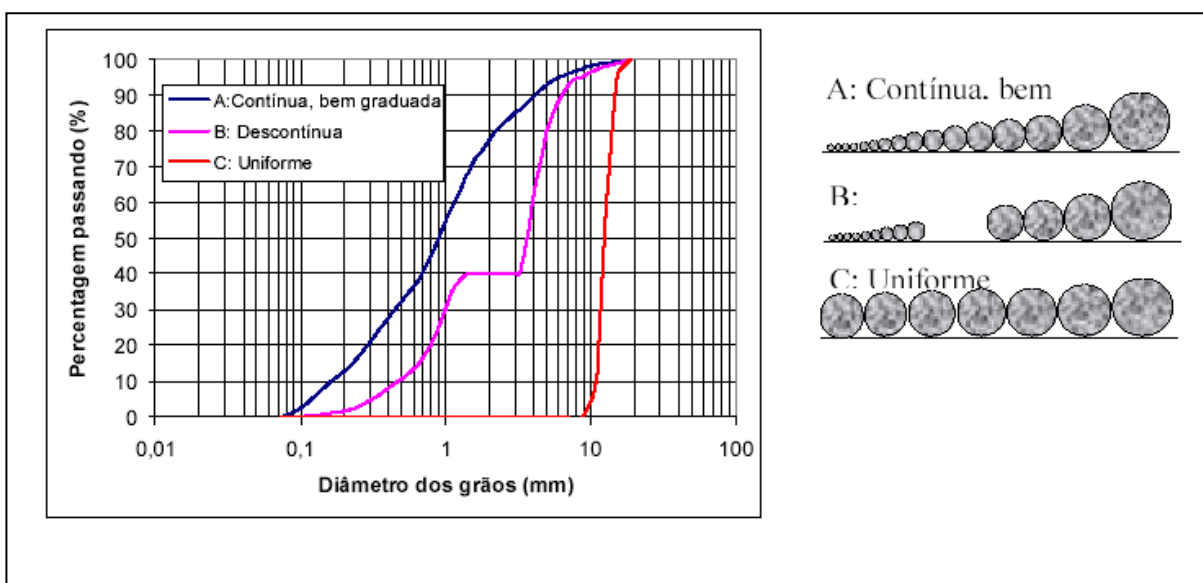


FIGURA 10 - TIPOS DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS
 FONTE: Ibracon (2005)

Segundo Shilstone (1990), a granulometria dos agregados na mistura dos concretos tem mostrado o seu efeito na construção, na resistência, na durabilidade, na rugosidade dos pavimentos, na economia, bem como na segregação e na necessidade de água. Vários modelos têm surgido para se buscar os melhores resultados com a granulometria, e recentemente várias empresas especificadoras nos Estados Unidos têm implementado vantagens para a otimização da granulometria. A otimização na granulometria é uma das formas de aprimoramento para melhorar a classificação do agregado. Adicionalmente, as formas das partículas também foram mencionadas, e é possível que este seja um fator de sucesso na otimização granulométrica.

A utilização na otimização da granulometria resulta em benefícios significativos. A quantidade de pasta de cimento pode ser reduzida, diminuindo o

custo com o cimento. A necessidade de água pode ser menor, a retração pode ser reduzida, melhorando a vida útil e as manutenções das construções.

2.20.1 Granulometria Contínua

Segundo Füller e Thompson (*apud* Shilstone, 2005) foram os primeiros a trabalhar no ajuste da granulometria contínua, buscando maior resistência e trabalhabilidade nos concretos. Eles concluíram que o agregado pode ser classificado em tamanhos, os quais combinados com a água e o cimento podem chegar à maior compacidade dos agregados, desenvolvendo assim a curva granulométrica ideal. Também notaram que a maior densidade obtida na classificação do agregado sozinho não necessariamente obteria a maior densidade quando combinado com a água e o cimento, em função das partículas de cimento entrarem nos pequenos poros.

Shilstone (1990) iniciou os trabalhos na área de concreto otimizado em um projeto na Arábia Saudita na década de 1970. A partir de seus experimentos, ele pôde verificar que existem vários fatores que influenciam as propriedades dos concretos, sendo que uma dela é a classificação do agregado. Suas observações são quanto à trabalhabilidade e à facilidade de ajustes na classificação, sugerindo que o “*slump*” pode ser controlado através da mudança de classificação sem que haja necessidade de se ajustar a relação água/cimento e sem afetar a resistência.

Wing *et al.* (*apud* Shilstone, 2005) notaram que a curva de Füller não necessariamente obtém a maior resistência nem a maior densidade.

Talbot e Richart (*apud* Shilstone, 2005) desenvolveram a seguinte equação conhecida:

$$P = (d/D)^n$$

Onde:

P = porcentagem que passa pela peneira de abertura d em mm.

d = abertura da peneira considerada (mm).

D = dimensão máxima característica do agregado maior.

O equação permite a indicação da dimensão máxima da partícula “D”. A equação produz a maior densidade com $n = 0,5$. Eles concluíram que apenas o

agregado graduado pode produzir dosagens de concretos duros (com pouca trabalhabilidade) e difíceis de serem lançados, não sendo possível a sua utilização.

Segundo a teoria de Edwards (*apud* Shilstone, 2005), a área superficial das partículas do agregado pode controlar a quantidade de água necessária para a trabalhabilidade dos concretos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos empregados para a obtenção das curvas granulométricas.

A metodologia para a obtenção dos concretos será essencialmente experimental, uma vez que se pretende medir o desempenho dos concretos a partir de diferentes misturas, fixando a relação água/cimento, objetivando assim determinar os diferentes parâmetros obtidos através da influência da curva granulométrica no concreto fresco e endurecido.

Todo o programa laboratorial foi executado no laboratório do Centro Técnico da Votorantim e no Laboratório da Universidade Estadual de Ponta Grossa, utilizando os equipamentos disponíveis para a realização do mesmo.

Para isso, foram feitas as seguintes determinações:

- caracterização do agregado miúdo;
- caracterização do cimento;
- confecção das diversas areias, baseadas no modelo parabólico de Talbot e Richart, a partir do expoente 0,2 até 0,8.
- ensaios para a verificação das propriedades do concreto no estado fresco:
 - consistência (NBR NM 67:98);
 - massa específica (NBR 9833/87);
 - *mini-slump*;
 - moldagem dos corpos de prova;
 - determinação da massa específica do concreto fresco.

3.2 COLETA DOS MATERIAIS

3.2.1 Agregado Miúdo Britado

Inicialmente foram coletados em torno de 400 kg de agregado britado da mina Saivá. O material foi coletado de uma pilha, secado e acondicionado em tambores. A coleta foi feita conforme procedimentos da NBR NM 26 (2001) e NBR NM 27 (2001).



DF 1 - PILHA DE AGREGADOS ONDE O MATERIAL FOI COLETADO.
FONTE: Votorantim



DF 2 - SECAGEM DAS AMOSTRAS.
FONTE: Votorantim

A tabela a seguir mostra as características físicas do agregado britado.

TABELA 09 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO BRITADO *IN NATURA*

| | % Retida Acumulada - NBR 7211:2005 | | | | |
|-------|------------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| | Areia Britada | Zona Utilizável Inferior | Zona Ótima Inferior | Zona Ótima Superior | Zona Utilizável Superior |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 5 | 10 |
| 2,4 | 25,6 | 0 | 10 | 20 | 25 |
| 1,2 | 57,4 | 5 | 20 | 30 | 50 |
| 0,6 | 80 | 15 | 35 | 55 | 70 |
| 0,3 | 87,6 | 50 | 65 | 85 | 95 |
| 0,15 | 91,8 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| 0,075 | 91,8 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| Fundo | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

FONTE: Laboratório Engemix (2007)

Módulo de Finura: 3,43
 Material Pulverulento: 8,2 %
 Dimensão Máxima (mm): 4,8

Massa Específica (Kg/dm³): 2,73
 Dimensão Mínima (mm): 0,075

3.2.2 Agregado Natural

Para o agregado natural foram coletados 10 kg em uma obra aleatória da região de Curitiba. Os procedimentos de coleta também seguiram as recomendações da norma NBR NM 26 (2001) e NBR NM 27 (2001).

Abaixo, na tabela 10, são indicadas as características físicas do agregado natural.

TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO NATURAL

| | % Retida Acumulada - NBR 7211:2005 | | | | |
|-------|------------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| | Areia Natural | Zona Utilizável Inferior | Zona Ótima Inferior | Zona Ótima Superior | Zona Utilizável Superior |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,8 | 1,3 | 0 | 0 | 5 | 10 |
| 2,4 | 28,0 | 0 | 10 | 20 | 25 |
| 1,2 | 85,0 | 5 | 20 | 30 | 50 |
| 0,6 | 147,2 | 15 | 35 | 55 | 70 |
| 0,3 | 269,5 | 50 | 65 | 85 | 95 |
| 0,15 | 211,2 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| 0,075 | 78,00 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| Fundo | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

FONTE: Laboratório Engemix (2008)

Massa Específica (Kg/dm³): 2,174
 Material Pulverulento: 3,91 %

Dimensão Mínima (mm): 0,075
 Dimensão Máxima (mm): 4,8

3.2.3 Cimento

O cimento utilizado no experimento foi o CII-Z-32 marca Votoran. A escolha deste cimento deu-se em função de ser um cimento tipicamente utilizado na região de Curitiba, no Paraná. Foi adquirido um saco de cimento de 50 kg com data de produção de 02 de novembro de 2007. A data da compra foi de um dia após a fabricação do mesmo. O cimento foi acondicionado em local fechado e dentro de sacos plásticos, garantindo-se assim as características do mesmo. Na tabela a seguir constam às características físicas, químicas e mecânicas obtidas com o cimento CII-Z-32.

TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO CIMENTO CII-Z

| FABRICA: RIO BRANCO MARCA: VOTORAN BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO | | CQ - CII-Z Exped. Fab.II novembro-07 | | | |
|--|------|---|--------------------|------------------|---|
| ENSAIOS QUÍMICOS - CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO - NBR 5736/91 | | | | | |
| ENSAIO QUÍMICOS -RX -METODO DE ENSAIO NBR 14656/01 | | NBR Nº | UNIDADE | RESULTADOS MÉDIA | ESPECIFICAÇÃO NORMA |
| Perda ao Fogo - PF | | NM18/04 | % | 5,49 | <ou=6,5 |
| Óxido de Magnésio - MgO | | NM21/04 | % | 5,79 | <ou=6,5 |
| Anidrido Sulfúrico - SO ₃ | | NM16/04 | % | 2,70 | <ou=4,0 |
| Resíduo Insolúvel - RI | | NM22/05 | % | 10,1 | <ou= 16 |
| Equivalente Alcalino em Na ₂ O - (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%) | | | % | 0,70 | não aplicável |
| ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS | | | | | |
| ENSAIO | | NBR Nº | UNIDADE | RESULTADOS MÉDIA | ESPECIFICAÇÃO NORMA |
| Área Específica (Blaine) | | NM76/98 | m ² /Kg | 350 | >OU=260 |
| Massa Específica | | NM23/01 | g/cm ³ | 3,0 | não aplicável |
| Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200) | | 11579/91 | % | 2,5 | <ou=12,0 |
| Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325) | | | % | 11,6 | não aplicável |
| Água da Pasta de Consistência Normal | | NM43/02 | % | 27,8 | não aplicável |
| Início de Pega | | NM65/03 | min | 269 | >ou=60minut |
| Fim de Pega | | | min | 344 | |
| Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente | | 11582/91 | mm | 0,80 | <ou=5,0 |
| RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) | | | | | ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 7215/69 |
| Idade (Dias) | Min. | Máx. | Média | Desvio | não aplicável >ou=10 >ou=20 >ou=32 |
| 1 | | | | | |
| 3 | 23,4 | 26,0 | 24,7 | 0,7 | |
| 7 | 27,1 | 30,4 | 29,0 | 0,9 | |
| 28 | 34,7 | 37,8 | 35,8 | 0,8 | |
| ESTABILIDADE DE PARÂMETROS DE QUALIDADE: RESISTÊNCIA e PEGA | | | | | |

FONTE: Laboratório Votorantim (2008)

3.3 PROCEDIMENTOS INICIAIS – DETERMINAÇÃO DAS CURVAS EXPERIMENTAIS OTIMIZADAS – SEM FINOS.

Para levantar a porcentagem retida de agregado necessário para a obtenção das curvas experimentais otimizadas a partir da equação matemática de Talbot e Richard (1923), partindo do expoente 0,2 até o expoente 0,8, foi feito o peneiramento de 1 kg de material com o objetivo de se descobrir o diâmetro máximo do agregado e quais faixas de areia deveriam ser peneiradas, conforme tabela abaixo.

$$P = (d/D)^n$$

Onde:

P = porcentagem que passa pela peneira de abertura d em mm.

d = abertura da peneira considerada (mm).

D = dimensão máxima característica do agregado maior.

n = expoente utilizado

TABELA 12 - PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS PARA OS EXPOENTES – Q SEM MATERIAL PULVERULENTO

| DMC (mm) | Peneiras (mm) | Porcentagens retidas acumuladas para os expoentes –q | | | | | | |
|----------|---------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 4,8 | 4,8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 2,4 | 12,94 | 18,77 | 24,21 | 29,29 | 34,02 | 38,44 | 42,57 |
| | 1,2 | 24,21 | 34,02 | 42,57 | 50,00 | 56,47 | 62,11 | 67,01 |
| | 0,6 | 34,02 | 46,41 | 56,47 | 64,64 | 71,28 | 76,67 | 81,05 |
| | 0,3 | 42,57 | 56,47 | 67,01 | 75,00 | 81,05 | 85,64 | 89,12 |
| | 0,15 | 50,00 | 64,64 | 75,00 | 82,32 | 87,50 | 91,16 | 93,75 |
| | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

FONTE: O autor (2007)

Para que houvesse a possibilidade de se moldarem 6 corpos de prova para rompimento aos 7 e 28 dias, foi necessário o peneiramento de 2.500 g de agregado para cada curva obtida a partir da equação matemática de Talbot e Richard *apud* Shilstone (2005) utilizando-se os coeficientes n, variando de 0,2 a 0,8, conforme tabela 13, a seguir.

TABELA 13 - MATERIAL UTILIZADO PARA COMPOSIÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS EM MASSA (g).

| Peneiras | Quant. Total (g) | Quantidade de material em massa (g) | | | | | | |
|----------|------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 2,4 | 2.500 | 323,624 | 469,369 | 605,354 | 732,233 | 850,615 | 961,069 | 1064,127 |
| 1,2 | | 281,731 | 381,246 | 458,773 | 517,767 | 561,197 | 591,608 | 611,180 |
| 0,6 | | 245,261 | 309,668 | 347,685 | 366,117 | 370,252 | 364,177 | 351,031 |
| 0,3 | | 213,512 | 251,529 | 263,496 | 258,883 | 244,275 | 224,177 | 201,614 |
| 0,15 | | 185,873 | 204,305 | 199,692 | 183,058 | 161,161 | 137,997 | 115,797 |
| <0,15 | | 1250,000 | 883,883 | 625,000 | 441,942 | 312,500 | 220,971 | 156,250 |

FONTE: O autor (2007)

Com a determinação da quantidade de material para a confecção de cada curva experimental otimizada, foi feito o peneiramento do material para as peneiras 0,15; 0,3; 0,6; 1,2 e 2,4. Para que fosse retirado o material pulverulento do fundo, todo o material passante pela peneira 0,15 passou por um processo de lavagem na peneira 0,075 mm (200 μ). O material retido foi seco em estufa por 24 horas e posteriormente utilizado na confecção das curvas experimentais otimizadas com adição de finos.

Para a pesagem dos materiais, foi utilizada uma balança da marca Toledo modelo PG 8001-S com precisão de 0,1g, vista na figura a seguir.



DF 3 - BALANÇA TOLEDO UTILIZADA PARA A PESAGEM DOS MATERIAIS.

FONTE: Votorantim (2007)

3.4 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO E DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Para a confecção das argamassas, foi escolhido o traço 1:3 em massa por ser comumente utilizado. Para determinar a relação água/cimento, pesaram-se 500 g de cimento e 1.500 g de agregado a ser utilizado. Foram feitas várias misturas até se obter o resultado mais próximo de 230 ± 5 mm de abertura na mesa de *flow*, chegando-se a uma relação de A/C de 0,48. Então foi fixado em 0,50 fator A/C para a realização de todas as curvas.

3.5 PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO

3.5.1 Procedimentos – Condições Ambientais

Para a realização dos ensaios foram adotados os seguintes procedimentos descritos:

- o laboratório deve ser mantido à temperatura de $(24 \pm 4)^{\circ}\text{C}$ e com umidade relativa maior do que 50%;
- todos os materiais para ensaio devem estar sempre à mesma temperatura do laboratório, quando usados;
- a água de amassamento deve ser mantida à temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$;
- a temperatura de aplicação do material de capeamento fundido deve ser de $(136 \pm 7)^{\circ}\text{C}$.

3.5.2 Materiais

Para a confecção de 6 corpos de prova, foram utilizados os seguintes materiais:

- 2.500 g de agregado miúdo britado otimizado granulometricamente, nas frações predeterminadas;
- 833,33 g de cimento Portland CII-Z-32 marca Votoran;
- 416,66 g de água destilada.

3.5.3 Mistura

Abaixo são descritos os procedimentos de mistura dos materiais:

- pesar e misturar previamente todas as frações de areia;
- despejar água na cuba, em seguida despejar o cimento previamente pesado, limpar o recipiente com o auxílio do pincel, levar o conjunto ao misturador e acionar a mesma com velocidade baixa, por 30 segundos;
- colocar a areia, com o misturador ligado, homogeneizando nos 30 segundos em que o misturador estiver em velocidade baixa;
- passar para a velocidade alta durante 30 segundos e então desligar o misturador;
- em 15 segundos, raspar as laterais do misturador com uma espátula;
- esperar 75 segundos com a cuba coberta com um pano úmido;
- retirar o pano e ligar o misturador na velocidade alta por 60 segundos;

3.5.4 Ensaio da Mesa de Consistência (*Flow Table Test*)

Com o término da mistura, foi executado primeiramente o ensaio da mesa de consistência, conforme procedimento descrito pela NBR 7215 (1996). Este ensaio visa medir o espalhamento de uma porção de argamassa moldada em tronco de cone sobre uma mesa de ensaio. O cone é preenchido em três camadas com altura similar onde a primeira camada recebe 15 golpes, a segunda 10 golpes e a terceira 5 golpes, posteriormente o excesso de material é raspado de forma que a argamassa fique totalmente preenchida no cone. A argamassa moldada é forçada a deformar-se mediante 30 ciclos (quedas) da mesa, onde são medidos os diâmetros ortogonais da base do tronco de cone de argamassa após a deformação, sendo a média aritmética dessas medidas o chamado índice de consistência, expresso em milímetros. A figura abaixo mostra o equipamento da mesa de consistência.



DF 4 - DETALHE DO EQUIPAMENTO DA MESA DE CONSISTÊNCIA
FONTE: Laboratório Votorantim (2007)

3.5.5 Ensaio de Mini Cone

Aproveitando a mesma argamassa utilizada no ensaio de índice de consistência, apenas misturando com o material acondicionado na cuba, foi realizado o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone utilizando-se os procedimentos descritos na NBR NM 67/98, porém foi utilizado o mini cone proposto por Gorisse (1981).

Para a realização do ensaio, foi utilizado um tronco de cone com dimensões de 5,0 x 10,0 x 15,0 cm e uma haste com 8 mm de diâmetro. O método consiste em preencher o tronco de cone em três camadas similares de argamassa, aplicando 12 golpes com a haste em cada camada. Após a realização da última camada e dos 12 golpes, retira-se a tampa eliminando o material excedente com uma espátula. Só então se ergue lentamente o cone. Coloca-se o cone virado ao lado da pilha de argamassa, apóia-se a haste em cima do cone metálico e faz-se a medida da diferença do cone e o topo superior da argamassa expressa em mm.



DF 5 - DETALHE DO TESTE DE "MINI-SLUMP".
FONTE: O autor (2007)

3.5.6 Ensaio de Massa Específica no Estado Fresco

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma cuba com volume e massa conhecidos. Após o teste com o *mini slump*, a cuba foi preenchida com a argamassa, tendo sido necessário bater a cuba para que ocorresse o adensamento pleno da argamassa, todo o excesso foi retirado com uma espátula para posterior pesagem.

3.5.7 Moldagem dos Corpos de Prova

Para a moldagem foram utilizados corpos de prova com dimensões de 5,0 x 10 cm previamente lubrificados com uma camada fina de óleo mineral. Com o auxílio de uma espátula foi colocada a argamassa nos moldes em 4 camadas, promovendo 30 golpes por camada com o auxílio de um soquete. Os topos dos corpos de prova foram arrasados, porém sem retirar todo o excesso de material, identificados com data e horário e levados à câmara úmida por aproximadamente duas horas e só então, os topos dos corpos de prova foram arrasados, de forma a se obter uma superfície regular e lisa.

Após 20 a 24 horas, os moldes foram retirados, desformados, pesados e identificados com a data e horário da moldagem, escritas a lápis nos corpos de prova. Posteriormente os corpos de prova foram acondicionados em banho até a data de rompimento.

No dia do rompimento os corpos de prova foram retirados do banho e levados para capeamento, para a qual se utilizou uma mistura na proporção de 67,5% de enxofre e 32,5% de areia moída.

Após o capeamento, os corpos de prova são imersos em água com temperatura entre 21 e 25 °C e transportados até o local da ruptura e mantidos desta forma até o momento da ruptura. Foi observada a tolerância de ± 2 horas para os rompimentos aos 7 dias e ± 4 horas para os rompimentos aos 28 dias.

Para o rompimento dos corpos de prova, foi utilizada uma prensa com velocidade de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

As figuras a seguir mostram os procedimentos de armazenagem e rompimento dos corpos de prova.



DF 6 - DETALHE DOS MOLDES NA CÂMARA ÚMIDA

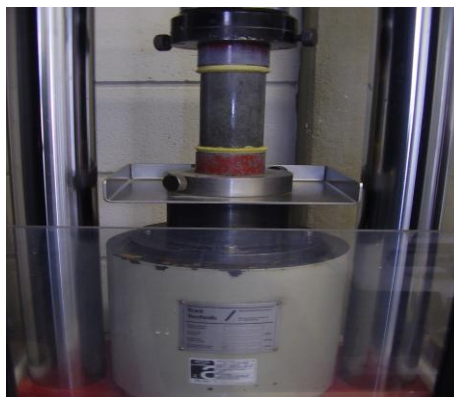


DF 7 - DETALHE DOS CORPOS DE PROVA NO BANHO



DF 8 - DETALHE DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

FONTE: O autor (2007)



DF 9 - DETALHE DO ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos com as curvas experimentais otimizadas, utilizando-se o material retido até a peneira 0,075 mm. O agregado miúdo retido na peneira 0,075 mm foi lavado para a retirada de todo o material pulverulento. Para fácil identificação dos materiais, as amostras foram classificadas como amostras da série A02 até A08, que indica o coeficiente n utilizado na composição granulométrica. A amostra A01 refere-se à amostra do agregado britado *in natura* coletado originalmente e, por último, a amostra denominada como natural, referindo-se à areia natural coletada em uma obra na cidade de Curitiba.

Posteriormente serão apresentados os resultados obtidos da composição de novas curvas, porém com a adição de material pulverulento, utilizando-se os coeficientes 0,4 a 0,8. A escolha dessas curvas foi feita a partir da observação qualitativa dos concretos obtidos nas curvas sem a adição de material pulverulento. Para a confecção dessas curvas, todo material retido na peneira 0,075 mm também foi lavado para eliminação do material pulverulento. Foi considerado como pulverulento apenas o material fino passante na peneira 0,075 e retido no fundo. Para observar a influência do material pulverulento nas composições nos concretos, foram adotadas a adição de 3%, 6%, 9% e 12% desse material. Para fácil identificação as amostras foram classificadas como B04.03 significando B como a amostra com material pulverulento, utilizando-se o coeficiente 0,4 na equação matemática para a obtenção da curva de distribuição e 03 indicando o percentual de adição de material pulverulento, no caso, 3%.

Além dos resultados, foram incluídos os materiais fotográficos de todos os ensaios realizados.

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS AGREGADOS BRITADOS

A seguir, na tabela 14 e gráficos 1 e 2, estão apresentadas as porcentagens retidas acumuladas e as curvas granulométricas utilizadas inicialmente no presente

trabalho, os módulos de finura e a área específica, adotando-se os coeficientes de distribuição $n = 0,2$ a $0,8$ sem a adição de material pulverulento.

TABELA 14 - COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS UTILIZADOS

| DMC (mm) | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | A. Natural | Britado | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 | A08 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0,13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 2,93 | 0,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 10,00 |
| | 2,4 | 11,43 | 25,6 | 12,94 | 18,77 | 24,21 | 29,29 | 34,02 | 38,44 | 42,57 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 26,15 | 57,4 | 24,21 | 34,02 | 42,57 | 50,00 | 56,47 | 62,11 | 67,01 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 53,1 | 80 | 34,02 | 46,41 | 56,47 | 64,64 | 71,28 | 76,67 | 81,05 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 74,22 | 87,6 | 42,57 | 56,47 | 67,01 | 75,00 | 81,05 | 85,64 | 89,12 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 92,2 | 91,8 | 50,00 | 64,64 | 75,00 | 82,32 | 87,50 | 91,16 | 93,75 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 100 | 91,8 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Módulo de Finura | 2,57 | 3,42 | 1,64 | 2,20 | 2,65 | 3,01 | 3,30 | 3,54 | 3,73 | 1,55 | 3,50 |
| | Área específica (cm ² /g) | 55,87 | 20,37 | 113,68 | 88,00 | 68,91 | 54,64 | 43,92 | 35,83 | 29,69 | - | - |

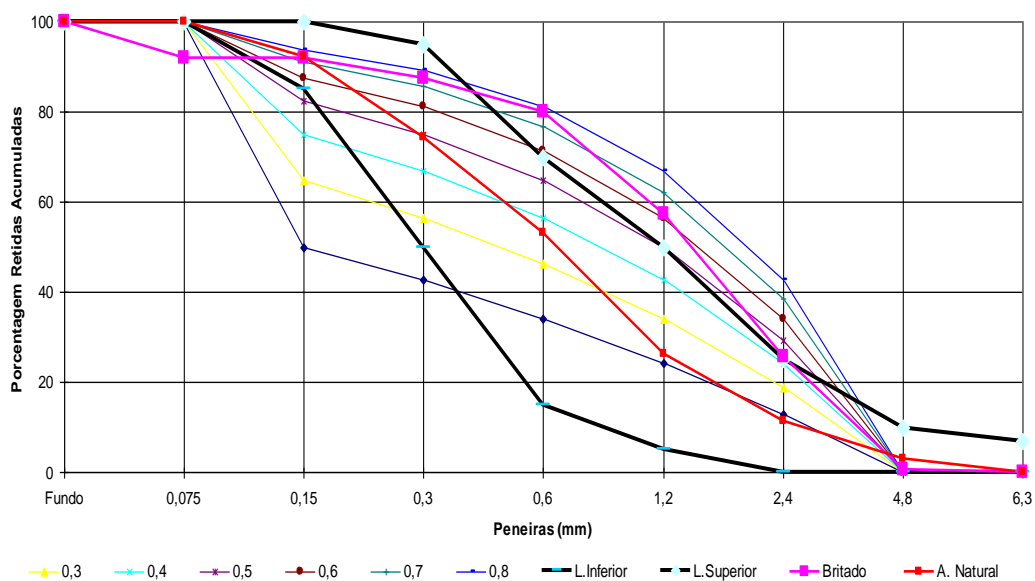


GRÁFICO 1 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE, OTIMIZADO BRITADO *IN NATURA* E NATURAL

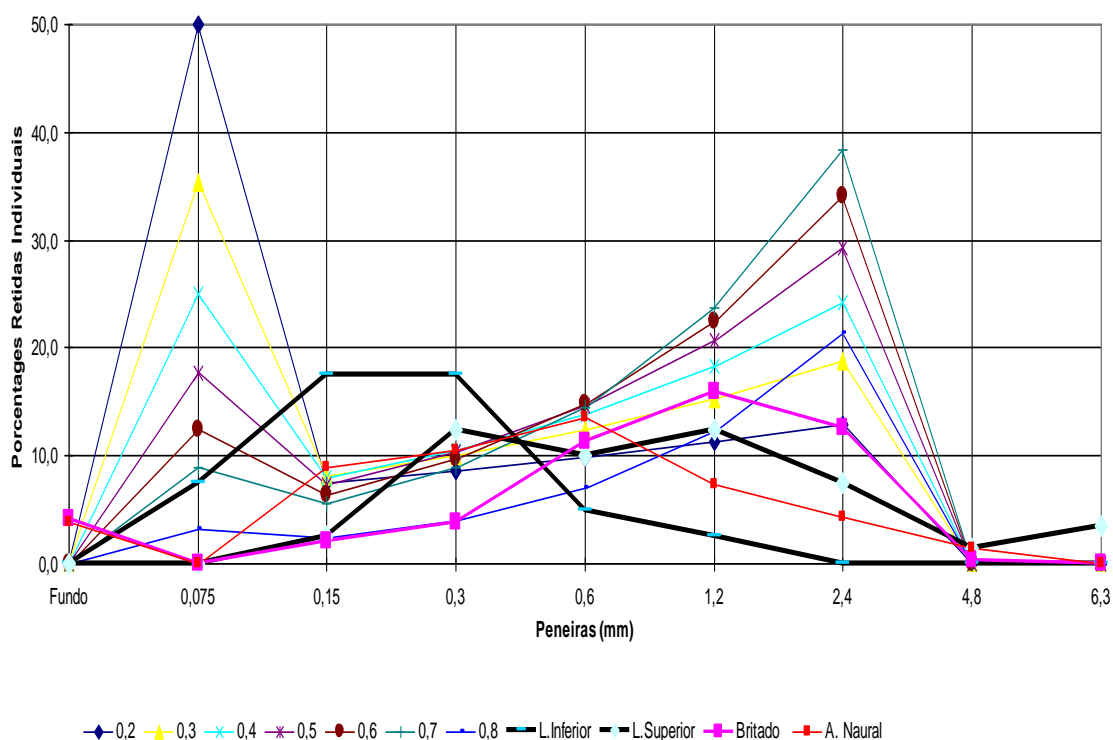


GRÁFICO 2 - PORCENTAGENS RETIDAS INDIVIDUAIS DOS AGREGADOS TOTAIS

Analisando os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados miúdos, pode-se verificar que nenhuma das faixas granulométricas montadas com os coeficientes de distribuição $n = 0,2$ a $0,8$ e o agregado miúdo britado *in natura* estão dentro dos limites propostos pela NBR 7211:2005; apenas a areia natural apresenta todas as peneiras retidas acumuladas dentro da faixa especificada pela norma.

As curvas granulométricas obtidas com os coeficientes de distribuição $n = 0,2$ a $0,4$ possuem área específica superior ao agregado britado *in natura*. É possível concluir que coeficientes muito pequenos ($n = 0,2$) causam um excessivo aumento na área superficial das partículas.

Analisando os resultados, os módulos de finura 2,2 e 2,65 das amostras da série A obtidas com os coeficientes de distribuição $n = 0,3$ e $0,4$ encontram-se dentro da zona ótima, que é de 2,2 a 2,90 proposto pela NBR 7211:2005.

As amostras A07, A08 apresentam o módulo de finura acima do limite superior proposto pela NBR 7211:2005. Todas as demais amostras apresentam o módulo de finura dentro dos limites recomendados pela NBR 7211:2005.

As curvas granulométricas com as faixas montadas com os coeficientes de distribuição $n = 0,5$ a $0,8$ e a amostra do agregado britado *in natura* apresentam porcentagens retidas acumuladas em várias peneiras, superiores ao limite superior recomendado pela NBR 7211:2005. Esta característica torna a curva mais aberta, ou seja, quanto maior for a porcentagem retida acumulada na peneira de maior tamanho maior será a influência da matriz agregada.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO FRESCO DAS AMOSTRAS DA SÉRIE A E AREIA NATURAL

TABELA 15 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, *MINI SLUMP* E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA

| AMOSTRAS | Britado | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 | A08 | Natural |
|--------------------------------------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|---------|
| Traço | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 |
| Fator A/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,5 | 155,95 | 160 | 267,75 | 256,9 | 230,15 | 263,4 | 265,65 | 140,15 |
| Mini Slump (mm) | 24 | 0 | 2 | 24 | 23 | 15 | 41 | 39 | 0 |
| Massa (g) | 1001,8 | 982,5 | 994,7 | 990,3 | 992 | 1001 | 977,6 | 1012,4 | 901,3 |
| Volume da Cuba | 427,8 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 429,7 |
| Densidade (kg/dm ³) | 2,342 | 2,296 | 2,325 | 2,314 | 2,318 | 2,339 | 2,285 | 2,366 | 2,098 |
| Área Específica (cm ² /g) | 20,37 | 113,68 | 88,00 | 68,91 | 54,64 | 43,92 | 35,83 | 29,69 | 55,37 |

FONTE: O autor (2007)

Os menores resultados obtidos no ensaio do índice de consistência, ocorreram nas amostras da série A02, A03 e na areia natural.

Para uma mesma extensão granulométrica (mesma faixa de agregados utilizados), quanto menor o coeficiente de distribuição utilizado para a composição da curva de distribuição granulométrica, maior será a área específica. Coeficientes pequenos causam um excessivo aumento na área superficial das partículas, reduzindo a fluidez.

Percebe-se também pelos documentos fotográficos 11 e 12 adiante, que ambas as amostras apresentam pouca coesão.

Para uma mesma relação água/cimento existe uma possível correlação entre a área específica e o *slump*. Esta correlação pode ser observada nas amostras A02, A03 e A04, porém nas amostras A05 e A06 o mesmo fenômeno não ocorre, voltando a ocorrer nas amostras A07 e A08.

Partículas menores do que 100 μm , as quais em conjunto com a água constituem a matriz do concreto, são predominantemente susceptíveis à ação de forças de superfície. Por sua vez, as partículas maiores que 100 μm (agregados) manifestam com maior intensidade os efeitos das forças mássicas, provavelmente o que ocorreu nas amostras A07 e A08.

A coexistência de partículas em ambos os domínios resulta no conceito de que esses materiais possuem natureza bifásica, provavelmente o que ocorreu nas amostras A04, A05 e na amostra do agregado britado, porém este já sofre a influência do material pulverulento.

Analisando os resultados de índice de consistência das amostras da Série A, percebe-se que os maiores espalhamentos ocorrem nas amostras A04 e A05, sem que houvesse segregação do material. Provavelmente estas amostras possuem natureza bifásica, havendo uma interação do conjunto de grãos grossos imersos na matriz fluida.

Os resultados obtidos com o ensaio de índice de consistência nas amostras 04, 05 e 06 apresentam um espalhamento da argamassa na mesa similar ou superior à amostra de referência denominada britado. Nesse ensaio observa-se que as amostras são coesas e seu espalhamento ocorre de forma uniforme, conforme os ciclos da mesa de consistência. O mesmo pode ser observado nos documentos fotográficos 13, 14 e 15.

Os resultados obtidos com o ensaio de índice de consistência nas amostras A07 e A08 apresentam um espalhamento da argamassa na mesa superior à amostra de referência denominado britado e próximo ao das amostras A04 e A05, porém, durante a realização dos ensaios, percebe-se a falta de coesão do concreto. Nos primeiros ciclos da mesa percebe-se a rápida desagregação e o espalhamento. Isso pode ser observado quando se analisa o documento fotográfico 18.

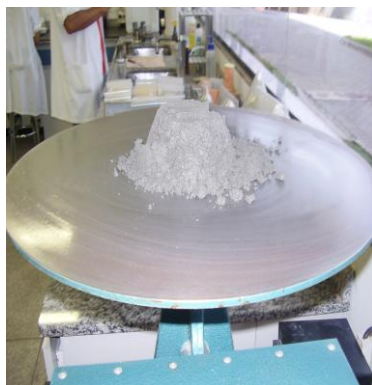
Apesar de os resultados do índice de consistência nas amostras 07 e 08 serem similares aos das amostras 04, 05 e 06 percebe-se uma tendência à falta de coesão quando o ensaio de mini cone é executado.

4.2.1 Documentos Fotográficos com as Amostras da Série A e Areia Natural

Os documentos fotográficos abaixo mostram a realização dos ensaios de índice de consistência e mini-slump.



DF 10 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A01.
FONTE: O autor (2007)



DF 11 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A02.
FONTE: O autor (2007)



DF 12 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A03.
FONTE: O autor (2007)



DF 13 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A04.
FONTE: O autor (2007)



DF 14 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A05.
FONTE: O autor (2007)



DF 15 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A06.
FONTE: O autor (2007)



DF 16 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A07.
 FONTE: O autor (2007)



DF 17 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA A08.
 FONTE: O autor



DF 18 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA COM
 AGREGADO NATURAL.
 FONTE: O autor

4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO ENDURECIDO DAS AMOSTRAS DA SÉRIE A E AGREGADO BRITADO “IN NATURA” E AREIA NATURAL

TABELA 16 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA AOS 7 E 28 DIAS

| R7 | Britado | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 | A08 | Natural |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP1 | 38,40 | 22,10 | 30,80 | 33,90 | 33,90 | 35,00 | 35,10 | 36,10 | 25,60 |
| CP2 | 39,10 | 22,40 | 29,50 | 33,80 | 35,30 | 37,00 | 37,20 | 36,10 | 25,80 |
| CP3 | 36,90 | 23,20 | 28,80 | 33,50 | 32,90 | 36,10 | 37,90 | 37,00 | 25,00 |
| Média | 38,13 | 22,57 | 29,70 | 33,73 | 34,03 | 36,03 | 36,73 | 36,40 | 25,47 |
| R28 | A01 | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 | A08 | A08 |
| CP1 | 46,6 | 25,30 | 34,00 | 43,70 | 44,20 | 44,30 | 45,90 | 43,70 | 38,40 |
| CP2 | 44,7 | 28,10 | 37,50 | 42,50 | 33,20 | 44,10 | 42,80 | 44,80 | 38,50 |
| CP3 | 45 | 26,50 | 34,80 | 44,30 | 43,60 | 44,10 | 46,50 | 45,70 | 38,30 |
| Média | 45,43 | 26,63 | 35,43 | 43,50 | 40,33 | 44,17 | 45,07 | 44,73 | 38,40 |

FONTE: Laboratório Votorantim

Os resultados dos ensaios no estado endurecido da tabela 16, anteriormente apresentada, comprovam que a distribuição da curva de composição granulométrica dos agregados também exerce influência nas resistências dos concretos, já que foram mantidos a quantidade de cimento, a relação água/cimento e os procedimentos adotados para os ensaios.

As amostras 02 e 03 apresentaram resistências médias 30% inferiores ao resultado obtido das demais amostras. Esta redução pode ter ocorrido em função da curva de distribuição granulométrica ser muita fechada, havendo a necessidade de mais aglomerante. Outro fator que pode influenciar a resistência é o adensamento do concreto, por se tratar de um concreto seco sem plasticidade e a dificuldade de compactação do concreto nos corpos de prova, havendo assim excesso de vazios. Provavelmente o último fator teve maior contribuição para a obtenção

4.4 RESULTADOS OBTIDOS COM A ADIÇÃO DE 3 , 6, 9 E 12% DE MATERIAL PULVERULENTO

4.4.1 Características Físicas das Amostras da Série B04

Na tabela 17, podem-se observar as porcentagens retidas acumuladas totais das composições das curvas granulométricas com expoente 0,4 e variação de material pulverulento de 3, 6, 9 e 12%.

TABELA 17 - PORCENTAGEM RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DA CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 04 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%.

| DMC (mm) | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|----------|------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | Britado | B04.03 | B04.06 | B04.09 | B04.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 23,49 | 22,76 | 22,03 | 21,31 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 41,29 | 40,01 | 38,73 | 37,46 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 54,78 | 53,08 | 51,39 | 49,70 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 65,00 | 62,99 | 60,98 | 58,97 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 72,75 | 70,50 | 68,25 | 66,00 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| | Módulo de Finura | 3,43 | 2,57 | 2,49 | 2,41 | 2,33 | 1,55 | 3,50 |

FONTE: O autor (2007)

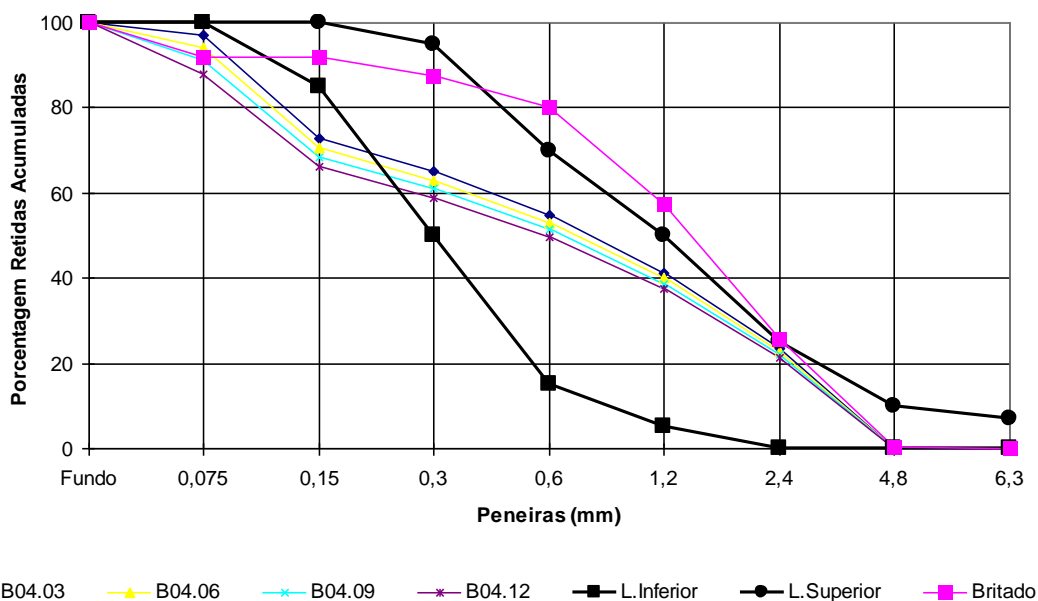


GRÁFICO 3 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 04 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO *IN NATURA*

FONTE: O autor (2007)

Analisando os resultados das amostras da série 04, pode-se observar que existe uma fração muito fina passante na peneira 0,15 mm, tendendo a aumentar em função da adição de material pulverulento.

4.4.1.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B04

A tabela 18 representa os resultados obtidos nos ensaios de índice de consistência, mini slump e densidade gravimétrica.

TABELA 18 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA

| AMOSTRAS | Britado | B04.03 | B04.06 | B04.09 | B04.12 |
|--|---------|--------|--------|--------|--------|
| Traço | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 |
| Fator A/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,5 | 211,1 | 200,1 | 185,7 | 168,75 |
| Mini Slump (mm) | 24 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| Densidade (kg/dm ³) | 2,34 | 2,34 | 2,33 | 2,32 | 2,31 |
| Área Específica Agregado(cm ² /g) | 20,37 | 68,91 | 68,91 | 68,91 | 68,91 |
| Relação Finos / Água | 2 | 2,18 | 2,36 | 2,54 | 2,72 |

FONTE: O autor (2007)

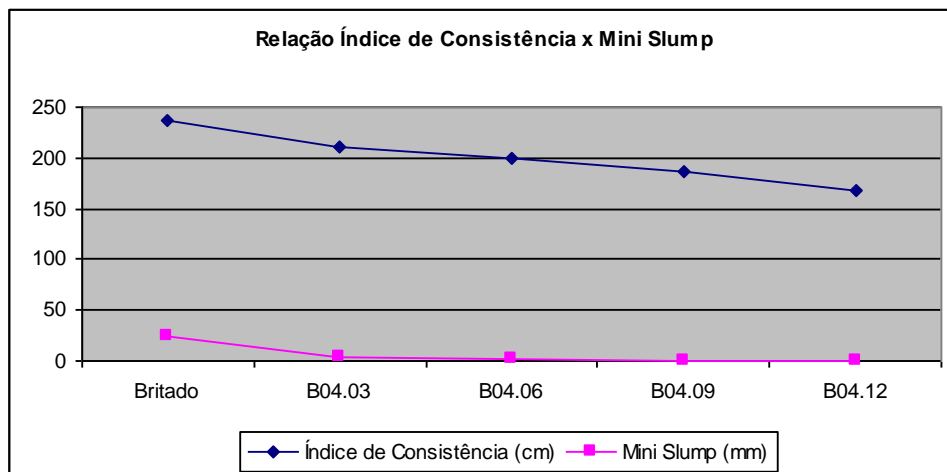


GRÁFICO 4 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X MINI SLUMP DA SÉRIE B04
 FONTE: O autor (2007)

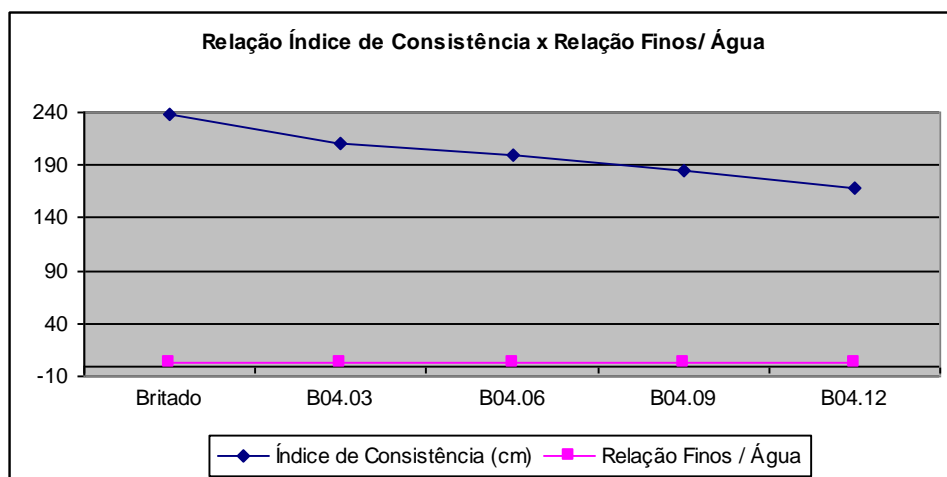


GRÁFICO 5 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B04
 FONTE: O autor (2007)

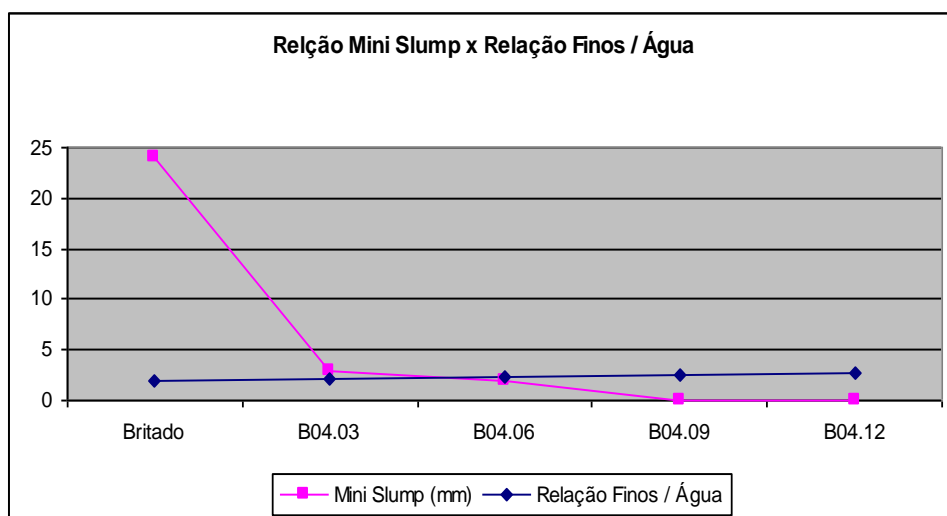


GRÁFICO 6 - RELAÇÃO MINI SLUMP X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B04
 FONTE: O autor (2007)

Os resultados dos ensaios de índice de consistência para as amostras B04.03 a B04.12 apresentam redução significativa no espalhamento da argamassa na mesa quando comparados com a amostra A04 (sem adição). Com a adição de apenas 3% de material pulverulento na amostra B04.03 observou-se uma redução de 267,75 mm para 211,1 mm.

A presença de material pulverulento no agregado miúdo tende a aumentar a relação finos/água, aumentando a viscosidade da matriz.

Para uma mesma extensão granulométrica e mesma relação água/cimento, existe uma relação inversamente proporcional para o índice de consistência e a relação finos/água.

Conforme descrito por Pileggi (2002), a influência provavelmente ocorre quando a matriz do concreto é predominantemente susceptível a forças de superfície.

Também se pode considerar que a tensão de cisalhamento é maior em agregados com maior área superficial, o que resulta na fricção entre as várias frações granulares. Considerando duas classes de partículas de mesma geometria, porém de tamanhos diferentes, quanto menor for a dimensão de uma delas maior será a tensão de cisalhamento.

Nos documentos fotográficos DF 19 a DF 22 pode-se observar um concreto pouco coeso, com vários vazios e de pouca fluidez. É perceptível a diminuição da trabalhabilidade em função do aumento da adição de material pulverulento, em consequência o aumento da viscosidade.

4.4.1.2 Documentos Fotográficos dos Ensaios com as Amostras da Série B04

Os documentos fotográficos a seguir representam os diferentes tipos de comportamento das amostras da série B04, apenas com o aumento do material pulverulento de 3%, 6%, 9% e 12%.



DF 19 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B04.03.
FONTE: O autor (2007)



DF 20 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B04.06.
FONTE: O autor (2007)



DF 21 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B04.09.
FONTE: O autor (2007)



DF 22 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B04.12.
 FONTE: O autor (2007)

4.4.2 Características Físicas das Amostras da Série B05

Na tabela 19, podem-se observar as porcentagens retidas acumuladas totais das composições das curvas granulométricas com expoente 0,5 e variação de material pulverulento de 3, 6, 9 e 12%.

TABELA 19 - PORCENTAGEM RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DA CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 05 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%

| DMC (mm) | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|----------|------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | Britado | B05.03 | B05.06 | B05.09 | B05.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 28,41 | 27,53 | 26,65 | 25,77 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 48,50 | 47,00 | 45,50 | 44,00 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 62,71 | 60,77 | 58,83 | 56,89 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 72,75 | 70,50 | 68,25 | 66,00 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 79,85 | 77,38 | 74,91 | 72,44 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| | Módulo de Finura | 3,43 | 2,92 | 2,49 | 2,74 | 2,65 | 1,55 | 3,57 |

FONTE: O autor (2007)

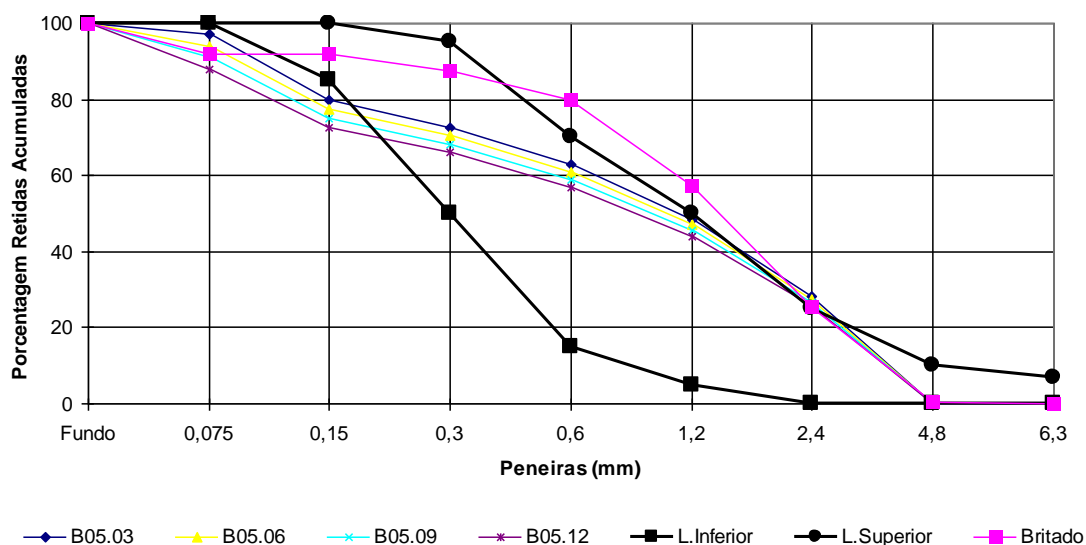


GRÁFICO 7 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 05 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO *IN NATURA*

FONTE: O autor (2007)

Analisando os resultados das amostras da série 05 pode-se observar que existe uma fração acumulada na região superior na peneira 1,2 e 2,4 mm e uma fração muito fina passante na peneira 0,15 mm, ficando apenas a faixa das peneiras 0,15 mm A 1,2 mm dentro dos limites da NBR7211 (2005).

4.4.2.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B05

Na tabela 20, podem-se observar os resultados obtidos nos ensaios de índice de consistência, mini slump e densidade gravimétrica para a série A01 e B05.

TABELA 20 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE, *MINI SLUMP* E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B05.03 A B05.12

| AMOSTRAS | Britado | B05.03 | B05.06 | B05.09 | B05.12 |
|--------------------------------------|---------|--------|---------|--------|--------|
| Traço | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 |
| Fator A/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,5 | 243,45 | 232,625 | 205,95 | 200,05 |
| Mini Slump (mm) | 24 | 17 | 10 | 5 | 6 |
| Densidade (kg/dm ³) | 2,34 | 2,33 | 2,33 | 2,34 | 2,33 |
| Área Específica (cm ² /g) | 20,37 | 54,64 | 54,64 | 54,64 | 54,64 |
| Relação Finos/Água | 2,0 | 2,18 | 2,36 | 2,54 | 2,72 |

FONTE: O autor (2007)

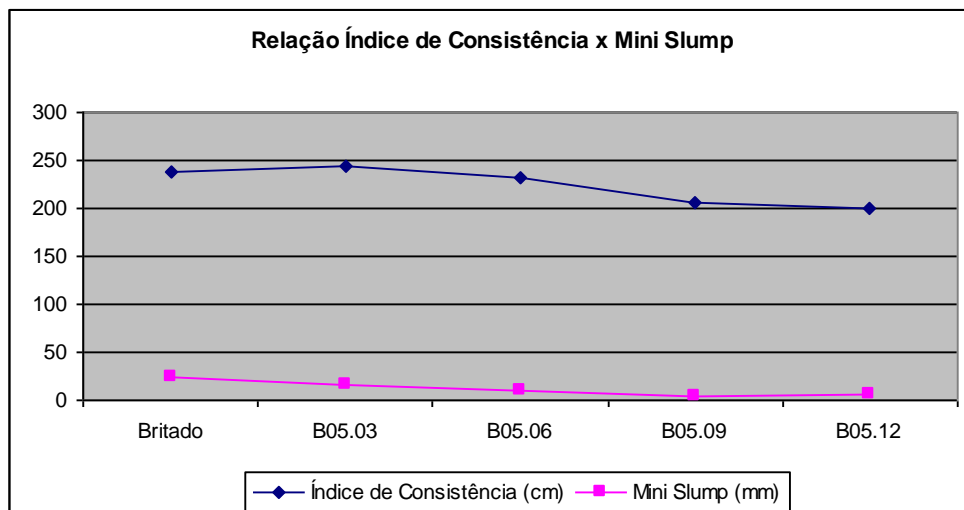


GRÁFICO 8 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X *MINI SLUMP* DA SÉRIE B05
 FONTE: O autor (2007)

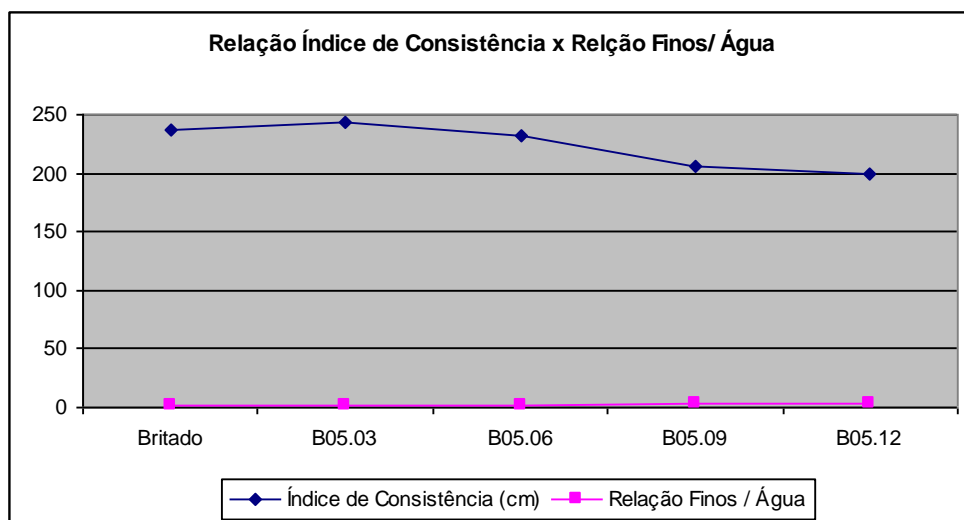


GRÁFICO 9 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B05
 FONTE: O autor (2007)

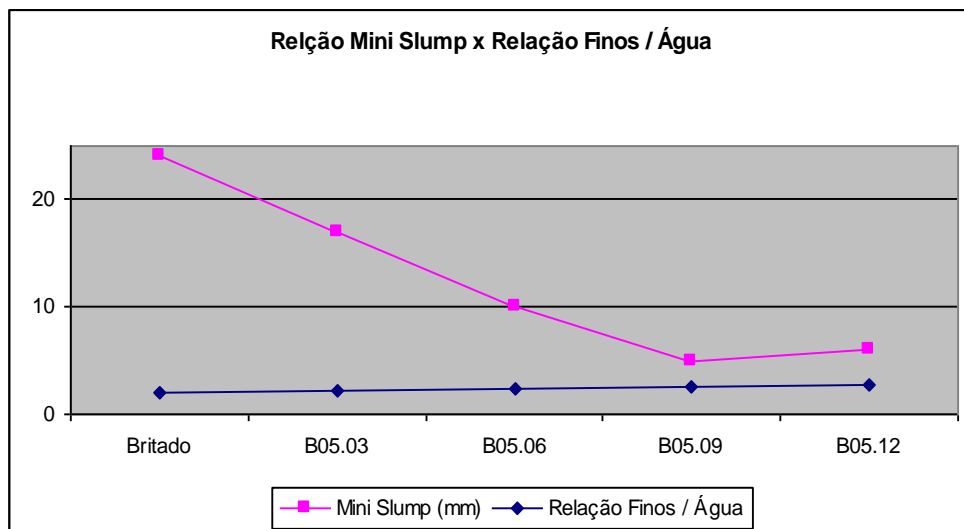


GRÁFICO 10 - RELAÇÃO *MINI SLUMP* X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B05
 FONTE: O autor (2007)

O resultado do índice de consistência da série B05 mostra um aumento no espalhamento em relação às amostras da série B04.

Com o aumento do coeficiente de distribuição granulométrica $n = 0,5$, houve uma redução na área específica do agregado em relação à série B04 de 20,71%. Esta redução na área específica do agregado pode ter contribuído de forma que, com 12% de adição de material pulverulento na amostra B05.12 fossem obtidos índices de consistências similares aos da amostra da série B04.06 com 6% de pulverulento.

No gráfico do índice de consistência x *mini slump*, pode-se observar uma correlação direta entre os dois ensaios, se o índice diminui o mesmo ocorre com o slump. Segundo Pandolfelli (2000), este fenômeno pode estar relacionado à presença de partículas sólidas em um fluido, que interferem na movimentação das linhas de fluxo, provocando aumento da viscosidade e desvio do comportamento newtoniano na suspensão.

No gráfico da relação *mini slump* x relação finos/água, também se pode observar uma relação direta; quanto maior a adição do material pulverulento maior a viscosidade da matriz, aumentando a tensão de escoamento, tornando a amostra menos fluida.

Nos documentos fotográficos DF 23 a DF 26, a seguir, observam-se a diminuição da fluidez do concreto, conforme se aumenta o teor de finos. Todas as

amostras apresentaram pouca coesão, porém, com o aumento do teor de finos, percebeu-se um concreto mais áspero, indicando uma tendência à segregação.

4.4.2.2 Documento Fotográfico dos Ensaios com as Amostras da Série B05

Os documentos fotográficos abaixo representam os diferentes tipos de comportamento das amostras da série B05, apenas com o aumento do material pulverulento de 3%, 6%, 9% e 12%.



DF 23 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B05.03.
FONTE: O autor (2007)



DF 24 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B05.06.
FONTE: O autor (2007)



DF 25 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B05.09.
FONTE: O autor (2007)



DF 26 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B05.12.
FONTE: O autor (2007)

4.4.3 Características Físicas das Amostras da Série B06

Na tabela 21, podem-se observar as porcentagens retidas acumuladas totais das composições das curvas granulométricas com expoente 0,6 e variação de material pulverulento de 3, 6, 9 e 12%.

TABELA 21 - PORCENTAGEM RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DA CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 06 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%

| DMC (mm) | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | Britado | B06.03 | B06.06 | B06.09 | B06.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 33,00 | 31,98 | 30,96 | 29,94 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 54,78 | 53,08 | 51,39 | 49,70 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 69,14 | 67,01 | 64,87 | 62,73 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 78,62 | 76,19 | 73,76 | 71,33 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 84,88 | 82,25 | 79,63 | 77,00 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | | 3,43 | 3,20 | 3,11 | 3,01 | 2,91 | 1,55 | 3,57 |

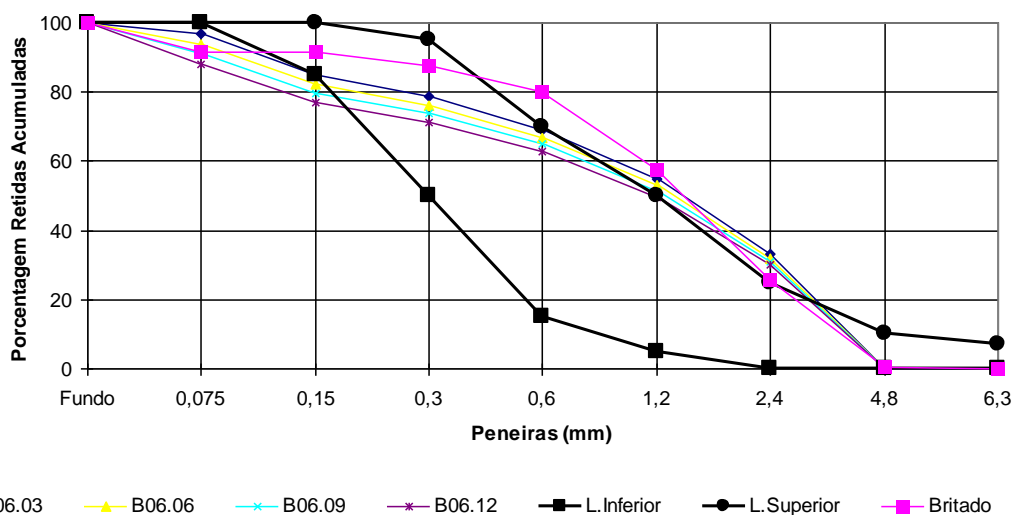


GRÁFICO 11 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 06 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO *IN NATURA*

FONTE: O autor (2007)

Analisando os resultados das amostras da série 06, pode-se observar que existe uma fração acumulada na peneira 1,2 mm superior ao recomendado pela norma e uma fração muito fina passante na peneira 0,15 mm, ficando apenas a faixa das peneiras 0,15 mm a 1,2 mm dentro dos limites da NBR7211 (2005).

4.4.3.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B06

Na tabela 22, podem-se observar os resultados obtidos nos ensaios de índice de consistência, mini slump e densidade gravimétrica para a série A01 e B06.

TABELA 22- RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, *MINI SLUMP* E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B06.03 A B06.12

| AMOSTRAS | Britado | B06.03 | B06.06 | B06.09 | B06.12 |
|--------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Traço | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 |
| Fator A/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,5 | 242,9 | 239,2 | 224,95 | 223,1 |
| Mini Slump (mm) | 24 | 26 | 20 | 17 | 14 |
| Densidade (kg/dm ³) | 2,34 | 2,33 | 2,33 | 2,32 | 2,34 |
| Área Específica (cm ² /g) | 63,74 | 43,92 | 43,92 | 43,92 | 43,92 |
| Relação Água/Materiais Finos | 2 | 2,18 | 2,36 | 2,54 | 2,72 |

FONTE: O autor (2007)

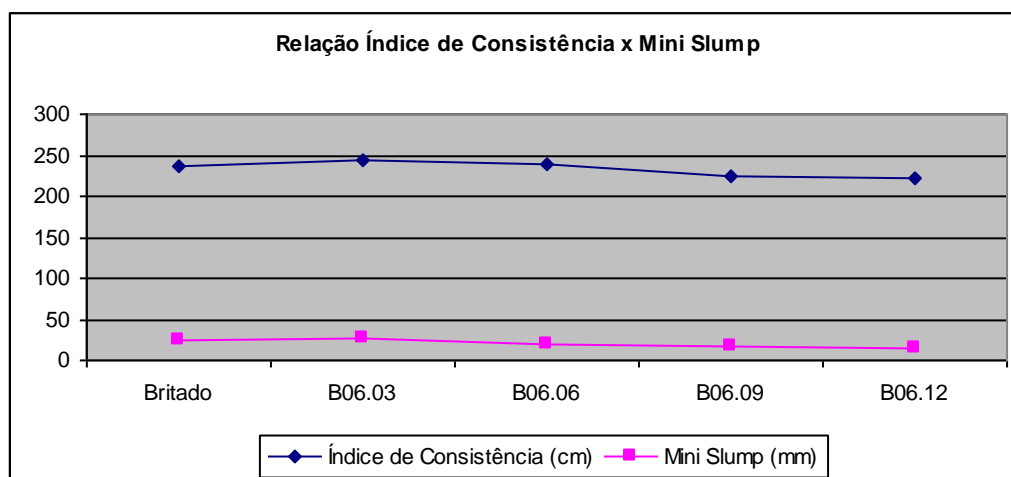


GRÁFICO 12 -RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X *MINI SLUMP* DA SÉRIE B06

FONTE: O autor (2007)

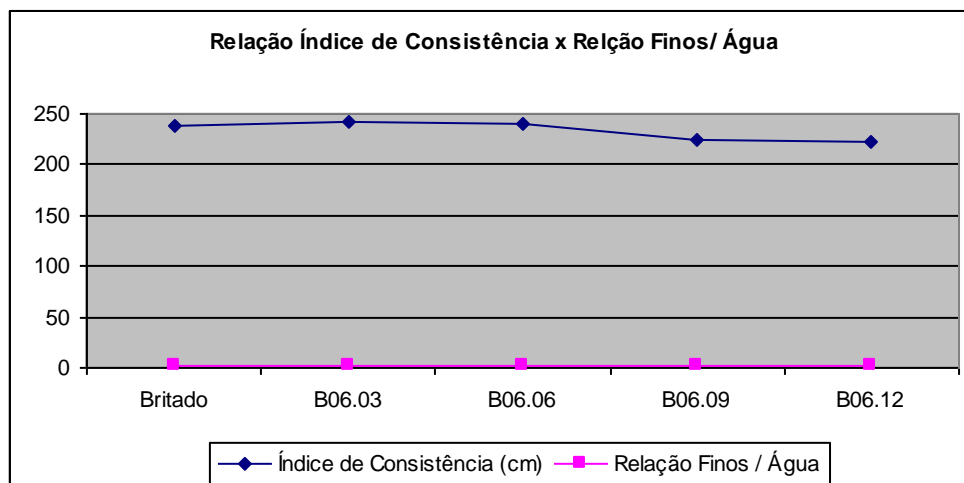


GRÁFICO 13 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B06
 FONTE: O autor (2007)

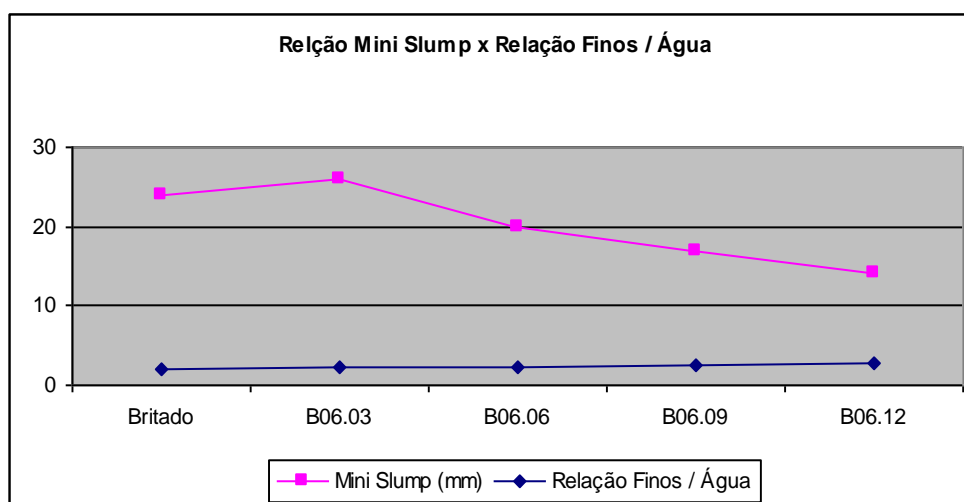


GRÁFICO 14 - RELAÇÃO MINI SLUMP X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B06
 FONTE: O autor

Analisando os resultados obtidos no estado fresco com as amostras da série B06, pode-se verificar que com o aumento no coeficiente de distribuição granulométrica $n = 0,6$, também de maneira geral houve o aumento nos resultados do índice de consistência.

Percebe-se, outrossim, uma correlação direta nos resultados do índice de consistência e o *mini slump*. Aumentando a quantidade de finos, irá também aumentar a viscosidade do concreto e, conseqüentemente, diminuir a fluidez do material.

Ao se compararem os resultados quantitativos e qualitativos da série B06 em relação às séries B04 e B05, percebe-se que existe uma melhor interação do conjunto

de grãos grossos imersos na matriz fluida, o que permitiu a obtenção de concretos mais coesos. Segundo Pileggi et.al (2002), a manutenção da integridade volumétrica (coesão) de um concreto no estado fluido depende fundamentalmente da ação das forças de superfície, que atuam nas partículas da matriz.

Também se pode constatar que as amostras B05.03 e B06.03 apresentaram resultados no espalhamento da mesa muito próximos – 243,5 mm e 242,9 –, porém o mesmo não ocorreu no *mini slump*, indicando que suas características reológicas são diferentes.

Com o aumento do coeficiente de distribuição granulométrica para $n = 0,6$, houve uma redução na área específica da série B06 em relação a série B05 na ordem de 19,62%.

A redução na área específica dos agregados diminui a viscosidade da matriz, aumentando a sua fluidez. Mesmo com a adição de 12% de finos, observa-se uma menor interferência na trabalhabilidade dos concretos em relação às séries anteriores.

Segundo Pileggi et.al (2002), a quantidade de matriz controla a fluidez do concreto, dando origem a dois comportamentos distintos. Com baixo teor de matriz, predominam os contatos entre agregados, e o valor de fluidez aumenta rapidamente com o teor de matriz presente. Quando a quantidade de matriz é elevada, diminuem os contatos entre os agregados e a fluidez passa a ser governada pela viscosidade da matriz.

Conforme documentos fotográficos DF 27 a DF 30, a seguir pode-se observar em toda a série B.06 a obtenção de concretos coesos. Pode-se concluir que, para o coeficiente de distribuição granulométrica $n = 0,6$, houve uma interação entre o conjunto matriz fluida e de grãos grossos, quando comparados com as demais séries.

4.4.3.2 Documento Fotográfico dos Ensaio com as Amostras da Série B06

Os documentos fotográficos a seguir representam os diferentes tipos de comportamento das amostras da série B06, apenas com o aumento do material pulverulento de 3%, 6%, 9% e 12%.



DF 27 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B06.03.
FONTE: O autor (2007)



DF 28 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B06.06.
FONTE: O autor (2007)



DF 29 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B06.09.
FONTE: O autor (2007)



DF 30 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B06.12.
 FONTE: O autor (2007)

4.4.4 Características Físicas das Amostras da Série B07

Na tabela 23, podem-se observar as porcentagens retidas acumuladas totais das composições das curvas granulométricas com expoente 0,7 e variação de material pulverulento de 3, 6, 9 e 12%.

TABELA 23 - PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 0,7 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%

| Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | Britado | B07.03 | B07.06 | B07.09 | B07.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| 2,4 | 25,6 | 37,29 | 36,14 | 34,98 | 33,83 | 0,00 | 25,00 |
| 1,2 | 57,4 | 60,24 | 58,38 | 56,52 | 54,65 | 5,00 | 50,00 |
| 0,6 | 80 | 74,37 | 72,07 | 69,77 | 67,47 | 15,00 | 70,00 |
| 0,3 | 87,6 | 83,07 | 80,50 | 77,93 | 75,36 | 50,00 | 95,00 |
| 0,15 | 91,8 | 88,43 | 85,69 | 82,96 | 80,22 | 85,00 | 100,00 |
| 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | 3,43 | 3,43 | 3,33 | 3,22 | 3,12 | 1,55 | 3,57 |

FONTE: O autor (2007)

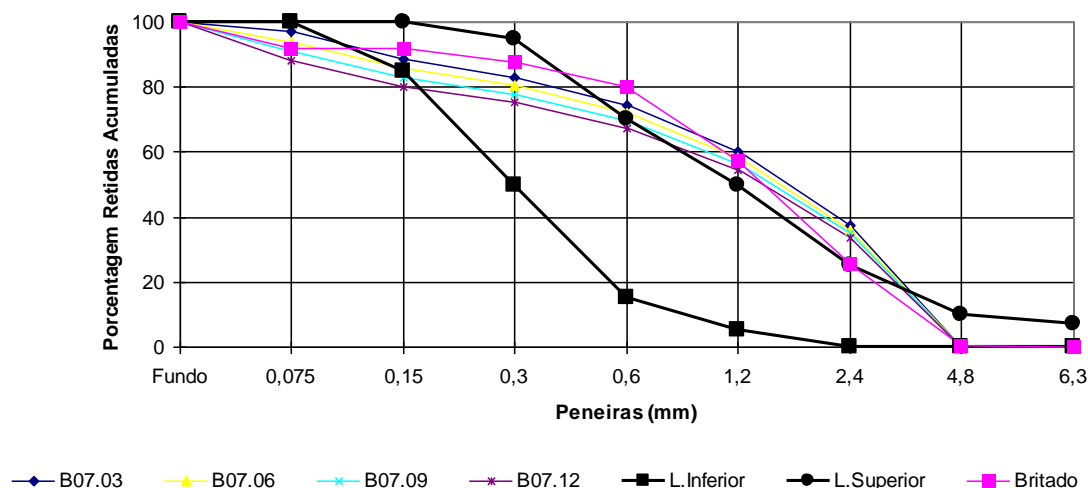


GRÁFICO 15 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 07 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO *IN NATURA*

FONTE: O autor (2007)

Analisando os resultados das amostras da série 07, pode-se observar que existe uma fração acumulada nas peneiras 2,4 mm, 1,2 mm e 0,6 mm superior ao recomendado pela norma e uma fração muito fina passante na peneira 0,15 mm, para as amostras B07.09 e B07.12.

4.4.4.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B07

Na tabela 24, podem-se observar os resultados obtidos nos ensaios de índice de consistência, mini slump e densidade gravimétrica para a série A01 e B07.

TABELA 24 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, *MINI SLUMP* E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B07.03 A B07.12

| AMOSTRAS | Britado | B07.03 | B07.06 | B07.09 | B07.12 |
|--------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Traço | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 |
| Fator A/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,5 | 254,95 | 255,05 | 232,6 | 223,55 |
| Mini Slump (mm) | 24 | 35 | 32 | 28 | 19 |
| Densidade (kg/dm ³) | 2,34 | 2,32 | 2,35 | 2,33 | 2,85 |
| Área Específica (cm ² /g) | 20,37 | 35,83 | 35,83 | 35,83 | 35,83 |
| Relação Água/ Materiais Finos | 2,0 | 2,18 | 2,36 | 2,54 | 2,72 |

FONTE: O autor (2007)

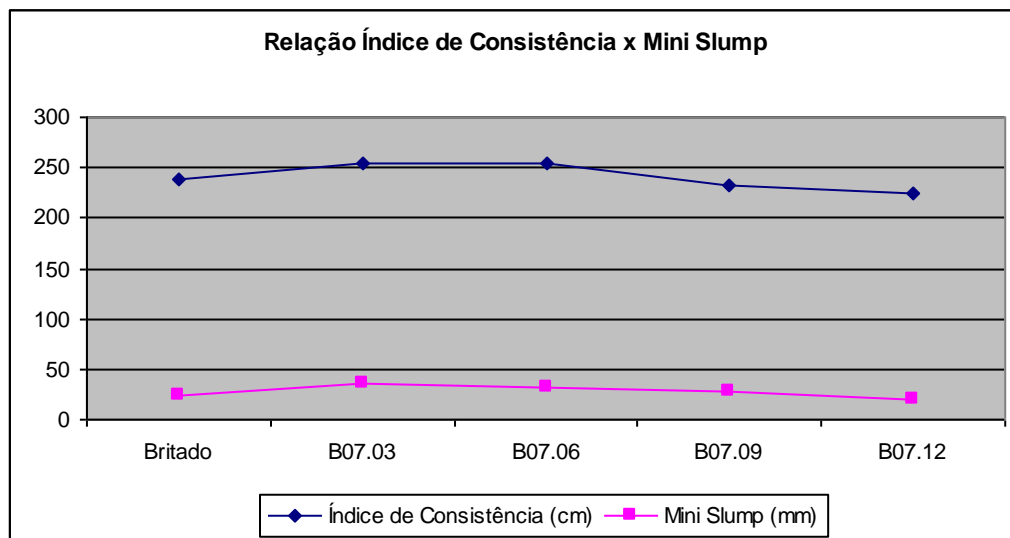


GRÁFICO 16 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X MINI SLUMP DA SÉRIE B07
 FONTE: O autor (2007)

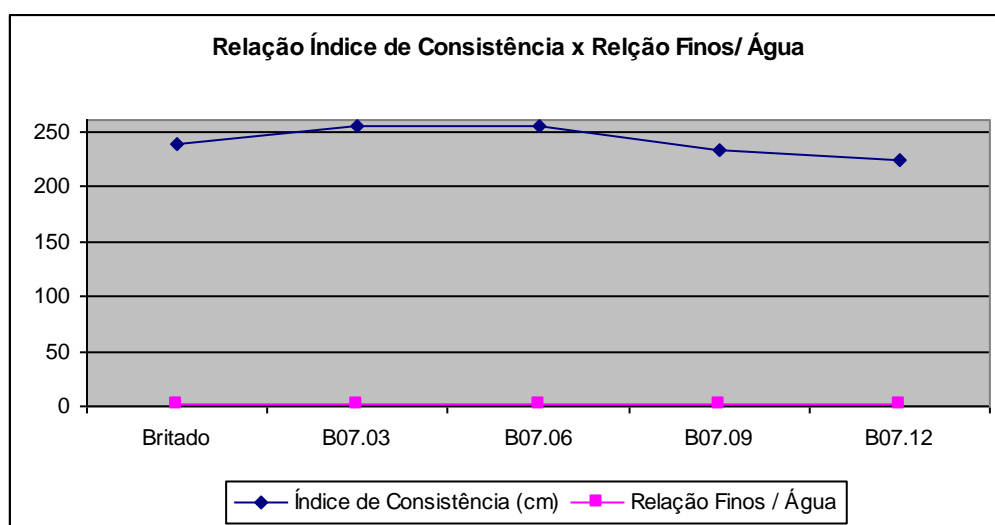


GRÁFICO 17 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B07
 FONTE: O autor (2007)

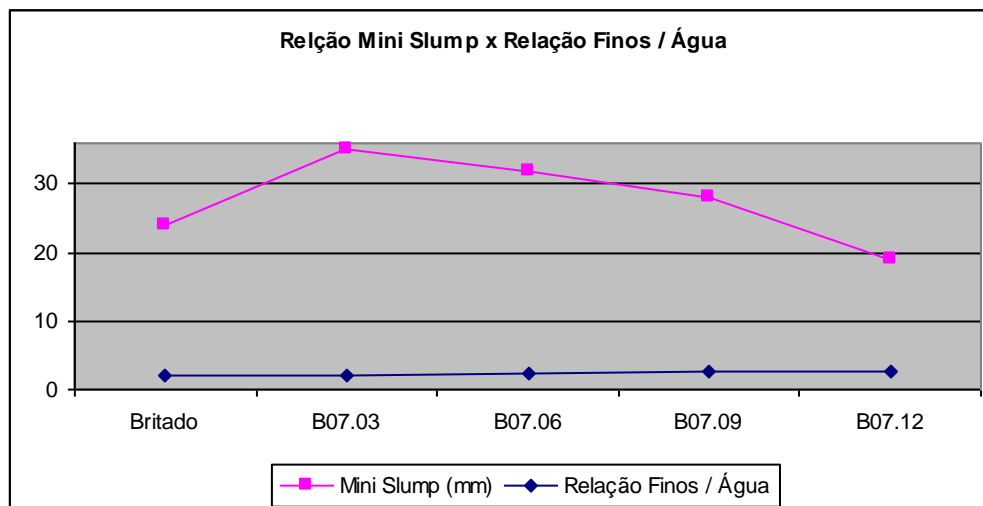


GRÁFICO 18 - RELAÇÃO MINI SLUMP X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B07
 FONTE: O autor (2007)

Analisando a relação índice de consistência x *mini slump*, percebe-se a mesma relação direta que foi observada nas demais amostras, quanto maior índice de consistência, maior o *slump*.

Na análise da série B.07, percebeu-se que os melhores resultados no índice de consistência foram obtidos nas amostras B07.03 e B07.06, superando todas as demais séries. Também foi constatado que a amostra B07.06 com maior adição de finos em relação à amostra B07.03 obteve o maior resultado no espalhamento 255,05 mm.

Analisando o resultado da amostra B07.06, certamente será obtida a menor tensão de escoamento, porém não a menor viscosidade, com coesão adequada, se comparados os resultados de *mini slump*. Pode-se constatar que o melhor resultado no ensaio de *mini slump* foi obtido na amostra da série B08.

Embora o *mini slump* seja um ensaio relacionado à tensão de escoamento, a viscosidade durante o fluxo exerce influência no comportamento ao longo do ensaio.

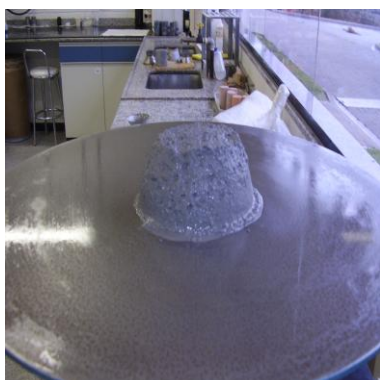
Analisando qualitativamente os documentos fotográficos DF 31 a DF 34, percebe-se uma diminuição na coesão nos concretos. Certamente o aumento da espessura média em torno das partículas facilitou o fluxo.

4.4.4.2 Documento Fotográfico dos Ensaios dos com as Amostras da Série B07

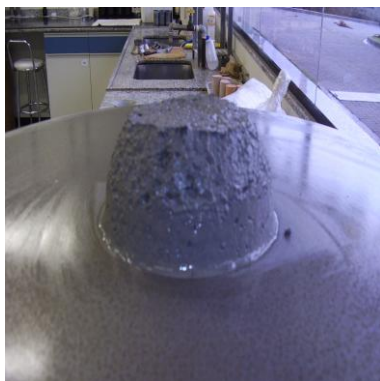
Os documentos fotográficos abaixo representam os diferentes tipos de comportamento das amostras da série B07, apenas com o aumento do material pulverulento de 3%, 6%, 9% e 12%.



DF 31 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B07.03.
FONTE: O autor (2007)



DF 32 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B07.06.
FONTE: O autor (2007)



DF 33 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B07.09.
FONTE: O autor (2007)



DF 34 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B07.12.
 FONTE: O autor (2007)

4.4.5 Características Físicas das Amostras da série B08

A tabela abaixo apresenta as porcentagens retidas acumuladas totais das composições das curvas granulométricas com a aplicação do expoente 0,8 e variação de material pulverulento de 3, 6, 9 e 12%.

TABELA 25 - PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS TOTAIS DAS COMPOSIÇÕES DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS COM EXPOENTE 08 E VARIAÇÃO DE MATERIAL PULVERULENTO DE 3, 6, 9 E 12%

| Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | Britado | B08.03 | B08.06 | B08.09 | B08.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| 2,4 | 25,6 | 41,29 | 40,01 | 38,73 | 37,46 | 0,00 | 25,00 |
| 1,2 | 57,4 | 65,00 | 62,99 | 60,98 | 58,97 | 5,00 | 50,00 |
| 0,6 | 80 | 78,62 | 76,19 | 73,76 | 71,33 | 15,00 | 70,00 |
| 0,3 | 87,6 | 86,44 | 83,77 | 81,10 | 78,42 | 50,00 | 95,00 |
| 0,15 | 91,8 | 90,94 | 88,13 | 85,31 | 82,50 | 85,00 | 100,00 |
| 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | 3,43 | 3,62 | 3,51 | 3,40 | 3,29 | 1,55 | 3,57 |

FONTE: O autor (2007)

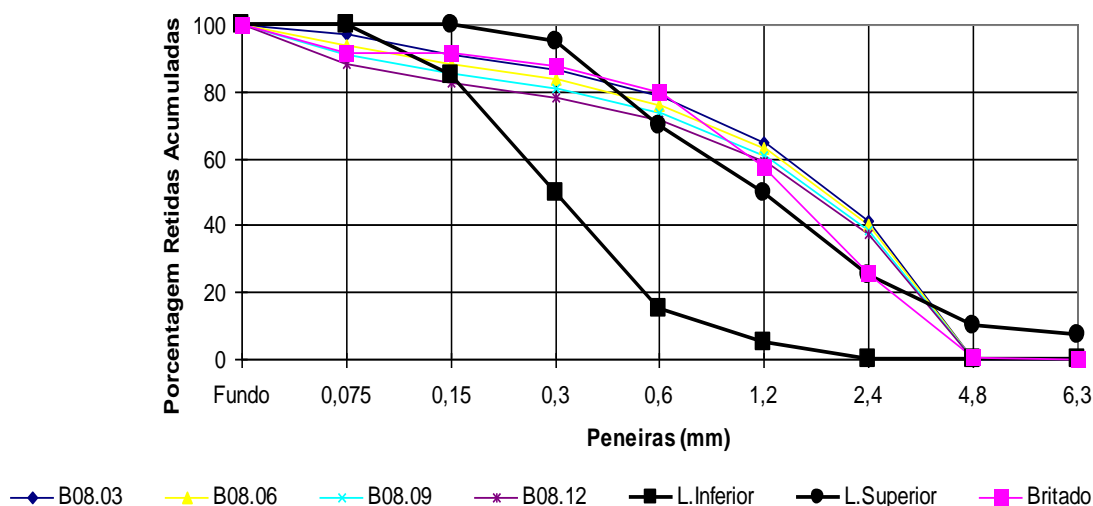


GRÁFICO 19 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS MIÚDOS BRITADOS OTIMIZADOS GRANULOMETRICAMENTE COM O EXPOENTE 08 E O AGREGADO OTIMIZADO BRITADO *IN NATURA*

FONTE: O autor (2007)

Analisando os resultados das amostras da série 08, pode-se observar que existe uma fração acumulada nas peneiras 2,4 mm, 1,2 mm e 0,6 mm, que são superiores ao recomendado pela norma, sendo que as demais frações encontram-se dentro do limite estabelecido pela NBR 7211 (2005).

4.4.5.1 Resultados Obtidos no Estado Fresco das Amostras da Série B08

Na tabela 26, podem-se observar os resultados obtidos nos ensaios de índice de consistência, mini slump e densidade gravimétrica para a série A01 e B08.

TABELA 26 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, "MINI SLUMP" E DENSIDADE GRAVIMÉTRICA DAS AMOSTRAS A01 E B08.03 A B08.12

| AMOSTRAS | Britado | B08.03 | B08.06 | B08.09 | B08.12 |
|--------------------------------------|---------|---------|--------|---------|--------|
| Traço | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 |
| Fator A/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,5 | 251,025 | 246,9 | 232,775 | 235,25 |
| Mini Slump (mm) | 24 | 40 | 38 | 32 | 25 |
| Densidade (kg/dm ³) | 2,34 | 2,33 | 2,29 | 2,33 | 2,31 |
| Área Específica (cm ² /g) | 20,37 | 29,69 | 29,69 | 29,69 | 29,69 |
| Relação Água/ Materiais Finos | 2,0 | 2,18 | 2,36 | 2,54 | 2,72 |

FONTE: O autor (2007)

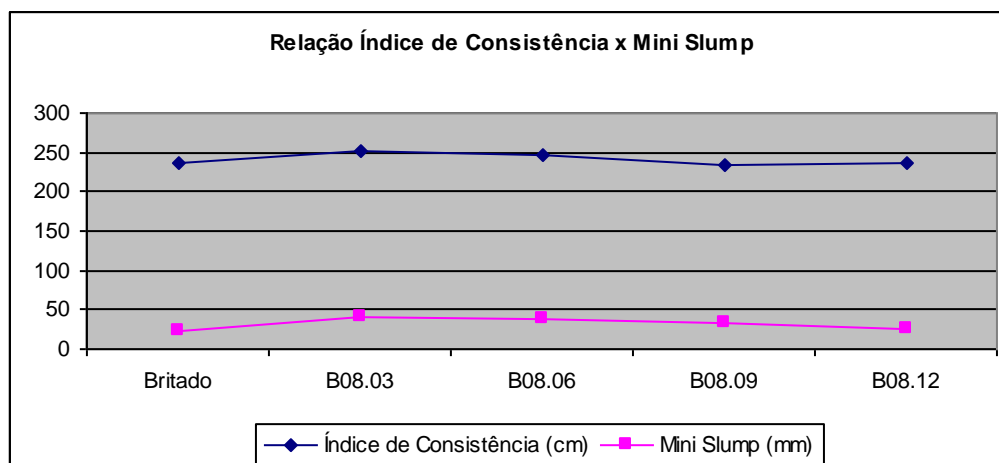


GRÁFICO 20 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X *MINI SLUMP* DA SÉRIE B08
 FONTE: O autor (2007)

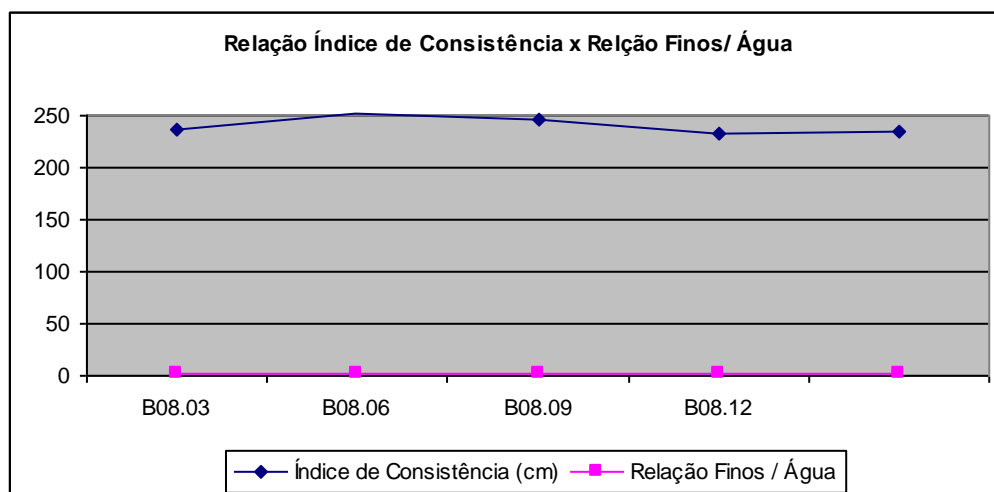


GRÁFICO 21 - RELAÇÃO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B08
 FONTE: O autor (2007)

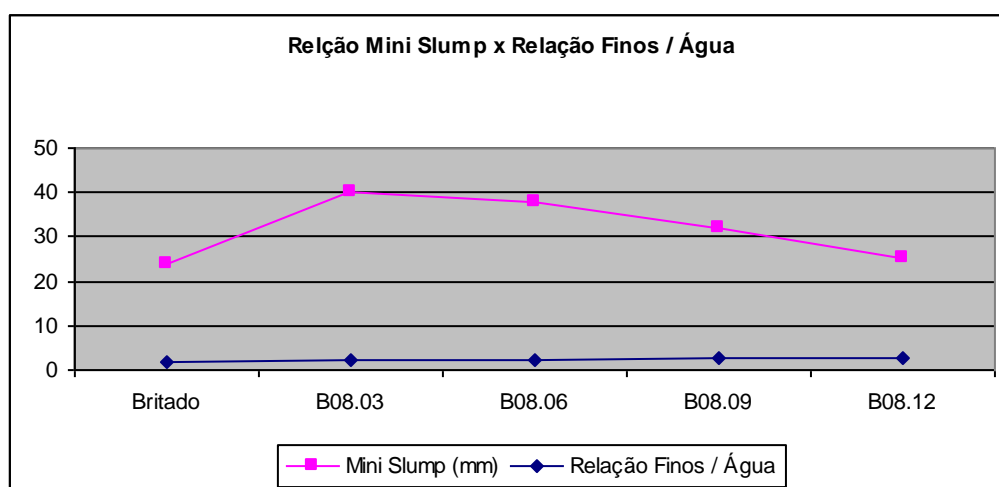


GRÁFICO 22 - RELAÇÃO *MINI SLUMP* X RELAÇÃO FINOS/ÁGUA DA SÉRIE B08
 FONTE: O autor (2007)

A série B.08 apresentou a menor variação nos resultados de índice de consistência entre as amostras da mesma série, quando comparadas às demais séries. Os resultados obtidos estão relacionados ao coeficiente de distribuição granulométrico $n = 0,8$, que indica uma curva com granulometria mais aberta.

Segundo Pileggi *et al.* (2002), partículas maiores que $100 \mu\text{m}$ (agregados) manifestam com maior intensidade os efeitos das forças de natureza mássica.

Mesmo na série B.08 existe uma relação entre o índice de consistência e o *mini slump*. Quanto menor o espalhamento na mesa menor o resultado do *mini slump*.

Os maiores resultados do *mini slump* em relação ao teor de finos foram obtidos com as amostras da série B.08. Pode-se concluir que houve um aumento na espessura da matriz, favorecendo a segregação.

Percebe-se que quanto menor for a área específica do agregado maior é o valor do índice de consistência, isto ocorre até o limite de sua tensão de escoamento. Sendo assim, pode-se concluir que o concreto comporta-se como um conjunto de grãos grossos mergulhados em uma matriz, a qual tem a função de assegurar a coesão do sistema, além da lubrificação, e o espaço disponível para a movimentação dos agregados. Portanto, se a concentração das partículas grossas for elevada, com pouca matriz, as características reológicas e as propriedades finais dos concretos são prejudicadas, devido à interferência entre os agregados.

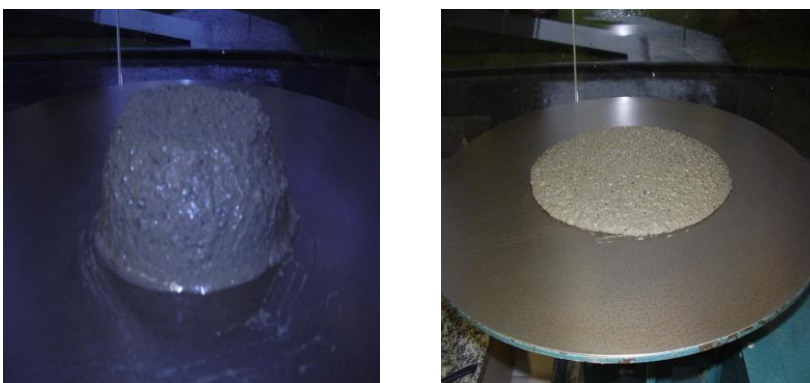
Analisando os documentos fotográficos DF35 a DF38, apresentados a seguir, observa-se a tendência à segregação do concreto. Quanto menor for a relação da área total de finos (viscosidade da matriz) com a área total de agregados (espessura) maior será a facilidade com que o concreto se desagrega.

4.4.5.2 Documento Fotográfico dos Ensaios com as Amostras da Série B08

Os documentos fotográficos abaixo representam os diferentes tipos de comportamento das amostras da série B08, apenas com o aumento do material pulverulento de 3%, 6%, 9% e 12%.



DF 35 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B08.03.
 FONTE: O autor (2007)



DF 36 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B08.06.
 FONTE: O autor (2007)



DF 37 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B08.09.
 FONTE: O autor (2007)



DF 38 - ENSAIOS DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E *MINI SLUMP* PARA A AMOSTRA B08.12.
 FONTE: O autor (2007)

4.5 RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO ENDURECIDO DAS AMOSTRAS SÉRIES B04 A B08

As tabelas apresentadas a seguir expressam os resultados obtidos nos ensaios à compressão axial das amostras das séries B04 à B08.

TABELA 27 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B04.03 A B04.12

| Resistência R7 (MPa) | B04.03 | B04.06 | B04.09 | B04.12 |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP1 | 35,3 | 35,2 | 34 | 32,8 |
| CP2 | 34,4 | 35,3 | 36 | 33,4 |
| CP3 | 35,2 | 31,1 | 35 | 32,9 |
| Média | 34,97 | 33,87 | 35,00 | 33,03 |

FONTE: O autor (2007)

TABELA 28 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B05.03 A B05.12

| Resistência R7 (MPa) | B05.03 | B05.06 | B05.09 | B05.12 |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP1 | 36,8 | 35,2 | 35,2 | 35,7 |
| CP2 | 35,9 | 32,6 | 37,1 | 35,9 |
| CP3 | 35,5 | 37,6 | 36,1 | 35,3 |
| Média | 36,07 | 35,13 | 36,13 | 35,63 |

FONTE: O autor (2007)

TABELA 29 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B06.03 A B06.12

| Resistência R7 (MPa) | B06.03 | B06.06 | B06.09 | B06.12 |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP1 | 35,3 | 34,7 | 33,9 | 34,2 |
| CP2 | 35,9 | 35,5 | 34,2 | 34,9 |
| CP3 | 35,8 | 35,3 | 32,9 | 33,7 |
| Média | 35,67 | 35,17 | 33,67 | 34,27 |

FONTE: O autor (2007)

TABELA 30 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B07.03 A B07.12

| Resistência R7 (MPa) | B07.03 | B07.06 | B07.09 | BC07.12 |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| CP1 | 31,4 | 34,6 | 27,1 | 34,7 |
| CP2 | 29,3 | 33,9 | 32,8 | 35,4 |
| CP3 | 35,2 | 33,5 | 33,8 | 34,6 |
| Média | 31,97 | 34,00 | 31,23 | 34,90 |

FONTE: O autor (2007)

TABELA 31 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS AMOSTRAS B08.03 A B08.12

| Resistência R7 (MPa) | B08.03 | B08.06 | B08.09 | B08.12 |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CP1 | 33,9 | 34,9 | 34,3 | 34,4 |
| CP2 | 33,6 | 35,4 | 31,3 | 33,8 |
| CP3 | 33 | 35,7 | 33 | 34 |
| Média | 33,50 | 35,33 | 32,87 | 34,07 |

FONTE: O autor (2007)

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão aos sete dias das amostras, observa-se uma pequena variação nas resistências, porém, levando-se em consideração que as amostras com granulometria mais aberta apresentaram maior fluidez, pode-se diminuir a relação água/cimento, limitando as medidas no ensaio de mesa e conseqüentemente haverá aumento à resistência final. O contrário nas curvas granulométricas menos abertas, como no caso das amostras da série 04, 05 e 06 que apresentaram níveis de fluidez muito baixos, se comparadas com as demais séries, haverá a necessidade de adição de água e conseqüentemente uma redução nas resistências.

O gráfico 23 a seguir representa os resultados gerais obtidos no estado fresco e endurecido das amostras da série B.

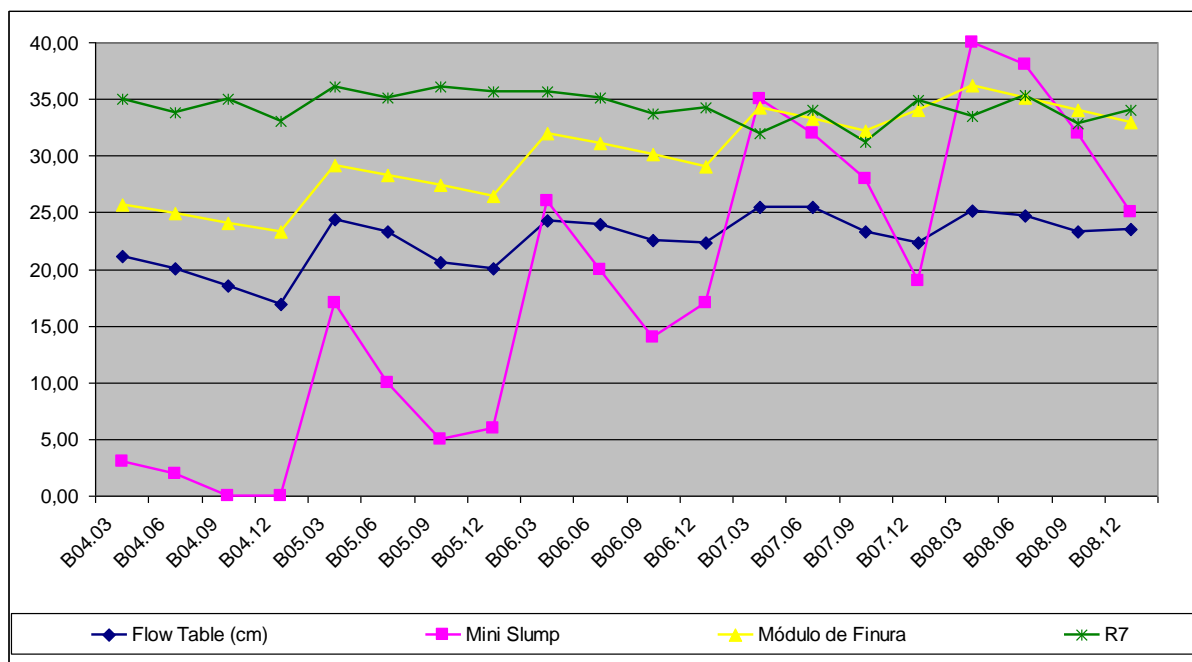


GRÁFICO 23 - GRÁFICO GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DAS AMOSTRAS DA SÉRIE B.

FONTE: O autor (2007)

Analisando os resultados do gráfico geral, existe um aumento no *mini-slump* quando comparada uma série em relação à outra para o mesmo teor de material pulverulento. Quanto maior a curva granulométrica menor a tensão de escoamento e conseqüentemente maior a viscosidade do material.

Percebe-se também uma correlação direta dos resultados obtidos no ensaio do *flow table* e o módulo de finura.

Pode-se observar no ensaio de *flow table* que a interferência do material pulverulento é menor nas curvas com maior expoente.

Pelos resultados de resistência à compressão obtidos aos 7 dias, não se observa uma grande variação. Acredita-se que as variações ocorreram mais em função dos desvios de moldagem.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES

Baseado nos fundamentos teóricos da revisão de literatura e também nos resultados obtidos neste trabalho, percebe-se a importância da distribuição das curvas granulométricas na reologia das argamassas, baseado no modelo parabólico de Füller. Percebe-se que valores distintos de n (coeficiente de distribuição granulométrica) conduzem a distintos comportamentos reológicos.

Em concretos, para uma mesma extensão granulométrica, coeficientes pequenos $n = 02$ e 03 causam aumento na área superficial das partículas, aumentando a viscosidade e reduzindo a fluidez. Esta redução pode ser constatada nos resultados das amostras da série A02 e A03, porém sem a presença de materiais finos.

A influência da distribuição granulométrica sobre a viscosidade e sobre a tensão de escoamento não pode ser considerada como sendo a única, outros fatores abordados na revisão bibliográfica também interferem no comportamento reológico de concretos (a utilização de aditivos, a temperatura, porosidade das partículas, diferentes tipos de agregados etc), os quais devem ser consideradas.

Porém, percebe-se que diferentes curvas granulométricas com a adição de finos alteram significativamente as características reológicas dos concretos. Curvas menos abertas (coeficientes menores do que 0,4) ou a adição de finos, possibilitam que um concreto com mesma extensão granulométrica perca trabalhabilidade e coesão, necessitando ajustes em sua composição.

Baseado nos resultados obtidos a partir da extensão granulométrica estudada, os coeficientes $n = 0,4$ e $0,5$ para a série A e $n = 0,6$ e $0,7$ da série B, mostraram-se mais adequados para a elaboração de concretos, apresentando equilíbrio entre os fenômenos de superfície de sua matriz e os mássicos dos agregados.

A substituição total do agregado natural pelo agregado britado é possível, sendo necessário que todas as características do agregado sejam conhecidas e que sejam estudadas as melhores curvas granulométricas com os equipamentos de

britagem disponíveis. Para a composição das melhores curvas granulométricas otimizadas, serão necessários investimentos em separadores (peneiras com cada fração) e misturadores, devendo este investimento ser avaliado e, se implantado, agregar valor ao produto final.

Finalmente, acredita-se que os resultados obtidos neste trabalho possam ser utilizados como curva de referência para a obtenção da melhor curva ótima, para o desenvolvimento de novos trabalhos científicos, em empresas de britagem ou demais segmentos que possam usufruir destas informações.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fazer uma análise da reologia ótima do agregado miúdo britado, através de diversos modelos matemáticos, como Füller, Furnas, Andreasen, Dinger e Funk, Pileggi (1996).
- Fazer uma análise comparativa entre o *gap-gradation* e o modelo contínuo de Füller.
- Avaliar a possibilidade da utilização de um reômetro, buscando correlacionar a tensão de escoamento e a viscosidade a partir de curvas granulométricas distintas.

REFERÊNCIAS

- ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uma breve história do cimento**. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/historia.shtml>. Acesso em 20/05/2007
- ALMEIDA, S. L.; SILVA, V. S. **Areia artificial**: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. II SEMINÁRIO DA FRAÇÃO FINA DE BRITAGEM, São Paulo, 2005.
- AÏTCIN, P. C.; MIDNESS, S. High-performance concrete: science and applications. In: SKALNY, J.; MINDDESS, S. (Eds.). **Materials Science of Concrete V**. Westerville: The American Society Ceramic, 1998. p. 477-511.
- AÏTCIN, P. C.; MEHTA, P. K. Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-performance concrete. **ACI Material Journal**, v. 87, n. 2, p. 103-107, 1990.
- AÏTCIN, P. C. Cements of yesterday and today: Concrete of Tomorrow. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1.349-1.359, sep. 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 125-93**: Definitions of terms relating to concrete and concrete aggregates. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-7211**: Agregados para Concreto – especificação. Março 2005. 10 p.
- _____. **NBR 7215**: Resistência à compressão e abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro 1996.
- _____. **NBR 7217**: Agregados – Determinação do teor de argila. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de torrões de argila e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais – Terminologia. Rio de Janeiro, 1993.
- _____. **NBR 7389**: Apreciação petográfica de agregados – Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 9917**: Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR ISO 3310-1**: Calibração de Peneira. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR NM 26:01**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 27:01**: Agregados – Redução de Amostra de Campo para Ensaios de Laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 67:98**: Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do tronco de cone – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:01**: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

BASÍLIO, Eduardo Santos. **Agregado para concreto**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1980.

BASTOS, Sandra Regina Bertocini. Uso de areia artificial britada em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais. II SUFFIB – SEMINÁRIO: O USO DA FRAÇÃO FINA NA BRITAGEM. **Anais...** São Paulo: Cuchierato *et al.* (eds.), 2005.

BENGTSSON, Magnus; EVERTSSON, C. M. **Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers**. Minerals Engineering 19, Göteborg, p. 1.479-1.486, 2006.

BRITISH STANDARD. **BS 812**: Part 1. Method for Sampling and Testing of Mineral Aggregate, Sands and Fillers, British Standards Institution, 1975.

BUCHER, Hans R. F. Agregados para Concreto. I SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS. **Anais...** São Paulo: EP USP, 1986.

BRUNAUER, S.; COPELAND, L. E. **Scientific American**. Apr. 1964.

CAMPITELI, V. C. Porosidade do concreto. **Boletim Técnico**, São Paulo, n. 9, EP, USP, 1987.

CAMPITELI, V. C. Concreto de Cimento Portland: um método de dosagem. **Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho**, Minho. Portugal, n. 20, p. 5-16, 2004.

CARDON, D.; EVRARD, H.; GARNIER, J. Prevision de la teneur en fines des sables de concassage. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. **Geosciences World Journal**, v. 29, p. 343-348, June 1984.

COUTINHO, A. de Souza. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa: LNEC, 1973. v. 1, p. 405-418.

COUTINHO, J. S. Materiais de Construção. **Agregados para argamassas e betões**. Edições DEC, 1999.

DAL MOLIN, C. C. D. Adições minerais para concreto estrutural. In: IBRACON. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: Ed. G. C. Isaia, 2005. p. 345-379.

DÍAZ, Vitervo O'Reilly. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 1998.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F.; RAHHAL, V. **Strength Concrete with Crushed and Natural Sand**. Proceedings Third International Conference. Recife, 2002.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F. **High-strength concrete with different fine aggregate**. Cement and Concrete Research 32, Buenos Aires, 2002. p. 1.755-1.761

FERRARIS, C. F.; DE LARRARD, F. Modified slump teste to measure rheological parameters of fresh concrete. **Cement, concrete, and aggregates**, CCAGDP, v. 20, n. 2, p. 241-247, Dec. 1998.

FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. Minerais e rochas. In: BRITO, Antonio Manoel de Oliveira; Sérgio (Org.). **Minerais e rochas**. São Paulo: ABGE/CNPq/Fapesp, 1998. p. 15-38.

FRAZÃO, E. B.; QUITETE, E. B. Formato e Rugosidade de Partículas da Britagem. II SUFFIB – SEMINÁRIO: O USO DA FRAÇÃO FINA NA BRITAGEM. **Anais...** São Paulo: Cuchierato *et al.* (eds.), 2005.

GARBOCZI, E. J.; DOUGLAS, J. F.; BOHN, R. B. The intrinsic elastic module of rectangular parallelepiped inclusions over a modest range of shape and a large range of property contrast, Special Issue of Mech. of Materials. **Cement and Concrete Research**, Gaithersburg, n. 36, p. 1.619-1.627, 2006.

GOMES, L. G.; KEMCZENSKI, J.; SILVEIRA, L. C.; BUOSO, A. Calcário. **Revista Brasil Cerâmica**, Curitiba, p. 1-12, 2007.

GORISSE, F. Ensayos y control de los hormigones. Ed. Técnicos Asociados Barcelona, 1981.

GUIMARÃES, A. T. C. Propriedades do concreto fresco. In: IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ed. G. C. Isaia, 2005. p. 473-494.

HEWLETT, P. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. Ed. Arnold, 1998.

HOGSKOLA, C. T. Fine crushed rocks as aggregate in concrete; a laboratory study on the effects of fine crushed minerals on concrete strength. **Journal Publ. Geologiska Institutionen**, B, 477, 2000. 29 p.

HOPPE, J. F.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Técnicas de caracterização reológica de concretos. **Revista Concreto & Construções**, 2007. p. 108-124.

IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ed. G. C. Isaia, 2005.

INDUSTRY AND ENVIRONMENT. Construction and the environment: fact and figures. **Unepie**, v. 29, n. 2, p. 2-8, April-June 1996.

JÄRVENPÄÄ, H. **Quality characteristics of fine aggregates and controlling their effects on concrete**. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology, Helsinki, 2001.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Doutorado) Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia Construção Civil, São Paulo, 200 f., 1995.

_____. **Avaliação da vida útil de materiais, componentes e edifícios**. Disponível em: <www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm>. Acesso em: 2005.

KAPLAN, M. F. The effects of properties of coarse aggregates on the workability of concrete. **Magazine of Concrete Research**, 10(29), p. 63-74, 1958.

KESLER, C. E. **Progress in Concrete Technology**. Ottawa: Canmet, 1990. p. 1-23.

KILBERT C. J, COBLE R.J. Integrating Safety and Environmental Regulation of Construction Safety. **Journal of Construction Engineering and Management**, ASCE, New York, NY, USA, v.121, no.1, p. 95-99, 1995.

LODI, Victor Hugo. **Viabilidade Técnica e Econômica do Uso de Areia de Britagem em Concretos de Cimento Portland na Região de Chapecó – SC**. Dissertação (Mestrado Profissional em Desempenho de Sistemas Constitivos). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

MALE. Properties of microsilica concrete. An overview of microsilica concrete in the UK. **Concrete**, London, v. 23, n. 8, p. 31-34, sep. 1989.

MCGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, p. 513-522, 1961.

MEINIGER, C. R. Fine aggregate grading for concert. **Rock Prod.**, v. 108, n. 2, F, 2005.

MEHTA, P. K. High-performance concrete technology for the future. INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETES STRUCTURES. **Anais...** Florianópolis, junho 5-7, 1996.

MEHTA, P. K. Aggregates. INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETES STRUCTURES. **Anais...** Florianópolis, junho 5-7, 1996.

_____. **Concrete technology for sustainable development – an overview of essential principles**. Proceedings of a Three-Day CANMET/ACI International.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

_____. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais**. EUA: Ed. MC Graw-Hill, 2005.

METSO MINERALS. **Barmac Sand**. Compact Disc. Disponível em: <www.barmacsand.com>. Acesso em: 2005.

MINESS, S. Young; FRANCIS, J. **Concrete**. New Jersey: Prentice Hall, 1981.

MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ S/A. **Substâncias deletérias dos agregados**. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/mineropar/html/rocha/carctconcreto.html>>. Acesso em: 20 nov. 2007.

NEVES, Ligia. **Aplicação dos Finos Gerados pela Produção de Pedras Britadas Graníticas no Concreto Pré-misturado em Substituição às Areias Naturais**. 01.10.2001.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A.; BROOKS, J. **Concrete Technology**. LongMan, 1993.

OLIVEIRA, Ivone Regina; STUDART, André Rocha; PILEGGI, Rafael Giuliano; PANDOLFELLI, Victor Carlos. **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Carlos, 2000.

PANDOLFELLI, V. C., OLIVEIRA, I. R., STUDART, A.R. E PILEGGI, R. G. **Dispersão e Empacotamento de Partículas. Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. p. 224.

PAULON, Vladimir Antônio. **A microestrutura do concreto convencional, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, ed. Geraldo C. Isaia, 2005. Cap. 19, p. 582-604.

PETRUCCHI, Eládio G. **Concreto de Cimento Portland**. Porto Alegre: Globo, 1973.

PRENTRICE, John E. **Geology of Constructions Materials**. London: Ed. Chapman and Hall, 1990.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A. **Concreto Refratário Auto-Escoante: Metodologia de Formulação e Correlações entre Distribuição Granulométrica e Reologia**. **Cerâmica**, São Carlos, n. 01, 1996.

_____. **Reologia e Distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis**. **Cerâmica**, São Carlos, n. 48 (305), 2002.

PILEGGI, R. G. A curva de distribuição granulométrica e sua influência na reologia de concretos refratários. **Cerâmica**, São Carlos, n. 48 (308), 2002.

POWERS, M. C. Comparison chart for visual estimation of roundness. **Journal Sedim Petrol**, v. 23, p. 117-119, 1953.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. **Projetos de Experimentos**. Porto Alegre: Fundação Empresa Escola de Engenharia da UFRGS, 2001.

SILVA, Daiane dos Santos. A influência do tipo de agregado, do cimento e da relação água/cimento no módulo de elasticidade do concreto. 45º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, **Anais...** Vitória, 2003.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC/PPGEP/LED, 2000. 118 p.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. A Influência do Filler de Areia Britada de Rocha Calcária nas Propriedades da Argamassa de Revestimento. II SUFFIB – SEMINÁRIO: O USO DA FRAÇÃO FINA NA BRITAGEM. **Anais...** São Paulo: Cuchierato *et al.* (eds.), 2005.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatório Mensal**, maio/2006. Disponível em: <<http://www.sinic.org.br/numerospag/prod-reg-2001.html>>. Acesso em 2007.

SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF CEMENT AND CONCRETE INDUSTRY. Ottawa, 1998. p. 1-14.

SJÖSTRÖM, Ch. Durability and sustainable use of building materials. In: LIEWELLYN, J. W.; DAVIES, H. (eds.). **Sustainable use of materials**. London: BRE/RILEM, 1996.

SJÖSTRÖM, Ch. Durability and sustainable use of building materials. *In: Sustainable use of materials*. J. W. Llewellyn & H. Davies editors. [London] BRE/RILEM, 1992]

SHILSTONE, J. M. Concrete Mixture Optimization. **Concrete International**, Rolla, v. 12, n. 6, p. 33-39, 1990.

_____. Aggregate Gradation Optimization - Literature Search. Research, **Development and Technology**, University of Missouri-Rolla, RDT 05-001, p. 1-113, jan. 2005.

SOBRAL, S. H. **Propriedades do concreto fresco**. São Paulo: ABCP, 1984.

SOARES L.; FUJIMURA, F.; BLASQUES JUNIOR, M.; RACHEL, R. M. & BRAGA, J. M. S. Areias naturais; material de construção cada vez mais escasso na Região Metropolitana da Grande São Paulo. CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS. **Anais...** São Paulo: ABM, 1997.

SUMÁRIO MINERAL. **Agregados para construção civil**. Edições 1999 a 2001.

TANNER, R. I. **Engineering Rheology**. New York: Oxford Science Publication, 1998.

TAVAKOLI, Mostafa; SOROUSHIAN, Parviz. **ACI Materials Journal**, v. 93, p. 182-190 March/April 1996; Applied Science & Technology ACI Materials Journal.

UNITED STATES GEOLIGICAL SURVEY. Disponível em: <www.usgs.gov>. Acesso em: 2005.

VASCONCELOS, W. L.; REIS, R. J. P. **Uso de areias artificiais como agregado miúdo em concretos de cimento Portland**. 45º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2003.

WOOLF, D. O. Toughness, hardness, abrasion strength and elastic properties. **ASTM Sp. Tech. Publ.**, n. 169, p. 24-314, 1956.

YIN, R. K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ANEXOS

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabela 1: | Resultado das Porcentagens Retidas Acumuladas das Areias sem a Adição de Finos..... | 132 |
| Tabela 2: | Resultado da Quantidade de Material Utilizado para cada Composição Granulométrica se a Adição de Finos | 132 |
| Tabela 3: | Resultado das Porcentagens Retidas para os Expoentes $-q$ sem a adição de Finos..... | 132 |
| Tabela 4: | Resultados Obtidos no Estado Fresco para as Amostras da Série A sem a adição de Finos | 133 |
| Tabela 5: | Resultados de Resistência à Compressão em (MPa) para as Amostras da Série A Sem a Adição de Finos | 133 |
| Tabela 6: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,4$ com adições e do Agregado Britado “in natura” | 134 |
| Figura 1: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B04 e Agregado Britado. | 134 |
| Tabela 7: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,5$ com adições e do Agregado Britado “in natura” | 134 |
| Figura 2: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B05 e Agregado Britado. | 135 |
| Tabela 8: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,6$ com adições e do Agregado Britado “in natura” | 135 |
| Figura 3: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B06 e Agregado Britado. | 135 |
| Tabela 9: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,7$ com adições e do Agregado Britado “in natura” | 136 |
| Figura 4: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B07 e Agregado Britado | 136 |
| Tabela 10: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,8$ com adições e do Agregado Britado “in natura” | 136 |
| Figura 5: | Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B08 e Agregado Britado | 137 |
| Tabela 11: | Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 3 % de adição de Finos. | 137 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabela 11: | Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 6 % de adição de Finos. | 137 |
| Tabela 12: | Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 9 % de adição de Finos. | 138 |
| Tabela 13: | Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 12 % de adição de Finos. | 138 |
| Tabela 14: | Resultado dos Ensaios no Estado Fresco das Amostras da Série B.04 e B.05..... | 138 |
| Tabela 15: | Resultado dos Ensaios no Estado Fresco das Amostras da Série B.06 e B.07..... | 139 |
| Tabela 16: | Resultado dos Ensaios no Estado Fresco das Amostras da Série B.08..... | 139 |
| Tabela 17: | Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão aos 7 dias das amostras da Série B. | 139 |
| Tabela 18: | Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 3% de Adição | 140 |
| Tabela 19: | Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 6% de Adição | 140 |
| Tabela 20: | Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 9% de Adição | 141 |
| Tabela 21: | Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 12% de Adição | 141 |

ANEXO 1: CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Tabela 1: Resultado das Porcentagens Retidas Acumuladas das Areias sem a Adição de Finos

| DMC (mm) | peneiras (mm) | Porcentagens retidas acumuladas para os expoentes -q | | | | | | |
|----------|---------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 4,8 | 4,8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 2,4 | 12,94 | 18,77 | 24,21 | 29,29 | 34,02 | 38,44 | 42,57 |
| | 1,2 | 24,21 | 34,02 | 42,57 | 50,00 | 56,47 | 62,11 | 67,01 |
| | 0,6 | 34,02 | 46,41 | 56,47 | 64,64 | 71,28 | 76,67 | 81,05 |
| | 0,3 | 42,57 | 56,47 | 67,01 | 75,00 | 81,05 | 85,64 | 89,12 |
| | 0,15 | 50,00 | 64,64 | 75,00 | 82,32 | 87,50 | 91,16 | 93,75 |
| | 0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 2: Resultado da Quantidade de Material Utilizado para cada Composição Granulométrica se a Adição de Finos

| Peneiras | Quant. Total (g) | Quantidade de material em massa (g) | | | | | | |
|----------|------------------|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 2,4 | 2500 | 323,624 | 469,369 | 605,354 | 732,233 | 850,615 | 961,069 | 1064,127 |
| 1,2 | | 281,731 | 381,246 | 458,773 | 517,767 | 561,197 | 591,608 | 611,180 |
| 0,6 | | 245,261 | 309,668 | 347,685 | 366,117 | 370,252 | 364,177 | 351,031 |
| 0,3 | | 213,512 | 251,529 | 263,496 | 258,883 | 244,275 | 224,177 | 201,614 |
| 0,15 | | 185,873 | 204,305 | 199,692 | 183,058 | 161,161 | 137,997 | 115,797 |
| <0,15 | | 1250,000 | 883,883 | 625,000 | 441,942 | 312,500 | 220,971 | 156,250 |
| Total | | 2500,000 | 2500,000 | 2500,000 | 2500,000 | 2500,000 | 2500,000 | 2500,000 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 3: Resultado das Porcentagens Retidas para os Expoentes -q sem a adição de Finos

| DMC (mm) | peneiras (mm) | Porcentagens retidas para os expoentes -q | | | | | | |
|----------|---------------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
| 4,8 | 4,8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 2,4 | 12,94 | 18,77 | 24,21 | 29,29 | 34,02 | 38,44 | 42,57 |
| | 1,2 | 11,27 | 15,25 | 18,35 | 20,71 | 22,45 | 23,66 | 24,45 |
| | 0,6 | 9,81 | 12,39 | 13,91 | 14,64 | 14,81 | 14,57 | 14,04 |
| | 0,3 | 8,54 | 10,06 | 10,54 | 10,36 | 9,77 | 8,97 | 8,06 |
| | 0,15 | 7,43 | 8,17 | 7,99 | 7,32 | 6,45 | 5,52 | 4,63 |
| | 0 | 50,00 | 35,36 | 25,00 | 17,68 | 12,50 | 8,84 | 6,25 |
| Total | | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 4: Resultados Obtidos no Estado Fresco para as Amostras da Série A sem a adição de Finos

| AMOSTRAS | A01 | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 | A08 |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Traço | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 | 1:3 |
| Fator A/C | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,5 | 155,95 | 160 | 267,75 | 256,9 | 230,15 | 263,4 | 265,65 |
| Mini Slump (mm) | 24 | 0 | 2 | 24 | 23 | 15 | 41 | 39 |
| Massa (g) | 1001,8 | 982,5 | 994,7 | 990,3 | 992 | 1001 | 977,6 | 1012,4 |
| Volume da Cuba | 427,8 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 | 427,9 |
| Densidade (kg/dm³) | 2,3417 | 2,2961 | 2,3246 | 2,3143 | 2,3183 | 2,3393 | 2,2846 | 2,3660 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 5: Resultados de Resistência à Compressão em (MPa) para as Amostras da Série A Sem a Adição de Finos

| R7 | A01 | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 | A08 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CP1 | 38,40 | 22,10 | 30,80 | 33,90 | 33,90 | 35,00 | 35,10 | 36,10 |
| CP2 | 39,10 | 22,40 | 29,50 | 33,80 | 35,30 | 37,00 | 37,20 | 36,10 |
| CP3 | 36,90 | 23,20 | 28,80 | 33,50 | 32,90 | 36,10 | 37,90 | 37,00 |
| média | 38,13 | 22,57 | 29,70 | 33,73 | 34,03 | 36,03 | 36,73 | 36,40 |
| R28 | A09 | A02 | A03 | A04 | A05 | A06 | A07 | A08 |
| CP1 | 46,6 | 25,30 | 34,00 | 43,70 | 44,20 | 44,30 | 45,90 | 43,70 |
| CP2 | 44,7 | 28,10 | 37,50 | 42,50 | 33,20 | 44,10 | 42,80 | 44,80 |
| CP3 | 45 | 26,50 | 34,80 | 44,30 | 43,60 | 44,10 | 46,50 | 45,70 |
| média | 45,43 | 26,63 | 35,43 | 43,50 | 40,33 | 44,17 | 45,07 | 44,73 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 6: Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,4$ com adições e do Agregado Britado "in natura".

| DMC | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | Britado | B04.03 | B04.06 | B04.09 | B04.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 23,49 | 22,76 | 22,03 | 21,31 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 41,29 | 40,01 | 38,73 | 37,46 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 54,78 | 53,08 | 51,39 | 49,70 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 65,00 | 62,99 | 60,98 | 58,97 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 72,75 | 70,50 | 68,25 | 66,00 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | | 3,43 | 2,57 | 2,49 | 2,41 | 2,33 | 1,55 | 3,50 |

FONTE: O autor (2007)

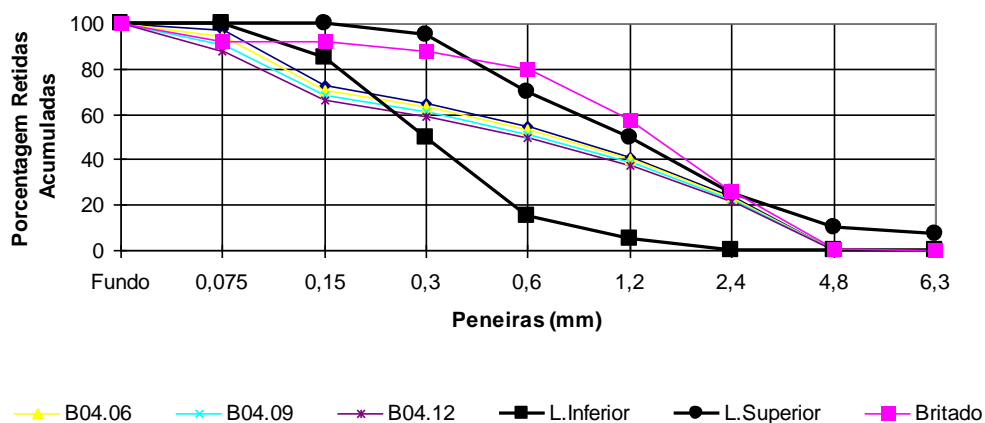


Figura 1: Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B04 e Agregado Britado.

FONTE: O autor (2007)

Tabela 7: Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,5$ com adições e do Agregado Britado "in natura".

| DMC | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | Britado | B05.03 | B05.06 | B05.09 | B05.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 28,41 | 27,53 | 26,65 | 25,77 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 48,50 | 47,00 | 45,50 | 44,00 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 62,71 | 60,77 | 58,83 | 56,89 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 72,75 | 70,50 | 68,25 | 66,00 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 79,85 | 77,38 | 74,91 | 72,44 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | | 3,43 | 2,92 | 2,83 | 2,74 | 2,65 | 1,55 | 3,57 |

FONTE: O autor (2007)

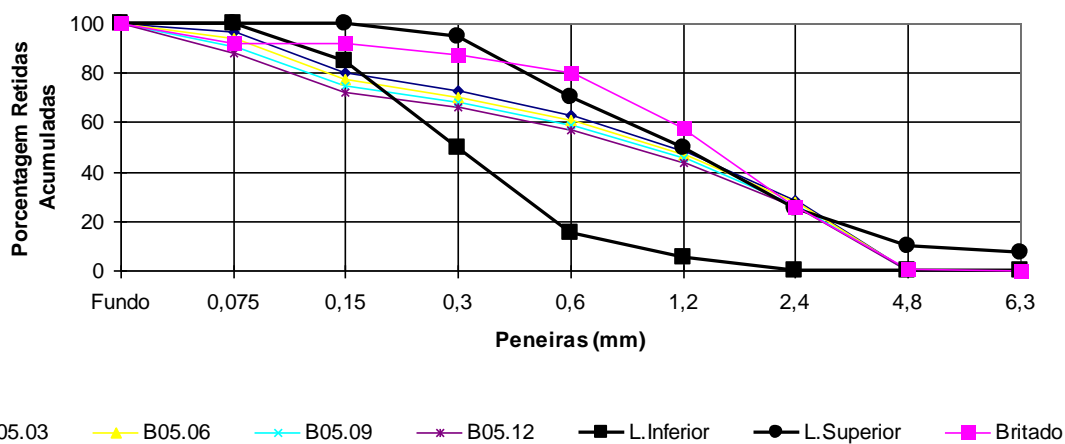


Figura 2: Percentagens Retidas Acumuladas da Série B05 e Agregado Britado.

FONTE: O autor (2007)

Tabela 8: Percentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,6$ com adições e do Agregado Britado "in natura".

| DMC | Peneiras (mm) | Britado | B06.03 | B06.06 | B06.09 | B06.12 | L.Inferior | L.Superior |
|------------------|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 33,00 | 31,98 | 30,96 | 29,94 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 54,78 | 53,08 | 51,39 | 49,70 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 69,14 | 67,01 | 64,87 | 62,73 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 78,62 | 76,19 | 73,76 | 71,33 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 84,88 | 82,25 | 79,63 | 77,00 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | 3,43 | 3,20 | 3,11 | 3,01 | 2,91 | 1,55 | 3,57 | |

FONTE: O autor (2007)

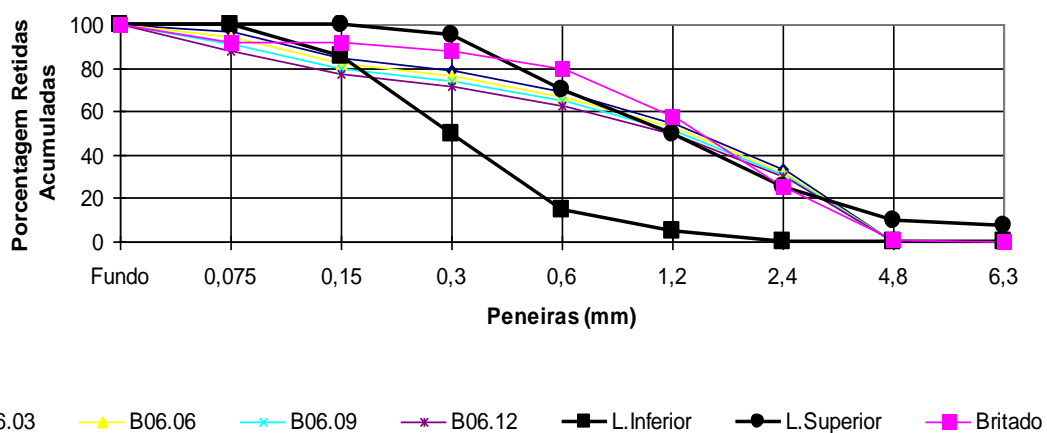


Figura 3: Percentagens Retidas Acumuladas da Série B06 e Agregado Britado.

FONTE: O autor (2007)

Tabela 9: Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,7$ com adições e do Agregado Britado "in natura".

| DMC | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | Britado | B07.03 | B07.06 | B07.09 | B07.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 37,29 | 36,14 | 34,98 | 33,83 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 60,24 | 58,38 | 56,52 | 54,65 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 74,37 | 72,07 | 69,77 | 67,47 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 83,07 | 80,50 | 77,93 | 75,36 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 88,43 | 85,69 | 82,96 | 80,22 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | | 3,43 | 3,43 | 3,33 | 3,22 | 3,12 | 1,55 | 3,57 |

FONTE: O autor (2007)

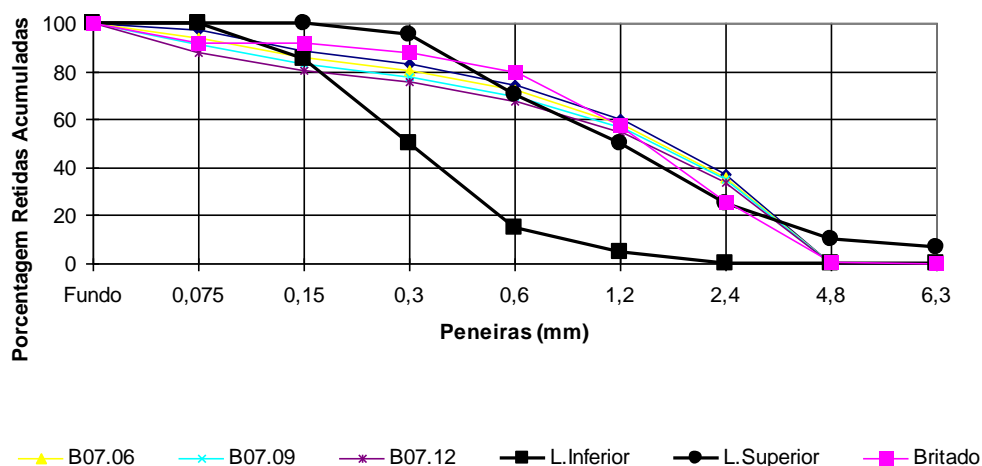


Figura 4: Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B07 e Agregado Britado

FONTE: O autor (2007)

Tabela 10: Porcentagens Retidas Acumuladas da Série B, com expoente $q = 0,8$ com adições e do Agregado Britado "in natura".

| DMC | Peneiras (mm) | PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS (%) | | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|
| | | Britado | B08.03 | B08.06 | B08.09 | B08.12 | L.Inferior | L.Superior |
| 4,8 | 6,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| | 4,8 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 10,00 |
| | 2,4 | 25,6 | 41,29 | 40,01 | 38,73 | 37,46 | 0,00 | 25,00 |
| | 1,2 | 57,4 | 65,00 | 62,99 | 60,98 | 58,97 | 5,00 | 50,00 |
| | 0,6 | 80 | 78,62 | 76,19 | 73,76 | 71,33 | 15,00 | 70,00 |
| | 0,3 | 87,6 | 86,44 | 83,77 | 81,10 | 78,42 | 50,00 | 95,00 |
| | 0,15 | 91,8 | 90,94 | 88,13 | 85,31 | 82,50 | 85,00 | 100,00 |
| | 0,075 | 91,8 | 97,00 | 94,00 | 91,00 | 88,00 | 100,00 | 100,00 |
| | Fundo | 100 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100 | 100,00 |
| Módulo de Finura | | 3,43 | 3,62 | 3,51 | 3,40 | 3,29 | 1,55 | 3,57 |

FONTE: O autor (2007)

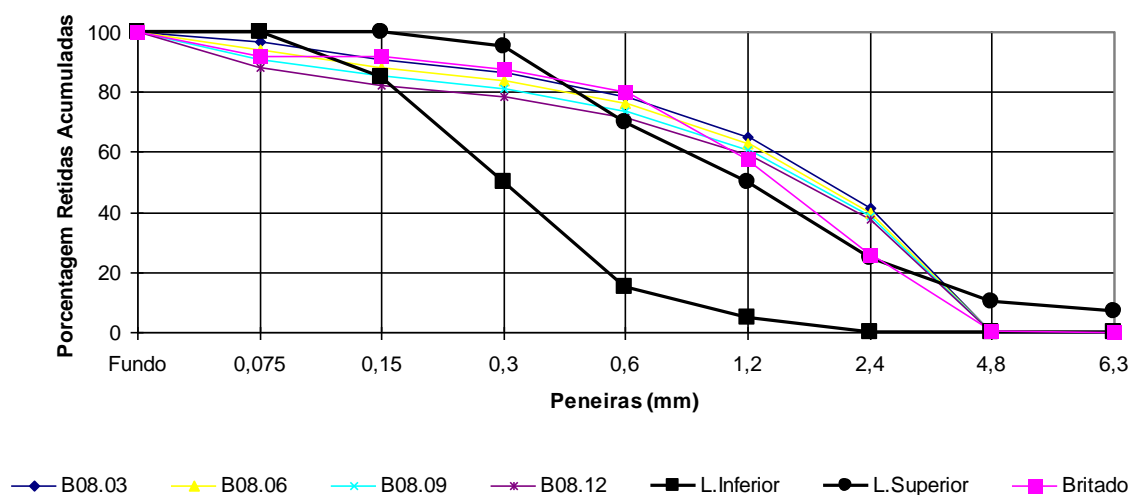


Figura 5: Percentagens Retidas Acumuladas da Série B08 e Agregado Britado

FONTE: O autor (2007)

Tabela 11: Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 3 % de adição de Finos.

| | | B04.03 | B05.03 | B06.03 | B07.03 | B08.03 |
|-----------|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,4 | 3% | 293,5968 | 355,133 | 412,5483 | 466,1187 | 516,1016 |
| 1,2 | | 222,5048 | 251,117 | 272,1804 | 286,9297 | 296,4225 |
| 0,6 | | 168,6271 | 177,5665 | 179,5721 | 176,626 | 170,25 |
| 0,3 | | 127,7954 | 125,5585 | 118,4734 | 108,726 | 97,78297 |
| 0,15 | | 96,85084 | 88,78326 | 78,16329 | 66,92872 | 56,16157 |
| 0,075 | | 303,125 | 214,3417 | 151,5625 | 107,1709 | 75,78125 |
| FUNDO | | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 |
| Total (g) | | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 11: Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 6 % de adição de Finos.

| | | B04.06 | B05.06 | B06.06 | B07.06 | B08.06 |
|-----------|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,4 | 6% | 284,5165 | 344,1495 | 399,7891 | 451,7027 | 500,1397 |
| 1,2 | | 215,6232 | 243,3505 | 263,7624 | 278,0556 | 287,2548 |
| 0,6 | | 163,4118 | 172,0748 | 174,0183 | 171,1633 | 164,9846 |
| 0,3 | | 123,843 | 121,6752 | 114,8093 | 105,3634 | 94,75876 |
| 0,15 | | 93,85545 | 86,03738 | 75,74587 | 64,85876 | 54,42461 |
| 0,075 | | 293,75 | 207,7126 | 146,875 | 103,8563 | 73,4375 |
| FUNDO | | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |
| Total (g) | | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 12: Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 9 % de adição de Finos.

| | | B04.09 | B05.09 | B06.09 | B07.09 | B08.09 |
|-----------|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,4 | 9% | 275,4362 | 333,166 | 387,0299 | 437,2866 | 484,1778 |
| 1,2 | | 208,7416 | 235,584 | 255,3445 | 269,1815 | 278,0871 |
| 0,6 | | 158,1966 | 166,583 | 168,4645 | 165,7006 | 159,7191 |
| 0,3 | | 119,8906 | 117,792 | 111,1451 | 102,0007 | 91,73454 |
| 0,15 | | 90,86006 | 83,29151 | 73,32845 | 62,7888 | 52,68766 |
| 0,075 | | 284,375 | 201,0835 | 142,1875 | 100,5417 | 71,09375 |
| FUNDO | | 112,5 | 112,5 | 112,5 | 112,5 | 112,5 |
| Total (g) | | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 13: Resultados em Massa da Curva Granulométrica da Série B., com 12 % de adição de Finos.

| | | B04.12 | B05.12 | B06.12 | B07.12 | B08.12 |
|-----------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2,4 | 12% | 266,3559 | 322,1825 | 374,2706 | 422,8706 | 468,2159 |
| 1,2 | | 201,86 | 227,8175 | 246,9265 | 260,3074 | 268,9194 |
| 0,6 | | 152,9813 | 161,0913 | 162,9108 | 160,238 | 154,4536 |
| 0,3 | | 115,9381 | 113,9087 | 107,481 | 98,63805 | 88,71033 |
| 0,15 | | 87,86468 | 80,54564 | 70,91103 | 60,71884 | 50,9507 |
| 0,075 | | 275 | 194,4544 | 137,5 | 97,22718 | 68,75 |
| FUNDO | | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Total (g) | | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 | 1250 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 14: Resultado dos Ensaio no Estado Fresco das Amostras da Série B.04 e B.05

| Série | B04.03 | B04.06 | B04.09 | B04.12 | B05.03 | B05.06 | B05.09 | B05.12 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| Cimento (g) | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 |
| Fator A/C=0,50 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 |
| Índice de Consistência (mm) | 218,4 | 201,6 | 182,9 | 169,6 | 243,4 | 236,5 | 210 | 202,7 |
| Índice de Consistência (mm) | 203,8 | 198,6 | 188,5 | 167,9 | 243,5 | 228,75 | 201,9 | 197,4 |
| Índice de Consistência Média (mm) | 211,1 | 200,1 | 185,7 | 168,75 | 243,45 | 232,625 | 205,95 | 200,05 |
| Diferença de flow (mm) | -45,8 | -56,8 | -71,2 | -88,15 | 13,3 | 2,475 | -24,2 | -30,1 |
| Módulo de Finura | 2,57 | 2,49 | 2,41 | 2,33 | 2,92 | 2,83 | 2,74 | 2,65 |
| Mini Slump (mm) | 3 | 2 | 0 | 0 | 17 | 10 | 5 | 6 |
| peso da cuba (g) | 1124,6 | 1124,6 | 1124,6 | 1124,6 | 1124,6 | 994,5 | 1124,6 | 1124,6 |
| cuba + argamassa (g) | 2130,2 | 2125,5 | 2121,1 | 2117,6 | 2126,1 | 1996,7 | 2128,6 | 2125,9 |
| massa (g) | 1005,6 | 1000,9 | 996,5 | 993 | 1001,5 | 1002,2 | 1004 | 1001,3 |
| Volume da Cuba (g/cm ³) | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 |
| Densidade (g/cm³) | 2,34 | 2,33 | 2,32 | 2,31 | 2,33 | 2,33 | 2,34 | 2,33 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 15: Resultado dos Ensaio no Estado Fresco das Amostras da Série B.06 e B.07

| Série | B06.03 | B06.06 | B06.09 | B06.12 | B07.03 | B07.06 | B07.09 | B07.12 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Cimento (g) | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 |
| Fator A/C=0,50 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 |
| Índice de Consistência (mm) | 247,9 | 247,65 | 230,2 | 233,7 | 258,8 | 259,3 | 236,9 | 227,9 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,9 | 230,75 | 219,7 | 212,5 | 251,1 | 250,8 | 228,3 | 219,2 |
| Índice de Consistência Média (mm) | 242,9 | 239,2 | 224,95 | 223,1 | 254,95 | 255,05 | 232,6 | 223,55 |
| Diferença de flow (mm) | -20,5 | -24,2 | -38,45 | -40,3 | -10,7 | -10,6 | -33,05 | 83,4 |
| Módulo de Finura | 3,2 | 3,11 | 3,01 | 2,91 | 3,43 | 3,33 | 3,22 | 3,4 |
| Mini Slump (mm) | 26 | 20 | 14 | 17 | 35 | 32 | 28 | 19 |
| peso da cuba (g) | 1124,6 | 1124,6 | 1124,6 | 1124,6 | 1125,5 | 1125,5 | 1125,5 | 994,8 |
| cuba + argamassa (g) | 2126,1 | 2127,7 | 2121,8 | 2128,7 | 2122,6 | 2133,8 | 2126,1 | 2212,9 |
| massa (g) | 1001,5 | 1003,1 | 997,2 | 1004,1 | 997,1 | 1008,3 | 1000,6 | 1218,1 |
| Volume da Cuba (g/cm ³) | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 429,7 | 427,8 |
| Densidade (g/cm³) | 2,33 | 2,33 | 2,32 | 2,34 | 2,32 | 2,35 | 2,33 | 2,85 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 16: Resultado dos Ensaio no Estado Fresco das Amostras da Série B.08

| Série | B08.03 | B08.06 | B08.09 | B08.12 |
|--|----------------|---------------|----------------|---------------|
| Cimento (g) | 416,67 | 416,67 | 416,67 | 416,67 |
| Fator A/C=0,50 | 208,33 | 208,33 | 208,33 | 208,33 |
| Índice de Consistência (mm) | 264,85 | 254,6 | 243,5 | 240,3 |
| Índice de Consistência (mm) | 237,2 | 239,2 | 222,05 | 230,2 |
| Índice de Consistência Média (mm) | 251,025 | 246,9 | 232,775 | 235,25 |
| Diferença de flow (mm) | 110,875 | 106,75 | 92,625 | 95,1 |
| Módulo de Finura | 3,62 | 3,51 | 3,4 | 3,29 |
| Mini Slump (mm) | 40 | 38 | 32 | 25 |
| peso da cuba (g) | 994,5 | 1125,5 | 994,5 | 1125,5 |
| cuba + argamassa (g) | 1989,8 | 2107,8 | 1989,9 | 2116,6 |
| massa (g) | 995,3 | 982,3 | 995,4 | 991,1 |
| Volume da Cuba (g/cm ³) | 427,8 | 429,7 | 427,8 | 429,7 |
| Densidade (g/cm³) | 2,33 | 2,29 | 2,33 | 2,31 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 17: Resultados dos Ensaio de Resistência à Compressão aos 7 dias das amostras da Série B.

| Resistência R7 | B04.03 | B04.06 | B04.09 | B04.12 | B05.03 | B05.06 | B05.09 | B05.12 | B06.03 | B06.06 | B06.09 | B06.12 |
|----------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CP1 | 35,3 | 35,2 | 34 | 32,8 | 36,8 | 35,2 | 35,2 | 35,7 | 35,3 | 34,7 | 33,9 | 34,2 |
| CP2 | 34,4 | 35,3 | 36 | 33,4 | 35,9 | 32,6 | 37,1 | 35,9 | 35,9 | 35,5 | 34,2 | 34,9 |
| CP3 | 35,2 | 31,1 | 35 | 32,9 | 35,5 | 37,6 | 36,1 | 35,3 | 35,8 | 35,3 | 32,9 | 33,7 |
| Média | 34,97 | 33,87 | 35,00 | 33,03 | 36,07 | 35,13 | 36,13 | 35,63 | 35,67 | 35,17 | 33,67 | 34,27 |
| Resistência R7 | B07.03 | B07.06 | B07.09 | BC07.12 | B08.03 | B08.06 | B08.09 | B08.12 | | | | |
| CP1 | 31,4 | 34,6 | 27,1 | 34,7 | 33,925 | 34,9 | 34,27 | 34,4 | | | | |
| CP2 | 29,3 | 33,9 | 32,8 | 35,4 | 33,58 | 35,4 | 31,28 | 33,8 | | | | |
| CP3 | 35,2 | 33,5 | 33,8 | 34,6 | 33,005 | 35,7 | 33,01 | 34 | | | | |
| Média | 31,97 | 34,00 | 31,23 | 34,90 | 33,50 | 35,33 | 32,85 | 34,07 | | | | |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 18: Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 3% de Adição

| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Adição de 3 % | 20230,35167 | 19403,85175 | 18120,69282 | 16702,23216 | 15320,82003 |
| | 15331,73959 | 13720,59515 | 11955,19876 | 10281,4299 | 8799,500383 |
| | 11619,28584 | 9701,925875 | 7887,489669 | 6328,962494 | 5053,985807 |
| | 8805,772022 | 6860,297577 | 5203,802507 | 3895,933409 | 2902,752592 |
| | 6673,527267 | 4850,962937 | 3433,229287 | 2398,228325 | 1667,193563 |
| | 20886,89213 | 11711,26051 | 6657,201863 | 3840,208039 | 2249,616825 |
| Área Total Agregado(cm2) | 83547,57 | 66248,89 | 53257,61 | 43446,99 | 35993,87 |
| Área Total Finos (cm2) | 21978,022 | 21978,022 | 21978,022 | 21978,022 | 21978,022 |
| Relação Área Total de Finos / Área Total de Agregados | 0,263 | 0,332 | 0,413 | 0,506 | 0,611 |
| Relação Área Total de Agregados / Área Total de Finos | 3,801 | 3,014 | 2,423 | 1,977 | 1,638 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 19: Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 6% de Adição

| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Adição de 6 % | 19604,67069 | 18803,73262 | 17560,25902 | 16185,66828 | 14846,98024 |
| | 14857,56207 | 13296,24685 | 11585,45034 | 9963,447537 | 8527,350887 |
| | 11259,92649 | 9401,866312 | 7643,54669 | 6133,221386 | 4897,676968 |
| | 8533,428557 | 6648,123425 | 5042,860162 | 3775,440623 | 2812,976738 |
| | 6467,129516 | 4700,933156 | 3327,046938 | 2324,056315 | 1615,630876 |
| | 20240,90578 | 11349,05658 | 6451,309022 | 3721,438718 | 2180,041047 |
| Área Total Agregado(cm2) | 80963,623 | 64199,959 | 51610,472 | 42103,273 | 34880,657 |
| Área Total Finos (cm2) | 43956,04 | 43956,04 | 43956,04 | 43956,04 | 43956,04 |
| Relação Área Total de Finos / Área Total de Agregados | 0,543 | 0,685 | 0,852 | 1,044 | 1,260 |
| Relação Área Total de Agregados / Área Total de Finos | 1,842 | 1,461 | 1,174 | 0,958 | 0,794 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 20: Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 9% de Adição

| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Adição de 9 % | 18978,98971 | 18203,6135 | 16999,82522 | 15669,10439 | 14373,14044 |
| | 14383,38456 | 12871,89855 | 11215,70193 | 9645,465169 | 8255,20139 |
| | 10900,56713 | 9101,806748 | 7399,60371 | 5937,480278 | 4741,368129 |
| | 8261,085092 | 6435,949273 | 4881,917816 | 3654,947837 | 2723,200885 |
| | 6260,731766 | 4550,903374 | 3220,864589 | 2249,884305 | 1564,068188 |
| | 19594,91942 | 10986,85265 | 6245,416181 | 3602,669397 | 2110,465269 |
| Área Total Agregado(cm ²) | 78379,678 | 62151,024 | 49963,329 | 40759,551 | 33767,444 |
| Área Total Finos (cm ²) | 65934,07 | 65934,07 | 65934,07 | 65934,07 | 65934,07 |
| Relação Área Total de Finos / Área Total de Agregados | 0,841 | 1,061 | 1,320 | 1,618 | 1,953 |
| Relação Área Total de Agregados / Área Total de Finos | 1,189 | 0,943 | 0,758 | 0,618 | 0,512 |

FONTE: O autor (2007)

Tabela 21: Resultados das Áreas Totais das Amostras de Agregados e Finos e suas Relações com 12% de Adição

| | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Adição de 12 % | 18353,30873 | 17603,49437 | 16439,39142 | 15152,54051 | 13899,30065 |
| | 13909,20705 | 12447,55024 | 10845,95351 | 9327,4828 | 7983,051894 |
| | 10541,20777 | 8801,747185 | 7155,660731 | 5741,73917 | 4585,059289 |
| | 7988,741628 | 6223,775121 | 4720,975471 | 3534,455051 | 2633,425032 |
| | 6054,334015 | 4400,873593 | 3114,68224 | 2175,712295 | 1512,505501 |
| | 18948,93307 | 10624,64871 | 6039,52334 | 3483,900077 | 2040,889491 |
| Área Total Agregado(cm ²) | 75795,732 | 60102,089 | 48316,187 | 39415,830 | 32654,232 |
| Área Total Finos (cm ²) | 87912,088 | 87912,088 | 87912,088 | 87912,088 | 87912,088 |
| Relação Área Total de Finos / Área Total de Agregados | 1,160 | 1,463 | 1,820 | 2,230 | 2,692 |
| Relação Área Total de Agregados / Área Total de Finos | 0,862 | 0,684 | 0,550 | 0,448 | 0,371 |

FONTE: O autor (2007)