

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

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA E  
DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS  
MIÚDOS DE BRITAGEM NAS PROPRIEDADES DO  
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

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

DENIS FERNANDES WEIDMANN

Florianópolis, agosto de 2008.

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORMA E DA COMPOSIÇÃO  
GRANULOMÉTRICA DE AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM NAS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

**DENIS FERNANDES WEIDMANN**

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

---

Prof. Dr. Glicério Trichês – Coordenador do PPGEC

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior – Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Júnior – Moderador - UFSC

---

Prof. Dr. Claudio Sbrighi Neto – IPT

---

Prof. Dr. Jefferson Sidney Camacho – UNESP

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha – UFSC

---

Prof. Dr. Wellington Longuini Repette – UFSC

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Ivalmir e Terezinha.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom e oportunidade que é a vida, por me dar força, coragem e perseverança nos momentos difíceis e por manter minha família unida.

Ao professor, orientador e, acima de tudo um grande amigo, Luiz Roberto Prudêncio Jr. pela confiança depositada e também pelo constante apoio e companheirismo ao longo dos mais de seis anos de convivência. Obrigado também pela oportunidade de poder participar desta família que é o GTec – Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland.

Aos professores Dra. Janaíde Cavalcante Rocha e Dr. Wellington Longuini Repette por terem aceito avaliar este trabalho, desde sua qualificação, e também pelo auxílio e ensinamentos.

Aos professores Dr. Claudio Sbrighi Neto e Dr. Jefferson Sidney Camacho por aceitarem avaliar este trabalho.

À Capes e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina pelo auxílio financeiro.

Aos meus grandes amigos que os considero mais que irmãos: Wilson, Tochetto, Fábio “Flufi” e Fábio “Wiki”, pela incansável ajuda, inclusive nas férias, finais de semana e até sob chuva. Sei o quão difícil e árduo foram os trabalhos, afinal não é fácil peneirar, lavar, secar, pesar, ensacar e misturar mais de uma tonelada de areia; e preparar e ensaiar mais de duzentos e cinquenta argamassas e cinquenta concretos. Valeu “esses meninos”, sem vocês esse trabalho não seria possível!

Ao Alexandre, o Leco, grande amigo e também mais que irmão, pela incansável ajuda teórica, prática e por estar sempre contribuindo com idéias. Valeu!

Ao amigo Luiz e as amigas Ju e Talita, do GTec, e Raphael, que é quase do GTec, pelo apoio e amizade. Um agradecimento especial também à Regina, “chefe” do GTec, pelos momentos de descontração e pelo apoio.

À professora Janaíde Cavalcante Rocha e ao professor Malik Cheriaf por disponibilizarem equipamentos e laboratório para ensaios, além de prestarem todo auxílio nos ensaios com a lupa estereoscópica.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina e seus funcionários Renato, Luiz Henrique e Roque pela ajuda, disponibilização das instalações e equipamentos para execução dos ensaios. Agradecimento igual ao Laboratório de Mecânica dos Solos, ao seu professor responsável Marciano Macarini e à bolsista Karina Guimarães Lopes por disponibilizarem as instalações e auxiliarem nos ensaios de sedimentação.

Ao engenheiro Nei B. Damo pela colaboração teórica sobre os sistemas de britagem, pelo empréstimo de material e por estar sempre pronto para discutir e trocar idéias.

À Cedro Engenharia, Comércio e Mineração pela doação dos agregados e em especial ao engenheiro Eliandro pelo auxílio e pela paciência em responder aos questionamentos e dúvidas. Em especial também ao engenheiro Joélcio Luiz Stocco, também da Cedro, pelo apoio e pela amizade construída nestes últimos anos.

À Rheotec pela doação dos aditivos e de outros produtos utilizados. Também a todos seus funcionários e em especial aos amigos Hideo, Marcus e Thomas pela amizade, apoio, compreensão e colaboração.

À Engemix pela doação de materiais e pela disponibilização de suas instalações para realização dos ensaios. Em especial aos amigos Joélcio, Cleiton e Neuri pelas informações, discussões sobre o assunto e por estarem sempre de prontidão para ajudar e colaborar.

À Cia de Cimento Itambé pelos ensaios de Blaine e em especial ao engenheiro Fernando Brandes que os viabilizou.

À Votorantim Cimentos pelos ensaios de granulometria à laser. Em especial ao Sr. Cleuton que os intermediou.

À D. Nésia e ao Sr. Maurício pelo carinho e apoio nestes mais de sete anos de amizade.

À minha namorada Larissa. A você, um agradecimento muito especial por todo apoio, paciência, carinho, afeto e compreensão.

E por fim, um agradecimento especial aos meus pais Ivalmir e Terezinha, que são pessoas muito importantes na minha vida, pela confiança, carinho e apoio. Peço desculpas pelos momentos em que estive ausente, mas tenho certeza que foi por um bom motivo e que vocês sabem disto.

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

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xvi
GLOSSÁRIO.....	xvii
RESUMO.....	xix
ABSTRACT.....	xx
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Considerações iniciais</i> .....	1
1.2 <i>Objetivos</i> .....	3
1.3 <i>Estrutura do trabalho</i> .....	4
<b>2 Agregados Miúdos Destinados a Concreto.....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Considerações preliminares</i> .....	5
2.2 <i>Terminologia e classificação</i> .....	6
2.3 <i>Principais características e sua influência nos concretos</i> .....	8
2.3.1 Composição granulométrica.....	9
2.3.1.1 Recomendações normativas e sua evolução.....	16
2.3.2 Dimensão máxima característica.....	18
2.3.3 Material pulverulento.....	19
2.3.4 Substâncias deletérias.....	25
2.3.5 Textura superficial dos grãos.....	28
2.3.6 Forma dos grãos.....	29
2.3.6.1 Métodos para determinação de parâmetros de forma.....	32
2.3.6.2 Considerações sobre os métodos de determinação de forma.....	39
2.4 <i>Agregados miúdos de britagem</i> .....	42
2.4.1 Considerações preliminares.....	42
2.4.2 Britagem de agregados.....	42
2.4.2.1 Principais tipos de britadores e suas influências.....	46
2.4.2.1.1 Britadores de compressão.....	46
2.4.2.1.1.1 Britador de mandíbulas.....	46
2.4.2.1.1.2 Britadores cônicos e giratórios.....	48
2.4.2.1.2 Britadores de impacto.....	49
2.4.2.1.2.1 Britadores de impacto de eixo horizontal (HSI).....	50
2.4.2.1.2.2 Britadores de impacto de eixo vertical (VSI).....	50
2.4.3 Pó de pedra: produção e particularidades.....	53
2.4.4 Produção de areias de britagem.....	56
2.4.4.1 Equipamentos para remoção de microfinos.....	57
2.4.5 Emprego de agregados miúdos de britagem em concretos e argamassas.....	63
<b>3 Dosagem e Bombeamento do Concreto de Cimento Portland.....</b>	<b>70</b>
3.1 <i>Considerações iniciais</i> .....	70
3.2 <i>Método de dosagem IPT/EPUSP ou IBRACON</i> .....	72
3.3 <i>Bombeabilidade</i> .....	75
3.3.1 Ensaio para determinação.....	78
3.3.2 Fatores que influenciam.....	81
<b>4 Programa Experimental.....</b>	<b>86</b>
4.1 <i>Considerações iniciais</i> .....	86

<b>4.2 Variáveis estudadas</b> .....	<b>86</b>
<b>4.3 Materiais empregados</b> .....	<b>89</b>
4.3.1 Cimento.....	89
4.3.2 Aditivo.....	90
4.3.3 Água.....	91
4.3.4 Agregados graúdos.....	91
4.3.5 Agregados miúdos.....	92
4.3.5.1 Preparo e obtenção das diversas areias de britagem.....	95
<b>4.4 Metodologia</b> .....	<b>101</b>
4.4.1 Ensaios de caracterização dos agregados miúdos.....	101
4.4.2 Ensaios em argamassa.....	102
4.4.2.1 Sequência de mistura e dos ensaios em argamassa.....	104
4.4.3 Ensaios em concreto.....	106
4.4.3.1 Sequência de mistura e dos ensaios em concreto.....	110
<b>5 Apresentação e Análise dos Resultados</b> .....	<b>112</b>
<b>5.1 Terminologia</b> .....	<b>112</b>
<b>5.2 Características dos agregados miúdos</b> .....	<b>113</b>
5.2.1 Areia natural.....	113
5.2.2 Agregados miúdos de britagem.....	114
5.2.2.1 Material passante na peneira 75µm.....	117
5.2.2.2 Avaliação da influência do tipo de britador.....	123
5.2.2.3 Características dos agregados de britagem utilizados nos estudos em concreto e argamassa.....	125
<b>5.3 Estudo em argamassas</b> .....	<b>128</b>
5.3.1 Avaliação da influência do ponto de corte do agregado miúdo de britagem.....	129
5.3.1.1 Quanto à fluidez.....	129
5.3.1.2 Quanto ao escoamento.....	134
5.3.1.3 Quanto ao teor de ar incorporado.....	138
5.3.2 Avaliação da influência do teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem.....	143
5.3.2.1 Quanto à fluidez.....	144
5.3.2.2 Quanto ao escoamento.....	149
5.3.2.3 Quanto ao teor de ar incorporado.....	153
5.3.2.4 Considerações complementares.....	157
5.3.3 Avaliação da influência da substituição parcial de agregado miúdo de britagem por areia natural fina.....	160
5.3.3.1 Quanto à fluidez.....	160
5.3.3.2 Quanto ao escoamento.....	165
5.3.3.3 Quanto ao teor de ar incorporado.....	170
5.3.4 Avaliação da influência da forma do agregado miúdo de britagem.....	173
5.3.5 Avaliação da correlação das características do agregado miúdo com as propriedades das argamassas.....	180
5.3.6 Correlação entre os ensaios.....	185
5.3.7 Composições selecionadas para o estudo em concretos.....	187
<b>5.4 Estudo em concretos</b> .....	<b>188</b>
5.4.1 Definição dos teores de argamassa.....	189
5.4.2 Curvas de dosagem.....	192
5.4.3 Análise de desempenho para mesma resistência.....	202
<b>5.5 Relação dos resultados entre argamassa e concreto</b> .....	<b>205</b>
<b>5.6 Proposta de metodologia de ensaios em argamassa para comparação de agregados miúdos para uso em concretos</b> .....	<b>213</b>

<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>218</b>
6.1	<i>Limitações das conclusões</i>	224
6.2	<i>Sugestão para trabalhos futuros</i>	224
<b>7</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>225</b>
<b>8</b>	<b>Anexos</b>	<b>235</b>
8.1	<i>Anexo A – Método GTec-UFSC para determinação do coeficiente volumétrico de forma de agregados graúdos e miúdos</i>	235
8.2	<i>Anexo B – Estudos preliminares para definição dos ensaios propostos</i>	241
8.2.1	Materiais utilizados nos estudos preliminares e piloto	242
8.2.2	Ensaio proposto para avaliação da bombeabilidade de concreto	244
8.2.2.1	Aferição do ensaio proposto para concreto	247
8.2.2.1.1	Avaliação da influência do teor de argamassa do concreto	248
8.2.2.1.2	Avaliação da influência do abatimento do concreto	250
8.2.2.2	Considerações sobre o ensaio proposto	252
8.2.3	Ensaio proposto em argamassa para avaliação da qualidade de agregados miúdos para concreto	253
8.2.3.1	Aferição do ensaio proposto	256
8.2.3.2	Considerações sobre o ensaio proposto	259
8.3	<i>Anexo C – Estudo-piloto</i>	260
8.3.1	Estudo em argamassa	264
8.3.2	Estudo em concreto	267
8.3.3	Resultados e considerações	270
8.4	<i>Anexo D – Tabelas de resultados do estudo em argamassa</i>	271



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Partículas com comprimento (a) e largura (b) maiores que a abertura da malha da peneira (adaptado de KWAN et al, 1999) .....	12
Figura 2.2 – Curvas granulométricas ideais para algumas normas. ....	18
Figura 2.3 – Distribuição de tamanho de grãos menores que 150µm para diferentes tipos de areia (D’AGOSTINO & SOARES, 2002). ....	23
Figura 2.4 – Distribuição do tamanho de partículas para diferentes agregados miúdos britados (QUIROGA, 2003). ....	24
Figura 2.5 – Determinação da angulosidade segundo Método do Gradiente proposto por Masad (2002) (QUIROGA, 2003). ....	33
Figura 2.6 – Tabela padrão para avaliação do grau de esfericidade e arredondamento de agregados (NBR 7389:1992). ....	36
Figura 2.7 – Diferença entre a maior dimensão e sua projeção de acordo com seu plano de apoio. ....	41
Figura 2.8 – Vista geral de uma planta de pedreira: da britagem primária (esquerda - 2) à pilha de pó-de-pedra (direita – 8*). ....	43
Figura 2.9 – Da direita para a esquerda: Pré-peneiramento, britador secundário, britador terciário e britador quaternário.....	45
Figura 2.10 – Decks de peneiramento e pilhas de material pronto para comercialização (centro esquerdo) e material para re-britagem (canto direito inferior). ....	46
Figura 2.11 – Britador de mandíbulas de um eixo (METSO MINERALS, 2005). ....	47
Figura 2.12 – Britador de mandíbulas de dois eixos (METSO MINERALS, 2005). ....	47
Figura 2.13 – Britadores: (a) giratórios e (b) cônicos (METSO MINERALS, 2005). ....	48
Figura 2.14 – Britador de impacto de eixo horizontal (HSI) – Moinho de martelos (METSO MINERALS, 2005). ....	50
Figura 2.15 – Britador de impacto de eixo vertical (VSI) (METSO MINERALS, 2005). ....	51
Figura 2.16 – Rotor, à esquerda, e câmara de acúmulo de material onde ocorre a cominuição autógena, à direita (METSO MINERALS, 2005). ....	52
Figura 2.17 – Britador do tipo VSI com câmara de acúmulo e cascata (adaptado de METSO MINERALS, 2005). ....	53
Figura 2.18 – Pilha (à esquerda) e estoque (à direita) de pó-de-pedra em pedreira da região da grande Florianópolis (outubro de 2006). ....	54
Figura 2.19 – Curvas granulométricas do pó-de-pedra de algumas pedreiras da Região Metropolitana de São Paulo (CUCHIERATO, 2000). ....	54
Figura 2.20 – Pó-de-pedra de diversas pedreiras de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. ....	55
Figura 2.21 – Pó-de-pedra após retirada do material pulverulento e do material retido na malha 2,4mm de diversas pedreiras de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.....	56

Figura 2.22 – Lavadores de rosca ou classificadores espirais (METSO MINERALS, 2005). ....	58
Figura 2.23 – Rodas desaguadoras ou rodas d’água (METSO MINERALS, 2005). .....	59
Figura 2.24 – Sistema beneficiamento do pó-de-pedra e produção de areia de britagem de uma pedreira da região da grande Florianópolis: (a) peneiramento da granilha; (b) roda desaguadora para remoção de microfinos; (c) pilha de granilha; e (d) pilha de areia de britagem. ....	60
Figura 2.25 – Detalhe do peneirador de granilha, ao lado da roda desaguadora, empregados em pedreira da região da grande Florianópolis. ....	60
Figura 2.26 – Funcionamento de um separador ciclônico (disponível em <a href="http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador_cicl%C3%B4nico">http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador_cicl%C3%B4nico</a> ). ....	62
Figura 2.27 – Exemplo de aeroseparador (LIMA & ALMEIDA, 2005). ....	62
Figura 3.1 – Mecanismo de deslocamento do concreto na tubulação (Browne & Bamforth, 1977) .....	76
Figura 3.2 – Redução da seção da tubulação logo após a saída da bomba de concreto (Putzmeister, 2004). ....	78
Figura 3.3 – Aparato para determinação da exsudação do concreto sob pressão ( <i>Pressure bleed test apparatus</i> – Browne e Bamforth, 1977). ....	79
Figura 3.4 – Aparato para teste de bombeamento de concreto desenvolvido por Best & Lane (1980). ....	80
Figura 3.5 – Esquema de funcionamento de um viscosímetro de tubo capilar de extrusão (KOEHLER & FOWLER, 2004). ....	81
Figura 3.6 – Variação da pressão de bombeamento em função da consistência do concreto (adaptado de BEST & LANE, 1980). ....	83
Figura 3.7 – Influência do teor de argamassa na pressão de bombeamento do concreto (adaptado de BEST & LANE, 1980). ....	83
Figura 3.8 – Influência da forma dos grãos na pressão de bombeamento do concreto para diferentes teores de argamassa (BEST & LANE, 1980). ....	84
Figura 4.1 – Universo de combinações estudado: alterações na areia de britagem e teor de composição com areia natural. ....	89
Figura 4.2 – Seqüência de britagem e equipamentos utilizados inicialmente pela pedreira. ....	93
Figura 4.3 – Nova seqüência de britagem após aquisição do britador VSI pela pedreira. ....	94
Figura 4.4 – Peneiramento mecânico da areia de britagem. ....	95
Figura 4.5 – Procedimento adotado para a lavagem das areias de britagem: a) mistura da areia e água na proporção 1:2 (areia:água, em volume unitário); b) repouso da mistura por cerca de 15s; c) vertendo a solução no conjunto de peneiras; d) material retido nas peneiras; e) retorno do material retido para a caixa e adição de nova quantidade de água; e f) secagem do material ao sol sobre lonas plásticas. ....	97
Figura 4.6 – Tubo para ensaio de escoamento de argamassas: (a) dimensões e (b) fixação na bancada. ....	106
Figura 5.1 – Imagens obtidas com auxílio da lupa estereoscópica – aumento de 6,5x – para a fração retina na peneira de malha 0,30mm da areia natural com: a) luz incidindo diretamente; e b) luz incidindo indiretamente. ....	114

Figura 5.2 – Imagens obtidas com auxílio do escâner para a fração retina na peneira de malha 2,36mm da areia de britagem: a) arredondada; e b) lamelar. ....	117
Figura 5.3 – Curvas granulométricas, obtidas por ensaios de sedimentação, da fração passante na peneira 150 $\mu$ m dos materiais: arredondado lavado (AL) e não lavado (AN), e lamelar lavado (LL) e não lavado (LN). ....	118
Figura 5.4 – Curvas granulométricas, obtidas por granulometria a laser, da fração passante na peneira 150 $\mu$ m dos materiais: arredondado lavado (AL) e não lavado (AN); lamelar lavado (LL) e não lavado (LN) e do cimento CP IV-RS utilizado. ....	118
Figura 5.5 – Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas do ensaio de granulometria a laser da fração passante na peneira 150 $\mu$ m dos materiais: a) arredondado lavado - AL e não lavado - AN; e, b) lamelar lavado - LL e não lavado - LN. ....	120
Figura 5.6 – Imagens obtidas com auxílio da lupa estereoscópica – aumento de 12,5x – com luz indireta para a fração passante na peneira de malha 0,075mm e retida no fundo dos materiais: a) arredondada lavada; e b) lamelar lavada. ....	122
Figura 5.7 – Variação da massa específica com o tempo de imersão dos grãos do material lamelar e arredondado. ....	124
Figura 5.8 – Composições granulométricas avaliadas para o material arredondado bem como os limites sugeridos pela NBR 7211:2005. ....	127
Figura 5.9 – Curvas granulométricas das areias de britagem arredondadas e da areia natural assim como os limites sugeridos pela NBR 7211:2005. ....	128
Figura 5.10 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas em função dos diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....	131
Figura 5.11 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares em função dos diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....	133
Figura 5.12 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas em função dos diferentes pontos de corte e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural. ....	136
Figura 5.13 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares em função dos diferentes pontos de corte e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural. ....	137
Figura 5.14 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas para diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....	140
Figura 5.15 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares em função de diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....	142

- Figura 5.16 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas com diferentes teores de material pulverulento e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....146
- Figura 5.17 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares com diferentes teores de material pulverulento e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....148
- Figura 5.18 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas com diferentes teores de material pulverulento e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural. ....150
- Figura 5.19 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares com diferentes teores de material pulverulento e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural. ....152
- Figura 5.20 – Teor de ar incorporado das argamassas com areias de britagem arredondadas em função do teor de material pulverulento para: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....155
- Figura 5.21 – Teor de ar incorporado das argamassas com areias de britagem arredondadas em função do teor de material pulverulento para: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural. ....157
- Figura 5.22 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem em relação: a) a todo o agregado miúdo de britagem; b) à areia base - X. ....159
- Figura 5.23 – Fluidez das argamassas contendo areias de britagem arredondadas em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 43,8%; b) 45,0%; e c) 46,1%.....162
- Figura 5.24 – Fluidez das argamassas contendo areias de britagem lamelares em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 45,0%; b) 46,1%; e c) 47,3%.....163
- Figura 5.25 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma arredondada em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 43,8%; b) 45,0%; e c) 46,1%.....166
- Figura 5.26 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma lamelar em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 45,0%; b) 46,1%; e c) 47,3%.....168
- Figura 5.27 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma arredondada em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 43,8%; b) 45,0%; e c) 46,1%.....171
- Figura 5.28 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma lamelar em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 45,0%; b) 46,1%; e c) 47,3%.....173

Figura 5.29 – Fluidez das argamassas em função do teor de pasta para as duas formas de grão, arredondada e lamelar, e para diferentes teores de material pulverulento do agregado miúdo de britagem: a) P1; b) P2; e c) P3.....	175
Figura 5.30 – Tempos de escoamento das argamassas em função do teor de pasta para as duas formas de grão, arredondada e lamelar, e para diferentes teores de material pulverulento do agregado miúdo de britagem: a) P1; b) P2; e c) P3. ....	177
Figura 5.31 – Teor de ar incorporado das argamassas em função do teor de pasta para as duas formas de grão (arredondada e lamelar) do agregado miúdo de britagem e para diferentes teores de material pulverulento do agregado miúdo de britagem: a) P1; b) P2; e c) P3.....	180
Figura 5.32 – Fluidez de todas as argamassas com teores de pasta de 45,0% e 46,1% em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo total.....	184
Figura 5.33 - Fluidez das argamassas com teores de pasta de 45,0% e 46,1% contendo agregado de britagem com forma arredondada em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo total.....	184
Figura 5.34 - Fluidez das argamassas com teores de pasta de 45,0% e 46,1% contendo agregado de britagem com forma lamelar em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo total.....	185
Figura 5.35 – Relação entre o tempo de escoamento no tubo do ensaio proposto e a fluidez, medida pelo espalhamento – Flow 0, das argamassas avaliadas.....	187
Figura 5.36 – Correlação entre módulo de finura do agregado miúdo total e teor de argamassa do concreto.....	192
Figura 5.37 – Relação entre teor de material pulverulento do agregado miúdo total e consumo de água por metro cúbico dos concretos.....	196
Figura 5.38 – Curvas de dosagem dos concretos contendo areia de britagem com forma arredondada dos grãos.....	199
Figura 5.39 – Curvas de dosagem dos concretos contendo areia de britagem com forma lamelar dos grãos.....	200
Figura 5.40 – Variação do teor de pasta do concreto em relação ao tempo de escoamento das argamassas multiplicado pelo módulo de finura do agregado miúdo total ao quadrado.....	206
Figura 5.41 – Variação do teor de pasta do concreto em relação ao tempo de escoamento das argamassas para concretos com mesmo teor de argamassa.....	207
Figura 5.42 – Correlação entre teor de pasta do concreto e da argamassa para condições semelhantes de consistência, abatimento e espalhamento, respectivamente, e de escoamento pelo cone invertido e pelo tubo proposto, respectivamente. Concretos com igual teor de argamassa.....	209
Figura 5.43 – Correlação entre consumo de água (litros/m <sup>3</sup> ) e fluidez (espalhamento – flow 0), de concretos e argamassas, respectivamente, confeccionados com os mesmos materiais e relação água/cimento semelhantes.....	210
Figura 5.44 – Variação do consumo de água do concreto (litros/m <sup>3</sup> ) em função da relação Flow 0, obtido nos ensaios em argamassas, sobre módulo de finura do agregado miúdo total para materiais e relação água/cimento semelhantes. Argamassa com teor de pasta de 46,1%, em volume.....	211

Figura 5.45 - Relação dos resultados em argamassa entre tempo de escoamento e fluidez, medida pelo espalhamento – Flow 0 e ponderada pelo módulo de finura do agregado miúdo, para as composições avaliadas em concreto. ....	212
Figura 5.46 – Fluxograma da proposta de metodologia de ensaios em argamassa para comparação de agregados miúdos para uso em concreto. ....	217
Figura 8.1 – Aparatos utilizados para auxiliar na aquisição das imagens para análise do coeficiente de forma: a) caixa com lâmpadas; e b) câmara escura. ....	238
Figura 8.2 – Proposta inicial do ensaio de cone invertido: (a) preenchimento do cone sobre chapa metálica e (b) levantamento do cone. ....	245
Figura 8.3 – Configuração final do ensaio de cone invertido: (a) portinhola de abertura rápida e (b) suporte para o conjunto de ensaio. ....	246
Figura 8.4 – Influência do abatimento no tempo de escoamento de concretos para três diferentes consumos de cimento. ....	251
Figura 8.5 – Espalhamento e teor de ar incorporado das composições 60x40 e 80x20 de agregados miúdos para diferentes consumos de cimento e a/c constante. ....	258
Figura 8.6 – Tempo de escoamento no ensaio proposto das composições 60x40 e 80x20 de agregados miúdos para diferentes consumos de cimento e a/c constante. ....	258
Figura 8.7 – Britas 4,75 / 12,5 utilizadas pela: a) central FL e b) central SJ. ....	263
Figura 8.8 – Britas 9,5 / 25,0 utilizadas pela: a) central FL e b) central SJ. ....	263
Figura 8.9 – Espalhamento das argamassas em função do teor de pasta na mistura para cada composição de agregado testada. ....	265
Figura 8.10 – Tempo de escoamento no ensaio proposto em função do teor de pasta na mistura para cada composição de agregado testada. ....	265
Figura 8.11 – Relação entre tempo de escoamento e espalhamento na mesa de consistência. ...	266

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação mineralógica de rochas destinadas a produção de agregados.....	8
Tabela 2.2 – Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado.....	9
Tabela 2.3 – Peneiras da série normal e intermediária e respectivas aberturas nominais. ....	10
Tabela 2.4 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo – NBR 7211: 2005 .....	16
Tabela 2.5 – Limites granulométricos de agregado miúdo – NBR 7211:1983 .....	17
Tabela 2.6 – Faixas granulométricas recomendadas pela EB4 e ASTM C 33 – 93 e 03 .....	17
Tabela 2.7 – Limites do teor de material pulverulento passante na peneira 75µm por lavagem para a norma brasileira e americana. ....	21
Tabela 2.8 – Classificação dos agregados quanto aos vértices e arestas dos grãos.....	30
Tabela 2.9 – Classificação dos agregados quanto à forma dos grãos.....	30
Tabela 4.1 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas médias do cimento. ....	90
Tabela 4.2 - Características técnicas do aditivo Tec-Mult 440LF utilizado.....	91
Tabela 4.3 – Características físicas dos agregados graúdos. ....	91
Tabela 4.4 – Traços e proporção em volume das argamassas com areia arredondada.....	104
Tabela 4.5 – Traços e proporção em volume das argamassas com areia lamelar. ....	104
Tabela 4.6 – Relação a/c e proporção entre os agregados graúdos de um concreto bombeável fck 30MPa e abatimento 10±2cm da central de onde foram obtidos os agregados graúdos utilizados neste trabalho.....	109
Tabela 5.1 – Características da areia natural fina utilizada. ....	113
Tabela 5.2 – Coeficiente de forma dos grãos da areia natural utilizada.....	113
Tabela 5.3 – Composição granulométrica dos pós-de-pedra coletados na pedreira sem qualquer beneficiamento (in natura).....	115
Tabela 5.4 – Características físicas dos pós-de-pedra coletados na pedreira sem qualquer beneficiamento (in natura).....	115
Tabela 5.5 – Forma dos grãos de cada fração e da composição do pó-de-pedra lamelar e do pó-de-pedra arredondado (in-natura). ....	115
Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos no ensaio de granulometria a laser para os materiais avaliados: arredondado lavado (AL) e não lavado (AN); lamelar lavado (LL) e não lavado (LN) e do cimento CP IV-RS. ....	121
Tabela 5.7 – Resultados de massa específica aparente e área específica pelo ensaio de Blaine. ....	121
Tabela 5.8 – Características dos materiais arredondado e lamelar <b>após peneiramento</b> na malha 2,80mm.....	125
Tabela 5.9 – Características dos materiais arredondado e lamelar <b>após serem peneirados</b> na malha 2,80mm <b>e lavados</b> .....	126

Tabela 5.10 – Parâmetros calculados com base nas composições granulométrica e utilizados para o proporcionamento das frações durante a pesagem dos materiais para os estudos em argamassa e concreto.....	126
Tabela 5.11 – Coeficientes de correlação $R^2$ das funções lineares de ajuste das propriedades das argamassas e as características dos agregados. ....	182
Tabela 5.12 – Coeficientes de correlação $R^2$ das funções de ajuste entre as propriedades das argamassas. ....	186
Tabela 5.13 – Resumo das propriedades das argamassas confeccionadas com as composições de agregados selecionadas para o estudo em concreto.....	188
Tabela 5.14 – Características das composições de agregados miúdos utilizados no estudo em concreto. ....	189
Tabela 5.15 – Resumo dos dados de ajuste do teor de argamassa dos concreto contendo areia de britagem com grãos de forma arredondada. ....	190
Tabela 5.16 – Resumo dos dados de ajuste do teor de argamassa dos concreto contendo areia de britagem com grãos de forma lamelar. ....	191
Tabela 5.17 – Resultados obtidos no estado fresco para os concretos contendo agregados de britagem com forma arredondada dos grãos.....	193
Tabela 5.18 – Resultados obtidos no estado fresco para os concretos contendo agregados de britagem com forma lamelar dos grãos. ....	194
Tabela 5.19 – Resultados obtidos no estado endurecido para os concretos contendo agregados de britagem com forma arredondada dos grãos.....	197
Tabela 5.20 – Resultados obtidos no estado endurecido para os concretos contendo agregados de britagem com forma lamelar dos grãos. ....	197
Tabela 5.21 – Resistência à compressão aos 7 dias para duas relações água/cimento fixas e para todas as composições de agregados avaliadas em concreto. ....	201
Tabela 5.22 – Consumos de cimento para concretos confeccionados com cada composição de agregado e para determinadas resistências à compressão aos 7 dias.....	202
Tabela 5.23 – Propriedades de todas as argamassas contendo 20% de areia natural avaliadas para cada teor de pasta estudado. ....	208
Tabela 8.1– Resolução mínima de aquisição das imagens em função do tamanho dos grãos. ..	238
Tabela 8.2 – Parâmetros de forma para cada fração dos agregados avaliados.....	240
Tabela 8.3 – Características dos agregados miúdos utilizados nos estudos preliminares e piloto. ....	243
Tabela 8.4 – Características dos agregados graúdos utilizados nos estudos preliminares e piloto. ....	243
Tabela 8.5 – Materiais e traço de um concreto bombeável de fck 25MPa e abatimento $10\pm 2$ cm empregado por uma central dosadora da Grande Florianópolis.....	249
Tabela 8.6 – Ajuste do teor de argamassa em função do escoamento pelo cone invertido para um concreto consagrado e utilizado por uma central dosadora de concreto da Grande Florianópolis. ....	249
Tabela 8.7 – Ajuste do teor de argamassa em função do escoamento pelo cone invertido para um concreto contendo apenas pó-de-pedra como agregado miúdo.....	250



Tabela 8.8 – Materiais e traços de concretos bombeáveis e abatimento $10\pm 2$ cm empregados por uma central dosadora da Grande Florianópolis. ....	251
Tabela 8.9 – Traços das argamassas com 60% de pó-de-pedra e 40% de areia natural. ....	257
Tabela 8.10 – Traços das argamassas com 80% de pó-de-pedra e 20% de areia natural. ....	257
Tabela 8.11 – Traço e materiais empregados em concretos bombeáveis de fck 30MPa e abatimento $10\pm 2$ cm pela central de concreto FL da Grande Florianópolis. ....	262
Tabela 8.12 – Traço e materiais empregados em concretos bombeáveis de fck 30MPa e abatimento $10\pm 2$ cm pela central de concreto SJ da Grande Florianópolis. ....	262
Tabela 8.13 – Composições de agregados miúdos testadas para cada central de concreto. ....	264
Tabela 8.14 – Traços das argamassas para os diferentes volumes de pasta. ....	264
Tabela 8.15 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados FL 20. ....	268
Tabela 8.16 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados FL 45. ....	268
Tabela 8.17 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados SJ 20. ....	269
Tabela 8.18 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados SJ 40. ....	269
Tabela 8.19 – Resultados dos ensaios das argamassa contendo areia de britagem arredondada. ....	272
Tabela 8.20 – Resultados dos ensaios das argamassa contendo areia de britagem lamelar. ....	273

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

AFNOR – *Association Française de Normalisation*

ASTM – *American Society for Testing Materials*

BS – *British Standard*

CP IV RS – Cimento Portland Pozolânico Resistente a Sulfatos

CT-Engemix/SC – Centro Tecnológico da Engemix de Florianópolis/SC

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## GLOSSÁRIO

Agregado miúdo de britagem: todo material com grãos passantes na malha de 4,75mm obtido por processo de britagem. Tanto o pó-de-pedra quanto a areia industrial de britagem (ou simplesmente areia de britagem) pertence a esta classificação;

Agregado miúdo total: corresponde a todos os grãos da composição de dois ou mais agregados miúdos;

Areia de britagem: agregado miúdo oriundo da britagem de rochas, obtido do beneficiamento do pó-de-pedra por processos de peneiramento, lavagem e/ou rebitagem. Também denominado por vezes de areia industrial de britagem;

Areia base: somatório das percentagens do material passante na malha 2,80mm e retido na 0,075mm. Representado em tabelas e figuras por “x”;

Areia natural: agregado miúdo de origem natural, podendo ser extraída de leito de rio, de cava ou de depósitos eólicos, sem sofrer qualquer tipo de processo de cominuição dos grãos;

Arredondado (a): normalmente precedida dos termos areia, areia de britagem, pó-de-pedra ou material, entre outros, esta palavra quando associada a um dos termos mencionados corresponde a amostra de agregados miúdos de britagem avaliada neste trabalho que contém grãos equidimensionais com forma mais cúbica e arestas mais arredondadas. Em abreviaturas, siglas, figuras e tabelas pode ser simbolizada pela letra “A”;

Dimensão máxima característica: corresponde 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;

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

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

Granilha: denominação comercial para grãos oriundos da britagem de rochas com tamanhos entre a malha 2,36mm e 4,80mm. Normalmente, o pó-de-pedra contém toda a granilha e a areia de britagem possui apenas uma parcela, sendo o restante retirado em processo de beneficiamento;

Lamelar: normalmente precedida dos termos areia, areia de britagem, pó-de-pedra ou material, entre outros, esta palavra quando associada a um dos termos mencionados corresponde a amostra de agregados miúdos de britagem com forma dos grãos mais lamelares e angulosas avaliada neste trabalho. Em abreviaturas, siglas, figuras e tabelas pode ser simbolizada pela letra “L”;

Microfinos: material passante na peneira de malha de 0,075mm (75 $\mu$ m) por lavagem de acordo com ensaio prescrito pela NBR NM 46:2003. Sinônimo de material pulverulento;

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

Pó-de-pedra: material obtido na britagem de rochas que contempla todos os grãos passantes na peneira de 4,75mm, admitindo-se uma pequena fração retida nesta malha;

Siglas: apresentadas nos gráficos, tabelas e corpo do texto deste trabalho seguem a seguinte nomenclatura lógica:

- **A:** areia de britagem com grãos com forma equidimensional, denominada neste trabalho de areia de britagem **arredondada**;
- **L:** areia de britagem com grãos de lamelares, denominada neste trabalho de areia de britagem **lamelar**;
- **0% / 20% / 35% ou 50%:** teores de substituição volumétrica de areia de britagem por areia natural;
- **<4,00 / <3,36 / <2,80:** malha de peneiramento de corte da areia de britagem, também denominado de ponto de corte;
- **P1, P2 e P3:** teor de material pulverulento da areia de britagem, correspondendo, em ordem, do menor para o maior teor, ficando em torno de 7,5; 15,0 e 22,5%, respectivamente, com relação à areia base;
- **43,8% / 45,0% / 46,1% e 47,3%:** teores de pasta presentes nas argamassas, em volume.

Seguindo este raciocínio, uma composição indicada pela sigla “A 20% <3,36 P1” corresponde a uma areia de britagem arredondada, peneirada na malha 3,36mm e com o menor teor de material pulverulento avaliado, composta com 20% de areia natural, em volume.

## RESUMO

WEIDMANN, Denis Fernandes. *Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland*. Florianópolis, 2008. 273 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

A utilização de agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland, em substituição parcial ou total as areias naturais, tem crescido consideravelmente nos últimos anos no Brasil. Dentre os principais motivos estão o aumento das restrições ambientais à exploração e a escassez das jazidas de areia natural de boa qualidade próximas aos grandes centros consumidores. A grande disponibilidade de pó-de-pedra nas pedreiras e o investimento de algumas destas na melhoria das características de seus produtos também tem contribuído. Dentre estes investimentos, destacam-se aqueles aplicados na melhoria da forma dos grãos e na redução do teor de material pulverulento e dimensão máxima característica dos agregados miúdos de britagem. Contudo, a influência de cada uma dessas características nas propriedades do concreto precisa ser mais bem compreendida, pois isto auxiliaria na decisão de investimentos em pedreiras e também na seleção de agregados miúdos para concreto. Diante do exposto e da importância tecnológica e econômica que tem sido dada aos agregados miúdos, este trabalho tem por objetivo principal contribuir para o entendimento da influência da composição granulométrica, incluindo a fração menor que  $75\mu\text{m}$ , e da forma dos grãos de agregados miúdos de britagem, assim como da composição destes com agregados naturais, nas propriedades de concretos de cimento Portland. Para cumprir com esse objetivo, foi proposto um programa experimental dividido em duas fases: a primeira compreende a avaliação das propriedades do estado fresco de argamassas e a segunda, as propriedades no estado fresco e endurecido de concretos. As propriedades avaliadas no estado fresco das argamassas foram fluidez, teor de ar incorporado e facilidade de bombeamento, medida através de um ensaio proposto. Já para os concretos, as propriedades no estado fresco foram avaliadas por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone e por um ensaio proposto para avaliação da facilidade de bombeamento de concreto, ambos visando à determinação do teor ideal de argamassa em concreto para cada composição de agregados. Na primeira etapa, foram avaliadas argamassas com setenta e duas composições distintas de agregados miúdos, variando não só a forma dos grãos, a dimensão máxima do agregado e o teor de material pulverulento das areias de britagem, mas também a proporção entre areia natural e de britagem. Como resultado do estudo em argamassa, foram selecionadas quatorze composições de agregados miúdos para o estudo em concreto, onde foram confeccionadas curvas de dosagem para cada uma delas. Com base na comparação dos resultados do estudo em argamassa e propriedades do estado fresco em concreto, foi possível estabelecer algumas correlações úteis para a dosagem de concretos e para avaliação de desempenho de diferentes composições de agregados miúdos naturais e de britagem quando utilizadas em concreto. Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se destacar o efeito da melhora na forma dos grãos dos agregados miúdos de britagem que proporcionou aumento significativo na trabalhabilidade dos concretos e conseqüente redução nos consumos de cimento para mesma resistência à compressão. Além disso, foi possível observar que alterações na composição granulométrica, reduzindo o teor de material pulverulento e alterando a dimensão máxima característica, podem conduzir a areias de britagem de boa qualidade para concreto. Quanto às composições entre areias naturais e de britagem, destaca-se que estas devem ser estudadas com cautela, pois a composição de melhor desempenho em concreto pode variar de acordo com o conjunto de agregados utilizados e o consumo de cimento. Por fim, pode-se afirmar que a metodologia utilizada, incluindo os ensaios propostos, se mostrou bastante eficaz na avaliação do desempenho e na seleção de composições de agregados miúdos para concreto.

Palavras Chave: agregado miúdo de britagem, forma dos grãos, composição granulométrica.

## ABSTRACT

WEIDMANN, Denis Fernandes. Study of the influences of the grain size distribution and the shape of artificial sand on the properties of concrete. Florianópolis, 2008. 273 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

The use of artificial sand, in partial or even total replacement of natural one, as a fine aggregate for ready mix concrete, has been increasing in the last years in Brazil. The main reason for that might be associated with the rising of environmental restrictions and the scarcity of deposits of good quality natural sand near from the foremost customers. Moreover, the high availability of crushed sands, associated with the effort of producers in improving their quality, has been also contributing for that. This effort include the improvement of aggregate properties such as the grain's shape, reduction of the dust content and of the maximum aggregate size. However, in order to assist the investments of the crushing plants and the suitable choosing of artificial aggregate by the ready mix concrete companies, it is necessary a good understanding of the effect of each aggregate property on the concrete behavior. Therefore, this paper has as a main purpose to study the influences of the grain size distribution, including the fraction below  $75\mu\text{m}$ , the shape of artificial sand as well as the compositions between natural and artificial sand on the properties of concrete. Hence, it was carried out an experimental study divided in two phases: the first one includes the evaluation of the fresh properties of mortar and the second one fresh and hardened properties of concrete. The fresh properties of mortar evaluated were consistency, air content and pump ability using a proposed test. The fresh concrete properties were evaluated by means of slump test and a proposed test, used both to determine the most suitable mortar content in concrete composition, and to evaluate the pump ability of the concrete. In the first phase, seventy two mortars were tested, varying not only grains shape, maximum aggregate size and dust content of artificial sand, but also the composition between natural and artificial sand. The results obtained in this phase were used to choose some compositions of fine aggregate to be used in the second phase of the experimental study. As a result of the mortar study, it was possible to select fourteen aggregate compositions and determinate the design concrete curves for each one. Based on the comparison of the results of mortar and concrete properties in the fresh state, it was possible to establish some useful correlations for concrete mix design and for evaluating the performance of the artificial sand, or even compositions with natural sand, when used in concrete. The most remarkable result obtained in the present study was the effect of the rounding of the artificial sand grains, in improving concrete workability and consequently reducing the cement content for concretes with the same compressive strength. Furthermore, it was found that changing the grain size distribution, by reducing the dust content and varying maximum grain size, it was possible to obtain artificial sand with good quality to be used in concrete compositions. Regarding the composition between artificial and natural sand, this one might be carefully studied, since the most suitable composition changes for each sort of aggregate and cement content that are being used in concrete. Finally, the proposed tests proved to be useful for evaluating the performance and selecting compositions of fine aggregates to be used in concrete.

Key Words: crushed fine aggregates; grain shape; grain size distribution.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Historicamente, as areias naturais de rio e de cava tiveram preferência sobre as de britagem na produção de concretos, principalmente por apresentarem grãos mais arredondados e baixo teor de material pulverulento. Algumas justificativas acerbam para que a primeira característica, dentre outros fatores, proporciona menor desgaste de equipamentos, como betoneiras, tubulações e bombas de concreto, e as duas juntas conduzem a menor demanda de água no concreto, implicando em menor consumo de cimento para mesma consistência e resistência. Além disso, a forma mais arredondada dos grãos normalmente conduz a maior facilidade de acabamento superficial do concreto, pois reduz sua aspereza (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

No entanto, nos últimos anos, a utilização de agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland tem crescido significativamente no Brasil e no mundo. Dentre os motivos, pode-se destacar a implantação de leis ambientais mais restritivas, a maior fiscalização sobre a exploração de areias naturais, principalmente as extraídas de rios, e a escassez de jazidas de areias naturais de boa qualidade próximas aos grandes centros consumidores, o que acarretou em aumento no custo de transporte e conseqüentemente no preço final do produto (SBRIGHI NETO, 2005).

Além disso, outro fator que contribuiu para este fato foi a maior variabilidade das características das areias naturais ao longo do tempo, principalmente das extraídas de rios, o que implica em adoção de maiores consumos de cimento para que seja garantida a resistência característica especificada. Conforme sugere Neville (1997), assegurar-se de que a qualidade de um agregado se manterá constante muitas vezes pode ser mais importante que se ter um bom agregado. O somatório destes fatores tem levado centrais dosadoras de concreto (concreteiras) e empresas de pré-fabricados a optarem por soluções que contemplam a substituição parcial ou até mesmo total, em alguns casos, da areia natural por agregado miúdo de britagem.

Em algumas regiões de Santa Catarina, onde o custo das areias naturais é muito elevado, decorrente normalmente de custos elevados de fretes, como é o caso do oeste catarinense, o

emprego de agregados miúdos de britagem é ainda maior. Mesmo nas regiões dos vales e litoral catarinense, onde se tem areia natural disponível com certa facilidade, a utilização do agregado miúdo de britagem já é predominante. Na região da grande Florianópolis, por exemplo, estima-se que atualmente o consumo de agregado miúdo de britagem em concretos dosados em central seja da ordem de  $7.800\text{m}^3$  mensais e o de pó-de-pedra seja de  $3.200\text{m}^3$ , o que somados representam aproximadamente 56% do mercado de agregados miúdos destinados a centrais dosadoras de concreto. Ainda há de se contar a parcela significativa dos agregados miúdos de britagem que é consumida pelas empresas produtoras de pré-fabricados e de artefatos de concreto.

Diante deste panorama de crescente uso de agregados miúdos de britagem, as pedreiras, vislumbrando um mercado potencial de consumo elevado e constante, têm investido significativamente na produção de areia de britagem, também dita areia industrial. Dentre os principais investimentos, destacam-se aqueles concentrados no beneficiamento do pó-de-pedra para produção de areia industrial de britagem, como a aplicação de peneiramento para remoção da fração mais grosseira (granilha) e também a utilização de sistemas melhores e mais eficientes para remoção de parte do material pulverulento. Além dos beneficiamentos mencionados, merece enorme destaque o crescente emprego de britadores do tipo “VSI” (Vertical Shaft Impact – britadores de impacto de eixo vertical) na planta das pedreiras, como britadores secundários, terciários ou quaternários, que possuem a prerrogativa de produzirem agregados com grãos mais esféricos e arredondados. Esta prática tem sido predominantemente observada em regiões aonde a natureza geológica da rocha matriz naturalmente conduz a grãos mais lamelares pelos processos de britagem convencionais.

Outro fator determinante para o interesse das pedreiras em produzir areia industrial de britagem é que esta é obtida do pó-de-pedra, material menos aceito no mercado de concreto de cimento Portland e com consumo sazonal em outras aplicações, como nas obras viárias, sendo tratado, muitas vezes, como rejeito nas pedreiras. Para se ter uma idéia, segundo Cuchierato e Sant’Agostino (2000), dependendo da composição mineralógica da rocha e do sistema de britagem empregado, o volume deste material pode representar de 10 a 42% da produção total do material britado. Segundo estes autores, só na Região Metropolitana de São Paulo no ano de 2000, a produção de pó-de-pedra atingiu cerca de 3 milhões de metros cúbicos.

Para que se possa buscar o melhor aproveitamento do pó-de-pedra para a pedreira, desde que garantida a produção de areias industriais de britagem de boa qualidade, é preciso conhecer a influência de cada um dos parâmetros envolvidos. Ou seja, precisa-se conhecer o teor ideal de material pulverulento a ser mantido, a malha mais adequada para o peneiramento do pó-de-pedra



(ponto de corte da fração mais graúda) e o real benefício trazido pelo uso de britadores do tipo “VSI” na produção de areias industriais de britagem destinadas a concretos de cimento Portland. Além disto, é preciso entender também a influência da composição deste material com areias naturais para que se possa buscar composições de agregados miúdos com características otimizadas para concretos de cimento Portland. Do ponto de vista das pedreiras, o entendimento destes parâmetros auxiliará na definição dos beneficiamentos a serem empregados visando utilizar ao máximo o seu material britado, necessitando assim menores quantidades de areia natural e reduzindo o material remanescente no pátio. Vale destacar que, atualmente, algumas pedreiras têm realizado estas composições de areia natural e de britagem no próprio pátio, fornecendo aos seus clientes um produto pronto para o uso em concreto.

Já os consumidores, efetivos e potenciais, destes agregados com características melhoradas também precisam conhecer o real benefício proporcionado por estes em termos de desempenho no concreto, conseguindo assim mensurar o valor agregado deste tipo de material. Além disso, é necessário saber otimizar a composição dos agregados, sobretudo os miúdos, para que se possa obter melhores resultados técnicos e econômicos para o concreto. Contudo, atualmente a definição das proporções entre as areias de britagem e natural a serem utilizadas pelas empresas produtoras de concreto e mesmo a definição de seus fornecedores, é feita de forma empírica ou por método de tentativas, demandando tempo e desperdício de recursos.

Diante do exposto, este trabalho propõe-se a realizar estudos em concretos e argamassas buscando contribuir para o entendimento da influência da composição granulométrica (teor de material pulverulento e dimensão máxima característica) e da forma dos grãos de agregados miúdos de britagem, bem como da sua composição com areia natural, nas propriedades do estado fresco e endurecido de concretos de cimento Portland. Além disso, buscar-se-á desenvolver uma metodologia com estudos em argamassa e concreto que auxilie na definição da composição mais adequada de agregados miúdos para emprego em concreto, principalmente aqueles bombeados..

## **1.2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo principal contribuir para entendimento da influência da composição granulométrica e da forma dos grãos de agregados miúdos de britagem, bem como a interação entre estas duas características quando este tipo de agregado é parcialmente substituído por areia natural, nas propriedades do estado fresco e endurecido de concretos de cimento Portland, sobretudo daqueles bombeados. O entendimento destas influências e a utilização de

uma metodologia a ser proposta, auxiliariam na seleção e definição de agregados miúdos e suas proporções para o uso em concretos.

Para atingir este objetivo, foi necessário desenvolver equipamentos e propor metodologias de ensaios em argamassas e em concreto, em escala laboratorial, que auxiliassem na avaliação do desempenho de agregados miúdos destinados a concretos.

Como objetivos específicos, destacam-se:

1. Aprimorar método desenvolvido por Oliveira (2004) para avaliação quantitativa do grau de esfericidade de grãos de agregados miúdos;
2. Avaliar a influência da inclusão de um britador do tipo VSI, num sistema de britagem existente, nas características dos agregados miúdos produzidos;
3. Estudar beneficiamentos a serem aplicados no material pó-de-pedra com intuito de se obter areia de britagem de boa qualidade para uso em concreto;
4. Estudar correlações entre o desempenho dos agregados miúdos em concretos e argamassas, propondo metodologia que viabilize estudos em argamassas;
5. Avaliar o desempenho em concreto de agregados miúdos de britagem com distintas granulometrias e forma de grãos e em composição com uma areia natural fina.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo que no primeiro foi apresentado um panorama geral da utilização atual de agregados miúdos de britagem no Brasil, dando destaque à importância deste trabalho e seus objetivos. No Capítulo 2 são relatadas as principais características dos agregados miúdos e suas influências nas propriedades do concreto, abordando inclusive os ensaios para caracterização de cada propriedade. Neste capítulo, é abordada ainda a produção de agregados miúdos de britagem, partindo-se do material pó-de-pedra, e sua utilização em concreto, assim como trabalhos realizados em que foi empregado este tipo de material. O Capítulo 3 trata resumidamente de dosagem de concretos de cimento Portland e ensaios utilizados para avaliação da bombeabilidade. Já no Capítulo 4 é apresentado o programa experimental adotado, as variáveis estudadas e a metodologia empregada. No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

## **2 AGREGADOS MIÚDOS DESTINADOS A CONCRETO**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES**

Por serem relativamente baratos e por não reagirem significativamente com os aglomerantes e com a água, os agregados, de maneira geral, historicamente têm sido tratados como material inerte de simples preenchimento do concreto de cimento Portland (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; AÏTCIN, 2000). Sbrighi Neto (2005) relata que até o início do século XX, os agregados eram abundantes, baratos e de boa qualidade e por isso a eles era atribuído esse papel secundário no produto concreto.

No entanto, com o passar do tempo, sua importância técnica e econômica foi evidenciada. A elevada competição comercial entre os consumidores de agregados e a conscientização da sociedade em relação ao meio ambiente, contribuíram para este fato (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; SBRIGHI NETO, 2005).

Do ponto de vista econômico, apesar de apresentarem custo, em massa, cerca de quinze vezes menor que o cimento, os agregados ocupam aproximadamente três quartas partes do volume do concreto e por isso merecem destaque. Além disso, uma escolha adequada dos agregados, sobretudo dos miúdos, pode conduzir a grandes reduções no consumo de cimento para determinada trabalhabilidade e resistência.

Do ponto de vista tecnológico, segundo Mehta & Monteiro (1994) e Neville (1997), as características dos agregados graúdos e miúdos afetam principalmente a estabilidade dimensional, resistência, durabilidade e trabalhabilidade dos concretos de cimento Portland, justificando o cuidado com sua escolha. Muitas destas características dependem inteiramente das propriedades da rocha matriz, como por exemplo, composição química e mineralógica, características petrográficas, massa específica, dureza, resistência, estabilidade química e física e estrutura de poros. Por outro lado, existem características que, dentre outros fatores, dependem do tipo de britagem empregado, sendo elas: forma e textura superficial das partículas, absorção, tamanho e composição granulométrica do agregado. Todas estas propriedades podem ter influências na qualidade e desempenho do concreto, tanto no estado fresco como endurecido, e precisam ser estudadas.

Diante do exposto, neste capítulo, serão abordadas as principais características dos agregados, sobretudo dos miúdos, que podem ser afetadas pelos processos de britagem e suas influências nas propriedades dos concretos. Vale ressaltar que, para o escopo deste trabalho, têm maior relevância aquelas influenciadas pelos processos de britagem e por isso estas receberão maior ênfase. Além disso, inicialmente serão apresentadas algumas classificações dos agregados e definições de termos utilizados.

## 2.2 TERMINOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO

Os agregados para concreto dividem-se segundo tamanho de grãos em agregado miúdo e agregado graúdo, cuja separação, dada pela peneira de malha 4,75mm, e definição são praticamente um consenso na literatura. A definição aqui apresentada tem por base a NBR 7211:2005, a saber:

- **Agregado miúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 4,75mm e ficam retidos na malha de 0,15mm em ensaio de peneiramento;
- **Agregado graúdo:** agregado cujos grãos passam pela peneira de malha 75mm e ficam retidos na malha de 4,75mm em ensaio de peneiramento.

No entanto, há uma falta de consenso na consideração ou não do material passante na malha de 0,15mm como parte do agregado miúdo. Mehta e Monteiro (1994) não consideram o material passante nessa peneira como fazendo parte do agregado miúdo. Já Neville (1997) adota 60 $\mu$ m para o limite inferior dos agregados miúdos. Este autor classifica ainda o material passante nesta peneira em: silte (60 a 2 $\mu$ m) e argila (partículas menores que 2 $\mu$ m).

Neste trabalho, tratar-se-á por agregado miúdo todo o material passante na peneira de malha de 4,75mm, sem limite inferior de tamanho de grãos. Para diferenciar a parte fina deste material, será definido e utilizado o termo **material pulverulento**, que se caracteriza como aquele passante na peneira de malha de 0,075mm (75 $\mu$ m) por lavagem de acordo com ensaio prescrito pela NBR NM 46:2003. Também serão por vezes usados os termos areia, para se tratar de agregados miúdos, e microfinos, para se tratar de material pulverulento. O termo microfinos é bastante empregado no meio científico.

Além da separação por tamanho de grãos, os agregados miúdos podem ser classificados quanto à origem, não havendo ainda um consenso quanto a esta classificação. Neste trabalho serão adotados os seguintes termos:

- **Areia natural:** agregado miúdo de origem natural, podendo ser extraída de leito de rio, de cava ou de depósitos eólicos, sem sofrer qualquer tipo de processo de cominuição dos grãos;
- **Areia de britagem:** agregado miúdo oriundo da britagem de rochas, obtido do beneficiamento do pó-de-pedra por processos de peneiramento, lavagem e/ou rebitagem. Também denominado por vezes de areia industrial de britagem.

Outros termos utilizados neste trabalho são:

- **Pó-de-pedra:** material obtido na britagem de rochas que contempla todos os grãos passantes na peneira de 4,75mm, admitindo-se uma pequena fração retida nesta malha;
- **Granilha:** denominação comercial para grãos oriundos da britagem de rochas com tamanhos entre a malha 2,36mm e 4,8mm. Normalmente, o pó-de-pedra contém toda a granilha e a areia industrial de britagem possui apenas uma parcela, sendo o restante retirado em processo de beneficiamento;
- **Agregado miúdo total:** corresponde a todos os grãos da composição de dois ou mais agregados miúdos;
- **Agregado miúdo de britagem:** categoricamente falando seria todo material com grãos passantes na malha de 4,75mm obtido por processo de britagem. Assim, tanto o pó-de-pedra quanto a areia industrial de britagem (ou simplesmente areia de britagem) pertence a esta classificação.

Além destes, é comum encontrar na literatura os termos areia artificial ou areia industrial referindo-se à areia de britagem. Contudo, na opinião deste autor, o primeiro termo parece inadequado uma vez que os agregados são de origem natural e, apesar de serem processados (britados, peneirados, etc), não são sintéticos. Já o segundo é mais aceitável e acredita-se ter origem devido ao processo industrial de beneficiamento aplicado e na maior constância da qualidade observada para as areias de britagem frente às areias naturais.

Há ainda classificações quanto à natureza dos agregados, que segundo Helene e Terzian (1993) entre outros, são de conhecimento indispensável, pois em alguns casos, por exemplo, podem apresentar alterações de volume por variação de umidade ou mesmo reação com os álcalis do cimento. Na Tabela 2.1 é apresentada uma classificação mineralógica das principais rochas destinadas à produção de agregados para concreto.

Tabela 2.1 – Classificação mineralógica de rochas destinadas a produção de agregados

<b>Grupo BASALTO</b>	<b>Grupo GRANITO</b>	<b>Grupo GABRO</b>
Andesito	Gnaisse	Diorito básico
Basalto	Granito	Gnaisse básico
Porfiritos básicos	Granodiorito	Gabro
Diabásio	Granulito	Horneblenda
Epidiorito	Pegmatito	Norit
Lamprófito	Quartzo-dolerito	Peridotito
Quartzo-dolerito	Sienito	Picrito
Espilito		Serpentinito
<b>Grupo das ROCHAS PORFIRÍTICAS</b>	<b>Grupo ARENITO</b> <i>Incluindo Rochas Vulcânicas</i>	<b>Grupo QUARTZITO</b>
Aplito	Arcósio	Rochas sedimentares altamente silicosas com matéria orgânica vegetal
Dacito	Grauvaca	Arenitos quartzíticos
Felsito	Arenitos	Quartzito recristalizado
Granófito	Tufos	
Lavas porfíricas	Silito	
Microgranito		
Rochas hipo-abissais	<b>Grupo CALCÁRIO</b>	<b>Grupo XISTO</b>
Quartzo-porfíricos	Dolomito	Filito
Riólito	Calcário	Xisto
Traquito	Mármore	Folhelho
		Rochas cisalhadas
<b>Grupo SÍLICA</b>	<b>Grupo HORNFELS</b>	
Calcedônia	Rochas de contato alteradas, exceto mármore	
Sílex		

Fonte: Neville, 1997. pág. 127.

## 2.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E SUA INFLUÊNCIA NOS CONCRETOS

Há um consenso na literatura de que a seleção de agregados inadequados pode culminar em manifestações patológicas graves. Neste sentido, Sbrighi Neto (2000) enfatiza que é de suma importância o conhecimento das propriedades e aplicação de conceitos tecnológicos na seleção dos agregados buscando a otimização da relação custo x benefício na produção de concretos e argamassas. Este autor ressalta ainda que, nessa seleção, além dos critérios técnicos, é necessário avaliar o custo final do produto (concreto ou argamassa) e não apenas o custo do insumo. Diante do exposto, torna-se indispensável conhecer a influência das características dos agregados nas propriedades do concreto. Na Tabela 2.2, é apresentada, de forma simplificada, uma relação das propriedades do concreto com as características dos agregados.

Tabela 2.2 – Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado.

PROPRIEDADES DO CONCRETO	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DO AGREGADO
Resistência mecânica	Resistência mecânica e sanidade Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima
Módulo de elasticidade	Granulometria Módulo de elasticidade Coeficiente de poisson
Resistência à derrapagem	Tendência ao polimento (abrasão) Textura superficial
Economia	Forma dos grãos Textura superficial Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

Fonte: Adaptada de Sbrighi Neto, 2000.

Além desta consideração simplificada, neste item será apresentada uma análise mais aprofundada de algumas características dos agregados, principalmente aquelas avaliadas neste trabalho, e sua influência nas propriedades de concretos e argamassas, dando maior ênfase aos agregados miúdos de britagem.

### 2.3.1 Composição granulométrica

Composição granulométrica pode ser definida como sendo a distribuição do tamanho de partículas de determinado agregado, sendo usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas das frações retidas ou passantes em uma dada série de aberturas de peneiras, ou ainda, de porcentagens entre certos intervalos de aberturas. Assim, a composição granulométrica de um agregado é determinada por meio de peneiramento de uma amostra representativa em uma seqüência de peneiras dispostas da maior abertura em cima para a menor abertura em baixo.

O ensaio de peneiramento deve ser realizado de acordo com a NBR NM 248:2003, que apresenta algumas recomendações, como por exemplo, a quantidade mínima da amostra que deve ser ensaiada de acordo com a dimensão máxima característica do agregado e quantidade limite de material que pode ficar sobre cada peneira. Esta quantidade é limitada a fim de evitar que o excesso de material provoque obstrução da malha, impedindo que grãos menores passem. Vale ressaltar que o peneiramento deve ser realizado com a amostra seca para evitar o entupimento das peneiras com material úmido e os torrões devem ser desfeitos para evitar sua retenção em peneiras de malha maior que os grãos que os compõem. Além disso, normalmente antes do ensaio de granulometria, tanto de agregados graúdos quanto de miúdos, procede-se o ensaio de determinação do material pulverulento por lavagem na peneira de malha 75µm (NBR NM 46:2003). Neste caso, a parcela de material passante no processo de lavagem é considerada na massa do material passante na malha 75µm que também é incorporada no jogo de peneiras do peneiramento a seco.

As peneiras utilizadas no ensaio de peneiramento possuem aberturas (malha) padronizadas sendo classificadas em: série normal e série intermediária. Na Tabela 2.3 são apresentadas estas séries de peneiras e suas aberturas nominais, de acordo com a NBR 7211:2005.

Tabela 2.3 – Peneiras da série normal e intermediária e respectivas aberturas nominais.

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

Além das peneiras apresentadas na Tabela 2.3, neste trabalho foram utilizadas as peneiras intermediárias adicionais de malha de 2,80mm, 3,36mm e 4,00mm para a separação da granilha



(conforme definido no item 2.2) dos agregados miúdos de britagem avaliados. Estas malhas correspondem as malhas de número 7, 6 e 5, respectivamente, de acordo com a classificação da ASTM.

De modo geral, as peneiras da série intermediária são utilizadas no ensaio de peneiramento de agregados para auxiliar na avaliação da granulometria e principalmente na classificação do mesmo quanto à dimensão máxima característica. Já as peneiras da série normal, devem ser sempre utilizadas nos ensaios, pois os resultados expressos em termos dessas malhas são utilizados para fins de classificação granulométrica e determinação do módulo de finura, conforme definição a seguir (de acordo com NBR 7211:2005):

- **módulo de finura:** soma das percentagens retidas acumuladas, relativas à massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100;
- **dimensão máxima característica:** corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

A dimensão máxima característica será melhor abordada no item 2.3.2. Já quanto ao módulo de finura, este corresponde à área sobre a curva granulométrica (quando representada na forma usual em tecnologia de concreto) e pode-se afirmar que fornece uma idéia de quão fino ou grosso é o agregado, sendo que agregados mais grossos apresentam valores maiores de módulo de finura. Segundo Popovics (1966) apud Neville (1997), o módulo de finura pode ser demonstrado como sendo a média logarítmica da distribuição de tamanhos de partículas de um agregado.

No entanto, um parâmetro médio parece pouco representativo de toda uma composição granulométrica, ao passo que infinitas curvas granulométricas podem apresentar o mesmo valor de módulo de finura. Contudo, este parâmetro, apesar de certas limitações, fornece uma boa idéia da finura do agregado e serve principalmente para avaliar a variabilidade de um mesmo agregado ao longo do tempo. Tristão (1995) propõe ainda o uso do coeficiente de uniformidade, oriundo da mecânica dos solos, para auxiliar na representação numérica de curvas granulométricas de agregados.

Já Neville (1997) e Farias & Palmeira (2007) afirmam que a representação gráfica da curva granulométrica é a forma mais fácil de avaliar a composição de um agregado, pois em um simples relance, consegue-se observar se a curva granulométrica se enquadra em uma

especificação, se é muito grossa ou muito fina, ou ainda, se é deficiente em um determinado tamanho. A padronização da representação dessas curvas auxilia na velocidade dessa análise. No Brasil, normalmente no eixo das abscissas são representadas as aberturas das peneiras, em ordem crescente da esquerda para direita. Já nas ordenadas são representadas as porcentagens retida acumulada para aquelas granulometrias destinadas à tecnologia de concreto de cimento Portland e de porcentagens passante acumulada para àquelas destinadas a obras rodoviárias. No caso de concreto de cimento Portland, normalmente o valor máximo das ordenadas (100%) é representado na interseção com o eixo das abscissas.

Kwan et al (1999) ressaltam em seu trabalho que apenas a composição granulométrica não é suficiente para caracterização de agregados uma vez que partículas alongadas podem passar por peneiras de malhas inferiores (Figura 2.1). Nestes casos, a interpretação dos resultados de curva granulométrica estaria distorcida uma vez que agregados de dimensões maiores estariam em grupos de peneiras de malha menor. De certa forma, Neville (1997) concorda com o exposto ao afirmar que agregados de diferentes origens, mesmo apresentando a mesma quantidade de material retido em determinada peneira, podem apresentar distribuição de tamanho de partículas diferentes.

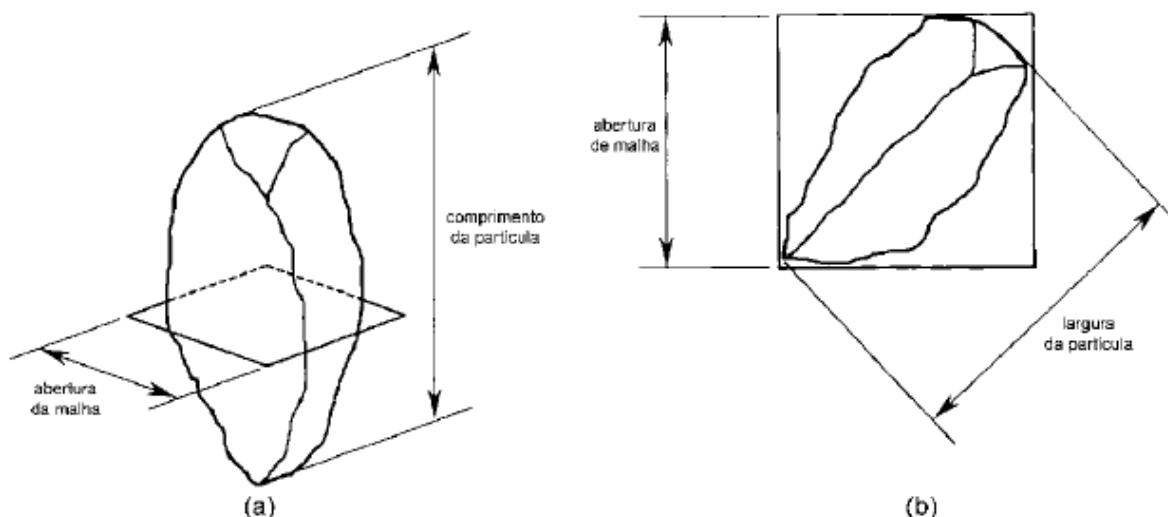


Figura 2.1 – Partículas com comprimento (a) e largura (b) maiores que a abertura da malha da peneira (adaptado de KWAN et al, 1999)

Uma alternativa bastante satisfatória seria a caracterização das duas propriedades, forma e composição granulométrica, conforme será realizado neste trabalho. Segundo Quiroga & Fowler (2004), a influência destas duas propriedades e a interação entre elas é pouco estudada e necessita de maior compreensão a fim de se otimizar a composição de agregados.

Independente de como é representada, de maneira geral, a composição granulométrica em todo o seu âmbito, incluindo material pulverulento e dimensão máxima característica, pode ser considerada uma das principais propriedades dos agregados, principalmente dos miúdos. Esta propriedade afeta principalmente a trabalhabilidade do concreto e conseqüentemente seu custo final (MEHTA & MONTEIRO, 1994; HUDSON, 1999; GUIMARÃES, 2005; SBRIGHI NETO, 2005; ERDOGAN & FOWLER, 2005). Quiroga & Fowler (2004) destacam ainda que a granulometria do agregado miúdo exerce uma influência muito maior sobre a trabalhabilidade do concreto que o efeito do agregado graúdo.

Segundo Neville (1997), como a trabalhabilidade tem influência sobre a demanda de água, segregação, exsudação, facilidade de lançamento e acabamento do concreto, a composição granulométrica se torna indiretamente responsável por todos estes fatores. Por sua vez, estes fatores que representam importantes características do concreto no estado fresco, influenciam também suas propriedades no estado endurecido tais como resistência, retração e durabilidade. Este autor afirma ainda que, em concretos plenamente adensados, a influência da composição granulométrica pode ser pequena, mas sua atuação na trabalhabilidade e na facilidade de se chegar a este adensamento adequado devem ser evidenciadas.

Do ponto de vista econômico, como o agregado é mais barato que a pasta, um concreto deveria conter o máximo de agregado possível, ou os agregados por si só, deveriam apresentar o menor volume de vazios (maior massa unitária ou densidade de empacotamento). No entanto, embora existam métodos para determinação do melhor empacotamento de grãos, com o menor volume de vazios, estes são pouco utilizados, pois segundo Mehta & Monteiro (1994), dificilmente conduzem a misturas com boa trabalhabilidade.

Há um consenso na literatura que a composição granulométrica dos agregados, principalmente dos miúdos, está diretamente ligada à coesão, exsudação, segregação e aspereza da mistura. Neste sentido, areias demasiadamente grossas, com excesso de material acima da peneira 2,36mm (granilha), normalmente conduzem a concretos ásperos, pouco trabalháveis e com tendência a segregação. Para compensar essa deficiência, muitas vezes são utilizados teores maiores de pasta e/ou de argamassa. No entanto, no entendimento deste autor, nestes casos em que a granulometria do agregado é deficiente de partículas mais finas, o aumento da proporção de agregado miúdo em relação ao agregado graúdo pode não se mostrar uma solução satisfatória, pois pode resultar em excesso de tamanhos médios e possivelmente em uma mistura áspera.

Por outro lado, areias muito finas proporcionam misturas bastante coesivas, mas por conta de sua elevada superfície específica (relação de área superficial por unidade de volume dos grãos), aumentam a demanda de água e por isso podem ser anti-econômicas ou também resultar em segregação. Em contrapartida, para uma mesma composição de agregados graúdos, normalmente as areias mais finas demandam um teor menor de argamassa para características satisfatórias de coesão e trabalhabilidade se comparadas a areias mais grossas. Este fato, que é previsto inclusive em alguns métodos de dosagem de concreto, como o do ACI (*American Concrete Institute*) e o da ABCP (*Associação Brasileira de Cimento Portland*), compensa, até certo ponto, a maior demanda de água devido à superfície específica elevada.

Ainda com relação à superfície específica, Neville (1997) afirma que este, aparentemente, é um fator importante na demanda de água e trabalhabilidade de misturas, mas, no entanto, a fração mais fina precisa ser melhor estudada. Frações menores que 0,15mm, e também algumas frações um pouco maiores, apesar de possuírem elevada área superficial, muitas vezes parecem atuar com uma função lubrificante dentro do concreto, facilitando a acomodação das demais partículas (NEVILLE, 1997; HUDSON, 2003). Este fato é principalmente observado quando o material é liso e bem arredondado, como é o caso das areias de duna e de cava. Este tipo de agregado tem sido usado com frequência em composição com areias mais grossas, principalmente as de britagem, com resultados bastante positivos em diversas regiões do país.

Além do exposto, segundo Guimarães (2005) e Neville (1997), o agregado miúdo deve possuir certa quantidade de material passante na peneira de malha de 0,30mm e também na 0,15mm, para conferir adequada coesão e trabalhabilidade ao concreto, bem como evitar segregação e exsudação. Esta quantidade varia de acordo com o consumo de cimento e presença de adições, pois estes também são considerados na parcela passante. Segundo Kosmatka & Panarese (1992) *apud* Erdogan & Fowler (2005), a quantidade de material passante nestas peneiras tem uma grande influência nas propriedades do concreto fresco, como trabalhabilidade, acabamento superficial, segregação e bombeabilidade.

Com relação à curva granulométrica mais adequada para concreto, esta vai depender da finalidade de sua aplicação e da trabalhabilidade necessária, mas, de maneira geral, as granulometrias contínuas, sem falta ou excesso de algum tamanho de grão, normalmente conduzem a resultados satisfatórios. Contudo, Mehta e Monteiro (1994) afirmam que se deve procurar uma granulometria adequada, que proporcione boa trabalhabilidade, porém dentro dos agregados disponíveis em determinada região, sendo que a imposição de composições granulométricas muito estreitas pode ser antieconômica. Uma prática comum e cada vez mais

crescente é a combinação de dois e, em alguns casos, de até três agregados miúdos buscando melhorar a composição granulométrica e reduzir o custo final do concreto. Com a crescente utilização de agregados miúdos de britagem, poder-se-ia, por exemplo, no processo da pedreira, beneficiar este material de maneira a se obter um agregado com características otimizadas para ser composto com determinada areia natural disponível na região, ou até mesmo para ser utilizado isoladamente. No entanto, para tal, torna-se necessário conhecer a influência de cada uma das características do material britado e a interação entre elas para definir-se o sistema de britagem, sendo esta uma contribuição que este trabalho pretende fornecer.

Ressalta-se ainda que o conceito de curva granulométrica ideal é complexo e difícil de ser aplicado, pois as propriedades do próprio agregado como forma e textura, podem também influenciar na adequação da curva granulométrica, como é o caso dos agregados miúdos de britagem (JOHANSSON, 1979 apud QUIROGA, 2003; NEVILLE, 1997; HUDSON, 2003). Por exemplo, no caso de partículas lamelares, angulosas e com superfície áspera, como é o caso de muitas areias de britagem, deve-se procurar uma granulometria mais fina para reduzir a possibilidade de intertravamento dos grãos e para compensar o atrito interno entre partículas.

No caso específico dos agregados miúdos de britagem, estes tendem a apresentar uma granulometria diferente das areias naturais, normalmente com maior teor de microfinos, elevado teor de material retido nas malhas 1,18mm e 2,36mm e concomitante redução de grãos entre os tamanhos de 600 $\mu$ m e 150 $\mu$ m. Além disso, normalmente a forma é mais angulosa e lamelar e a textura mais rugosa. Estes fatos somados, normalmente levam à necessidade de composição com uma areia natural em teor que pode variar de acordo com aplicação do concreto e com a própria areia natural. Por exemplo, nos casos práticos de concretos bombeáveis de centrais dosadoras, corriqueiramente é necessário aumentar o teor de argamassa da mistura ou o teor de areia natural para facilitar o deslizamento do material na tubulação.

Quanto ao desempenho das areias de britagem em concreto, Mehta e Monteiro (1994) sugerem como regra prática que, dada uma consistência, o concreto precisaria de 2 a 3% a mais de areia em volume absoluto e de 5,9 a 8,9kg a mais de água por metro cúbico de concreto, quando for empregada areia de britagem fina e de grãos angulosos ao invés de areia natural mais grossa ou de grãos mais arredondados. No item 2.4.5 serão apresentados alguns trabalhos que abordam a utilização deste tipo de material em concreto.

### 2.3.1.1 Recomendações normativas e sua evolução

Ainda com relação às curvas granulométricas, existem diversas normas que estabelecem limites para o uso de agregados miúdos para concreto. Atualmente no Brasil, a norma que está em vigor é a NBR 7211:2005 e esta especifica que agregados que apresentem curva granulométrica fora dos limites expostos na Tabela 2.4 podem ser utilizados em concreto desde que sejam realizados estudos prévios que comprovem sua aplicabilidade.

Para finalidades práticas, agregados miúdos, cujas granulometrias estejam dentro dos limites especificados por estas normas, seriam técnica e economicamente adequados, pois estes limites são baseados em experiências práticas e não apenas em considerações teóricas. No caso da NBR 7211:2005, foram avaliadas mais de mil composições granulométricas de diversos locais do país para a definição dos limites propostos (CUCHIERATTO, SBRIGHI NETO e QUITETE, 2005). Areias fora dos limites especificados pela maioria das normas poderiam conduzir a concretos com problemas de trabalhabilidade ou sem vantagem econômica.

Tabela 2.4 – Limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo – NBR 7211: 2005

Abertura da malha da Peneira (ABNT NBR NM ISO 3310-1) (mm)	Porcentagens Retidas Acumuladas			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,60	15	35	55	70
0,30	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Notas:

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

No entanto, a curva granulométrica mais adequada para o agregado miúdo destinado ao concreto ainda não é um consenso, tendo em vista as diferenças dos limites apresentados por diversas normas. Além disso, acredita-se que esta curva ideal seja muito relativa, conforme comentado anteriormente, pois vai depender da finalidade e das especificações do concreto além da forma e textura dos grãos dos agregados, sendo que estes aspectos são pouco ou nada enfatizados por estas normas (QUIROGA, 2003).

Destaca-se ainda que a norma brasileira de especificação de agregados para concreto modificou três vezes nas últimas décadas e todas as curvas idéias sugeridas diferenciam uma das outras. A norma que estava em vigor antes da atual, a NBR 7211:1983, sugeria zonas de classificação das areias conforme apresentado na Tabela 2.5, deixando subentendido em seu texto a preferência pela Zona 3 para uso em concreto. Anteriormente a esta, tinha-se a EB-4 cujos limites das faixas granulométricas são apresentadas na Tabela 2.6, juntamente com as prescrições da norma americana ASTM C 33 - 93. A EB-4 vigorou desde 1939 até o ano de 1983 e apresentava apenas duas faixas, uma considerada ótima e outra utilizável.

Tabela 2.5 – Limites granulométricos de agregado miúdo – NBR 7211:1983

Abertura da malha da peneira (mm)	Porcentagens Retidas Acumuladas			
	Zona 1 (muito fina)	Zona 2 (fina)	Zona 3 (Média)	Zona 4 (Grossa)
9,5	0	0	0	0
6,3	0 - 3	0 - 7	0 - 7	0 - 7
4,75	0 - 5 (A)	0 - 10	0 - 11	0 - 12
2,36	0 - 5 (A)	0 - 15 (A)	0 - 25 (A)	5 (A) - 40
1,18	0 - 10 (A)	0 - 25 (A)	10 (A) - 45 (A)	30 (A) - 70
0,6	0 - 20	21 - 40	41 - 65	66 - 85
0,3	50 - 85 (A)	60 (A) - 88 (A)	70 (A) - 92 (A)	80 (A) - 95
0,15	85 (B) - 100	90 (B) - 100	90 (B) - 100	90 (B) - 100

(A) Pode haver uma tolerância de até um máximo de 5 unidades (%) em um só dos limites marcados com a letra A ou distribuídos em vários deles.

(B) Para agregado miúdo resultante de britagem, este limite poderá ser 80.

Tabela 2.6 – Faixas granulométricas recomendadas pela EB4 e ASTM C 33 – 93 e 03

Abertura da malha da peneira (mm)	Porcentagens Retidas Acumuladas			
	EB-4		ASTM C 33	
	Zona Ótima	Zona Utilizável	1993	2003***
9,5	0	0	0	0
4,75	3 - 5	0 - 3	0 - 5	0 - 5
2,36	29 - 43	15 - 29	0 - 20	0 - 20
1,18	49 - 64	23 - 49	15 - 50	15 - 50
0,6	68 - 83	42 - 68	40 - 75	40 - 75
0,3	83 - 94	73 - 83	70 - (90)*	70 - 95
0,15	93 - 98	88 - 93	90 - (98)**	90 - 100

\* ,\*\* Estes valores podem passar para 95 e 100% quando o consumo de cimento for maior que 300kg/m<sup>3</sup> ou 240kg/m<sup>3</sup> com ar incorporado.

\*\*\* O agregado não deve ter mais que 45% passante em uma peneira e retido na seguinte e o módulo de finura deve estar entre 2,3 e 3,1.

Observa-se que a NBR 7211:83 é possivelmente uma cópia da norma britânica BS 882 da mesma época, pois esta também diferenciava em zonas de classificação dos agregados e os

limites de cada zona eram iguais. A divisão em zonas de classificação era feita basicamente no material passante ou retido na peneira 600 $\mu$ m, que segundo Neville (1997), era onde normalmente as areias naturais, abundantes na época, diferenciavam umas das outras.

Na Figura 2.2 podem ser observadas aquelas que seriam as curvas granulométricas ideais consideradas pelas diferentes versões da norma brasileira e norma americana.

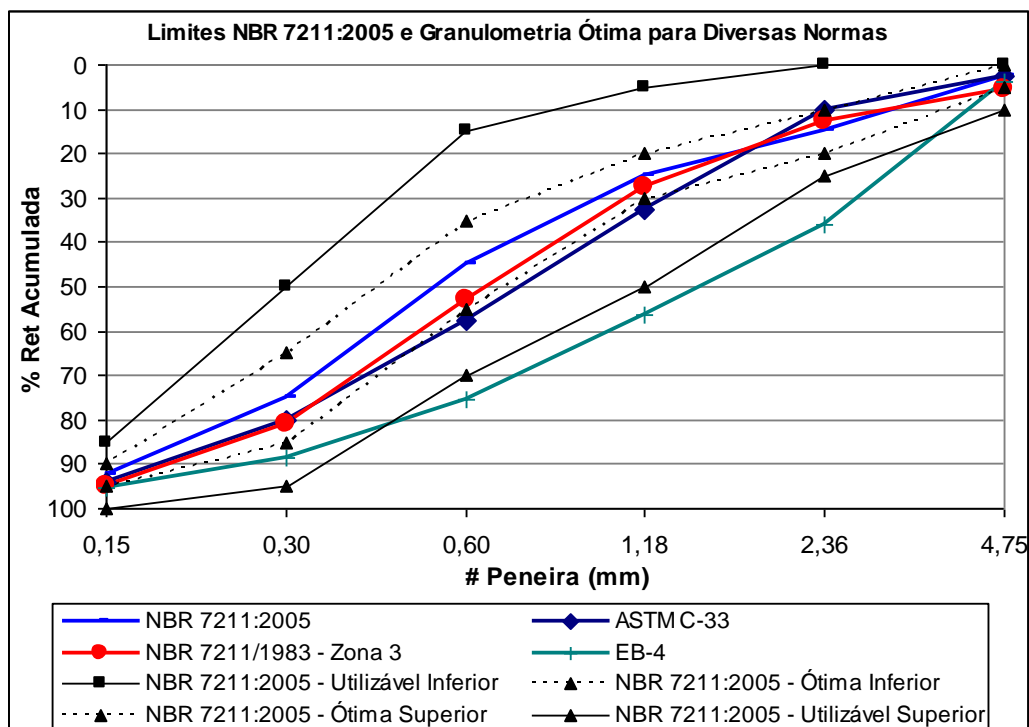


Figura 2.2 – Curvas granulométricas ideais para algumas normas.

Observa-se que as curvas granulométricas ideais, apresentadas pelas normas brasileiras, ficaram mais finas com o passar dos anos (maior proporção de material retido nas peneiras menores). Além disso, apesar das curvas dos anos de 2005 e 1983 estarem muito próximas, os limites superior e inferior das faixas granulométricas de cada norma diferem bastante como pode ser observado na Tabela 2.4 e Tabela 2.5. Já a norma ASTM C 33, nas versões consideradas, apresentou variação apenas na parte fina do agregado, nas peneiras 300 $\mu$ m e 150 $\mu$ m. Os limites ficaram maiores e foram retiradas as considerações de consumo mínimo de cimento.

### 2.3.2 Dimensão máxima característica

No Brasil, a NBR NM 248:2001 define esta característica como sendo a abertura da malha da peneira na qual o agregado apresenta 5%, ou menos, de suas partículas retidas. Outras normas especificam valores para estes limites de até 15% do material retido. Apesar do módulo



de finura dar uma noção de finura das partículas, a dimensão máxima característica também é muito importante.

De maneira geral, quanto maiores as partículas, menor a área específica a ser molhada e por isso menor a demanda de água para uma mesma trabalhabilidade. No entanto, agregados maiores, além de diminuírem a área de aderência à pasta para um mesmo volume de sólidos, tendem a formar zonas de transição mais microfissuradas, podendo contrapor o benefício em resistência obtido pela menor demanda de água (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997). No entanto, Neville (1997) ressalta que, para partículas menores que 38,1mm (maioria dos agregados empregados em concreto na atualidade), prevalece o efeito da demanda de água. Para tamanhos maiores, o balanço dos dois efeitos depende do consumo de cimento da mistura.

Para agregados graúdos, a dimensão máxima exerce influência significativa na trabalhabilidade e principalmente na resistência à compressão, pelos motivos acima explanados. Para estes, a dimensão máxima normalmente é limitada por questões construtivas (tamanho da peça, cobertura e distância entre armaduras) ou de transporte e operação (diâmetro da tubulação de bombeamento).

Para os agregados miúdos, a influência está diretamente ligada à trabalhabilidade e aspereza da mistura. De acordo com Shilstone (1990), as partículas entre 2,36mm e 9,5mm, principalmente se lamelares e alongadas, podem afetar a trabalhabilidade da mistura e contribuir para a aspereza. Nesta mesma linha, trabalhos tecnológicos desenvolvidos no Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland da Universidade Federal de Santa Catarina (GTec-UFSC), têm mostrado que, de maneira geral, quanto maior a dimensão máxima característica de agregados miúdos de britagem maior a aspereza de concretos e argamassas com eles produzidos. Além do tamanho, a quantidade deste material mais grosseiro também exerce enorme influência sobre este aspecto.

A dimensão máxima característica dos agregados miúdos será também avaliada neste trabalho, tendo em vista que os agregados miúdos de britagem serão obtidos através do peneiramento de pó-de-pedra em três diferentes malhas: 2,80mm, 3,36mm e 4,00mm.

### **2.3.3 Material pulverulento**

Também chamado neste trabalho de microfinos, o material pulverulento é definido como a fração com dimensão inferior a 75 $\mu$ m, sendo normalmente quantificado em processo de lavagem do agregado em uma peneira com esta malha (NBR NM 46:2003 e ASTM C 117 – 90).

Este tipo de ensaio é empregado porque a fração fina, principalmente a argila, adere-se às partículas maiores, normalmente não sendo possível separá-la por peneiramento a seco. No processo de lavagem, o agregado é colocado em um recipiente com água e agitado para que as partículas finas fiquem em suspensão. Em seguida, a solução é vertida na peneira 75µm, separando assim o material passante do material retido.

No entanto, existem ainda outros procedimentos para avaliação do teor de material fino em agregados. Por exemplo, as normas britânicas adotam processo de sedimentação para avaliar este material, sendo o procedimento descrito na BS 812: Seção 103.2. Já a norma rodoviária ME 054:1997 do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT, padroniza um ensaio, que pode ser realizado inclusive no campo, para determinação da quantidade de materiais finos argilosos, denominado pela norma de “equivalente em areia”, de solos e agregados miúdos. Neste ensaio, uma amostra do material passante na peneira 4,75mm é agitada em uma proveta contendo uma solução padrão. O material fino que ficará em suspensão com a agitação sedimentará em uma camada em cima da areia e a altura dessa camada pode ser expressa em porcentagem da altura da areia (relação de volume unitário). Procedimento semelhante é apresentado também por Neville (1997), porém, segundo o autor, este utilizado de forma expedita.

As normas que especificam os agregados para concreto, apresentam limites máximos com relação ao teor de material pulverulento que pode estar presente nos agregados, tanto miúdos quanto graúdos. Na Tabela 2.7 são apresentados os limites máximos aceitáveis pelas normas brasileiras e americanas, para os teores de material pulverulento determinados pelo ensaio de lavagem na peneira 75µm. Estas normas fazem uma ressalva quanto aos agregados miúdos oriundos de britagem de rochas, permitindo para esses casos um teor um pouco maior de microfinos, desde que comprovada sua não interferência na qualidade do concreto. Apesar de haver uma tolerância maior para os agregados de britagem, observa-se que a norma americana é bastante conservadora quanto ao limite de microfinos.

Quiroga (2003) critica os limites americanos comparando-os aos limites adotados por alguns outros países, merecendo destaque a Austrália aonde os limites podem chegar a 25%, desde que acordado com o consumidor deste material. Esse autor afirma ainda que as areias de britagem, que representam atualmente a maior parte dos agregados miúdos utilizados, apresentam normalmente teores entre 10 e 20% de microfinos, bem superior ao limite apresentado pela norma americana. Segundo ele, isto força os produtores norte-americanos de agregados a lavarem suas areias de britagem o que gera custos e um passivo ambiental.

Tabela 2.7 – Limites do teor de material pulverulento passante na peneira 75µm por lavagem para a norma brasileira e americana.

Agregado / Condição de exposição		NBR 7211:2005	ASTM C 33 – 03
Miúdo	Concretos submetidos a desgaste superficial (abrasão)	3,0% podendo chegar a 10% <sup>1</sup>	3,0% podendo chegar a 5,0% <sup>4</sup>
	Concretos protegidos do desgaste superficial	5,0% podendo chegar a 12% <sup>1</sup>	5,0% podendo chegar a 7,0% <sup>4</sup>
Graúdo		1%, podendo chegar a 2% <sup>2</sup>	1,0%**
Total		6,5% <sup>3</sup>	-

\*Pode-se chegar ao limite máximo apresentado quando:

1 O material for constituído totalmente de grãos gerados durante o processo de britagem de rocha e desde que comprovada por apreciação petrográfica (NBR 7389:1992) sua não interferência nas propriedades do concreto;

2 Se tratar de agregados produzidos a partir de rochas com absorção inferior a 1%;

3 Comprovada por apreciação petrográfica (NBR 7389:1992) sua não interferência nas propriedades do concreto;

4 O material for constituído de pó de britagem e livre de argila e folhelho;

\*\* Permite-se limites maiores para agregado total de acordo com a proporção entre agregado miúdo e graúdo e o teor de material fino no agregado miúdo.

Além do trabalho de Quiroga (2003), diversas outras pesquisas como as de Ahn (2000), Bigas e Gallias (2002), Stewart *et al* (2006) utilizaram teores maiores de microfinos e obtiveram bons resultados em concreto. No Brasil, vale ressaltar as pesquisas de Cuchierato (2000), Menossi (2004), Magalhães *et al* (2005), Buest (2006) e Lodi (2006) que também utilizaram teores maiores de microfinos com resultados satisfatórios.

A utilização de teores maiores de microfinos, desde que não prejudiciais, pode ser favorável em algumas situações. Kronlof (1994) sugere que os microfinos podem ter efeito no empacotamento dos grãos (efeito fíler) e melhorar a interface dos grãos maiores com a pasta (zona de transição). Segundo Neville (1997), a presença de um teor maior de microfinos pode ser importante principalmente nos concretos bombeados, em concretos utilizados em peças estreitas e com alta taxa de armadura, bem como naqueles destinados a estruturas estanques à água. Por outro lado, ressalta que seu excesso pode ser prejudicial em concretos submetidos à abrasão e também ao congelamento e degelo. Este autor apresenta ainda prescrições de que o material menor que 125µm deve ser limitado a um máximo de 350kg/m<sup>3</sup> para concretos com consumo de cimento abaixo de 300kg/m<sup>3</sup> e de no máximo 400kg/m<sup>3</sup> para concretos com consumo de cimento de 350kg/m<sup>3</sup>.

Destaca-se ainda que os limites normativos apresentados referem-se a todo o material fino, não fazendo separação em granulometria, superfície específica ou composição. Segundo Mehta & Monteiro (1994), se forem substâncias deletérias podem ser prejudiciais mesmo em teores menores, podendo afetar desde a trabalhabilidade até as características de durabilidade do concreto, passando por interferências na pega e endurecimento. Neville (1997) afirma ainda que se forem argilas (menores que  $2\mu\text{m}$ ), por exemplo, devido à finura elevada e composição mineralógica, aumentariam consideravelmente a demanda de água se comparadas, em igual quantidade, com microfinos oriundos de britagem. Além disso, quanto mais finas, maior a probabilidade de estarem aderidas às partículas dos agregados, prejudicando sua aderência à pasta de cimento e conseqüentemente interferindo na resistência. Diante do exposto, além de avaliar a quantidade de microfinos, é preciso atentar para sua distribuição de tamanhos de partículas, finura (superfície específica) e qualidade (composição).

Quiroga (2003), Ahn (2000), Stewart *et al* (2006) entre outros, afirmam que a distribuição de tamanhos de partículas, forma e textura dos microfinos exercem um efeito significativo no comportamento do concreto no estado fresco. No entanto, segundo Quiroga (2003), devido às dificuldades inerentes relacionadas à caracterização de tais partículas, pouca pesquisa tem sido feita para avaliar o efeito destes parâmetros no comportamento do concreto. Dentre as dificuldades, destaca-se a pouca disponibilidade de equipamentos especiais como microscópios eletrônicos, dispositivos de adsorção de nitrogênio e analisadores de difração de laser que são necessários.

Contudo, alguns trabalhos têm avaliado a distribuição do tamanho de partículas dos microfinos. Para caracterização desta propriedade, normalmente tem sido empregado técnicas de difração de raios laser em meio aquoso, normalmente água deionizada (SOARES & ZANCHETTA, 2001; D'AGOSTINO & SOARES, 2002; SOARES & MENDES, 2001; CUCHIERATO, 2000; AHN, 2000; QUIROGA, 2003; STEWART *et al*, 2006). Entretanto, se as partículas forem muito alongadas ou achatadas, pode haver uma diferença bastante grande entre a distribuição de tamanho real e a estimada com esta técnica (Allen (1990) *apud* Dal Molin (2007); [HTTP://www.instrutec.com.br](http://www.instrutec.com.br)). Por outro lado, segundo Ferraris *et al* (2002), dentre as técnicas comumente empregadas na avaliação do tamanho de partículas de cimento esta é a mais precisa.

Outra técnica simples que poderia ser empregada para a classificação do tamanho das partículas passantes na malha  $75\mu\text{m}$  seria a de sedimentação, bastante utilizada para caracterização de tamanho de partículas de solo. Contudo, segundo Ahn (2000), esta técnica tem

precisão para avaliação de grãos somente até a dimensão de  $30\mu\text{m}$ . Em resumo, pode-se afirmar que não há uma técnica perfeita e absoluta, pois todas farão aproximações quanto ao formato das partículas e/ou dependerão da atuação de um agente dispersante que pode não ter a eficiência desejada. Assim, cabe aos pesquisadores escolher a técnica mais adequada e tratar os resultados apenas de forma comparativa.

Na Figura 2.3, são apresentadas as distribuições de tamanhos de grãos passantes na peneira de malha  $150\mu\text{m}$  obtidas por difração de raios laser para cinco tipos de microfinos: oriundos de britagem de rocha (finos de pedra), de areia eólica, de areia aluvionar, da moagem de quartzito e de areias obtidas por desmonte hidráulico (D'AGOSTINO & SOARES, 2002).

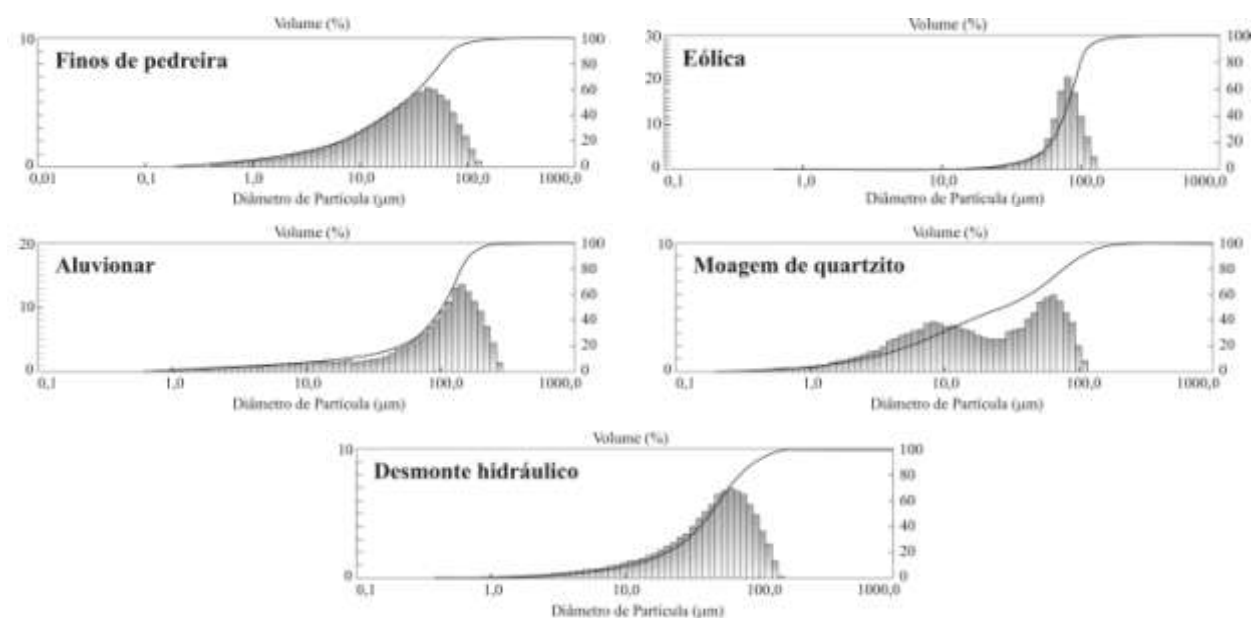


Figura 2.3 – Distribuição de tamanho de grãos menores que  $150\mu\text{m}$  para diferentes tipos de areia (D'AGOSTINO & SOARES, 2002).

Como pode ser observado na Figura 2.3, os finos de pedra apresentam uma distribuição granulométrica uniforme da fração passante na malha de  $150\mu\text{m}$ , com maior concentração de grãos com tamanho aproximado de  $70\mu\text{m}$ . Chama a atenção a distribuição de tamanhos de partículas da areia aluvionar que apresentou maior concentração em torno de  $100\mu\text{m}$  e não em tamanhos menores. Este tipo de areia normalmente apresenta sua fração pulverulenta de origem argilosa que se espera ser bastante fina.

Quiroga (2003), utilizando esta mesma técnica, encontrou diferentes distribuições de tamanhos de partícula para os microfinos de agregados miúdos britados oriundos de três diferentes rochas (Figura 2.4). Dentre os materiais avaliados, o calcário apresentou distribuição de tamanhos de partículas mais uniforme sendo também o material mais fino. Segundo o autor,

os diâmetros médios obtidos no ensaio,  $D_{50}$ , foram de  $15\mu\text{m}$  para o calcário, de  $36\mu\text{m}$  para o basalto e de  $47\mu\text{m}$  para o granito.

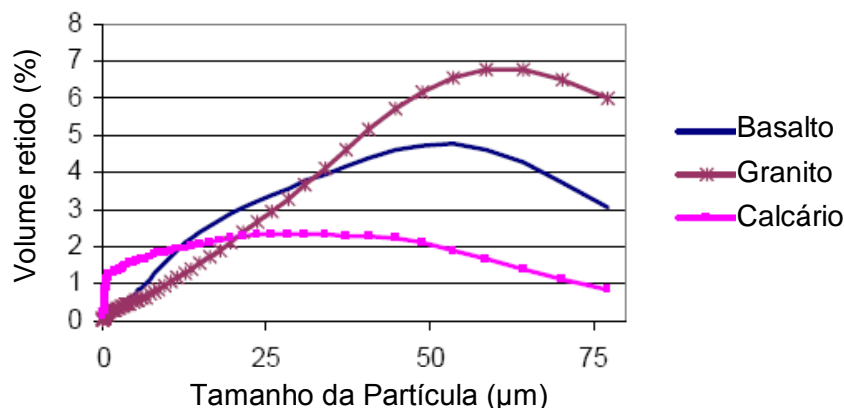


Figura 2.4 – Distribuição do tamanho de partículas para diferentes agregados miúdos britados (QUIROGA, 2003).

Para avaliação da finura ou superfície específica dos microfinos, alguns pesquisadores têm utilizado os ensaios de Blaine (NBR 7224 e ASTM C 204) e/ou de adsorção de nitrogênio (pela técnica BET), sendo este último mais oneroso e de difícil disponibilidade nos centros de pesquisa, o que dificulta sua utilização. Apesar de estimarem o mesmo parâmetro, Quiroga (2003) não encontrou boa correlação entre os resultados de superfície específica determinados pelas duas técnicas. Neste mesmo trabalho, os resultados do ensaio de Blaine apresentaram boa correlação com a densidade de empacotamento e foram linearmente proporcionais a superfície específica calculada com o diâmetro médio das partículas obtidas da distribuição de tamanhos à laser, embora os valores absolutos diferissem.

A densidade de empacotamento mencionada, avaliada pela massa unitária solta ou compactada, consiste em uma maneira indireta de medir a finura, distribuição de tamanhos, forma e textura conjuntamente. Bigas e Gallias (2002) investigaram o efeito de dezoito adições minerais no seu grau de empacotamento quando misturadas a cimento. De acordo com os resultados deles, principalmente forma e textura afetam a densidade de empacotamento, sendo que este parâmetro teve boa correlação com demanda de água das misturas. Estes autores utilizaram ainda uma adaptação do ensaio de Vicat e um ensaio desenvolvido por eles, denominado de “single drop test”, para avaliação da demanda de água de materiais finos. Neste último ensaio, uma gota de água é lançada sobre uma amostra seca do material em avaliação e determina-se a relação entre a massa de água e a quantidade de material aglomerado a esta gota. Estes autores acharam boas correlações entre os resultados do ensaio de Vicat adaptado e do “single drop test”. Concluem ainda que ambos os testes caracterizam o arranjo espacial das

partículas como uma função das suas características granulares e morfológicas e poderiam ser utilizados para avaliar adições minerais finas para uso em concreto. Quiroga (2003) encontrou boa correlação entre a demanda de água em concreto e o ensaio de Vicat adaptado sugerido. Já Stewart et al (2006) afirmam que “single drop test” é bom para avaliar comparativamente materiais mas não para prever demanda de água de uma forma geral, podendo sofrer influência se avaliadas diferentes granulometrias e composições mineralógicas.

Quanto à qualidade dos microfinos, no item 2.3.4 são apresentadas técnicas para avaliação e identificação de substâncias nocivas ao concreto que podem estar presentes também em frações maiores que 75µm.

Diante de todo o exposto neste item, vale ressaltar que os ensaios de caracterização dos microfinos aqui apresentados servem mais para análises comparativas e explicação de comportamentos que para prevê-los antecipadamente. Por exemplo, Stewart *et al* (2006), utilizaram vários dos testes mencionados e encontraram baixa correlação entre a maioria dos ensaios de caracterização e os resultados obtidos em concreto e argamassa.

### **2.3.4 Substâncias deletérias**

Algumas substâncias prejudiciais ao desempenho do concreto podem estar presentes nos microfinos e mesmo em outras frações dos agregados, principalmente dos miúdos. Estas substâncias, comumente denominadas deletérias, podem interferir no processo de hidratação do cimento, na aderência entre agregados e pasta de cimento hidratada além de poderem ser reativas com a pasta de cimento, conforme já comentado. Esta última abordagem pode englobar reações álcali-agregado, entre outras que afetam negativamente a durabilidade do concreto que, no entanto, fogem ao escopo deste trabalho.

Dentre os materiais deletérios que afetam a hidratação do cimento, pode-se destacar a presença de impurezas orgânicas, derivados principalmente da decomposição de material vegetal, aparecendo na forma de húmus e argila orgânica. Agregados miúdos naturais extraídos de leito de rio ou de cava possuem uma maior probabilidade de conterem esse tipo de material, caracterizando assim uma desvantagem potencial. A verificação da presença de material orgânico em quantidade prejudicial normalmente é feito em ensaios colorimétricos, onde se compara a cor de uma solução padrão contendo ácido tânico com a cor da solução obtida com o agregado. No entanto, Neville (1997) ressalta que nem toda matéria orgânica é prejudicial ao concreto e indica a avaliação em ensaios comparativos com outras areias de qualidade conhecida

ou com a mesma areia tratada. Além disso, destaca ainda que outras substâncias, como minerais ferrosos, podem afetar a cor da solução no ensaio colorimétrico. O ensaio colorimétrico é abordado pelas normas NBR NM 49:2001 e ASTM C40 – 04. Já o ensaio de qualidade do agregado (ensaio comparativo) é abordado pelas normas NBR 7221:1987 e ASTM C87 – 03.

Outras partículas não sãs, presentes nos agregados e que englobam materiais friáveis e/ou expansíveis, podem influenciar o comportamento do concreto. Os materiais friáveis (torrões de argila, madeira e carvão), em geral de baixa massa específica e de baixa resistência, podem causar falhas na superfície e comprometerem, sobretudo, a resistência do concreto. Já os materiais expansíveis por contato com água ou por ação de congelamento, podem promover fissuração ou até mesmo desagregação do concreto, afetando também a resistência. Dentre os materiais friáveis, destacam-se torrões de argila, madeira e carvão que, segundo Neville (1997), quando presentes, em proporções de 2 a 5% da massa do agregado, podem comprometer a resistência do concreto, devendo ser evitados em concretos submetidos à abrasão. Ainda segundo o mesmo autor, o carvão além de ser um material mole, pode expandir, causando desagregação e, se presente em grandes quantidades, pode perturbar o processo de hidratação do cimento. Dentre as normas relacionáveis aos materiais friáveis e de baixa massa específica, destaca-se a NBR 7218:1987 que estabelece um procedimento para determinação do teor de torrões de argila e materiais friáveis e as normas ASTM C 123 – 03 e NBR 9936:1987 que sugerem método de ensaio para quantificação do teor de partículas leves. Neste último ensaio proposto, promove-se a decantação do agregado em um líquido denso e com auxílio de uma escumadeira retira-se o material leve em suspensão, determinando seu teor em relação à amostra total. Neville (1997) aconselha a avaliação da adequação de agregados em testes diretamente em concreto.

Ainda dentro das partículas não sãs, merece enorme destaque o grupo dos materiais micáceos. Segundo Frascá (2007), o grupo é formado pela muscovita e biotita, que se dividem em caulinita e gibsita, e, clorita e vermiculita, respectivamente. Segundo Mehta & Monteiro (1994), estas partículas são constituídas basicamente de silicatos de ferro, magnésio e/ou alumínio e possuem arranjo interno em estrutura lamelar o qual é responsável pela tendência à fratura em finas lâminas. As micas são abundantes e ocorrem em todos os principais grupos de rocha.

A presença de mica livre no agregado, tanto na forma de biotita como de muscovita, deve ser evitada, pois, mesmo em pequenos teores, pode influenciar de maneira negativa a demanda de água e a resistência do concreto. Fookes e Rovic (1982) apud Neville (1997) observaram que um teor de 5% de mica provocou a redução de 15% na resistência do concreto aos 28 dias,



mesmo mantendo-se constante a relação água/cimento. Resultados semelhantes foram observados por este autor em seu trabalho de conclusão de curso de graduação (WEIDMANN, 2005). Neste trabalho, foi observado que a presença de materiais micáceos, além de piorar a fluidez das misturas de argamassas, provocou uma redução de 11% na resistência à compressão aos 28 dias, para uma mesma relação água/cimento e curva granulométrica do agregado. As razões prováveis acercam possibilidades de uma aderência insuficiente entre a pasta de cimento e a superfície das partículas de mica (NEVILLE, 1997) ou a um fenômeno expansivo dessas partículas na presença de água.

Não existe método normalizado para determinação da quantidade de mica nos agregados, nem mesmo para determinar seu efeito sobre a qualidade do concreto. Gaynor e Meininger (1984) apud Neville (1997) recomendam uma contagem ao microscópio de partículas de mica na fração de areia entre as peneiras de malha 0,15 e 0,30mm. Segundo estes autores, até um limite de 15% em número de partículas, é provável que a presença de mica não afete significativamente as propriedades do concreto. Apesar de ser encontrada nestas frações, a mica pode estar mais concentrada em frações menores, prejudicando a análise de sua influência quando seguido o procedimento proposto.

Algumas normas como a NBR 14949:2003, destinada ao setor petrolífero, apresentam ainda um procedimento de ensaio utilizando azul de metileno para avaliação da qualidade dos microfinos pela quantificação do teor de argilo-minerais (esmectita, caulinita e illita), matéria orgânica e hidróxidos férreos presentes, indicando sua reatividade superficial. Outras normas internacionais, como a DIN EN 933-9:1998, AASHTO TP-57:2000 e ASTM C 837, apresentam procedimentos semelhantes. O método é baseado na habilidade destas argilas em trocar cátions e então adsorver o azul de metileno e segundo, Ahn (2000), o valor final do azul de metileno pode depender de algumas características de agregado como mineralogia, tamanho de partícula, e porosidade. Assim, diversas pesquisas indicam que não há uma boa correlação entre este ensaio e o desempenho do agregado em concreto (Ahn, 2000). Contudo, este mesmo autor sugere que materiais que apresentam um valor muito alto de adsorção de azul de metileno podem apresentar problemas potenciais com relação à demanda de água em concreto e deveriam ser melhor investigados. Já Stewart et al (2006) afirmam que o ensaio é bom para prever demanda de água em comparações relativas para mesma granulometria e composição mineralógica. Estes mesmos pesquisadores encontraram que, para um mesmo tamanho de partículas, microfinos de origem argilosa aumentaram a demanda de água, reduziram a resistência e aumentaram a retração se comparados com microfinos oriundos da britagem de rocha. Ao saturarem os microfinos

argilosos em azul de metileno, observaram uma redução na demanda de água, mas não nos outros efeitos.

Para avaliação da composição mineralógica dos materiais existem ainda outras técnicas como as de análises petrográfica, química e termogravimétrica, além das técnicas mais modernas como a difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (STEWART *et al*, 2006; DAL MOLIN, 2007).

### 2.3.5 Textura superficial dos grãos

A textura superficial dos grãos de agregados, também chamada de aspereza, depende da dureza, granulação e estrutura dos poros da rocha matriz, além da ação do atrito à que os grãos foram expostos (desgaste). Assim, rochas duras, densas e com granulação fina geralmente apresentam superfícies fraturadas mais lisas (MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; QUIROGA, 2003).

Esta característica é normalmente avaliada visualmente, definindo empiricamente o quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, sendo preconizada no Brasil pela NBR 7389:1992. Já Masad (2002) apud Quiroga (2003) sugere a utilização de ferramentas de análise de imagens para quantificar esta propriedade. Nesta técnica, a textura seria representada pela variação local dos valores de intensidade de cinza dos *pixels*. No entanto, Quiroga (2003) não obteve boa correlação entre os resultados obtidos com esta técnica e a avaliação visual. Este autor, entre outros, sugere ainda a utilização do parâmetro de empacotamento de grãos (ou em termos do teor de vazios intergranulares), como método para avaliação indireta da forma e textura.

Segundo diversos autores, a textura superficial dos agregados afeta diretamente a demanda de água do concreto e a aderência entre a pasta de cimento e o agregado, que tem importante papel na resistência do concreto. Superfícies mais rugosas apresentam maior travamento mecânico e também maior superfície específica para reagir com a pasta de cimento hidratado, o que normalmente conduz a maiores resistências do concreto que aquele correspondente contendo agregado liso, afetando principalmente a resistência à tração e à flexão. No entanto, segundo Mehta & Monteiro (1994), normalmente agregados de textura rugosa conduzem a maior demanda de água para mesmo abatimento que os lisos, podendo assim se perder a vantagem inicialmente observada dos agregados rugosos sobre o ponto de vista de resistência global. Galloway (1994) apud Quiroga & Fowler (2004) afirma que a textura

superficial exerce efeito sobre a trabalhabilidade, porém é menos importante que a granulometria e a forma.

Quanto à aderência, Neville (1997) e Quiroga & Fowler (2004) afirmam ainda que esta pode ser influenciada também pela composição química e mineralógica bem como pela condição eletrostática da superfície do agregado, não sendo completamente compreendido todos os fenômenos envolvidos. Segundo Mehta & Monteiro (1994) há evidências de que a textura superficial do agregado ao afetar a resistência, principalmente à flexão, favorece uma forte aderência mecânica nas primeiras idades. Porém em idades mais avançadas, estes autores sugerem que, com o desenvolvimento de uma aderência química entre pasta e agregado, esse efeito pode não ser tão importante.

A qualidade de aderência do agregado e da pasta é de difícil avaliação, não havendo métodos consagrados para tal. Para concretos de elevada resistência, segundo Aïtcin (2000), quando a aderência é satisfatória, a superfície de ruptura de um corpo-de-prova deve conter agregados partidos além de outros arrancados da pasta, devendo este último ser em maior número. A observação de maior número de agregados partidos pode indicar a resistência insuficiente do agregado.

Neville (1997) ressalta ainda que, embora possa haver uma aderência adequada entre o agregado e a pasta hidratada, este fator pode ainda não ser o único a controlar a resistência de concretos convencionais.

### **2.3.6 Forma dos grãos**

Mehta & Monteiro (1994) definem que a forma dos agregados diz respeito às características geométricas das partículas, podendo ser classificadas como arredondada, angulosa, alongada ou achatada. No entanto, essa classificação da forma dos agregados pode ser mais ampla e não há um consenso, entre pesquisadores da área, sobre os termos a serem usados. Diante disto, antes de abordar sobre o assunto, torna-se necessário definir os termos a serem utilizados neste trabalho. Primeiramente, são apresentadas as definições dos termos relativos às dimensões dos agregados e, posteriormente, os termos relativos às classificações de forma que serão adotados.

Segundo a NBR 7225:1993, os termos relativos às dimensões dos agregados são definidos da seguinte maneira:

- **Comprimento (c):** distância entre dois planos paralelos que possam conter o agregado, em sua maior dimensão;
- **Largura (l):** diâmetro da menor abertura circular através da qual o agregado possa passar;
- **Espessura (e):** distância mínima entre dois planos paralelos que possam conter o agregado.

Segundo esta mesma norma, a forma do grão pode ser definida como a feição exterior que o grão ou fragmento apresenta quanto à relação de dimensões, arestas, cantos e faces.

Quanto à classificação da forma dos grãos, Bonin (2005) apresenta uma sugestão com base na NBR 7225:1993, onde são apresentadas relações fixas entre as dimensões como limitante entre cada tipo de forma. Para este trabalho, serão adotadas classificações mais subjetivas, sem limites fixos de separação, com maior interesse em facilitar a identificação dos formatos no transcorrer do texto. A classificação sugerida tem como base a NBR 7225:1993 e o trabalho de Bonin (2005). Assim, quanto aos vértices e arestas, os agregados serão classificados de acordo com a Tabela 2.8 e, quanto à forma do grão, de acordo com a Tabela 2.9.

Tabela 2.8 – Classificação dos agregados quanto aos vértices e arestas dos grãos.

Classificação	Descrição
Anguloso	Arestas e vértices vivos, bem definidos, formados pela interseção de faces relativamente planas.
Arredondado	Não apresentam arestas e possuem cantos (vértices) arredondados, erodidos pela água ou atrito.

Tabela 2.9 – Classificação dos agregados quanto à forma dos grãos.

Classificação	Descrição
Alongado	Comprimento muito maior que a largura e espessura que normalmente são da mesma ordem de grandeza.
Cúbico	Comprimento, largura e espessura da mesma ordem de grandeza.
Discóide	Espessura pequena em relação ao comprimento e largura que normalmente são da mesma ordem de grandeza.
Esférico	Grão arredondado semelhante a uma esfera.
Lamelar	Comprimento muito maior que a largura e largura muito maior que a espessura.

Conforme mencionado no item anterior, o arredondamento das partículas depende, entre outros, da resistência à abrasão da rocha matriz e das ações de desgaste a que estas foram submetidas. Assim, partículas formadas por atrito tendem a ser arredondadas devido à perda de

vértices e arestas. Por este fato, areias de depósitos eólicos ou de leito de rio têm geralmente uma forma esférica.

Por outro lado, agregados de britagem, normalmente possuem vértices e arestas bem definidos, sendo classificados como angulosos. Para esses agregados, a forma da partícula depende, além das propriedades naturais da rocha matriz (estratificação, planos de clivagem, etc), do tipo de britador e da relação de redução empregados (NEVILLE, 1997; METSO MINERALS, 2005). Entende-se por relação de redução, a relação entre os tamanhos nominais do material que entra e do que sai do britador.

É um consenso na literatura que a forma dos agregados, juntamente com a textura superficial dos grãos, influencia as propriedades do concreto. Estas características dos agregados afetam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que no endurecido, pois quanto mais ásperas, angulosas e alongadas sejam as partículas, mais pasta será exigida para produzir misturas de mesma trabalhabilidade, logo, aumentam também o custo do concreto. Este maior volume de pasta é necessário tanto para envolver a maior área específica dos grãos quanto para compensar dificuldades no rolamento dessas partículas.

Complementarmente, partículas mais angulosas e lamelares dos agregados miúdos conduzem a concretos mais ásperos, dificultando seu acabamento. Além disso, segundo Shilstone (1990), partículas esféricas e cúbicas conduzem a melhor bombeabilidade do concreto (facilidade de bombeamento). Este mesmo autor afirma ainda que a forma das partículas entre 2,36mm e 4,75mm exerce maior influência que as demais.

Hudson (2003) afirma que forma e textura dos agregados miúdos têm um efeito muito mais importante que a dos agregados graúdos na qualidade e trabalhabilidade do concreto. Este autor atribui este feito à atuação conjunta de forma e superfície específica das partículas.

Mehta & Monteiro (1994) estabelecem que as partículas alongadas, lamelares ou discóides, principalmente das areias, produzem concretos ásperos e por isso devem ser evitadas ou limitadas a no máximo 15% da massa total dos agregados. Neville (1997) cita que, apesar de não existirem limites estabelecidos, é indesejável a presença de mais de 10 ou 15%, em massa, de partículas alongadas.

Além disso, Mehta & Monteiro (1994) e Neville (1997), enfatizam que principalmente para os agregados graúdos, grãos com formatos lamelares normalmente se acomodam em uma direção preferencial, alinhando-se e podendo criar planos de fraqueza. Da mesma maneira, partículas com esta forma apresentam maior probabilidade de acumular água de exsudação e

bolhas sob elas, enfraquecendo a zona de transição e comprometendo, entre outras propriedades, a resistência e durabilidade do concreto.

Quanto aos procedimentos para determinação da forma de agregados, Neville (1997) ressalta que é difícil representar corpos tridimensionais e por isso a maior parte das metodologias presentes definem certas características geométricas desses corpos para a avaliação da forma. Atualmente, algumas técnicas mais sofisticadas já conseguem fazer uma representação tridimensional das partículas, no entanto, estas ainda são dispendiosas e estão pouco disponíveis nos centros de pesquisa. Na seqüência, serão apresentadas as principais metodologias e normas para determinação da forma dos grãos para agregados graúdos e posteriormente para os miúdos. Ao final serão apresentadas algumas considerações sobre os principais métodos.

### **2.3.6.1 Métodos para determinação de parâmetros de forma**

Na literatura, existem vários termos e parâmetros utilizados para descrever a forma dos grãos. Os dois principais e mais utilizados são: angulosidade e esfericidade. O primeiro diz respeito aos vértices e arestas quanto ao seu arredondamento, conforme apresentado na Tabela 2.8. Já o segundo, está relacionado à forma geométrica do grão (Tabela 2.9).

Relativamente, a determinação da angulosidade é mais difícil e possui menos métodos abordados na literatura. A maioria deles correlaciona esta característica com a massa unitária do agregado (densidade de empacotamento). Estes métodos têm como base a premissa de que, para um mesmo tamanho de grão, quanto mais arredondado este for, maior será o empacotamento de grãos. Para estes ensaios, o tamanho das partículas ensaiadas deve ser controlado em limites estreitos, o que caracteriza uma dificuldade do ensaio (um ensaio para cada fração). Um exemplo é a norma britânica BS 812: Parte 1: 1975 que define o número de angulosidade que correlaciona esta propriedade com a massa unitária compactada, determinada segundo procedimento estabelecido. Este tipo de ensaio pode sofrer influência de inúmeros fatores, além da angulosidade dos grãos propriamente. Estes fatores vão desde as condições de adensamento (influência do operador) até a própria distribuição de tamanhos, grau de esfericidade e textura dos grãos. Em resumo, o ensaio avalia um conjunto de fatores e não apenas a angulosidade e por isto este ensaio é condenado por grande parte dos pesquisadores para medir especificamente esta propriedade.

Quiroga (2003) utilizou em seu trabalho os conceitos e metodologias propostas por Masad em 2002, onde a angulosidade é medida através da análise de imagens dos agregados por

dois métodos: o método do gradiente e o método do raio. No primeiro, mede-se a taxa de mudança da direção de vetores gradientes. Neste caso, conforme pode ser observado na Figura 2.5, aplica-se um pequeno deslocamento tangencial ao vetor gradiente e mede-se o ângulo formado por dois vetores sucessivos. Em objetos com vértices angulosos (objeto angular), a direção do vetor gradiente para pontos adjacentes na linha de contorno da partícula muda bruscamente (B), enquanto em partículas arredondadas, esta mudança é menor (A).

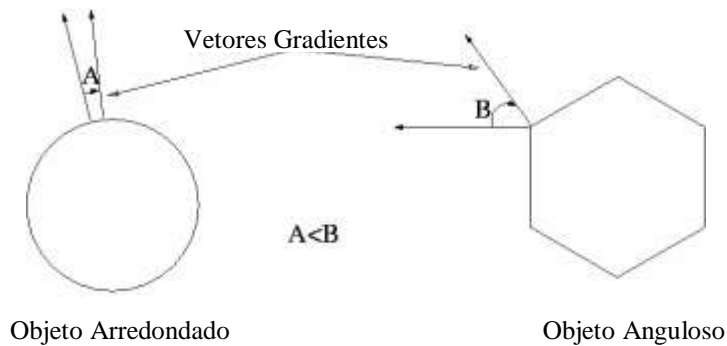


Figura 2.5 – Determinação da angulosidade segundo Método do Gradiente proposto por Masad (2002) (QUIROGA, 2003).

Já no método do raio, a partir do centro de gravidade, mede-se a diferença entre o raio da partícula e o raio de uma elipse equivalente em várias direções. Esta elipse equivalente possui mesma relação de aspecto (relação comprimento : largura) porém não tem angulosidade. A soma das diferenças, em módulo, entre a partícula e o raio da elipse equivalente fornece o chamado “índice de angulosidade”.

No entanto, segundo Quiroga, não foram obtidas boas correlações entre os parâmetros obtidos das análises de imagem propostos por Masad e as observações visuais. Também não houve boa correlação com a densidade de empacotamento. Outras metodologias utilizando análise de imagens e relacionando o perímetro da projeção da partícula com o perímetro de figuras que a circunscrevem ou com sua área foram propostas, porém sem resultados satisfatórios.

Já para a determinação da esfericidade, sobretudo para os agregados graúdos, dispõe-se de metodologias, normas e ensaios consagrados no mundo inteiro, apesar destes diferirem um pouco entre si. Em comum, tem-se que todos os métodos dependem de determinações ou medidas de dimensões realizadas em cada grão.

Neville (1997) destaca as normas britânicas BS 812: Parte 105.1: 1989 e BS 812: Parte 105.2: 1990 as quais apresentam metodologias, onde, por meio de gabaritos, classifica-se a forma dos grãos de agregados graúdos quanto aos índices de lamelaridade e de alongamento,

respectivamente, sendo que as partículas podem ser classificadas nos dois índices concomitantemente. Nestas normas, a partícula é considerada lamelar se a sua espessura é menor que 0,6 vezes o tamanho médio entre a peneira imediatamente acima e aquela na qual a partícula ficou retida. De maneira semelhante, definiu-se como alongada a partícula que apresentar comprimento maior que 1,8 vezes o tamanho médio das peneiras. Para esta avaliação, normalmente são utilizadas peneiras em intervalos menores que os usualmente empregados em ensaios de granulometria.

Segundo Neville (1997), os ensaios de lamelaridade e de alongamento são úteis para avaliação geral dos agregados, mas não descrevem adequadamente a forma das partículas. Em outras palavras, classificam-nas em lamelares ou não e alongadas ou não, mas não oferecem uma grandeza com significado físico na qual se possa avaliar quantitativamente a forma.

A norma brasileira NBR 7809:1983 prescreve a determinação do coeficiente de forma de cada fração que possua no mínimo 5% de massa retida excetuando-se as frações passantes na peneira de malha 9,5mm. Este coeficiente de forma do agregado é definido como a relação entre o comprimento e a espessura do grão, sendo que as medidas devem ser realizadas com auxílio de paquímetro. A norma recomenda ainda que seja medido um total de pelo menos 200 grãos, sendo que para cada fração, a quantidade a ser medida deve ser proporcional à respectiva porcentagem de massa retida. O índice médio de forma do agregado será dado pelo somatório do coeficiente de cada fração ponderado pela respectiva porcentagem de massa retida. Segundo a NBR 7211:2005, o índice de forma dos agregados graúdos, determinado segundo a NBR 7809:1983, não deve ser superior a 3 para uso em concreto.

Já a norma francesa AFNOR XP P18-540 (1997) estabelece um coeficiente volumétrico para quantificar a forma do agregado. Este coeficiente é definido pela relação entre o volume do grão e o volume da esfera que o circunscreve conforme equação a seguir:

$$cf = \frac{V}{\pi \cdot d^3 / 6} \quad \text{Equação 1}$$

onde: V = volume do grão;

d = diâmetro da esfera que circunscreve o grão, sendo igual a sua maior dimensão.

O coeficiente volumétrico deve ser determinado em uma amostra representativa de aproximadamente 200g, iniciando-se pela determinação do volume da referida amostra, preferencialmente pelo método de balança hidrostática. Em seguida, determina-se a maior



dimensão de cada grão da amostra com auxílio de um paquímetro e calcula-se o volume das esferas que circunscvem cada grão. Conforme mostrado, o coeficiente volumétrico do agregado será dado pela razão entre o volume da amostra e o somatório do volume das esferas que circunscvem os respectivos grãos.

A norma francesa recomenda os seguintes limites de coeficiente volumétrico médio de agregados, de acordo com o tipo de concreto:

- Concretos estruturais armados e de baixa permeabilidade: 0,20;
- Concreto pouco ou não armado: 0,15.

Algumas outras normas, como a espanhola UNE 7.238:1971, utilizam a mesma metodologia que a AFNOR para caracterização da forma do agregado. O limite de coeficiente de forma apontado por estas normas geralmente também é de 0,20 para concretos estruturais armados. Ainda segundo estas normas, agregados com coeficiente de forma médio abaixo do limite especificado podem ser empregados em concreto, porém são necessários estudos prévios em laboratório que comprovem sua aplicabilidade.

Como pode ser observado, nos métodos citados a definição do coeficiente de forma dos agregados exige a determinação de propriedades geométricas dos grãos e é esta a principal dificuldade para a quantificação da forma em agregados miúdos, como por exemplo, determinar a maior dimensão de cada grão. Além disso, a determinação manual destas propriedades geométricas é extremamente demorada.

Para os agregados miúdos, a norma brasileira NBR 7389:1992 sugere a avaliação da forma por meio de inspeção visual, a olho nu ou com auxílio de lupa. Segundo a referida norma, cada grão deve ser avaliado e comparado com uma tabela padrão de forma (Figura 2.6). Esta tabela padrão define em alto ou baixo o grau de esfericidade dos grãos. Outras normas e autores também sugerem avaliações visuais com classificações semelhantes.



Figura 2.6 – Tabela padrão para avaliação do grau de esfericidade e arredondamento de agregados (NBR 7389:1992).

Como pode-se perceber, esta classificação é qualitativa e dependendo muito da experiência do avaliador. Além do mais, os agregados são enquadrados em apenas duas classes de esfericidade: alto ou baixo grau de esfericidade. Já quanto ao arredondamento de suas arestas e vértices, são classificados em quatro classes (anguloso, subanguloso, subarredondado e arredondado), totalizando oito definições pré-concebidas. No entanto, falta ainda uma avaliação da terceira dimensão, pois o agregado pode ser arredondado e com alto grau de esfericidade que, aparentemente, tem uma boa forma, mas possuir uma pequena espessura, caracterizando um grão discóide (forma ruim).

Com o advento das técnicas de processamento e análise de imagens foram desenvolvidos métodos de determinação digital das características geométricas dos grãos dos agregados, facilitando esta operação. Segundo Mora et al (1998), vários trabalhos, como os de Barksdale et al (1991), Li et al (1993), Yue & Morin (1996) e Kuo et al (1996), tentaram utilizar essa técnica para determinação de composição granulométrica e de parâmetros de forma dos grãos (esfericidade, coeficiente de lamelaridade e alongamento, etc). Apesar do esforço, a análise de imagens gerava resultados que eram expressos em termos de relações bi-dimensionais, desconsiderando, ou avaliando de maneira ineficaz, a espessura das partículas e sendo de pouco significado físico. Neville, em 1997, já afirmava que, apesar das várias tentativas utilizando relações de área da superfície projetada e outras aproximações geométricas para determinação da forma de agregados miúdos, nenhum método disponível era plenamente aceito.

Já em 1998, Mora, Kwan e Chan apresentaram um método para a estimativa da espessura média das partículas, podendo então fazer relações das áreas projetadas com o volume e massa das partículas. Mora e Kwan publicaram inclusive dois outros trabalhos na seqüência utilizando

esta consideração. Estes trabalhos tratam da avaliação de diversos parâmetros de agregados graúdos, como composição granulométrica, fatores de forma e convexidade dos grãos utilizando ferramentas de análise de imagens. Neles, a espessura média é determinada multiplicando-se um coeficiente ( $\lambda$ ), que depende da lamelaridade das partículas, pela largura de cada uma (Equação 2).

$$\text{espessura média} = \lambda \cdot \text{largura} \quad \text{Equação 2}$$

Conceitualmente, este coeficiente  $\lambda$  representa a relação média da espessura pela largura das partículas, sendo assumido que este não varia entre as frações de um agregado de determinada fonte. Este coeficiente possui significado físico podendo ser determinado pela expressão definida na Equação 3.

$$\lambda = \frac{M}{\rho \cdot \sum_{i=1}^n (\text{largura} \cdot \text{área})} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: -  $\rho$  é a massa específica do material;

- M é a massa da amostra de agregados cujas larguras e áreas foram determinadas.

Para determinação do grau de arredondamento Mora e Kwan (2000) definem dois parâmetros de avaliação: esfericidade e fator de forma. Estes autores utilizaram o conceito de esfericidade definido por Krumbein (1991) e o fator de forma sugerido por Kuo et al (1996). A estes, foi empregado o coeficiente  $\lambda$ , o que resultou na Equação 4 e Equação 5, respectivamente.

$$\text{esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{\text{espessura} \cdot \text{largura}}{\text{comprimento}^2}} = \sqrt[3]{\lambda \cdot \left(\frac{\text{largura}}{\text{comprimento}}\right)^2} \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{fator de forma} = \frac{\text{espessura}}{\sqrt{\text{largura} \cdot \text{comprimento}}} = \lambda \cdot \sqrt{\frac{\text{largura}}{\text{comprimento}}} \quad \text{Equação 5}$$

ARAÚJO *et al* (2003) também propuseram uma metodologia para quantificação da forma dos grãos de agregados miúdos através do uso de imagens digitalizadas e programas computacionais. Segundo esta metodologia, os agregados miúdos são separados em frações por peneiramento e uma amostra de cada fração é fotografada para posterior análise. Para a digitalização das imagens de cada fração, o referido autor utilizou câmera fotográfica digital até a fração retida na peneira 0,60mm e este equipamento acoplado a uma lupa para as demais frações até a retida na peneira de malha 0,075mm. O parâmetro adotado pelo autor para

caracterização da forma dos agregados foi o grau de esfericidade definido por RITENHOUSE *apud* CARR *et al* (2001). Este parâmetro relaciona o diâmetro do círculo de área igual à projeção da partícula e o diâmetro do menor círculo circunscrito à partícula. Para determinar estes parâmetros geométricos (área projetada e diâmetro do menor círculo circunscrito a cada partícula) as imagens digitalizadas eram carregadas em ambiente CAD onde se extraíam, de cada grão, os dados necessários. Após isto, estes dados eram exportados para planilha eletrônica onde eram realizados os demais cálculos necessários.

Outros autores sugerem ainda a avaliação dos índices de lamelaridade (ou achatamento) e de alongamento, definidos conforme Equação 6 e Equação 7, respectivamente.

$$\text{índice de achatamento ou lamelaridade} = \frac{\text{espessura}}{\text{largura}} \quad \text{Equação 6}$$

$$\text{índice de alongamento} = \frac{\text{largura}}{\text{comprimento}} \quad \text{Equação 7}$$

O inverso das Equações 6 e 7 também é usado por alguns autores, sendo que o inverso da Equação 7 também é chamado de relação de aspecto. A Equação 6, como está apresentada tem o significado do próprio coeficiente  $\lambda$  (Equação 3), sugerido por Mora, Kwan e Chan (1998). Vale ressaltar ainda que, na forma em que são apresentados neste trabalho, os índices de lamelaridade e de alongamento podem variar de 0 (pior forma) a 1 (melhor forma – partícula equidimensional).

Além dos índices e coeficientes apresentados até o momento, outros ainda são utilizados com menor frequência:

- *diâmetro de Feret* =  $\sqrt{4 \cdot \text{Área} / \pi}$ , o círculo que tem a mesma área que o objeto. Normalmente é comparado a uma dimensão do objeto;
- *Compacidade* =  $\frac{\sqrt{4 \cdot \text{Área} / \pi}}{\text{comprimento}}$ , mede o quão circular é um objeto variando de 1 (completamente circular) a 0 (menos circular);
- *Arredondamento* =  $\frac{4 \cdot \pi \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}^2}$ , onde para um círculo se obteria valor igual a 1, se aproximando de 0 para figuras mais alongadas.

Como pode ser observado, com exceção da proposta de Mora e Kwan (2000) de utilizar uma espessura média, que é um parâmetro medido e considerado constante em todas as frações,

todas as outras metodologias utilizam parâmetros bidimensionais para calcular o coeficiente de forma.

Por outro lado, Oliveira (2004), em seu trabalho, propôs uma metodologia para determinação do coeficiente volumétrico de forma de agregados miúdos, tendo como base a norma francesa AFNOR P18-540 (1997), mencionada anteriormente. Este método também utiliza recursos computacionais e análise de imagens para quantificação da forma, tendo sido utilizado e aprimorado pelo GTec-UFSC ao longo dos últimos anos, inclusive no trabalho de conclusão de curso de graduação deste autor (WEIDMANN, 2005). A metodologia pode ser aplicada para a determinação do coeficiente volumétrico de forma de agregados graúdos e miúdos e sua seqüência de determinação, aprimorada neste trabalho, é apresentada no Anexo A.

Ultimamente, muitos novos métodos para avaliação da forma surgiram utilizando as mais diversas técnicas de aquisição e análise de dados, destacando-se os escâneres a laser e a tomografia de raios-x. Os dados gerados por estes sistemas de aquisição são processados por algoritmos e técnicas matemáticas complexas (geometria de fractais, análise de Fourier, funções harmônicas esféricas, entre outros), transformando-os em índices para avaliação da angulosidade, esfericidade e textura das partículas (QUIROGA, 2003). Este autor utilizou as técnicas de escâneres a laser em seu trabalho, obtendo informações em 3D dos agregados, porém não obteve boas correlações com as avaliações visuais e com os resultados de densidade de empacotamento (massa unitária).

Quanto ao emprego de técnicas de tomografia de raios-X para determinação da forma dos grãos em três dimensões, normalmente os agregados são embutidos em matrizes cimentícias ou de cera e são obtidas imagens 2D em diferentes alturas, que ao serem combinadas, geram as informações em 3D (CARBOCZI, 2002; ERDOGAN et al, 2006). No entanto, apesar de promissora, esta ainda é uma técnica cara, sofisticada e por isso pouco disponível na maioria dos laboratórios de tecnologia de concreto e agregados. As pesquisas mais recentes com esta técnica têm sido desenvolvidas pelo NIST (National Institute of Standards and Technology) e pela Universidade do Texas.

### **2.3.6.2 Considerações sobre os métodos de determinação de forma**

As metodologias utilizadas para determinação da esfericidade e, principalmente, da angulosidade dos grãos baseadas na medição da massa unitária dos agregados, conforme comentado anteriormente, sofrem influência de inúmeros fatores, indo desde as condições de

adensamento até a própria granulometria dos grãos. Além destes, a textura, o grau de esfericidade e a própria angulosidade também influenciam. Assim, este não parece ser um bom parâmetro para avaliar uma única propriedade isolada.

Quanto à determinação da esfericidade, os métodos normalizados disponíveis para a avaliação da forma de agregados graúdos, abordados no item 2.3.6.1, são todos manuais. Este fator acarreta em elevado tempo para a determinação do coeficiente de forma. Para avaliar o exposto, imagina-se o tempo necessário para a determinação do comprimento e da espessura de 200 grãos, conforme recomenda a NBR 7809:1983. Mesmo um operador com prática vai demorar um tempo considerável para realizar esta tarefa. A prescrição normativa da AFNOR esbarra na mesma questão, pois também é preciso determinar a maior dimensão de cada grão. Dentre as metodologias apresentadas, a recomendada pela AFNOR parece mais adequada conceitualmente uma vez que considera o volume das partículas e não apenas uma relação de dimensões.

Para os agregados miúdos, excetuando-se as avaliações visuais que são subjetivas e qualitativas, têm-se apenas metodologias digitais para a determinação da forma dos agregados, por conta de motivos já explanados. A maioria delas leva em consideração apenas aspectos bidimensionais dos grãos, podendo superestimar a forma de agregados lamelares e principalmente dos discóides. Em outras palavras, grãos discóides ou em forma de chapas finas, semelhantes a moedas e folhas, quando avaliados bidimensionalmente, apresentariam bons coeficientes de forma quando na verdade sua forma, do ponto de vista da aplicação real em concreto, não seria a mais adequada. Este aspecto torna estas metodologias limitadas do ponto de vista prático.

Por outro lado, a metodologia apresentada por Mora e Kwan (2000) leva em consideração, de alguma maneira, o conceito da espessura das partículas, tanto no fator de forma quanto no parâmetro esfericidade. No entanto, os conceitos empregados não apresentam um significado prático de aplicação em tecnologia do concreto. Além disso, a espessura média estimada pode não ser constante em todas as frações.

Já a metodologia proposta por Oliveira (2004) e posteriormente aprimorada pelo GTec-UFSC, parece ser mais promissora, uma vez que leva em consideração o volume real das partículas relacionando-o com o volume de esferas com diâmetro igual à maior dimensão das partículas. Em outras palavras, o coeficiente volumétrico de forma, sugerido pela AFNOR P18-540 (1997), é uma relação do volume da partícula com o volume de uma esfera perfeita.

Deve ser aqui lembrado que as metodologias digitais de determinação da forma trazem consigo embutido uma aproximação ao considerar a projeção em um plano horizontal da maior medida de um grão igual a sua maior dimensão real (Figura 2.7). Esta medida digital será sempre menor ou no máximo igual à maior dimensão real. Além disso, dependendo da posição de apoio do grão sobre o plano de digitalização da imagem, a geometria projetada pode ser diferente (comprimento, largura e principalmente área). No entanto, segundo Kwan et al (1998), se considerado um efeito aleatório e randômico de apoio das partículas, em uma amostra de tamanho considerável, este efeito pode ser desprezível.

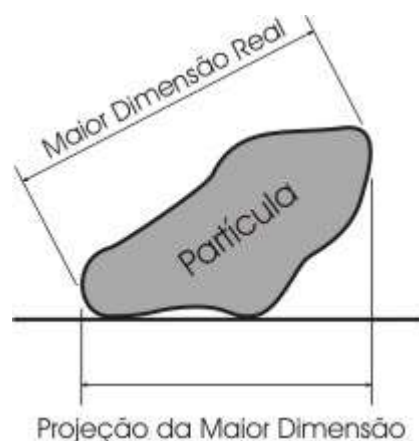


Figura 2.7 – Diferença entre a maior dimensão e sua projeção de acordo com seu plano de apoio.

Este autor, em seu trabalho de conclusão de curso de graduação (WEIDMANN, 2005), utilizando análises de imagens e o método GTec-UFSC para determinação do coeficiente de forma, verificou que este efeito e obteve coeficientes de variação menores que 0,60% em 3 determinações distintas para agregados de diferentes formas. Diante do exposto, pode-se chegar a duas conclusões: ou a posição de apoio dos grãos sobre o plano de digitalização varia pouco, ou têm-se um efeito randômico e numa amostra de aproximadamente 100 grãos, que foi o caso, a variação média é pequena. Além disso, neste trabalho foi observado que, para dois agregados graúdos distintos, um lamelar e outro equidimensional, a média de três determinações digitais foi 2,0% e 5,2% maiores, respectivamente, que a média de três determinações manuais. Contudo, em termos práticos, mesmo a variação de 5,2% pode ser considerada aceitável.

Neste trabalho também foi possível perceber que a variação dos resultados de coeficiente de forma determinado com auxílio de imagens digitais está associada à própria forma do grão, pois quanto mais lamelar este for, maior a chance de sua maior dimensão estar paralela ao plano da digitalização da imagem. Assim com um programa de ensaios abrangente, seria possível estudar um coeficiente de correção para o coeficiente de forma em função do próprio resultado obtido.

## **2.4 AGREGADOS MIÚDOS DE BRITAGEM**

### **2.4.1 Considerações preliminares**

A produção de agregados miúdos de britagem passa por diversos estágios. Além do processo normal de produção de pedra britada (agregado graúdo) têm-se outros processos subseqüentes para se chegar ao agregado miúdo de britagem com características melhoradas para utilização em concreto. Ainda pode haver alguma alteração no processo original, como inserção de um novo britador ou recirculação do material graúdo para maior e/ou melhor produção do material miúdo.

O entendimento dos processos e dos equipamentos utilizados é de suma importância, uma vez que estes influem nas características finais dos agregados miúdos de britagem. Segundo Neville (1997), além do tipo de britador, a quantidade de material nele inserido também afeta a granulometria do produto britado. Mehta e Monteiro (1994) também afirmam que o tipo de britador utilizado pode determinar a forma das partículas.

Diante do exposto, foi realizada uma breve revisão sobre a produção de areia de britagem, tendo como ponto de partida o material pó-de-pedra. Além disso, são apresentadas algumas particularidades dos equipamentos de britagem e separação de finos disponíveis e suas características mais importantes.

Na seqüência são apresentados alguns estudos realizados que contemplam o uso parcial ou total de agregados miúdos de britagem em concretos e argamassas de cimento Portland.

### **2.4.2 Britagem de agregados**

O processo de britagem normalmente tem a seguinte seqüência: planejamento, locação e perfuração da rocha matriz; detonações; desmonte secundário com utilização de fogachos e/ou martelos pneumáticos; carregamento e transporte até o britador primário. No entanto estas etapas não serão aqui abordadas, pois fogem ao escopo do trabalho, sendo apenas abordadas as etapas de britagem propriamente ditas.

Na Figura 2.8 é apresentada uma vista geral da planta de uma pedreira da região da grande Florianópolis onde podem ser observados todos os estágios de britagem e peneiramento além de uma usina de asfalto anexa.





Figura 2.8 – Vista geral de uma planta de pedra: da britagem primária (esquerda - 2) à pilha de pó-de-pedra (direita - 8\*).

A numeração indicada na Figura 2.8 refere-se às seguintes etapas do processo de britagem:

1. Descarga do material fragmentado na alimentação do britador primário;
2. Britagem primária e separação do material em pedra pulmão (3) e pré-classificado (11);
3. Pilha de pedra pulmão para alimentação do britador secundário;
4. Pré-peneiramento separando o material a ser britado e a bica corrida (12)
5. Britagem secundária, terciária e quaternária;
6. Primeiro peneiramento. Possível retorno de material para re-britagem (9);
7. Segundo peneiramento. O material passante na última peneira forma a pilha do pó-de-pedra (8\*);
8. Pilhas de materiais britados separados em diversas faixas granulométricas para comercialização;
9. Pilha de material retido no primeiro *deck* dos dois estágios de peneiramento, retornado para re-britagem no britador terciário (fração mais graúda) e no britador quaternário (fração mais fina);
10. Usina de asfalto anexa;
11. Pilha de material pré-classificado;
12. Pilha de bica-corrída.

Como pode ser observado na Figura 2.8, o britador primário é o primeiro estágio da britagem propriamente dita; é onde se inicia o processo de cominuição dos grãos. Sua principal

função é a de reduzir o tamanho dos fragmentos oriundos do desmonte para que possam ser conduzidos por transportadora de correias aos estágios subsequentes da planta de britagem. Para esta primeira britagem, normalmente são empregados britadores de mandíbulas. Em alguns casos, principalmente quando a capacidade de produção for muito elevada (acima de 700ton/h), podem ser empregados britadores giratórios para esta finalidade (METSO MINERALS, 2005). Segundo esta publicação, o tamanho da boca de alimentação do britador (dimensão máxima possível de ser britada) e sua capacidade de produção são as principais características consideradas na escolha do tipo de britador primário. O primeiro aspecto é geralmente confrontado com o maior ou menor custo de desmonte da rocha matriz (perfurações e malhas de fogo mais ou menos densas, quantidade de explosivos, fragmentação secundária, etc). Comparativamente, os britadores de mandíbula apresentam maior entrada de alimentação, aceitando materiais maiores para um mesmo porte de máquina que os britadores giratórios. No entanto, devido à ação vai-e-vem de britagem (intermitente), um britador de mandíbulas apresenta menor capacidade de produção que um giratório, que tem ação contínua de britagem.

No estágio seguinte do processo de britagem, têm-se os britadores intermediários que são responsáveis por reduzir o tamanho dos grãos até as granulometrias comercializadas no mercado. A maioria das plantas de pedreiras apresenta britadores secundários e terciários podendo, em alguns casos, dispor ainda de britagem quaternária, principalmente quando se pretende produzir material de granulometria mais fina e/ou material mais cúbico. Na britagem intermediária, principalmente na secundária e terciária, normalmente são empregados britadores cônicos, graças a sua boa capacidade de produção e seu baixo custo de produção (METSO MINERALS, 2005).

Antes do britador secundário, freqüentemente ocorre um pré-peneiramento onde se retira o material argiloso juntamente com alguma fração mais fina de rocha, material esse denominado de bica corrida (Figura 2.9). O material passante no britador secundário segue por transportador de correias para o primeiro peneiramento. O material que ainda não apresentar uma dimensão adequada, retorna para os britadores intermediários e, dependendo do seu tamanho e do nível de utilização de cada britador, pode ser lançado novamente no britador secundário ou nos britadores terciário ou quaternário, caso a planta disponha deste equipamento. Em resumo, fecha-se um ciclo de britagem (re-britagem) até que o grão atinja o tamanho adequado. É comum também, a formação de pilhas de abastecimento dos britadores terciários e quaternários, pois o volume de pedra retornada pode não justificar o funcionamento contínuo de um desses britadores.



Figura 2.9 – Da direita para a esquerda: Pré-peneiramento, britador secundário, britador terciário e britador quaternário.

O sistema de peneiramento é realizado em *decks* de peneiras (Figura 2.10). Em um primeiro peneiramento, são separados os grãos que ainda apresentam tamanho elevado, retornando estes para o processo de britagem. Podem ser separados ainda os agregados graúdos de maior dimensão de comercialização. Quando o estoque está satisfatório, é comum o retorno desse material também para o processo de britagem, resultando na formação de material de granulometria inferior.

O material passante em uma peneira pré-determinada segue para o segundo peneiramento onde serão separados os agregados graúdos de granulometrias mais finas além do material passante na malha 4,8mm que caracteriza o chamado pó-de-pedra. Devido ao fenômeno do peneiramento incipiente, é comum as faixas granulométricas possuírem alguma contaminação de grãos mais finos que a malha utilizada no peneiramento. Maiores informações sobre parâmetros, técnicas e equipamentos de peneiramento podem ser encontradas em Chaves e Peres (2006) e no Manual de Britagem da Metso Minerals (2005).



Figura 2.10 – Decks de peneiramento e pilhas de material pronto para comercialização (centro esquerdo) e material para re-britagem (canto direito inferior).

Para a britagem fina e/ou aquela destinada a melhorar a forma dos grãos (britagem terciária ou quaternária), predomina a utilização de britadores de impacto, podendo ainda, no entanto, serem especificados britadores cônicos específicos, dependendo da abrasividade e dureza do material e da distribuição granulométrica desejada. No item 2.4.2.1, são apresentadas maiores informações sobre estes tipos de britadores.

### **2.4.2.1 Principais tipos de britadores e suas influências**

De maneira geral, os britadores podem ser classificados em dois grandes grupos: os britadores de compressão e os britadores de impacto. No primeiro grupo, que contém os britadores de mandíbulas, cônicos, giratórios e de rolo, o material é esmagado até ser quebrado. Já no segundo, o material é cominuído por rápido impacto contra uma peça de metal ou contra a própria rocha, sendo ainda dividido em britadores de impacto de eixo horizontal e de eixo vertical. A seguir serão apresentados os principais tipos de britadores mencionados, descrevendo-se com maior profundidade suas características e aplicação.

#### **2.4.2.1.1 Britadores de compressão**

##### **2.4.2.1.1.1 Britador de mandíbulas**

Neste tipo de britador, a cominuição das rochas ocorre entre uma mandíbula fixa e uma móvel. A mandíbula móvel é presa a um eixo excêntrico que, quando rotacionado por uma polia,

descreve movimentos de vai-e-vem esmagando a rocha contra a mandíbula fixa. O eixo onde a mandíbula fica presa é comumente denominado de queixo. Por ser bastante robusto, eficiente e ter uma entrada de alimentação relativamente grande, o britador de mandíbulas é bastante popular nas instalações de pedreiras, sendo empregado principalmente como britador primário.

Existem dois tipos básicos de britadores de mandíbula: de um (Figura 2.11) ou de dois eixos (Figura 2.12). No primeiro, o queixo se apóia em um eixo excêntrico na parte superior do britador. Na parte inferior, a mandíbula é mantida em posição por uma placa articulada que oscila em pequenos arcos. A combinação de movimento excêntrico em cima e oscilatório em baixo, dá à mandíbula um movimento de mastigação por toda a superfície de britagem.

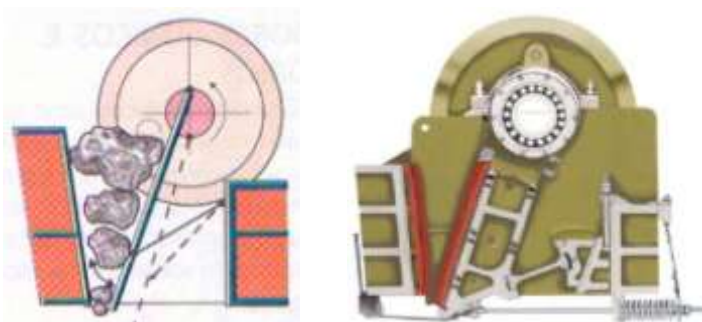


Figura 2.11 – Britador de mandíbulas de um eixo (METSO MINERALS, 2005).

Já no britador de dois eixos, na parte superior o queixo se apóia em um eixo pivotado e um segundo eixo excêntrico, quando rotacionado, aciona duas placas articuladas na extremidade inferior da mandíbula móvel. Neste tipo de britador a mandíbula móvel faz um movimento puro de vai-e-vem em direção à mandíbula fixa.

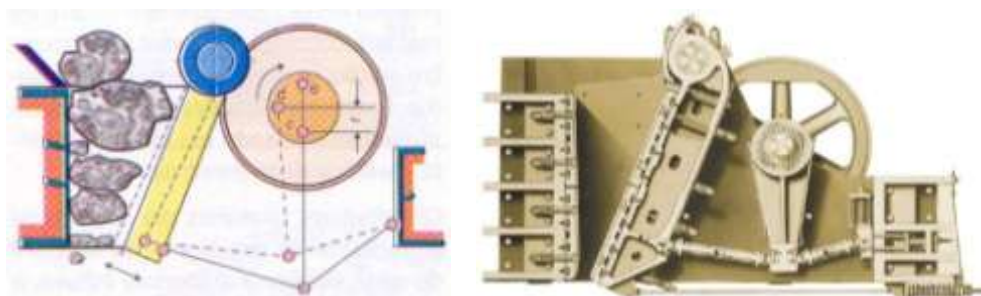


Figura 2.12 – Britador de mandíbulas de dois eixos (METSO MINERALS, 2005).

Por conta do movimento de mastigação, o britador de um eixo tem melhor capacidade de entrada de material na alimentação que o britador de dois eixos de tamanho correspondente. Já no britador de dois eixos, o consumo de peças de desgaste é menor, pois o movimento pendular da mandíbula móvel apenas comprime o material contra a mandíbula fixa, não havendo,

portanto, arraste de material e conseqüente atrito. A definição do tamanho máximo do material de saída normalmente é feita por regulagem da distância inferior entre as mandíbulas.

#### 2.4.2.1.1.2 Britadores cônicos e giratórios

Estes britadores possuem um eixo vertical oscilante que, em movimentos circulares hora se afasta, hora se aproxima da carcaça lateral do britador. A britagem propriamente dita ocorre por esmagamento da rocha entre os revestimentos, do eixo (manto) e da carcaça, ou entre as próprias partículas pressionadas, resultando, neste caso, menor desgaste do revestimento metálico e melhor forma das partículas (CHAVES e PERES, 2006). Vale ressaltar, que a fragmentação ocorre de maneira contínua ao redor da câmara, diferentemente do observado para os britadores de mandíbula que são intermitentes. Quanto ao movimento oscilante, este é produzido por um sistema de coroa e pinhão que fazem um eixo excêntrico vertical girar. Essa excentricidade do eixo central é um dos fatores que determina a capacidade do britador, tanto do giratório quanto do cônico. Um esquema básico do funcionamento dos britadores giratórios e cônicos pode ser observado nas Figuras 2.13a e 2.13b, respectivamente.

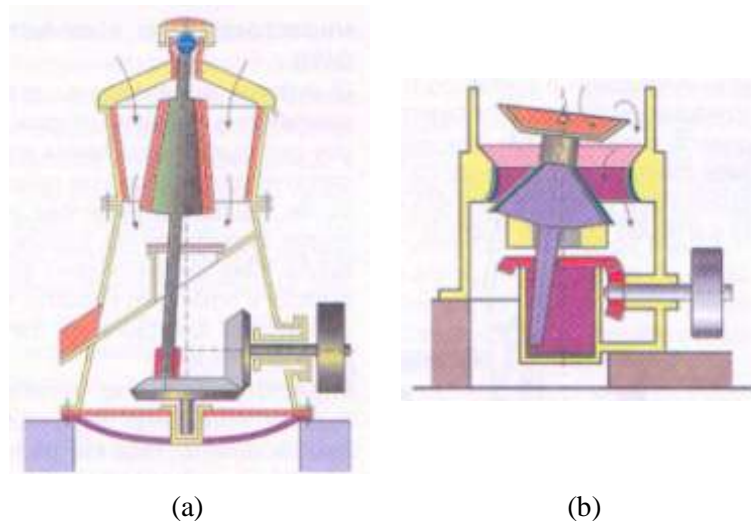


Figura 2.13 – Britadores: (a) giratórios e (b) cônicos (METSO MINERALS, 2005).

Nestes britadores, a definição do tamanho máximo do material de saída é realizada por deslocamentos verticais do conjunto do eixo oscilante (britadores giratórios) ou dos conjuntos de revestimento da carcaça (britadores cônicos). Alterações na espessura dos revestimentos e diferentes tipos de cone são ainda alternativas possíveis na busca por mudanças no tamanho máximo e composição granulométrica do material britado, principalmente para os britadores cônicos (METSO MINERALS, 2005). Comparativamente, os britadores giratórios apresentam

maior capacidade de câmara de britagem e maior vida útil dos revestimentos graças a maior superfície de britagem proporcionada pelo menor ângulo do cone (METSO MINERALS, 2005).

O melhor desempenho dos britadores cônicos e giratórios é conseguido com alimentação abundante, mantendo sua câmara de britagem sempre cheia. Desta maneira, são otimizados os custos operacionais e melhora-se a forma do material britado (METSO MINERALS, 2005). Esta alimentação adequada é facilmente obtida com uma pilha ou um silo de material de abastecimento, regularizando as inevitáveis flutuações de fluxo de material.

Em casos de elevada produção e de britagem de material de baixa abrasividade, os britadores giratórios constituem uma opção interessante na britagem primária (CHAVES e PERES, 2006).

Quanto aos britadores cônicos, estes podem ser empregados para britagem intermediária ou fina, para dar forma mais cúbica ao material. Devido a esta versatilidade de emprego e a sua alta taxa de redução de material britado, possuem preferência nas instalações de britagem. Estes britadores cônicos são bastante observados nas pedreiras da região da grande Florianópolis, sendo empregados como britador secundário, terciário e até mesmo quaternário.

O desempenho de um britador cônico está relacionado com o perfil da câmara de britagem e, por esta razão, há geralmente uma faixa de câmaras padrão para cada britador de modo que se possa encontrar a mais adequada para determinado material de alimentação e curva granulométrica desejada. Outra vantagem deste tipo de britador é a sua boa consistência, aceitando variações do material de entrada e gerando uniformidade do material de saída. Devido à alta rotação e excentricidade elevada do cone combinada com uma câmara de britagem que promove intensa cominuição inter-partículas, os britadores cônicos podem gerar agregados miúdos de britagem com partículas cúbicas e boa graduação para uso em concreto. Quando comparados aos britadores de impacto de eixo vertical (VSI), possuem a vantagem de propiciarem maior produção com a mesma potência instalada e menor geração de material pulverulento (METSO MINERALS, 2005).

#### ***2.4.2.1.2 Britadores de impacto***

Os britadores de impacto se caracterizam pela alta taxa de redução de tamanho e pela propriedade de dar forma cúbica ao produto. São divididos em dois tipos principais: os de eixo horizontal e os de eixo vertical. Basicamente, este tipo de britador, tanto os de eixo horizontal como vertical, é constituído de uma carcaça metálica de revestimento e um conjunto de eixo e

rotor no interior. Por este motivo, quando comparados a outros tipos de britadores, apresentam um pequeno volume de peças móveis.

#### 2.4.2.1.2.1 Britadores de impacto de eixo horizontal (HSI)

Neste tipo de britador, o material é submetido a altíssimos impactos de martelos ou barras de aço presos a um rotor que se movimenta rapidamente. As partículas resultantes sofrem impactos sucessivos no interior da máquina, colidindo com as peças metálicas do britador e uma com as outras até que deixam o interior do equipamento, passando por uma grelha no fundo. Por estes fatores, resultam em maior redução e em melhor formato dos grãos produzidos. A velocidade do rotor, a distância entre as placas de impacto, a geometria do martelo e as aberturas da grelha podem ser reguladas para diferentes aplicações. No entanto, este tipo de equipamento tem sido mais indicado para trituração ou pulverização de materiais não muito duros ou abrasivos, sendo pouco utilizado na indústria de agregados. O tipo mais comum deste tipo de britador é o moinho de martelos (Figura 2.14).

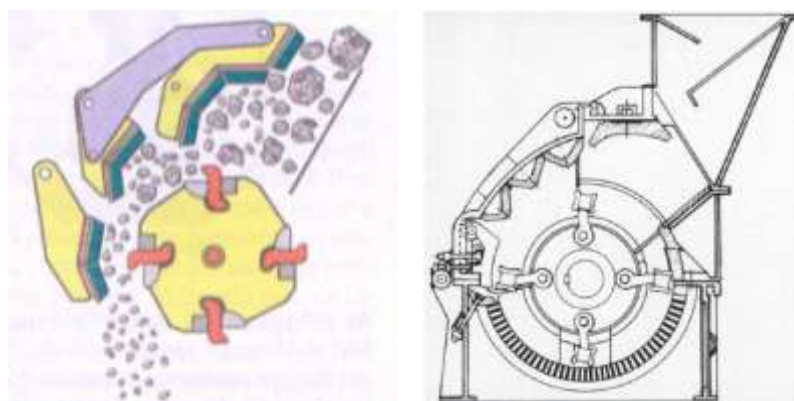


Figura 2.14 – Britador de impacto de eixo horizontal (HSI) – Moinho de martelos (METSO MINERALS, 2005).

#### 2.4.2.1.2.2 Britadores de impacto de eixo vertical (VSI)

Neste tipo de equipamento, o material é alimentado pelo centro de um eixo, acelerado a altas velocidades e lançado para fora do rotor por aberturas periféricas, funcionando de maneira semelhante a uma bomba centrífuga. A britagem ocorre quando o material em alta velocidade se choca contra o revestimento da carcaça estacionária externa e/ou quando as partículas colidem entre si (Figura 2.15). Segundo Lima e Almeida (2005) a velocidade das partículas na saída do rotor pode ser de 50 a 150m/s. Este processo de cominuição de rocha contra rocha (britagem



autógena), tornou-se bastante popular na última década, sendo principalmente identificado pelo britador da marca *Barmac*.

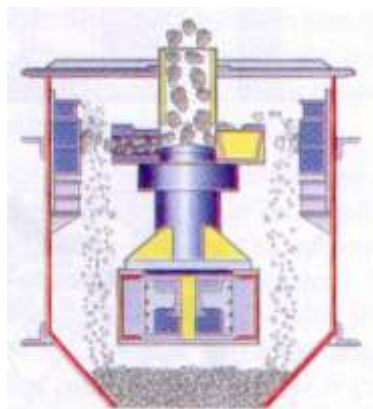


Figura 2.15 – Britador de impacto de eixo vertical (VSI) (METSO MINERALS, 2005).

Este tipo de britador é empregado principalmente na britagem terciária ou quaternária e é capaz de cominuir ampla gama de materiais, incluindo rochas duras e altamente abrasivas. Comparado a outros tipos de britadores, o britador de impacto de eixo vertical apresenta maior tolerância quanto à alimentação por materiais finos e úmidos. Além disso, é bastante competitivo em termos de investimento inicial e custos operacionais (METSO MINERALS, 2005).

Os britadores de impacto de eixo vertical são principalmente aplicados na produção de materiais finos, inclusive agregados miúdos de britagem, produzindo um material com forma mais cúbica e arestas arredondadas a um custo atraente por tonelada produzida. Além disso, a cominuição por impacto de alta velocidade obtida nestes britadores melhora a resistência dos grãos (METSO MINERALS, 2005). Chaves & Peres (2006) afirmam ainda que o impacto é praticamente desprezível para partículas menores que  $150\mu\text{m}$ .

Há basicamente dois tipos de britadores de impacto de eixo vertical: sem e com câmara de acúmulo de material ao redor do rotor (Figura 2.16). Quando não há a câmara de acúmulo, o material saído do rotor se choca contra o revestimento metálico da carcaça. Estes equipamentos são indicados para aplicações em moagem de materiais de baixa abrasividade, proporcionando, nestes casos, maiores taxas de redução e menor consumo energético quando comparados aos britadores com câmara. Por outro lado, quando há a câmara de acúmulo, têm-se a formação de um revestimento do próprio material na parede do britador onde as partículas saídas do rotor se chocam (Figura 2.16). Este sistema possui a vantagem de minimizar os custos relacionados ao desgaste de peças e de exigir poucos serviços de manutenção.



Figura 2.16 – Rotor, à esquerda, e câmara de acúmulo de material onde ocorre a cominuição autógena, à direita (METSO MINERALS, 2005).

Alguns britadores de impacto de eixo vertical apresentam ainda um sistema de alimentação diferenciado, onde é possível introduzir e controlar um segundo fluxo de material que vai direto à câmara de cominuição, sem passar pelo rotor (Figura 2.17). O aumento desse fluxo, comumente denominado de cascata, normalmente reduz a produção de finos e aumenta o volume de material processado para um mesmo consumo energético (CUNHA et al, 2005). Além da dosagem da cascata, alguns destes britadores possibilitam certo controle sobre a granulometria do material britado alterando a velocidade e o tipo do rotor utilizado. Maiores velocidades do rotor conduzem a maior produção de microfinos e, conseqüentemente, material britado com curva granulométrica mais fina (AHN & FOWLER, 2001; METSO MINERALS, 2005; CHAVES & PERES, 2006). Quanto à influência do material britado, aqueles de maior dureza conduzem a curvas granulométricas mais grossas para as mesmas regulagens de equipamento.

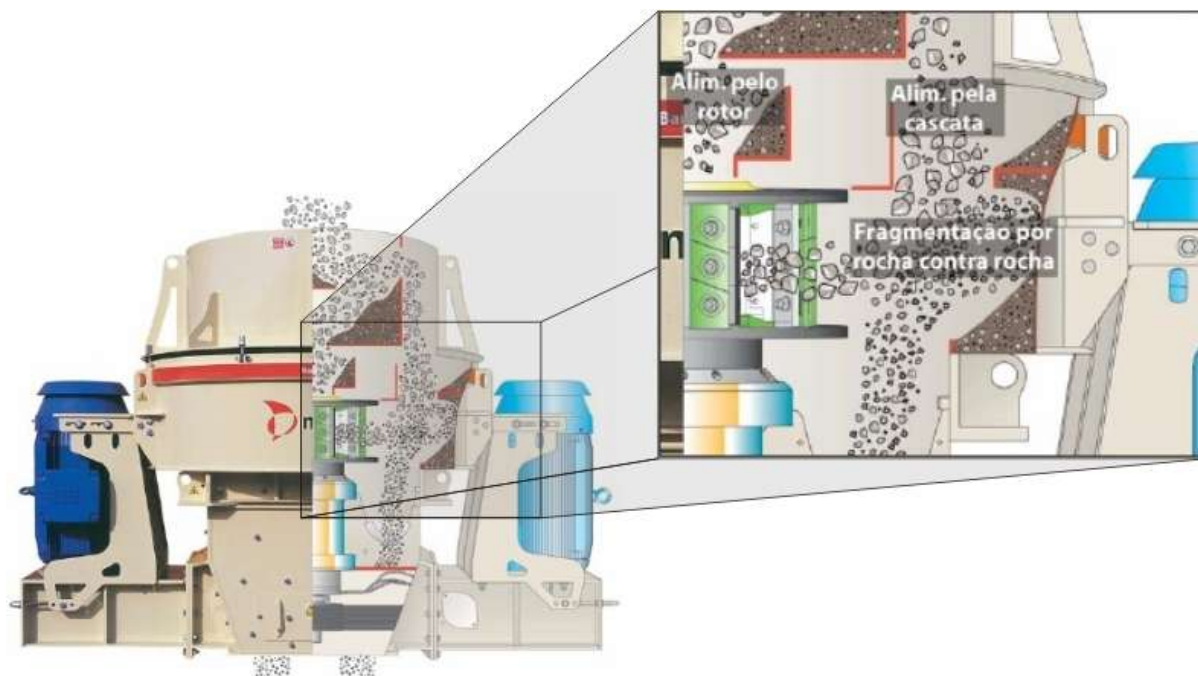


Figura 2.17 – Britador do tipo VSI com câmara de acúmulo e cascata (adaptado de METSO MINERALS, 2005).

### 2.4.3 Pó de pedra: produção e particularidades

Conforme mencionado anteriormente, o pó-de-pedra é o último material separado no processo de britagem de uma pedreira. Este material compreende todas as partículas passantes na peneira 4,75mm, podendo ter uma pequena fração retida nesta peneira, até o menor tamanho gerado. Sua produção, segundo observações de Cuchierato e Sant’Agostino (2000), pode variar entre 10 e 42% de todo o material britado, dependendo da composição mineralógica da rocha e dos equipamentos de britagem empregados.

Como a utilização deste produto “in-natura” é de pequena escala e muito sazonal, sendo aplicado basicamente em obras de pavimentação na confecção de base, sub-base e concreto asfáltico, normalmente constituem grandes estoques nas pedreiras (Figura 2.18), sendo, inclusive, algumas vezes tratados como sub-produto, resíduo ou até mesmo rejeito. Só na Região Metropolitana de São Paulo, estima-se que a produção de pó-de-pedra seja da ordem de 3 milhões de m<sup>3</sup>/ano (CUCHIERATO & SANT’AGOSTINO, 2000).



Figura 2.18 – Pilha (à esquerda) e estoque (à direita) de pó-de-pedra em pedreira da região da grande Florianópolis (outubro de 2006).

Este material tem ainda uma particularidade de apresentar pequena variação na sua composição granulométrica. Cuchierato (2000) observou este fenômeno na Região Metropolitana de São Paulo (Figura 2.19), compilando dados de 13 pedreiras.

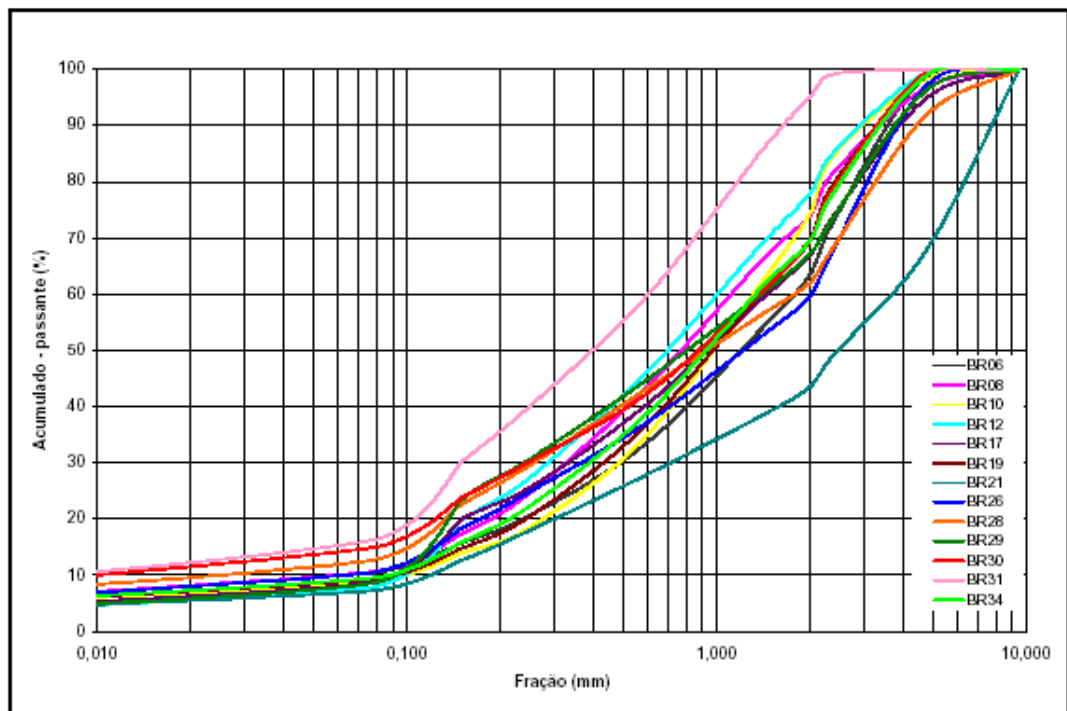


Figura 2.19 – Curvas granulométricas do pó-de-pedra de algumas pedreiras da Região Metropolitana de São Paulo (CUCHIERATO, 2000).

Nota-se a semelhança entre as composições granulométricas estudadas. Segundo a autora, os dois casos destoantes observados, devem-se, possivelmente, a variações no processo de

beneficiamento das pedreiras BR 31 e BR 21. Provavelmente, na BR 31 o material deve estar sendo peneirado, pois este apresenta quase todos os grãos passantes na peneira 2,36mm. Já o material da pedreira BR 21 apresenta mais de 35% de material retido na peneira 4,75mm e todos os grãos passantes na peneira 9,5mm, não caracterizando conceitualmente um agregado miúdo. Comercialmente, este material recebe o jargão de “pódrisco”.

Comportamento semelhante foi observado para algumas pedreiras de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Figura 2.20). Os dados foram coletados de trabalhos desenvolvidos pelo GTec-UFSC e nas próprias pedreiras. As curvas granulométricas apresentadas correspondem a basaltos (B), granitos (G) e riólitos (R) britados em diferentes tipos de equipamentos. Esta origem mineralógica está indicada pela primeira letra da legenda. As demais letras indicam a procedência / fabricante.

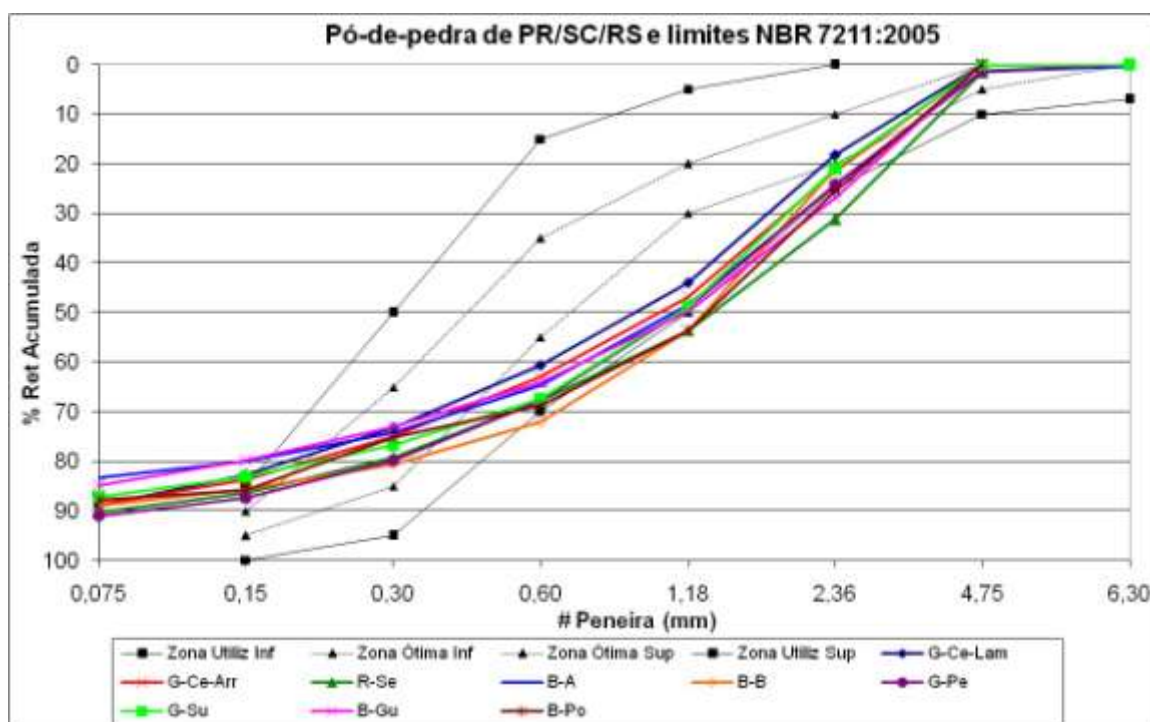


Figura 2.20 – Pó-de-pedra de diversas pedreiras de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Mesmo se retirado todo o material pulverulento e o material retido na malha 2,36mm, beneficiamento este que poderia ser dado a cada pó-de-pedra para produção de areia de britagem, a semelhança entre as curvas granulométricas permanece (Figura 2.21).

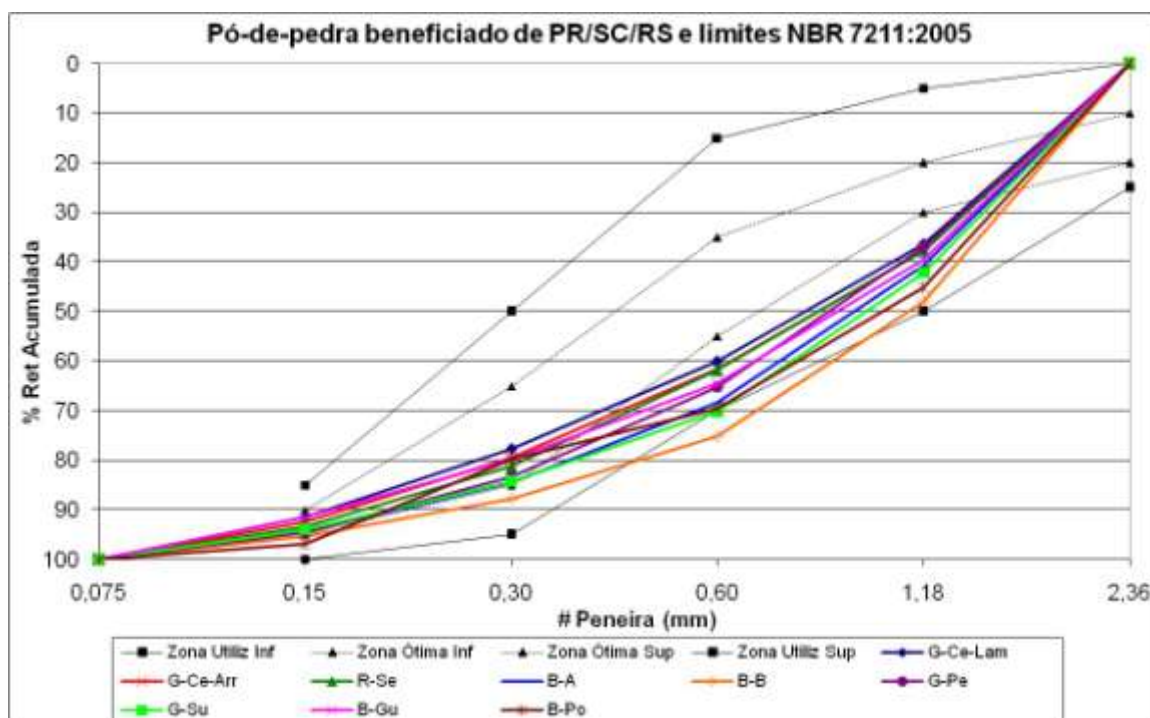


Figura 2.21 – Pó-de-pedra após retirada do material pulverulento e do material retido na malha 2,4mm de diversas pedreiras de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

#### 2.4.4 Produção de areias de britagem

As areias de britagem normalmente são produzidas a partir do pó-de-pedra que, conforme apresentado, por muitas vezes é tratado como um resíduo nas pedreiras. O pó-de-pedra, se adequadamente beneficiado, pode ter boa aplicação em concretos de cimento Portland, como agregado miúdo, cuja utilização, por motivos já explanados, tem crescido muito nos últimos anos. O beneficiamento do pó-de-pedra e transformação em areia de britagem pode envolver diferentes processos. Neste trabalho serão abordados dois: o peneiramento do material grosseiro (granilha) e a remoção do material pulverulento.

Neste tipo de beneficiamento, o primeiro passo seria a remoção de parte do material grosso (maior que 2,36mm) que geralmente é abundante no pó-de-pedra e, quando presente em excesso nos agregados miúdos, conduz, entre outros, a concretos ásperos, conforme explanado no item 2.3.2. Este material grosseiro, também denominado comercialmente de granilha, pode ser comercializado separadamente (“in-natura”), tendo principal destinação as fábricas de artefatos vibro-prensados de concreto, ou poderia ser re-britado sendo também transformado em areia de britagem.

Para a pedreira, quanto maior a peneira de separação e maior o teor de granilha mantido na areia de britagem, melhor será o aproveitamento do pó-de-pedra e menor a quantidade de

material remanescente. No entanto, para que se obtenha um desempenho adequado em concreto de cimento Portland, a dimensão máxima e o teor de granilha a serem mantidos precisam ser mais bem estudados. Em uma situação real, o teor de granilha a ser mantido na areia pode ser definido pela malha da peneira a ser empregada na separação (peneira de corte) e/ou por diferentes eficiências de peneiramento. Neste trabalho, por ser realizado em escala laboratorial, o teor de granilha será definido pela peneira de corte.

Com relação ao material pulverulento, quanto maior o teor mantido na areia, também maior será o benefício para a pedreira (menor passivo ambiental e maior retorno financeiro pelo aproveitamento do pó-de-pedra). No entanto, do ponto de vista de agregado miúdo para concreto, provavelmente haverá um teor limite para sua utilização considerando o desempenho da areia de britagem. Conforme comentado no item 2.3.1, acredita-se que este teor seja função principal do tamanho máximo do agregado e da forma e textura das partículas, além do tipo de aplicação do concreto. Assim como a granilha, os microfinos remanescentes podem ainda ser comercializados para outras finalidades, principalmente se removido a seco. Uma das aplicações seria o emprego como fíler em concretos auto-adensáveis (BARBOSA et al, 2004). Outras finalidades para aplicação deste material podem ser observadas no trabalho de Cuchierato (2000).

#### **2.4.4.1 Equipamentos para remoção de microfinos**

Existem diversos tipos de equipamentos para remoção de microfinos e a especificação e/ou utilização de cada um vai depender dentre outros, das condições de umidade do material, da quantidade de material a ser removida e do tipo de processo, se por via seca ou úmida.

No processo via úmida, quando o teor de microfinos é muito alto ou o material está úmido, com partículas finas aderidas, a remoção pode ser iniciada já no peneiramento. Nestes casos, aplicam-se jatos dirigidos de água sobre a camada de material enquanto está sendo peneirado, sendo os jatos dispostos transversalmente ao fluxo de material na peneira. Para uma lavagem mais eficiente, normalmente é indicado uma cortina contínua de água, conseguida com jatos em forma de leque, e o volume de água lançado varia de uma a três vezes o volume de material peneirado, dependendo da quantidade de impurezas no agregado e o tamanho do mesmo (METSO MINERALS, 2005). Neste processo, após o peneiramento, com ou sem aplicação de água, o material passante é conduzido aos sistemas de separação dos microfinos, que podem ser

de diversos tipos, merecendo destaque os lavadores de rosca (classificadores espirais) e as rodas desaguadoras (rodas d'água).

Os lavadores de rosca, ou classificadores espirais, são bastante empregados na remoção de excesso de microfinos, principalmente em portos de areia e instalações de britagem destinadas à produção de areia (Figura 2.22). O equipamento consiste de um tanque de decantação inclinado onde as partículas maiores e mais pesadas precipitam e são deslocadas para fora por uma hélice que ao girar, traz o material para cima, jogando-o para fora da caixa. As partículas mais finas ficam em suspensão devido à turbulência provocada por injeção de água inferior, pelo movimento rotacional das hélices e pela própria alimentação, sendo levadas por transbordo da água para fora da caixa. O tamanho da partícula a ser removida é função da vazão de água na caixa, tanto no tanque quanto no final da rosca.



Figura 2.22 – Lavadores de rosca ou classificadores espirais (METSO MINERALS, 2005).

Da mesma forma, as rodas desaguadoras ou, popularmente conhecidas por rodas d'água, também são bastante empregadas na remoção de microfinos de areias de britagem. Este equipamento apresenta a vantagem de baixo consumo de energia por metro cúbico de material processado e constitui-se basicamente de uma roda dotada de caçambas com fundo em forma de peneira e uma caixa de decantação de material (Figura 2.23). Seu funcionamento, explicado na Figura 2.23, inicia-se com a introdução da polpa de areia e água no tanque (1), onde os sólidos decantam por gravidade. Na seqüência, as caçambas da roda escavam o material acumulado no fundo do tanque (2). Esta ação agitadora provoca “turbulência” do material, executando a



lavagem e promovendo o desprendimento de resíduos, argila e matéria orgânica. Durante a primeira metade da revolução (parte ascendente), a roda deságua o material pelos furos das telas das caçambas (3), para então descarregar o material desaguado na bica de saída (4). A água contendo os resíduos em suspensão é conduzida ao vertedor, sempre localizado no lado oposto à alimentação (5), onde transborda para a saída. O desempenho deste equipamento é função do volume de água introduzido, da velocidade de rotação da roda e da abertura da malha da caçamba.

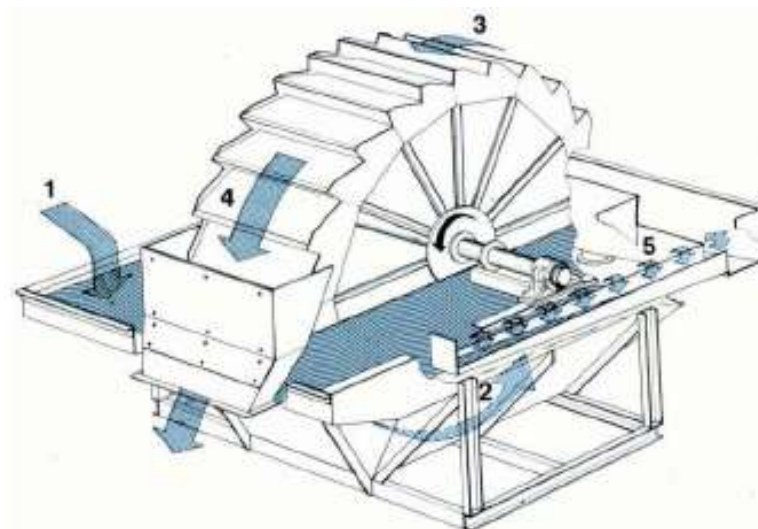


Figura 2.23 – Rodas desaguadoras ou rodas d'água (METSO MINERALS, 2005).

Nas Figuras 2.24 e 2.25 são apresentados os sistemas de peneiramento e o de remoção de microfinos por roda desaguadora empregados em uma pedreira da região da grande Florianópolis. Vale ressaltar que, neste caso, o peneiramento pode ser realizado com ou sem a aspersão de água (Figura 2.25), dependendo da umidade em que se encontra o material e, conseqüente, quantidade de microfinos aderidos.



Figura 2.24 – Sistema beneficiamento do pó-de-pedra e produção de areia de britagem de uma pedra da região da grande Florianópolis: (a) peneiramento da granilha; (b) roda desaguadora para remoção de microfinos; (c) pilha de granilha; e (d) pilha de areia de britagem.



Figura 2.25 – Detalhe do peneirador de granilha, ao lado da roda desaguadora, empregados em pedra da região da grande Florianópolis.

Existem ainda outros equipamentos, menos comuns em pedreiras, que empregam água para separação de microfinos como as caixas lavadoras de cascalho e os lavadores de tambor. No

entanto, todos estes estão em desuso tanto pelo volume de água consumido, quanto pela necessidade de tratamento desta água e destinação da borra.

Já no processo via seca de remoção de microfinos, jatos de ar são aplicados sobre o material quando este está no interior dos britadores, nas correias transportadoras ou nos *decks* de peneiramento e a suspensão é conduzida a equipamentos de separação. Este processo possui as vantagens de eliminar a utilização de água, que exige a presença de tanques de decantação e sistemas de tratamento, e de facilitar a comercialização dos microfinos, que dependerá, entre outros, de sua composição química. Dentre os sistemas de separação dos microfinos a seco, destacam-se os ciclones (ou separadores ciclônicos) e os aeroseparadores. Após os sistemas de separação à seco, é comum ainda a utilização de filtros de manga para auxiliar na remoção de partículas em suspensão no ar utilizado.

Os separadores ciclônicos são equipamentos de formato cilíndrico-cônico nos quais a separação se dá por centrifugação das partículas e formação de vórtices (Figura 2.26). Neste equipamento, produz-se a rotação da suspensão através da alimentação tangencial sob pressão formando um vórtice ao longo das paredes do equipamento com direção ao fundo. No centro da parte superior do equipamento, aplica-se uma sucção que forma um vórtice secundário interno no eixo que arrasta as partículas mais finas que estão no centro. As partículas mais pesadas ficam próximas as paredes e são conduzidas ao fundo do equipamento onde são coletadas. O tamanho de separação da partícula é função da geometria do equipamento e dos fluxos volumétricos dos gases de entrada e de saída. Estes equipamentos têm sido empregados com boa frequência em pedreiras e podem ser utilizados isoladamente ou em baterias, dependendo da produção necessária e do tamanho de partícula que se pretende remover (CHAVES, 2005). Alguns autores sugerem que este tipo de equipamento possui baixa precisão na separação e, além disso, não conseguem separar partículas menores que  $5\mu\text{m}$ .

Já os aeroseparadores possuem maior eficiência e precisão na separação das partículas, porém tem um custo mais elevado. Estes equipamentos possuem um rotor central dotado de pás com inclinações que podem variar (Figura 2.27). A combinação de geometria do equipamento, ângulo de inclinação das pás, velocidade de rotação do rotor e taxa de alimentação definem o tamanho da partícula a ser retirada na separação.

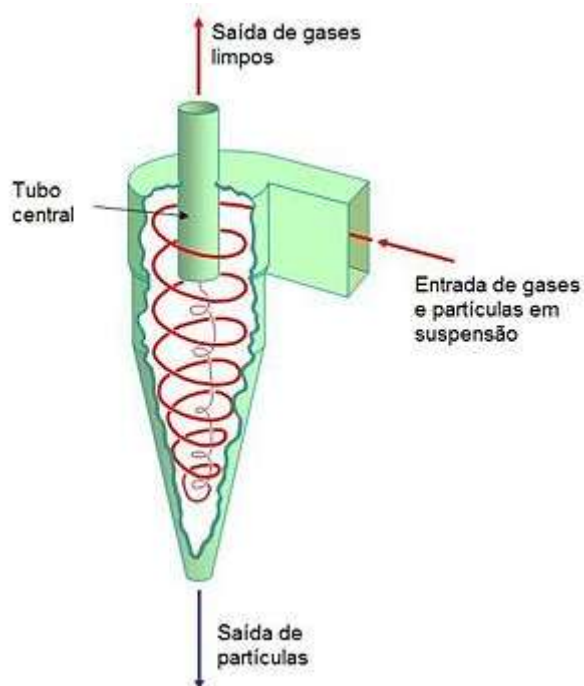


Figura 2.26 – Funcionamento de um separador ciclônico (disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador\\_cicl%C3%B4nico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador_cicl%C3%B4nico)).

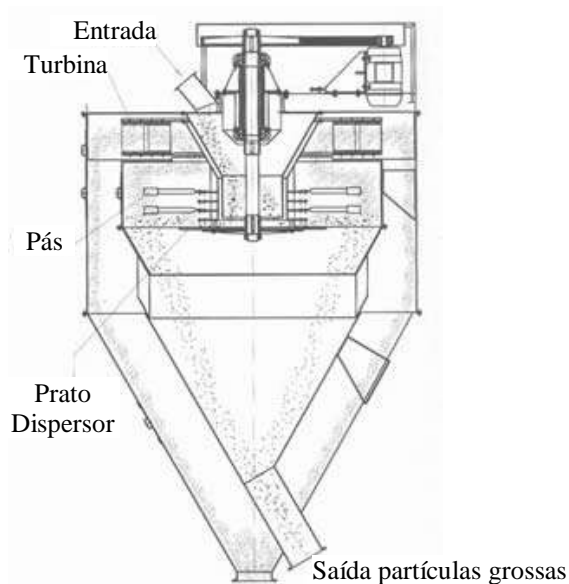


Figura 2.27 – Exemplo de aeroseparador (LIMA & ALMEIDA, 2005).

Existem ainda outros equipamentos de separação a seco, merecendo destaque as câmaras gravitacionais. Nestas, em uma das extremidades da câmara, é empregada uma turbina que lança o ar horizontalmente sob a alimentação do material, produzindo uma névoa horizontal com partículas em suspensão. Por diferença de peso, e conseqüente diferente deslocamento horizontal para a mesma pressão de ar empregada, ocorre a separação do material ao longo da câmara. Normalmente no fundo destas câmaras existem tremonhas dividindo-a em seguimentos e separando o material em diferentes faixas de tamanho.

## **2.4.5 Emprego de agregados miúdos de britagem em concretos e argamassas**

Apesar do crescente emprego de agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland, ainda há algumas limitações para seu uso como substituição total às areias naturais. Dentre as principais, estão o alto teor de material pulverulento que acarreta em maior demanda de água e os grãos de forma angulosa e superfície áspera que, devido ao atrito interno entre partículas, prejudicam a trabalhabilidade, bombeabilidade e acabamento (PRUDÊNCIO JR et al, 1995; ALMEIDA, 2005).

Contudo, a utilização parcial de agregados miúdos naturais e de britagem tem sido bastante freqüente, pois assim são minimizados os possíveis inconvenientes. Por este motivo, muitos trabalhos contemplando o uso de areias de britagem e pó-de-pedra na produção de concretos e argamassas de cimento Portland têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Na maioria dos estudos observados, são avaliadas algumas propriedades de concretos ou argamassas contendo substituições de areia natural por pó-de-pedra ou areia de britagem e estas comparadas as de um material de referência, normalmente aquele contendo 100% de areia natural. Prudêncio Jr. et al (1995) enfatizam ainda que os estudos realizados no sentido de viabilizar a utilização dos materiais de britagem como agregado miúdo são ainda limitados, restringindo-se principalmente a avaliação da variação da resistência e demanda de água nos concretos. Alguns trabalhos avaliam ainda a utilização de agregados miúdos de britagem com vistas à durabilidade e outras propriedades dos concretos, como: absorvidade (PANDOLF et al, 2005), permeabilidade, penetração de cloretos, reação álcali-agregado, retração, entre outros, não cabendo aqui serem pormenorizados tendo em vista que fogem ao escopo deste trabalho.

Nos estudos em argamassa, geralmente é observado vantagem para as composições contendo os agregados miúdos de britagem (areia e/ou pó-de-pedra) quanto à resistência à compressão. Já quanto à fluidez, os resultados são um pouco contraditórios. Vale ressaltar que, na maioria dos casos observados, as areias são comparadas em argamassas de cimento e areia de traço fixo em volume unitário, o que desfavorece as areias com massa unitária maior e/ou de massa específica menor, pois para estas, o volume de grãos na mistura é mais alto. O procedimento mais adequado para este tipo de comparação seria a definição de um traço fixo em volume aparente de grãos.

Dentre alguns estudos em argamassa onde foram comparados diferentes agregados, pode-se destacar o trabalho de D'Agostino & Soares (2002), onde foi comparado o desempenho de

cinco tipos de areia: pó-de-pedra (MF=2,60), areia aluvionar (MF=2,07), areia eólica (MF=1,13), areia oriunda da moagem de quartzito (MF=2,31) e areia de alteração de rocha obtida por desmonte hidráulico (MF=2,85). As argamassas foram confeccionadas com um traço fixo de 1:6 (cimento:areia) em volume unitário, que foi convertido para traço em massa utilizando os valores de massa unitária de cada uma das areias. A quantidade de água adicionada em cada mistura foi aquela necessária para se obter um índice de consistência pré-definido de  $250 \pm 10$  mm (NBR 13276). Dos resultados, a argamassa contendo o pó-de-pedra, apesar de apresentar o maior volume de sólidos na mistura, foi a que demandou menos água para mesma consistência (menor a/c e menor relação água/materiais secos - H). No estado endurecido, esta argamassa foi a que apresentou maior resistência, provavelmente justificada pela menor demanda de água para a consistência especificada e por um melhor empacotamento de grãos (efeito fíler). Estudo semelhante foi realizado por Nogueira et al (2005), que compararam sete areias de britagem e duas naturais, sendo que todas as de britagem apresentaram resistência à compressão superior às naturais. O estudo também foi conduzido para argamassa de traço 1:6 em volume unitário de areia e com quantidade de água variável para uma mesma consistência.

Além desses, tem-se o estudo de Almeida & Silva (2005), que avaliaram três materiais: uma areia de britagem, produzida em britador do tipo VSI e com remoção de material pulverulento; o pó-de-pedra de mesma origem geológica da primeira areia; e a areia normal do IPT. Quanto aos resultados, a areia de britagem proporcionou a maior fluidez à argamassa, seguida pela areia normal do IPT. No estado endurecido, a maior resistência foi observada para a areia normal do IPT, seguida pela areia de britagem.

Verificam-se ainda alguns estudos de composições de areias naturais e artificiais em argamassa, sendo que para estes, na maioria dos casos, a incorporação de material pulverulento de britagem proporcionou aumento na resistência à compressão sem grandes prejuízos à fluidez. No entanto, a maioria dessas proporções entre agregados é estudada em substituição em massa o que prejudica a avaliação comparativa, principalmente quando estão envolvidos agregados de massa específica bastante distinta.

Quanto aos trabalhos realizados em concreto, a maioria deles contempla estudos da substituição parcial da areia natural por agregado miúdo de britagem (areia ou pó-de-pedra) avaliando, na maioria dos casos, demanda de água ou aditivo para uma mesma trabalhabilidade, resistência à compressão e, em alguns casos, comparando custos. Alguns destes trabalhos são apresentados na seqüência.

Nugent (1979) e Cabrera & Irassar (1991) avaliaram a possibilidade de emprego de composições de areia natural e areia de britagem na confecção de concretos com vista à redução de custos. Obtiveram como resultados que as composições de areias de britagem e natural apresentaram resistências geralmente melhores que a utilização de 100% de areia natural, além de melhor trabalhabilidade e redução de custos. Apesar disto, algumas divergências foram observadas quanto à demanda de água das misturas.

Silva, Costa & Bastos (2005) avaliaram a substituição de areia natural por areia de britagem basáltica (teor de material pulverulento de 3,5%) e também por pedrisco (MF=5,41 e teor de material pulverulento de 2,4%) na produção de concreto. Para os dois materiais, foram avaliados teores de 15 a 50% de substituição. O teor de 40% de areia de britagem proporcionou a menor relação de custo do concreto por resistência (R\$/MPa), dentre todas as misturas avaliadas. Para o pedrisco, a proporção mais econômica ficou em torno de 15% deste material.

Bastos (2005) testou substituições entre 15 e 70%, em massa, de areia natural por areia de britagem basáltica na produção de concretos convencionais com duas faixas de resistência. Para ambos, quanto maior o teor de areia de britagem empregado menor foi a demanda de água e maior foi a resistência obtida, sendo que o melhor desempenho foi observado para a substituição de 70% da areia natural, principalmente para o traço de maior consumo de cimento. Conforme comentado anteriormente, a substituição em massa, de um material por outro mais pesado, diminui o volume de sólidos na mistura. Este fato pode ter influenciado os resultados obtidos.

Krempel, Crevilaro e Paulon (1992) estudaram a substituição de cimento por pó-de-pedra basáltico com 13% de material pulverulento e não observaram alteração significativa na resistência à abrasão e permeabilidade de concretos confeccionados com substituições de até 20%. Apontam ainda para redução do consumo de cimento para uma mesma resistência, principalmente para 90 dias, caracterizando assim um provável efeito pozolânico do pó-de-pedra basáltico. Pensando nisso, estes autores caracterizaram o pó-de-pedra quimicamente obtendo teores de 80,52% de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , 0% para  $\text{SO}_3$  e 2,25% de perda ao fogo. Estes valores atendem as exigências da NBR 12653 para serem caracterizados quimicamente como materiais pozolânicos.

O provável efeito pozolânico comentado, também foi observado por Menossi (2004). Este autor constatou que concretos com adição de pó-de-pedra com cerca de 13% de material pulverulento apresentaram crescimento de resistência com o tempo superior a um concreto contendo apenas areia natural. Além disso, este autor avaliou a atividade pozolânica dos

microfinos deste pó-de-pedra, que apesar de não ter atingido o limite de 75% exigido pela norma brasileira, obteve índice considerável de 61,3%. Ainda em seu trabalho, este autor constatou que, apesar de prejudicar a trabalhabilidade, a utilização de pó-de-pedra em concreto melhorou a durabilidade e a resistência à compressão tanto de concretos com igual relação água/cimento quanto de igual abatimento.

Sbrighi Neto (1975) apud Cuchierato (2000) estudou a influência da natureza petrográfica da areia de britagem e de seus finos em algumas propriedades do concreto. Verificou a existência de um teor ótimo da quantidade de finos presentes no concreto, variando entre 5 e 7 %, e que as propriedades que são mais influenciadas são a trabalhabilidade e a resistência à compressão. Este pesquisador relata ainda que a retirada completa da fração fina é prejudicial à trabalhabilidade do concreto.

Costa et al (2005) testaram composições de areia de britagem basáltica com três diferentes areias naturais: uma muito fina, uma fina e outra média. Observaram que a composição de areia muito fina e fina (classificação de acordo com NBR 7211 de 1983) apresentaram desempenho semelhante entre si e bastante superior a areia média. As substituições em torno de 50% apresentaram melhor desempenho, principalmente para resistências mais elevadas. Menossi, Camacho, Salles & Melges (2004); Cervi, Sagave & Santos (2005); Mendes, Moreira, Vieira & Garcia (2007) também obtiveram melhor desempenho para composições de 50% de agregado britado e 50% de areia natural. Já Brum Filho & Bertocini (2006) obtiveram melhores resultados com composições de 40% de areia de britagem e 60% de areia natural mas, de maneira geral, dentre as composições avaliadas, aquelas contendo agregados miúdos de britagem prejudicaram um pouco a trabalhabilidade, contudo, aumentaram a resistência. Teores menores ainda, na faixa de 30 a 10% de pó-de-pedra foram os que proporcionaram desempenhos satisfatórios nos estudos de Schumacher et al (2007).

No intuito de estudar composições do próprio material britado, Prudêncio Jr et al (1995) dividiram o pó-de-pedra em duas frações, uma passante e outra retida na malha 600µm, e compuseram estas duas frações em diferentes proporções avaliando a massa unitária compactada e a consistência de argamassas. A melhor fluidez (menor demanda de água) foi obtida com a composição de 30% de material passante e 70% de material retido na referida malha. Esta mistura correspondeu a um valor intermediário de massa unitária compactada, não caracterizando uma relação direta com a fluidez. A referida composição foi ainda empregada na confecção de concreto e comparada a soluções que contemplavam, entre outras, o uso total de uma areia natural, uso de maior teor de material passante na malha 600µm (40%) e o uso desta



última composição (40% passante na malha 600 $\mu$ m) retirando-se a fração retida na malha 2,4mm. Dentre estas, a composição 70%-30% apresentou maior resistência, mas, no entanto, segundo os autores, este concreto apresentou menor coesão e plasticidade (baixa trabalhabilidade), além de maior grau de exsudação. A mistura sem a fração 2,4mm, apesar de aumentar sensivelmente a demanda de água, melhorou substancialmente a trabalhabilidade e acarretou em um pequeno acréscimo na resistência.

Buest (2006), em seu trabalho, adotou metodologia semelhante à apresentada por Prudêncio et al (1995), separando dois materiais britados e uma areia natural em peneira de malha de aproximadamente 1,9mm. Posteriormente, recompôs as duas frações em ensaios em argamassa e produziu concretos com as composições obtidas, ajustando o teor em relação ao agregado graúdo. Concluiu que, apesar da vantagem econômica da areia natural, há viabilidade técnica na substituição total da areia natural por material de britagem.

Lodi (2006) avaliou o desempenho de agregados miúdos de britagem de origem basáltica em substituição a areias naturais com vista à redução de custos de concretos produzidos na região oeste de Santa Catarina. Obteve excelente desempenho dos concretos contendo substituições parciais dos agregados de britagem. Seu estudo foi conduzido em duas etapas, onde primeiramente foram estudadas proporções entre os agregados de britagem e natural em argamassa e posteriormente confeccionadas curvas de dosagem de concreto contendo as proporções definidas em argamassa. Vale ressaltar que as proporções que apresentaram melhor desempenho técnico e econômico no estudo em argamassa foram empregadas em concreto, tendo a necessidade de sofrerem pequenos ajustes por conta de correção de trabalhabilidade das misturas, principalmente por falta de coesão.

Raros são os trabalhos em que se avaliou o emprego total dos agregados de britagem como agregado miúdo para concreto. Dentre estes, destaca-se o trabalho de Almeida (2005). Este autor faz uma espécie de relato histórico da utilização total de agregado miúdo britado na produção de concreto dosado em central, inclusive concreto bombeado. Esta aplicação se deu em uma central de concreto situada no pátio de uma pedreira em Niterói (RJ), onde, através de um programa intenso de estudo de traços de concreto em laboratório e de um rigoroso controle de qualidade do agregado produzido, forneceu, durante vários anos, a partir do início da década de 80, concretos com 100% de agregado miúdo de britagem. Este autor relata que a areia de britagem, consumida sem qualquer beneficiamento, possuía granulometria situada na zona utilizável da especificação em vigor na época (EB-4 da ABNT) da parcela mais grossa até a peneira de 0,30 mm e abaixo desta até o fundo, passava a superar em poucas unidades

percentuais os teores máximos recomendados. Apresentava ainda teor de material pulverulento de 6,7%.

Donza, Cabrera & Irassar (2002) avaliaram a utilização de agregados de britagem nas propriedades de concretos de alta resistência e encontraram que aqueles oriundos de britagem, apesar de demandarem uma dosagem um pouco maior de superplastificante para a mesma trabalhabilidade, proporcionaram resistências mecânicas iguais ou maiores que agregados naturais. Estes autores atribuem este fato a um efeito da forma e textura dos grãos britados que proporcionaram melhor inter-travamento com a pasta de cimento. Krempel et al (1994) também obtiveram bons resultados com a utilização parcial de pó-de-pedra de rocha basáltica na produção de pisos de alta resistência empregados na Usina Hidrelétrica de Segredo.

Gonçalves (2005) em sua tese, afirmou ser viável tecnicamente a utilização de areia artificial para concretos de média resistência. Este autor observou ainda que um pó-de-pedra com 17,7% de material pulverulento prejudicou a trabalhabilidade, quando comparado à areia do IPT, porém manteve resistências semelhantes. Areia de britagem obtida do beneficiamento deste pó-de-pedra, com 14,5% de material pulverulento, melhorou a trabalhabilidade e a resistência. No entanto, quando reduzido o teor de material pulverulento destes materiais, para 4,8% e 1,6% respectivamente, por utilização de aeroseparador, houve prejuízo na resistência e o ganho na trabalhabilidade foi mínimo.

Existem ainda trabalhos avaliando a utilização de pó-de-pedra para outras finalidades, como o reforço de misturas solo-cimento (SOARES & PISSATO, 2001 e 2005), produção de concreto compactado com rolo – CCR (SOARES & MENDES, 2001; BATISTA et al, 2005; CUCHIERATO, 2000), entre outros. Em todos os casos listados, foi observado um incremento de resistência à compressão tanto quanto maior o teor de material de britagem empregado. Até mesmo em argamassas de revestimento e assentamento, foram observados benefícios mecânicos do emprego de areias de britagem com maior teor de material pulverulento (Silva, Buest e Campiteli, 2005), não cabendo aqui serem pormenorizados.

Como pode ser observado neste item, a maior parte dos trabalhos aborda apenas aspectos sobre as alterações proporcionadas a concretos e argamassas pelo uso parcial ou total de materiais de britagem (pó-de-pedra e areia de britagem). Pouco é mencionado a respeito dos fatores que causaram o bom ou mau desempenho, como forma inadequada dos grãos, teor de granilha e teor de material pulverulento. Menos ainda é mencionado sobre a influência do beneficiamento que poderia ser dado a esses materiais no intuito de melhorar seu desempenho.

Diante do exposto, o presente trabalho busca avaliar a influência da forma dos grãos e de composições granulométricas possíveis de serem obtidas com esses materiais nas propriedades de argamassas e concretos. No Capítulo 4 é apresentado o programa experimental deste trabalho que, entre outros, visa o estudo do beneficiamento mais adequado a ser dado ao pó-de-pedra para produção de areias de britagem com desempenho otimizado em concretos de cimento Portland.

## 3 DOSAGEM E BOMBEAMENTO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade e desde a segunda metade do século XX é o segundo material mais consumido pelo homem, ficando atrás apenas da água. Por estes motivos, alguns países desenvolvidos, como Canadá, Estados Unidos e outros europeus, têm investido fortemente no desenvolvimento e melhor conhecimento deste material (HELENE & ANDRADE, 2007).

Deste volume total de concreto consumido, boa parte é produzida nas centrais dosadoras de concreto. Para se ter uma idéia, no Brasil, do total de cimento produzido nos meses de janeiro e fevereiro de 2008 (quase 7,8 milhões de toneladas), cerca de 14% foi destinado as centrais dosadoras de concreto. Na região Sul, que consome 16,6% do total de cimento produzido no país, a parcela destinada às centrais dosadoras de concreto chega a 16%<sup>1</sup>. Apesar de esta parcela parecer pequena, as centrais dosadoras de concreto representam o segundo setor que mais consome cimento no país, ficando atrás apenas do mercado varejista (revendas), que consome aproximadamente 64% do total de cimento produzido no país.

Contudo, optou-se, neste trabalho, em estudar a utilização dos agregados miúdos de britagem em concretos dosados em central porque, além do volume considerável, é neste setor que se observa a maior dificuldade de utilização deste tipo de material, principalmente pelos inconvenientes provocados nos concretos bombeáveis que, atualmente, acredita-se representar a maior parcela dos concretos fornecidos pelas centrais dosadoras.

Para entender a problemática, é preciso entender o comércio do concreto dosado em central. Há no mercado, atualmente, inúmeras maneiras de comercialização destes concretos que envolvem, entre outras, especificações de consumo mínimo de cimento, módulo de elasticidade mínimo à determinada idade, resistência à tração mínima ou massa específica pré-estabelecida. Entretanto, a comercialização da maior parte dos concretos dosados em central envolve, sem dúvida, as seguintes especificações:

---

<sup>1</sup> Fonte: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC. Disponível em: [www.snic.org.br](http://www.snic.org.br)

- Dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- Consistência do concreto, geralmente determinada pelo ensaio de abatimento (NBR NM 67:1998);
- Resistência característica à compressão, normalmente especificada para os 28 dias e determinada segundo NBR 5739:2007;
- Condição de transporte e lançamento (concreto convencional ou bombeável).

Contudo, para a seleção de um agregado miúdo, do ponto de visto técnico e econômico, para uma central dosadora de concreto, é preciso levar em consideração os três últimos fatores mencionados. Como exemplo, pode-se citar que algumas areias podem proporcionar boa redução na demanda de água e conseqüentemente no consumo de cimento para determinados abatimento e resistência à compressão, porém dificultar enormemente o bombeamento do concreto, inviabilizando, em alguns casos, sua utilização. Nestes casos, muitas vezes a alternativa prática é o aumento do abatimento e/ou do teor de argamassa para possibilitar o bombeamento, o que normalmente ocasiona um aumento no consumo de cimento para uma mesma resistência, reduzindo a vantagem econômica inicialmente apresentada. Outra alternativa que tem sido observada para melhorar o bombeamento das misturas, quando do uso de misturas de agregados miúdos naturais e de britagem, é o aumento da proporção de areia natural no traço em detrimento da redução do agregado miúdo de britagem. No entanto, estes ajustes dos traços se dão por tentativas no dia-a-dia, o que pode comprometer a integridade dos equipamentos de bombeamento (bombas de concreto e tubulações), além da trabalhabilidade e resistência do concreto entregue.

Diante do exposto, neste trabalho, buscou-se fixar uma condição idêntica de bombeabilidade para se fazer os estudos de dosagem para cada composição de agregados miúdos estudada em concreto, avaliando, assim, as misturas sob o ponto de vista técnico e econômico para uma mesma condição de transporte e lançamento. Por conta disto, neste capítulo é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre o método de dosagem IPT/EPUSP, recentemente denominado de método “IBRACON” de dosagem, o qual foi utilizado neste trabalho com algumas pequenas alterações. Também é apresentada uma breve revisão sobre bombeabilidade e os ensaios disponíveis na literatura para avaliação desta propriedade do concreto, os quais serviram de embasamento teórico para desenvolvimento e definição de um ensaio utilizado neste trabalho conforme é apresentado no programa experimental.

### **3.2 MÉTODO DE DOSAGEM IPT/EPUSP OU IBRACON**

O concreto de cimento Portland é composto por cimento, água e agregados e facultativamente por aditivos, adições, fibras e agregados especiais, cujo emprego está cada vez mais freqüente nos concretos atuais. A proporção mais adequada entre estes constituintes é buscada pela tecnologia do concreto para atender simultaneamente a critérios econômicos e principalmente às exigências de trabalhabilidade, resistência mecânica, deformabilidade e durabilidade, que podem variar para cada caso. Segundo Helene (2005), as propriedades do estado endurecido são normalmente exigidas pelo projeto da estrutura, enquanto as propriedades do estado fresco são determinadas pelas características da peça a ser concretada (geometria, taxa de armadura, etc) e pelos equipamentos e técnicas construtivas que serão utilizadas (transporte, lançamento e adensamento).

Conforme mencionado, o custo é um fator de extrema importância na dosagem de concretos. Como normalmente o cimento é o componente mais caro, busca-se sempre dosar um concreto com o menor consumo de cimento possível, desde que atendidas todas as exigências estabelecidas. Contudo, a adequada escolha e proporcionamento dos agregados graúdos e principalmente dos miúdos tem grande importância, pois segundo Helene & Andrade (2007), o emprego de agregados com forma, granulometria e textura adequadas pode conduzir a uma redução do atrito interno da mistura e assim permitir uma redução do volume de pasta, mantendo o mesmo abatimento e sem alterar significativamente as propriedades do concreto endurecido.

Estes fatos evidenciam a importância do estudo de dosagem, que pode ser definido como o procedimento teórico-experimental para determinação da proporção dos diversos constituintes do concreto destinado a determinada aplicação. Existem atualmente muitos métodos de dosagem disponíveis na literatura, sendo bastante utilizado no Brasil o método “IBRACON” de dosagem (HELENE & ANDRADE, 2007). Este método, por vezes também denominado de método dos 4 quadrantes, tem como base o método IPT/EPUSP definido por Helene & Terzian em 1993, tendo sofrido pequenas alterações recentemente (HELENE, 2005).

Alguns parâmetros e abreviações utilizados no método são aqui definidos e apresentados:

- $m$  = relação, em massa seca, dos agregados pelo cimento - traço (kg de agregado total por kg de cimento ( $m = a + p$ ));
- $a$  = proporção em massa de agregado miúdo em relação à massa de cimento do traço;
- $p$  = proporção em massa de agregado graúdo em relação à massa de cimento do traço;
- $a/c$  = relação, em massa, de água pelo de cimento do traço (relação água/cimento);

- $f_{cj}$  = resistência à compressão do concreto a  $j$  dias de idade;
- $C$  = consumo de cimento, em massa, por  $m^3$  de concreto adensado;
- $H$  = relação água/materiais secos em massa (umidade do concreto fresco);
- $\alpha$  = teor de argamassa seca em relação aos materiais secos, em massa, normalmente mantida constante para diferentes resistências, dentro de certos limites e para concretos feitos com os mesmos materiais;
- $\gamma$  = massa específica do concreto adensado.

Este método tem como premissa as leis de Abrams, Lyse e Prizskulnik & Kirilos (ou Lei de Molinari, conforme denominação de HELENE & TERZIAN, 1993). Estas leis são adotadas como modelos que governam o comportamento do concreto, conforme apresentado:

- Lei de Abrams: "A resistência do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento". Esta lei é bem ajustada pela Equação 8.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação 8}$$

- Lei de Lyse: "A quantidade de água a ser empregada em um concreto devidamente proporcionado, confeccionado com um determinado grupo de materiais (mesmos cimento e agregados miúdo e graúdo), para obter-se uma dada consistência, independe do traço deste concreto". Em outras palavras, para um dado grupo de materiais, existe uma relação água/materiais secos ( $H$ ) constante para obter-se uma determinada consistência. Esta lei é bem ajustada pela Equação 9.

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad \text{Equação 9}$$

- Lei de Prizskulnik & Kirilos: esta lei estabelece que o consumo de cimento é inversamente proporcional à massa de agregados do traço ( $m$ ), sendo bem ajustada pela Equação 10.

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m} \quad \text{Equação 10}$$

onde:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_5$  e  $k_6$  são constantes de ajuste, particulares para cada conjunto de materiais e consistência.

Por definição, existem outras equações as quais são utilizadas no método:

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \quad \text{Equação 11}$$

$$H = \frac{a/c}{1 + m} \quad \text{Equação 12}$$

$$C = \frac{\gamma}{1 + m + a/c} \quad \text{Equação 13}$$

Este método baseia-se no ajuste de curvas de resistência e trabalhabilidade em função dos requisitos do estado fresco e endurecido do concreto. Ao contrário de outros métodos, que se baseiam em tabelas, ábacos e/ou composições de agregados com maior massa unitária sendo procedidos ajustes posteriores para adequação da trabalhabilidade (principalmente teor de argamassa), este método parte do princípio que a melhor solução deve ser obtida diretamente através de procedimentos experimentais.

Para tal, produz-se um traço piloto em laboratório (ex:  $m_{\text{piloto}} = 5$ ) utilizando os materiais que serão efetivamente empregados e com um teor de argamassa propositalmente baixo a fim de obter-se um concreto visivelmente “empedrado”. Através de adições sucessivas de pequenas porções de cimento e areia, pré-estabelecidas e pesadas, e de água para atingir o abatimento desejado, determina-se experimentalmente o teor de argamassa ideal ( $\alpha_{\text{ideal}}$ ). Este pode ser definido como o mínimo teor de argamassa para se obter um concreto trabalhável para determinada aplicação: simplificada, com superfície compacta e sem vazios, sem segregação e exsudação e com consistência e coesão adequadas. O teor ideal de argamassa, normalmente é sensivelmente alterado para um teor maior ( $\alpha_{\text{dotado}} = \alpha_{\text{ideal}}$  acrescido de 2 a 4%), em função de perdas de argamassa para equipamentos, fôrmas e armadura durante o processo de mistura, transporte e lançamento do concreto, que vão também depender da aplicação.

Na seqüência da metodologia, repete-se a mistura com  $m_{\text{piloto}}$ , mantendo-se constante o  $\alpha_{\text{dotado}}$ , e produz-se duas novas misturas com diferentes traços, um mais rico ( $m_{\text{piloto}}+1$  ou 1,5) e um mais pobre ( $m_{\text{piloto}}-1$  ou 1,5). Estas três misturas devem ser produzidas com a consistência (abatimento) igual à definida para aquela aplicação, obtida por meio da adição gradual de água ao concreto durante o estudo de dosagem. Para cada um dos três concretos, são determinadas as massas específicas no estado fresco e são confeccionados corpos-de-prova para serem ensaiados à compressão nas idades de interesse para o estudo (normalmente 7 e 28 dias).



De posse de todos os resultados, incluindo os de resistência à compressão, são traçadas as curvas de Abrams ( $f_{cj}$  em função de  $a/c$ ), de Lyse (traço (m) em função de  $a/c$ ), e de Priskulnik & Kirilos (consumo de cimento (C) em função do traço (m)). O proporcionamento ideal do concreto é determinado por interpolação das curvas, partindo-se do parâmetro de interesse (seja  $f_{cj}$ ,  $a/c$  ou C), observando-se o cumprimento simultâneo dos demais requisitos definidos na dosagem.

Esse método de dosagem é, sem dúvida, bastante eficaz e permite que, para um mesmo conjunto de materiais e um mesmo abatimento, se possam definir o proporcionamento ideal de concretos de várias especificações simultaneamente. No entanto, adaptações se fazem necessárias para o seu emprego quando do uso de aditivos redutores de água, mas poucas são as referências na literatura que apresentam orientações para este fim. Maiores detalhes sobre este método de dosagem podem ser obtidos em Helene (2005).

Outro fato que merece destaque é que, conforme pode ser observado, o teor de argamassa adotado é determinado em função da experiência do tecnologista, sendo que muitas vezes são necessários ajustes durante a aplicação do concreto. Este fato ocorre com frequência considerável no caso de concretos bombeáveis, onde na prática muitas vezes são exigidos maiores teores de argamassa que aqueles estipulados no estudo de dosagem. Neste trabalho será proposto um ensaio que auxilie na determinação do teor de argamassa a ser adotado para um dado conjunto de materiais e consistência, para uma determinada condição de bombeamento.

### **3.3 BOMBEABILIDADE**

Bombeabilidade pode ser definida como uma propriedade do concreto que quantifica a facilidade com que o mesmo se desloca através de uma tubulação quando submetido à determinada pressão. Assim como a trabalhabilidade, a bombeabilidade também é função das características da própria mistura e das condições de aplicação do concreto, como equipamentos (tipo e potência da bomba e configuração da tubulação) e fatores relacionados ao local (temperatura, distância, altura, etc).

Apesar da sua importância, conforme abordado no início deste capítulo, não existe atualmente um ensaio normalizado para quantificar esta propriedade (ACI 304.2R-96). Apesar de alguns pesquisadores terem proposto, ao longo dos anos, algumas correlações entre bombeabilidade e parâmetros determinados em ensaios, incluindo os reométricos, poucas

aplicações práticas ainda são encontradas. Chapdelaine (2007) afirma ainda que provavelmente poucos pesquisadores se interessam pelo tema por conta da sua complexidade. Dos estudos mais recentes, que se encontram disponíveis na literatura, destacam-se o de Kaplan (2000) e o de Chapdelaine (2007). Maiores detalhes do trabalho destes dois pesquisadores são apresentados no item 3.3.1.

O mecanismo mais aceito na literatura para o deslocamento do concreto por dentro de uma tubulação é de que o núcleo central se desloca na forma de um bloco, cisalhando uma fina camada de pasta lubrificante (ou argamassa com grãos menores de areia) que fica entre o concreto e a parede do tubo. Uma ilustração deste mecanismo pode ser observada na Figura 3.1. Nesta, observa-se que o perfil de velocidade de deslocamento do material dentro da tubulação é máxima e se mantém constante na região central (núcleo de concreto) e se torna praticamente nula tangencial a parede do tubo, caracterizando o cisalhamento da pasta. Assume-se assim que não há deslizamento entre a pasta e o tubo. Segundo este modelo, as perdas de pressão estariam ligadas às deformações por cisalhamento localizadas na camada lubrificante (KAPLAN, 2000).

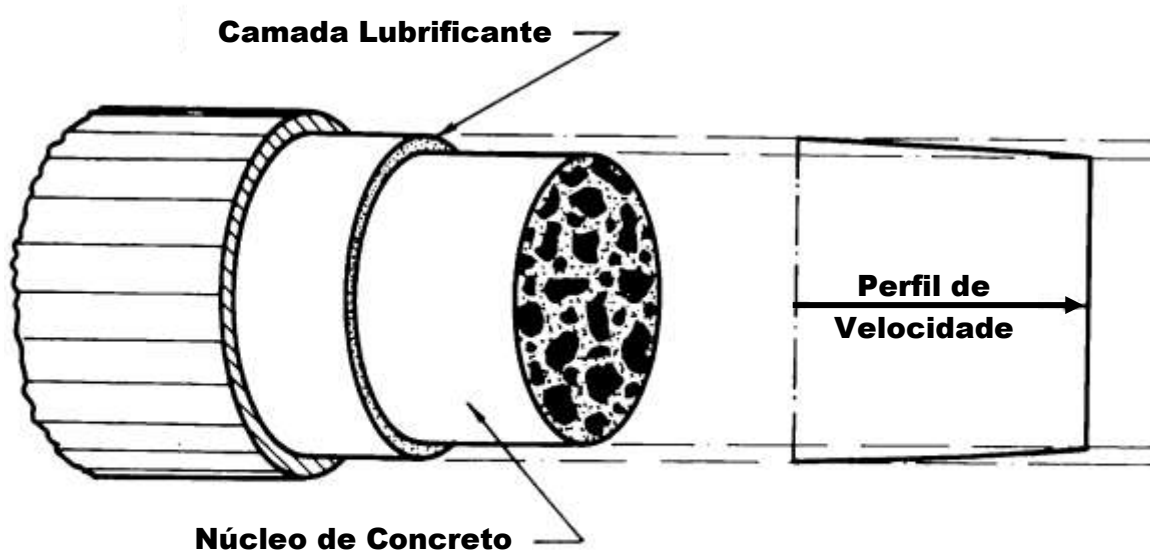


Figura 3.1 – Mecanismo de deslocamento do concreto na tubulação (Browne & Bamforth, 1977)

Com base neste mecanismo, há na literatura um consenso de que a bombeabilidade está intimamente ligada estabilidade e a resistência ao escoamento de uma mistura de concreto fresco sob pressão. A mistura de concreto deverá se manter estável quando submetida à pressão de bombeamento, sem perda de água, pois, segundo alguns autores, é a água que transfere a maior parcela da pressão entre as partículas sólidas do concreto fazendo com que todo o conjunto escoe pela tubulação. Além disso, segundo Browne & Bamforth (1977), a perda de água do concreto (exsudação) é a principal causa de bloqueios (entupimentos) de tubulações de bombeamento.

Deste modo, estes autores sugerem que a composição dos constituintes sólidos do concreto deve ser estanque (ter um efeito de peneira entupida) quando submetido à pressão, pois assim, a água não se separará da mistura e o concreto irá fluir pela tubulação de bombeamento. Pensando nisso, Browne & Bamforth (1977) desenvolveram um ensaio para avaliar a capacidade de uma mistura de concreto se manter estável sob pressão. Este ensaio será mais bem explicado no item 3.3.1.

Já a resistência ao escoamento da mistura dentro da tubulação está ligada às propriedades da pasta que envolve todo o núcleo central e ao atrito das partículas com a tubulação. Este último, segundo Browne & Bamforth (1977), é menos importante em concretos saturados. Assim, quando em fluxo contínuo e laminar (não turbulento), o deslocamento do concreto no núcleo central da tubulação na forma de um bloco, é influenciado essencialmente pelas propriedades da pasta lubrificante. Segundo Kaplan (2000), a tensão de cisalhamento na interface governa este mecanismo que, por sua vez, é caracterizada pela tensão de escoamento e a viscosidade plástica da pasta na interface.

No entendimento deste autor, apenas os parâmetros de estanqueidade do concreto sob pressão e de lubricidade da pasta que o envolve na tubulação, sozinhos ou em associação, não explicam por completo o fenômeno de bombeamento. Como justificativa a esta afirmação destaca-se que, na prática, se preparada uma mistura contendo apenas pó-de-pedra com alto teor de material pulverulento em substituição a um agregado miúdo natural, apesar de esta possuir maior quantidade de pasta lubrificante devido ao elevado teor de microfios e do pó-de-pedra por si só possuir um efeito de entupimento inquestionável, esta mistura dificilmente será bombeável. Assim, provavelmente há outros fatores envolvidos os quais justificariam esta restrição de utilização de agregados miúdos de britagem em concretos bombeáveis. Acredita-se que fatores relacionados à capacidade de re-acomodação da mistura, como seu atrito interno, devam ser considerados. Estes últimos predominariam nos locais onde se observa um fluxo turbulento do concreto na tubulação (deformações, curvas, reduções, emendas com incrustações, etc) e os parâmetros relacionados à estanqueidade e lubricidade da mistura predominariam em regiões de fluxo laminar (trechos retos e sem interferências). Segundo documento da Putzmeister<sup>2</sup> (2004) e observações de casos práticos, os pontos críticos onde ocorre o maior número de entupimentos de tubulações (bloqueios) são justamente aqueles onde o concreto apresenta fluxo turbulento.

---

<sup>2</sup> A Putzmeister, com sede na Alemanha e 50 anos de experiência, é um dos maiores fabricantes de bombas de concreto no mundo.

Além disso, segundo o mesmo documento da Putzmeister (2004), as dificuldades de bombeamento podem ser divididas em dois estágios: o primeiro é a saída do concreto da bomba e o segundo é o movimento do concreto na tubulação. No segundo estágio, a dificuldade de bombeamento é variável e vai depender da configuração da tubulação (diâmetro, comprimento, número de curvas, altura de bombeamento, etc). Já no primeiro estágio, segundo este documento, o concreto tem que passar por uma grande redução da seção transversal da tubulação e esta pode consistir na maior dificuldade. Assim, a redução do diâmetro do pistão para o diâmetro da tubulação, que normalmente ocorre dentro da própria bomba, e/ou a redução do diâmetro original da tubulação para diâmetros menores, que facilitam o manuseio e ocorrem normalmente logo após a saída da bomba (Figura 3.2), caracterizam pontos cruciais para o bombeamento do concreto. Este documento enfatiza isto afirmando que, para bombeamentos convencionais (concretos de peso normal e sem pressões elevadas), se o concreto passar esta barreira, desde que não haja posteriores alterações significativas na linha de bombeamento, o concreto pode ser considerado bombeável. O ensaio que será proposto neste trabalho simula, dentro de certos limites, este efeito de redução de seção.



Figura 3.2 – Redução da seção da tubulação logo após a saída da bomba de concreto (Putzmeister, 2004).

### 3.3.1 Ensaio para determinação

Conforme mencionado anteriormente, não há um ensaio consagrado na literatura para avaliação da bombeabilidade. O que se tem são ensaios desenvolvidos para avaliação comparativa de misturas, buscando correlações com casos práticos (KAPLAN, DE LARRARD & SEDRAN, 2005). Desta maneira, a única forma de avaliar verdadeiramente a bombeabilidade de uma mistura é bombeando-a em uma tubulação real. No entanto, este procedimento além de difícil execução, é demorado, oneroso, arriscado e exige uma grande quantidade de material o que o torna estritamente difícil de ser executado, principalmente em estudos como este, em que foram avaliados diferentes agregados que foram obtidos por beneficiamento manual.

Dentre os ensaios já propostos para avaliar bombeabilidade, destaca-se o de Browne & Bamforth, em 1977. Este ensaio busca avaliar a capacidade de retenção de água de um concreto fresco quando submetido a determinada pressão. Assim, estar-se-ia avaliando a estabilidade da mistura e sua capacidade de reter água, comportando-se como um filtro entupido. Neste ensaio, uma amostra do concreto é colocada dentro de um recipiente cilíndrico que contém um material poroso e uma saída de água na parte inferior (Figura 3.3). Na parte superior, com auxílio de um pistão, aplica-se a pressão sobre o concreto e então é avaliada a quantidade de água expulsa do concreto em função do tempo. Concretos capazes de manter maior quantidade de água por mais tempo tenderiam a causar menos bloqueios nas tubulações durante o bombeamento. Uma adaptação deste método, utilizado para avaliação de bombeabilidade de concretos leves, foi proposto por Nolan & Jan (1999). Neste caso, mede-se a deformação da mistura sob pressão e não a quantidade de água expulsa.

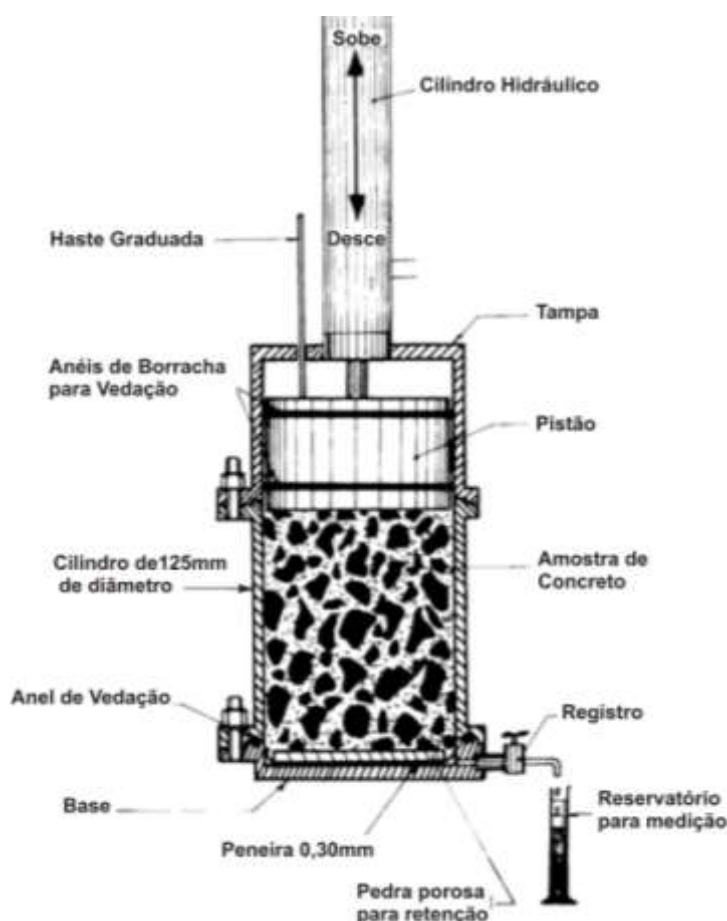


Figura 3.3 – Aparato para determinação da exsudação do concreto sob pressão (*Pressure bleed test apparatus* – Browne e Bamforth, 1977).

No entanto, conforme mencionado anteriormente, a estabilidade da mistura sob pressão é apenas um dos parâmetros influentes na bombeabilidade da mistura. Outros ainda precisariam ser avaliados.

Poucos anos depois, em 1980, Best & Lane também propuseram um ensaio para medir bombeabilidade. Neste, uma mistura de concreto é colocada dentro de um tubo circular de 5” (125mm) que possui uma alteração para seção elíptica em uma das extremidades. Na outra extremidade, aplica-se pressão sobre a mistura com auxílio de um pistão acoplado à uma bomba hidráulica (Figura 3.4) e então determina-se a pressão máxima para o escoamento da mistura. Estes autores ainda desenvolveram equipamentos para tentar avaliar bombeabilidade de pastas e de argamassas. Neste último, o aparato acabou nem sendo utilizado por problemas operacionais.

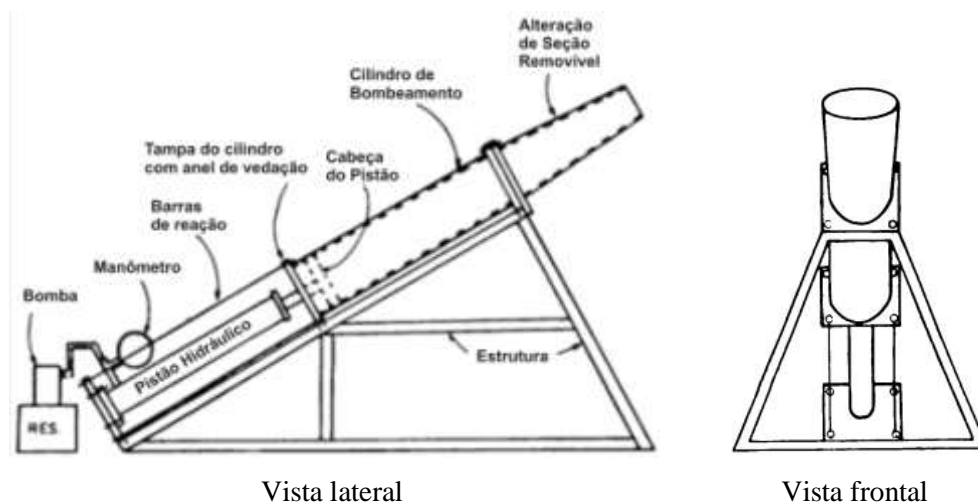


Figura 3.4 – Aparato para teste de bombeamento de concreto desenvolvido por Best & Lane (1980).

Provavelmente este aparato foi pouco utilizado devido ao seu grande tamanho, elevado custo relativo e dificuldade de fabricação, pois, segundo os próprios criadores, o contato entre a parede do cilindro e o êmbolo deve ser perfeita a fim de evitar perda de pasta ou água da mistura, o que é uma tarefa difícil. Além disso, conforme pode ser observado na Figura 3.6 e na Figura 3.7, as pressões obtidas com este aparato são consideravelmente menores que aquelas obtidas em casos reais de bombeamento e o aparato possui baixa sensibilidade para variações na mistura.

Posteriormente, foram utilizados ensaios para determinação das propriedades reológicas dos concretos buscando correlacioná-las com a bombeabilidade, merecendo destaque os trabalhos de Chiara Ferraris e François De Larrard (FERRARIS & DE LARRARD, 1998; DE LARRAD et al, 1997). No entanto, não tiveram grande aplicação provavelmente devido a dificuldade de acesso a estes ensaios.

Em 2000, Kaplan adaptando um reômetro de cilindros coaxiais (o BTRHEOM) desenvolveu o chamado tribômetro para avaliar as propriedades das misturas em movimento na interface com paredes de aço. Estes ensaios permitiram algumas descobertas interessantes e foram de grande valia para o entendimento dos fenômenos que ocorrem na pasta que envolve o

núcleo de concreto em movimento numa tubulação. Chapdelaine, em 2007, utilizou sistema semelhante avaliando as diferenças entre paredes de aço e de borracha, buscando explicações para o aumento de pressão de bombeamento quando da utilização de mangueiras de borracha em lugar de tubos de aço. Estes autores correlacionaram as propriedades obtidas nos estudos de laboratório com as obtidas em um circuito fechado de bombeamento e também com alguns casos reais. Chegaram à conclusão que os parâmetros tribológicos são melhor correlacionáveis com a bombeabilidade que os parâmetros reológicos, porém estes por si só não são suficientes para explicar todos os fenômenos envolvidos.

Além destes, segundo Tattersall & Banfill (1983) apud Koehler & Fowler (2004), o viscosímetro de tubo capilar de extrusão, que não é normalmente utilizado para medir propriedades de concretos em geral, também poderia ser utilizado para avaliar bombeabilidade. O equipamento consiste em um tubo com uma redução de seção, sendo que na maior seção um pistão força o material a escoar e sair na extremidade de menor seção (Figura 3.5). A pressão necessária para o deslocamento do material pode ser correlacionada com uma maior ou menor facilidade de bombeamento. Além disto, medindo-se a força aplicada pelo pistão e a taxa de fluidez do material para fora do tubo, poder-se-ia determinar a viscosidade plástica (KOEHLER & FOWLER, 2004).

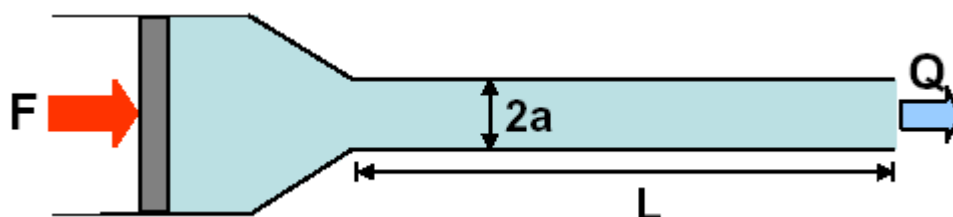


Figura 3.5 – Esquema de funcionamento de um viscosímetro de tubo capilar de extrusão (KOEHLER & FOWLER, 2004).

Segundo Melo (2005), outro ensaio que simula o movimento aproximado do concreto durante o bombeamento é o ensaio Orimet, desenvolvido por Bartos (1978) apud Koehler & Fowler (2003). No entanto, não foram encontrados na literatura registros de correlações deste ensaio com bombeabilidade do concreto.

### 3.3.2 Fatores que influenciam

Vários são os fatores que influenciam a facilidade de bombeamento de uma mistura de concreto, podendo ser intrínsecos à mistura, condicionados ao local de aplicação do concreto

(externos) e/ou relativos ao procedimento de bombeamento (KAPLAN, DE LARRARD & SEDRAN, 2005). Dos fatores externos, pode-se destacar:

- Configuração da tubulação: diâmetro, comprimento, material constituinte e número de curvas, reduções, etc;
- Altura (ou profundidade) de bombeamento.

De maneira geral, quanto menor o diâmetro, maior o comprimento e maior o número de curvas, reduções e outras peças especiais na tubulação, maior será a pressão necessária para o bombeamento de determinada mistura. Maiores alturas de bombeamento também exigem maiores pressões. Quanto ao material constituinte, mangueiras de borracha exigem pressões cerca de três vezes maior que tubulações de aço de mesmo diâmetro (ACI 304.2R-96; CHAPDELAINÉ, 2007).

O procedimento de bombeamento pode influenciar a adequabilidade de uma mistura ser bombeável, pois dependendo da pressão aplicada, da taxa de bombeamento, da imprimação aplicada na tubulação e principalmente de interrupções no bombeamento podem tornar uma mistura aparentemente bombeável em uma mistura não bombeável, com formação de bloqueios (KAPLAN, DE LARRARD & SEDRAN, 2005).

Dos fatores intrínsecos ao concreto, destacam-se:

- **Consistência:** Dentro de certos limites e desde que não haja segregação nem exsudação do concreto, quanto maior o abatimento do concreto, maior a facilidade de bombeamento (ANDERSON, 1977; BEST & LANE, 1980; ACI 304.2R-96). Concretos com abatimento muito elevado, podem tender a segregação e isso dificultar o bombeamento. Um exemplo da influência da consistência, determinada pelo abatimento de tronco de cone, na facilidade de bombeamento pode ser observado na Figura 3.6. Nesta figura também são apresentados os resultados obtidos com aparato desenvolvido por Best & Lane (1980) para concretos semelhantes.



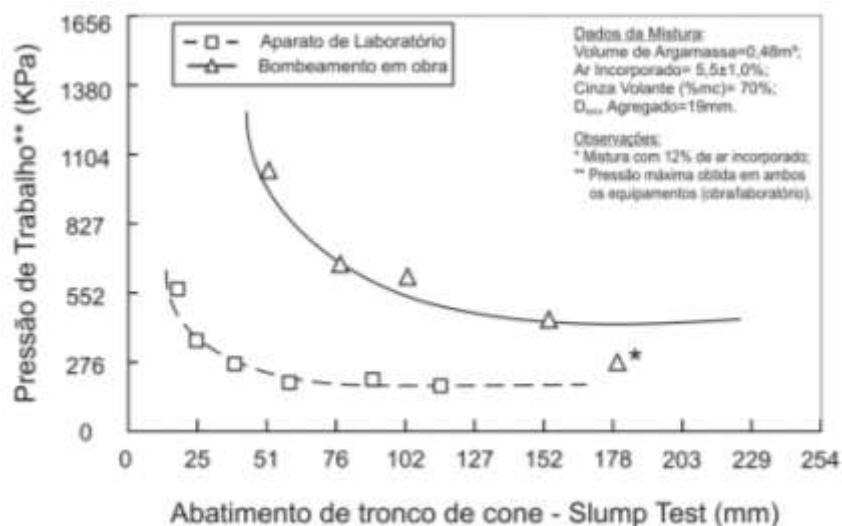


Figura 3.6 – Variação da pressão de bombeamento em função da consistência do concreto (adaptado de BEST & LANE, 1980).

- Teor de argamassa:** De maneira geral, quanto maior o teor de argamassa, menor a pressão necessária para uma mesma situação de bombeamento (ANDERSON, 1977; BEST & LANE, 1980; ACI 304.2R-96). Teores maiores de argamassa facilitam o bombeamento, pois aumentam a lubrificação da mistura em contato com a tubulação e facilitam a acomodação dos agregados graúdos que se deslocam pelo centro da tubulação. A influência do teor de argamassa na pressão de bombeamento pode ser observada na Figura 3.7. Nesta figura também são apresentados os resultados obtidos com aparato desenvolvido por Best & Lane (1980) para concretos semelhantes.

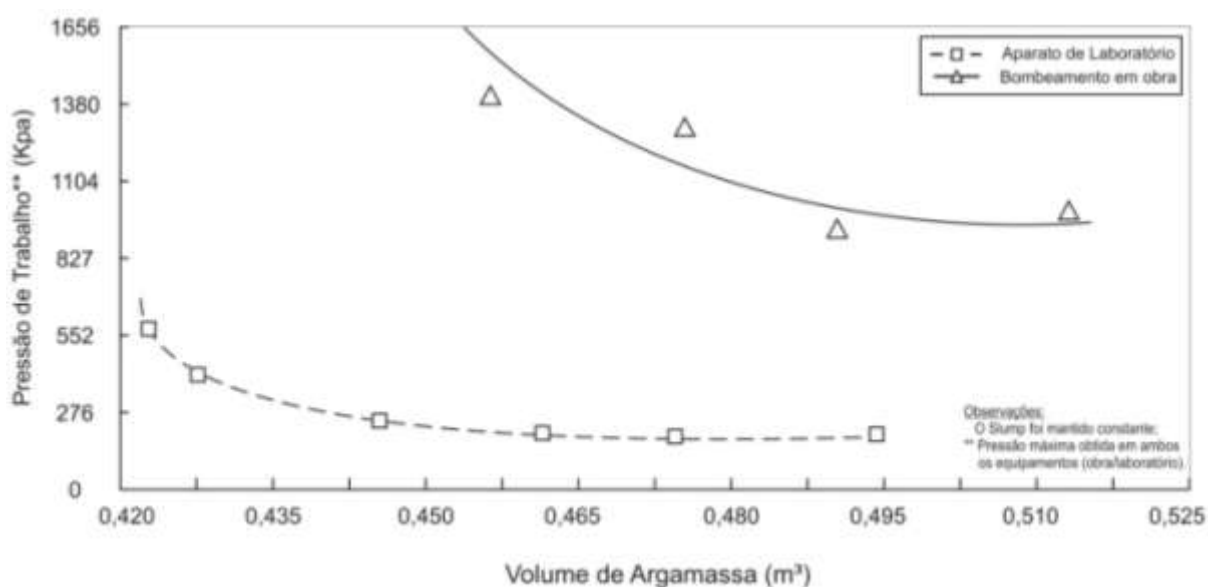


Figura 3.7 – Influência do teor de argamassa na pressão de bombeamento do concreto (adaptado de BEST & LANE, 1980).

- Forma dos grãos:** Há um consenso na literatura que grãos mais angulosos e lamelares demandam maior pressão de bombeamento para um mesmo teor de argamassa que grãos arredondados e esféricos. Esta diferença é mais acentuada para baixos teores de argamassa. Quanto melhor a forma, menor o atrito entre os grãos e com as paredes da tubulação, menor a superfície específica e maior a facilidade de acomodação destes pela argamassa (ANDERSON, 1977; BEST & LANE, 1977; ACI 304.2R-96). Na Figura 3.8 é representada esta afirmação.

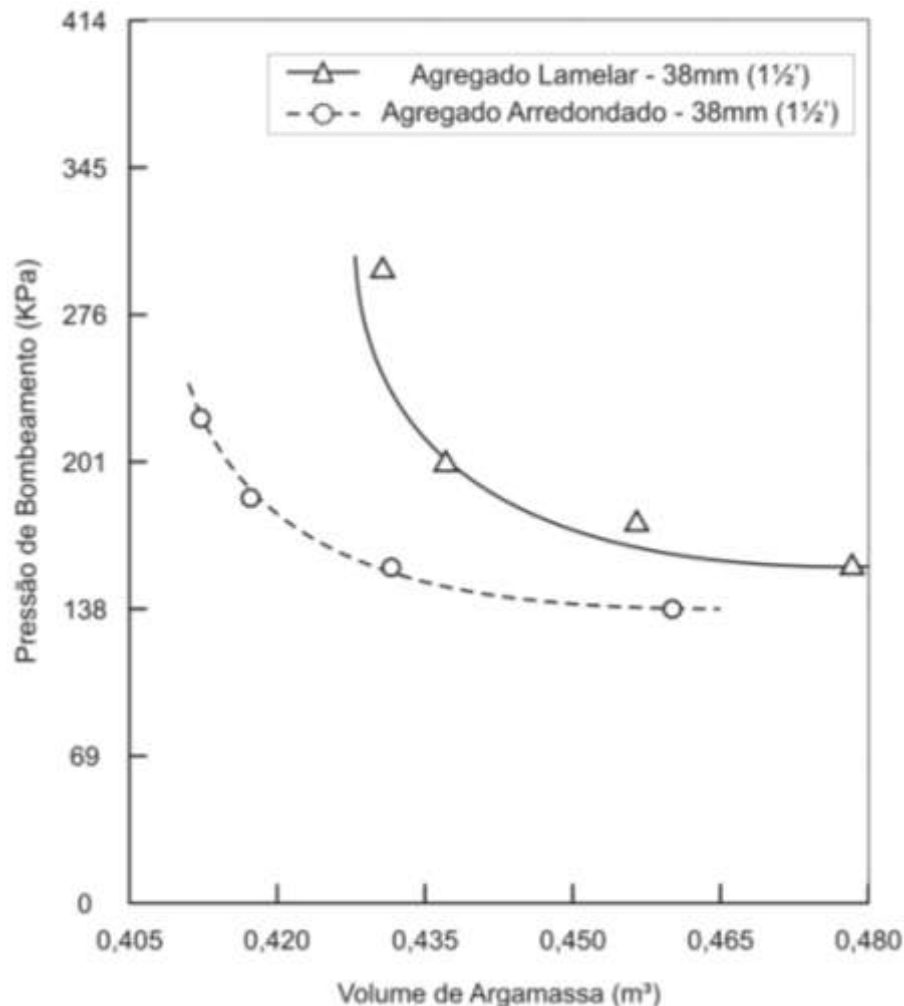


Figura 3.8 – Influência da forma dos grãos na pressão de bombeamento do concreto para diferentes teores de argamassa (BEST & LANE, 1980).

- Teor de cimento e/ou de adições minerais:** Há um consenso na literatura de que quanto maior o teor de materiais cimentícios (ou de outros materiais finos), para um mesmo volume de argamassa, maior a facilidade de bombeamento. Best & Lane (1980) obtiveram que a quantidade de cinza volante em relação ao peso de cimento foi menos influente que os parâmetros de abatimento e volume de argamassa mencionados anteriormente.

Além dos fatores já mencionados, algumas prescrições básicas, oriundas da prática de bombeamento, merecem destaque. A própria ACI 304.2R-96 recomenda levar em consideração as experiências prévias, referindo-se principalmente à curva granulométrica do agregado total. Anderson, em 1977, já ressaltava a importância deste parâmetro, recomendando inclusive curvas granulométricas padronizadas, sendo estas também apresentadas no documento do ACI. Anderson (1977) afirma ainda que uma atenção especial deve ser dada a fração mais fina, sugerindo que 15 a 30% dos grãos devem passar na peneira de abertura de 300 $\mu$ m e 5 a 10% devem passar na de 150 $\mu$ m. No entanto, deve-se evitar teores muito elevados destas frações pois pode-se aumentar significativamente a demanda de água (ACI 304.2R-96). Estes dois documentos ainda enfatizam que a adição de um pouco de areia natural fina, com grãos esféricos e arredondados, pode trazer benefícios para a bombeabilidade.

Conforme mencionado anteriormente, a consistência da mistura influencia a facilidade de bombeamento. No entanto, o ACI 304.2R-96 destaca que obter misturas mais plásticas pela composição de agregados é muito mais interessante que adicionar mais água para se obter esta plasticidade. Este documento ainda resalta que, o agregado miúdo pode exercer papel mais importante que o agregado graúdo, pois juntamente com o cimento e a água, o agregado miúdo compõe a argamassa que carrega os agregados graúdos em suspensão durante o bombeamento.

Dentre as recomendações básicas para a dosagem de concretos bombeáveis, destacam-se aquelas quanto à forma dos agregados, que devem ser preferencialmente arredondados e esféricos, e ao tamanho máximo do agregado, que deve ser limitado a 1/3 do menor diâmetro interno da bomba ou da tubulação para formas angulares e 2/5 para agregados arredondados (ANDERSON, 1977; ACI 304.2R-96). Além disso, segundo Anderson (1977), o teor de ar incorporado e a presença de aditivos devem ser considerados na dosagem de um concreto bombeável.

Além destes, conforme já mencionado, o tipo e a potência do equipamento utilizado também devem ser considerados no momento de definição de um bombeamento de concreto. No entanto, não cabe neste trabalho pormenorizar estes equipamentos. Maiores detalhes sobre estes, podem ser observados nos manuais dos próprios fabricantes, no ACI 304.2R, no trabalho de Chapdelaine (2007) e também em Tartuce & Giovannetti (1990). Estes documentos trazem ainda ábacos nos quais tendo as informações de diâmetro e comprimento da tubulação, altura de bombeamento, abatimento do concreto e taxa de bombeamento (m<sup>3</sup>/hora), pode-se obter uma noção de pressão que será necessária para determinado bombeamento.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Para cumprir com o objetivo principal deste trabalho, dentro de condições exeqüíveis, foi desenvolvida uma metodologia de estudos a qual está dividida em duas partes: em uma primeira fase, um estudo em argamassa e, na segunda, em concreto. O estudo em argamassa foi seletivo e visou definir, no universo de combinações proposto, algumas composições granulométricas para que estas fossem posteriormente testadas em concreto.

Por questões de estrutura laboratorial e logística, a etapa de estudos em argamassa foi desenvolvida no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (LMCC-UFSC) e a em concreto foi realizada no Centro Tecnológico da Engemix de Florianópolis/SC (CT-Engemix/SC).

Neste capítulo, primeiramente são apresentadas as variáveis estudadas (alterações nas areias de britagem e composições com areia natural) e, em seguida, é fornecida uma descrição dos materiais utilizados no trabalho, bem como suas formas de obtenção. Por fim, é apresentada a metodologia de ensaios adotada.

Vale ressaltar que, para definição desta metodologia, foram realizados alguns estudos preliminares para definição dos ensaios propostos em argamassas e concretos assim como um estudo piloto, os quais são apresentados no Anexo B e C, respectivamente.

### **4.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS**

Conforme exposto no item 1.2, este trabalho tem por objetivo principal estudar a influência da composição granulométrica e da forma dos grãos de agregados miúdos de britagem, bem como a interação entre estas duas características quando este tipo de agregado é parcialmente substituído por areia natural, nas propriedades do estado fresco e endurecido de concretos de cimento Portland. Para cumprir com este objetivo, foram definidas as seguintes variáveis a serem estudadas para os agregados miúdos de britagem:

- **Forma dos grãos:** foi definida uma fonte mineralógica (uma pedreira) da qual foram obtidas duas amostras de pó-de-pedra com forma distinta dos grãos, uma mais angulosa e lamelar (denominada ao longo do trabalho de **lamelar**) e outra mais arredondada e cúbica, ou equidimensional (denominada neste trabalho de **arredondada**). As amostras foram obtidas na mesma pedreira antes e após a implantação de um britador do tipo VSI no circuito de britagem;
- **Malha de peneiramento do pó-de-pedra (ponto de corte):** foram definidas 3 malhas para o peneiramento de cada pó-de-pedra, arredondado e lamelar, visando alterar o teor da fração mais grossa desse material pela mudança na dimensão máxima do agregado miúdo. As malhas adotadas foram: **2,80mm; 3,36mm e 4,00mm**. Estas aberturas correspondem as malhas ASTM Nº 7, 6 e 5, respectivamente, e encontram-se disponíveis comercialmente;
- **Teor de material pulverulento:** definiram-se três teores de material pulverulento para cada agregado miúdo de britagem, obtidos por variação na forma e no ponto de corte, sendo eles de aproximadamente 7,5; 15,0 e 22,5% em relação à “areia base”, conforme será explicado no item 4.3.5.1. Estes teores serão referenciados no decorrer do trabalho por **P1, P2 e P3**, respectivamente.

Dentre as justificativas para as variáveis escolhidas para avaliação nas areias de britagem, destaca-se o interesse em investigar qual o benefício proporcionado pela melhora na forma e na angulosidade dos grãos dos agregados miúdos de britagem. Tendo em vista que muitas pedreiras têm investido em equipamentos britadores do tipo VSI, que tem a prerrogativa de arredondar mais os grãos e torná-los mais equidimensionais, buscar-se-á contribuir para o conhecimento do real benefício trazido por este tipo de equipamento.

As demais variações a serem estudadas (peneiramento e remoção de material pulverulento) correspondem a beneficiamentos simples e fáceis de serem aplicados ao pó-de-pedra, visando à produção de areia de britagem para concreto de cimento Portland. Estes beneficiamentos, se comparados a outros, como a separação em diversas frações para posterior composição em curva granulométrica específica, por exemplo, podem ser considerados menos onerosos e de maior facilidade de implantação e operação em plantas de pedreiras existentes. Além disso, este tipo de beneficiamento tem potencial de gerar menos resíduo, tendo em vista que o material retido na peneira de corte poderia ser re-britado até passar nesta malha, incorporado ao pedrisco (brita 4,75 / 12,5 – NBR 7211:2005) e/ou então comercializado separadamente de acordo com a demanda local. Quanto ao material pulverulento, este teria

algumas destinações, conforme bem listado por Cuchierato (2000), podendo até ser comercializado como fíler, inclusive para alguns tipos de concreto de cimento Portland.

O peneiramento do pó-de-pedra em malhas com aberturas maiores que 2,80mm, tem justificativa em um trabalho tecnológico desenvolvido no GTec-UFSC para uma pedreira da região da grande Florianópolis/SC, onde foi observado que o peneiramento nesta malha conduziu a uma areia de britagem com bom desempenho em concreto, ficando, inclusive, levemente demasiada fina quando composta com 35% de areia natural de duna ( $MF \approx 0,80$ ). Trabalho parecido, realizado para uma pedreira do interior do Paraná e utilizando a malha de 3,00mm para o peneiramento de corte, conduziu a resultados semelhantes. Além disso, o peneiramento em malhas inferiores poderia gerar um excesso de material remanescente, contribuindo para inviabilidade econômica da implantação deste beneficiamento em pedreiras.

Quanto à quantidade de material pulverulento, foram estudados os teores de aproximadamente 7,5; 15,0 e 22,5% em relação à “areia base”, que corresponde ao material compreendido entre as malhas 2,80mm e 0,075mm (conforme será melhor explicado no item 4.3.5.1). Esta fração foi denominada de “areia base” pois esta permanece inalterada e está presente em todas as configurações testadas para as areias de britagem. Por este motivo, todos os cálculos de teor de material pulverulento se referem a ela. O menor teor de material pulverulento sugerido corresponde a um teor compatível com aquele que é encontrado em areias de britagem que passaram por sistemas de remoção de microfinos com utilização de água. Já o maior é o próprio teor de material pulverulento do material utilizado, estando coerente com os teores máximos observados em outros pós-de-pedra (cerca de 13% se considerado em relação a todo o material passante na malha 4,80mm).

Além das alterações no pó-de-pedra, cada combinação de agregado miúdo de britagem obtida foi composta com quatro diferentes teores de uma areia natural fina ( $MF \approx 0,80$ ), nas proporções de:

- **0% de areia natural:** 100% da areia de britagem;
- **20% de areia natural:** substituição volumétrica de 20% da areia de britagem;
- **35% de areia natural:** substituição volumétrica de 35% da areia de britagem;
- **50% de areia natural:** substituição volumétrica de 50% da areia de britagem.

Este tipo de areia natural, empregada neste trabalho, tem sido largamente utilizada por empresas produtoras de concreto da região da grande Florianópolis, e também da Grande São Paulo (lá conhecida como “areia rosa”), em composições com agregados miúdos de britagem.

Foram avaliadas 36 combinações entre as variáveis da areia de britagem (ponto de corte e teor de material pulverulento) e da composição com areia natural para cada forma de grão (lamelar e arredondada), totalizando 72 combinações. Um fluxograma da obtenção das 36 combinações avaliadas para cada forma de grão pode ser observado na Figura 4.1.

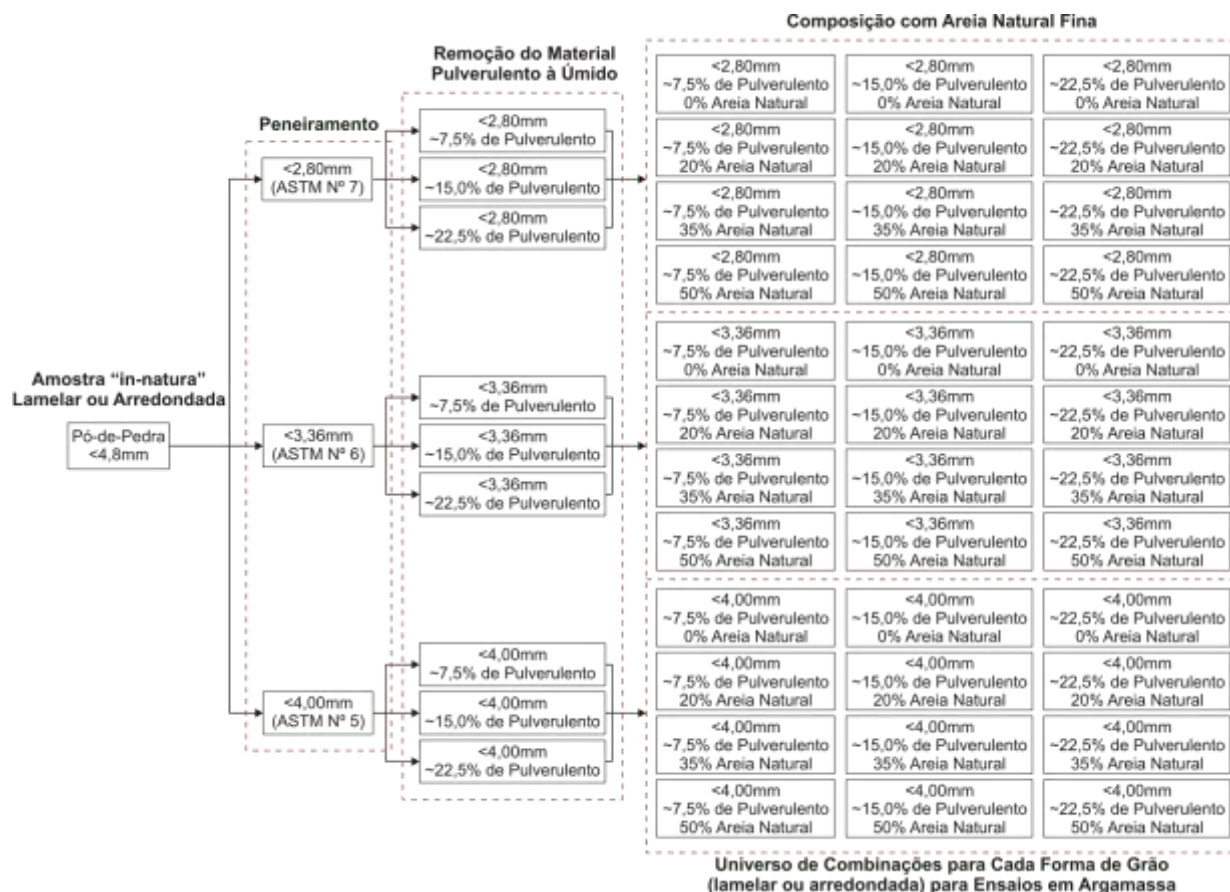


Figura 4.1 – Universo de combinações estudado: alterações na areia de britagem e teor de composição com areia natural.

## 4.3 MATERIAIS EMPREGADOS

### 4.3.1 Cimento

Em todo o trabalho, incluindo os estudos preliminares e piloto, foi utilizado cimento do tipo CP IV-RS, classe 32, da Votorantim Cimentos, proveniente da fábrica de Rio Branco do Sul/PR. Este tipo de cimento, fornecido apenas a granel, é comumente empregado por centrais dosadoras de concreto da região Sul do Brasil, principalmente no Paraná e Santa Catarina. As propriedades físicas, químicas e mecânicas, referentes às médias dos meses de novembro e dezembro de 2007 e de janeiro de 2008 são apresentadas na Tabela 4.1. Estas propriedades foram fornecidas pelo próprio fabricante do cimento.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas, químicas e mecânicas médias do cimento.

Ensaio Químicos - RX - Método de Ensaio NBR 14656/01	NBR	Un.	Valores Médios		
			nov/07	dez/07	jan/08
Perda ao Fogo - PF	NM18/04	%	3,28	3,27	3,26
Óxido de Magnésio - MgO	NM21/04	%	4,77	4,68	4,82
Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>	NM16/04	%	2,79	2,68	2,63
Resíduo Insolúvel - RI	NM22/05	%	29,2	29,7	29,3
Equivalente Alcalino em Na <sub>2</sub> O *	-	%	0,90	0,90	0,93

\* (0,658 x K<sub>2</sub>O% + Na<sub>2</sub>O%)

Ensaio Físicos	NBR	Un.	Valores Médios		
			nov/07	dez/07	jan/08
Área Específica (Blaine)	NM76/98	m <sup>2</sup> /Kg	473	476	478
Massa Específica	NM23/01	g/cm <sup>3</sup>	2,83	2,83	2,83
Resíduo na Peneira 0,075mm (#200)	11579/91	%	0,24	0,27	0,19
Resíduo na Peneira 0,044mm (#325)	-	%	1,68	1,61	1,48
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/02	%	30,7	30,5	30,5
Início de Pega	NM65/03	min	251	235	242
Fim de Pega	-	min	324	306	313
Expansibilidade Le Chatelier - a Quente	11582/91	mm	0,0	0,0	0,0

Ensaio Mecânicos - Resistência à Compressão (MPa) - NBR 7215/96						
Idade (Dias)	novembro/2007		dezembro/2007		janeiro/2008	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
3	25,9	0,8	25,6	1,1	25,1	0,7
7	30,5	1,3	30,1	1,3	29,6	0,8
28	42,4	0,7	41,6	0,9	41,6	0,8

Para cada etapa do trabalho (estudos preliminares e piloto, estudo em argamassa e estudo em concreto) foi coletado um lote de cimento em uma central de concreto de Florianópolis, compatível com as necessidades de cada etapa. Este cimento foi armazenado em sacos plásticos bem vedados, os quais eram colocados dentro de tambores plásticos com tampa de vedação.

### 4.3.2 Aditivo

Neste trabalho, tanto nos estudos em concreto quanto em argamassa, foi empregado um aditivo plastificante polifuncional à base de lignossulfonatos, produzido pela empresa Rheotec Indústria e Comércio de Aditivos Ltda. Este tipo de aditivo está disponível comercialmente e sua utilização, ou não, pode afetar significativamente as características das misturas, tanto no estado fresco quanto endurecido. A decisão de sua utilização foi tomada, tendo em vista que atualmente a grande maioria das centrais dosadoras emprega esse tipo de aditivo em seus concretos. Foi utilizado o aditivo Tec-Mult 440LF, cujas especificações técnicas, fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 4.2.



Tabela 4.2 - Características técnicas do aditivo Tec-Mult 440LF utilizado.

Função principal	Plastificante (NBR 11768 - tipo P e ASTM C 494 - tipo A e F)
Base química predominante	Lignossulfonatos
Aspecto	Líquido de cor castanho escuro
pH	10,0 ± 1,0
Massa específica	1,20 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	38,80 ± 1,90%

### 4.3.3 Água

A água utilizada provinha da rede de abastecimento da universidade, no caso dos testes realizados no LMCC-UFSC, e de uma fonte natural no caso dos testes realizados no CT Engemix/SC.

### 4.3.4 Agregados graúdos

Nos estudos em concreto, foram empregados dois agregados graúdos utilizados por uma central dosadora de concreto da grande Florianópolis. Foram empregados agregados de classificação 4,75/12,5 e 9,5/25, segundo NBR 7211:2005 (antiga brita 0 e brita 1, respectivamente), ambos de origem granítica porém de fontes mineralógicas (pedreiras) distintas. As características destes agregados são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Características físicas dos agregados graúdos.

Parâmetro		Agregados Graúdos	
		Brita 4,75 / 12,5	Brita 9,5 / 25,0
Granulometria - NBR NM 248:2003 % Retida Acumulada	Abertura das peneiras (mm)	25,0	0
		19,0	0
		12,5	0
		9,5	2
		6,30	50
		4,75	85
		0,075	99
		Fundo	100
Dim. Máx. Caract. (mm) - NBR 7211:2005		9,5	19,0
Módulo de Finura - NBR 7211:2005		5,77	6,77
Material Pulverulento - NBR NM 46:2003		1,0%	1,1%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) - NBR NM 52:2003		2,684	2,637
Coeficiente de forma - Método GTec-UFSC		0,208	0,171

Os métodos de ensaio utilizados na caracterização dos agregados estão referenciados por suas normas ao lado de cada característica avaliada. Vale ressaltar que o coeficiente de forma foi determinado segundo metodologia desenvolvida pelo GTec-UFSC, que tem como base a norma francesa AFNOR XP P18-540 e vem sendo aprimorada ao longo dos anos (WEIDMANN, 2005 e OLIVEIRA, 2004). Esta metodologia está detalhada no Anexo A.

#### **4.3.5 Agregados miúdos**

Em todo o estudo definitivo (etapa em argamassa e em concreto) foram utilizados basicamente três agregados miúdos. A partir destes é que foram obtidas as 72 composições granulométricas apresentadas no item 4.2 e que foram avaliadas neste trabalho.

Um dos agregados miúdos utilizados foi uma areia natural fina proveniente de Imbituba/SC (95 km ao sul de Florianópolis/SC). Trata-se de uma areia quartzosa, extraída de depósitos eólicos (dunas) e utilizada por várias empresas produtoras de concretos e argamassas em toda a grande Florianópolis/SC. Principalmente nas centrais de concreto e nas empresas de pré-moldados, esta areia é utilizada quase sempre em composição com uma areia de britagem. Suas características são apresentadas no item 5.2.1.

Além desta, foram utilizados dois agregados miúdos de britagem, principal objeto de estudo desta pesquisa, que foram obtidos de uma pedreira localizada no sul do estado, na cidade de Maracajá/SC (205 km ao sul de Florianópolis/SC). Esta pedreira foi selecionada em função da implantação de um equipamento de britagem do tipo VSI em suas instalações durante o período de definição deste trabalho. Assim, foram coletadas amostras de pó-de-pedra desta pedreira antes e depois da instalação do britador VSI, ou seja, foram obtidos agregados miúdos de mesma fonte mineralógica, porém produzidos com diferentes processos de britagem e, por isso, supostamente com diferentes formas dos grãos.

O material britado pela pedreira selecionada é da família basáltica, cujas propriedades físicas dos minerais que as compõe (planos de clivagem, xistosidade, etc) tendem a formação de grãos mais lamelares e alongados. Os equipamentos de britagem empregados inicialmente por esta pedreira, pouco contribuíam para a melhoria desta característica do material. Sendo assim, tinha-se um pó-de-pedra com grãos lamelares e alongados. Os equipamentos utilizados e a seqüência de britagem empregada inicialmente por esta pedreira podem ser observados na Figura 4.2. Os britadores são indicados em amarelo e os conjuntos de peneiras em verde.

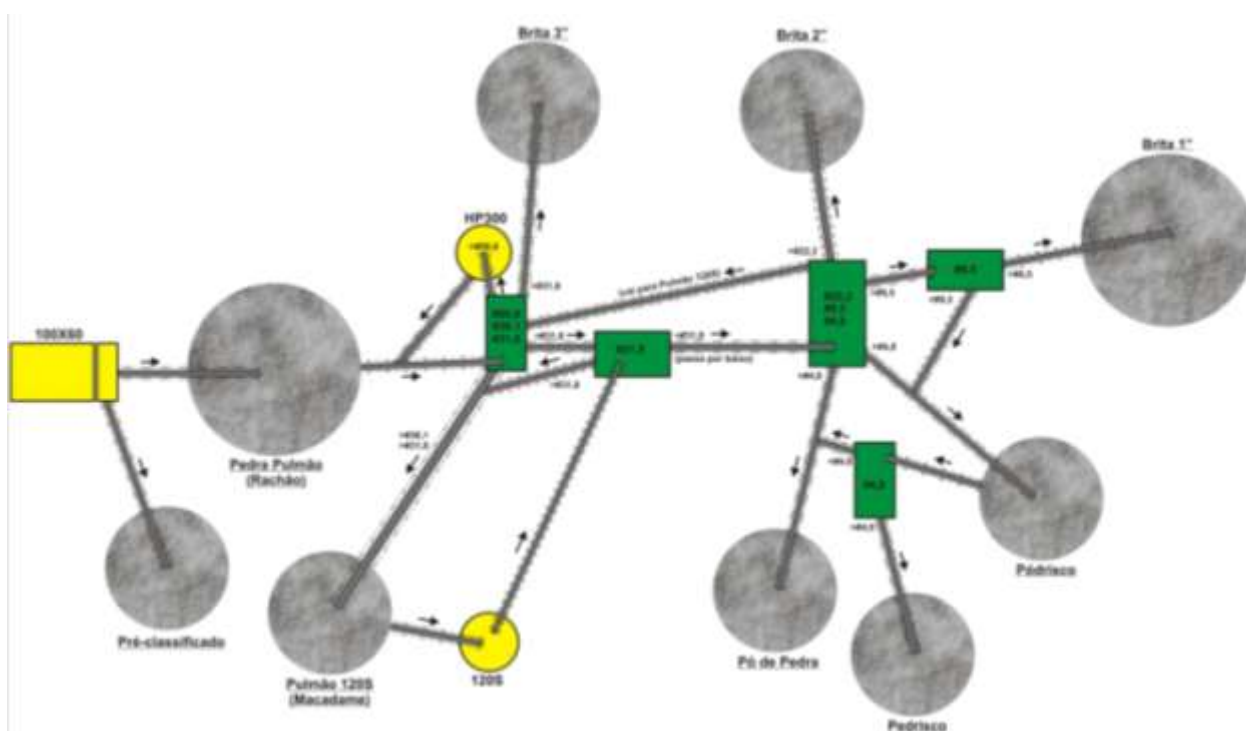


Figura 4.2 – Seqüência de britagem e equipamentos utilizados inicialmente pela pedreira.

Observa-se na Figura 4.2, a utilização de um britador primário de mandíbulas e de britadores cônicos como secundário e terciário na seqüência de britagem. Numa seqüência linear de britagem, sem re-britagens, a rocha passaria pelo britador primário de mandíbulas (100x60), pelo britador secundário cônico (HP300) e por fim pelo britador terciário cônico (120S), sendo então peneirado e depositado nas pilhas.

Objetivando melhorar a qualidade de seu material britado, esta pedreira investiu na aquisição de um britador do tipo VSI que, conforme mencionado anteriormente, tem a prerrogativa de contribuir para o arredondamento dos grãos. Após instalação do britador VSI, da marca REMco, a seqüência de britagem foi alterada, ficando com a configuração apresentada na Figura 4.3.

Como pode ser na Figura 4.3, o britador VSI foi implantado como um britador quaternário, sendo que todo material britado, após passar pelos britadores já mencionados, passaria por este britador para melhorar a forma dos grãos.

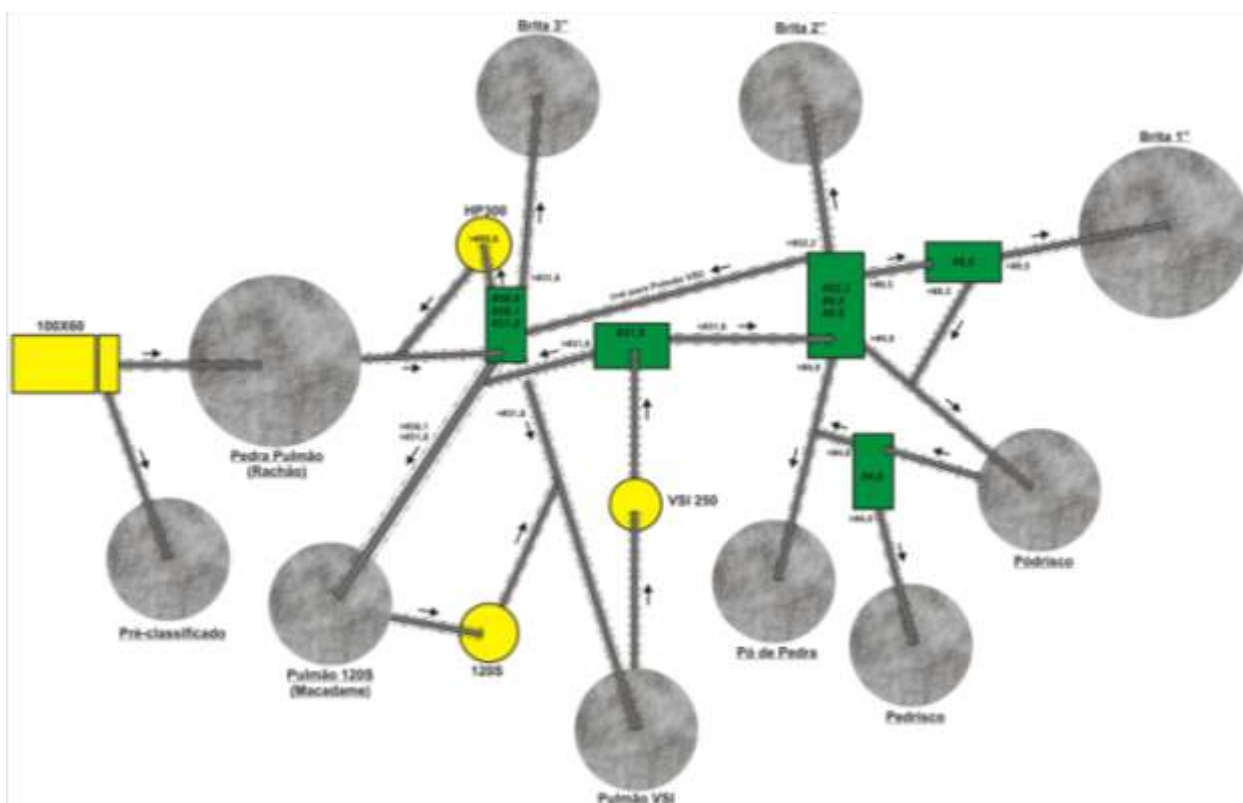


Figura 4.3 – Nova seqüência de britagem após aquisição do britador VSI pela pedra.

Vale ressaltar que, conforme mencionado no item 4.2, a amostra coletada antes da implantação do britador VSI foi denominada de **lamelar** e simbolizada pela letra “**L**” no decorrer do trabalho. Já o pó-de-pedra coletado após a implantação deste equipamento foi denominada de **arredondado** e simbolizada pela letra “**A**”.

As amostras foram obtidas na pedreira com 20 dias de diferença na coleta, sendo que o pó-de-pedra lamelar foi obtido 5 dias antes da implantação do britador do tipo VSI no circuito de britagem e o pó-de-pedra arredondado, 15 dias após o início de funcionamento do mesmo. Optou-se em deixar a pedreira operar por um certo período após a implantação do novo britador para que a coleta da amostra fosse realizada com a pedreira em regime normal de produção, minimizando possíveis efeitos de ajuste e adequação do novo equipamento e da nova seqüência de britagem.

Os materiais foram coletados na pedreira, na pilha dos agregados, sendo previamente revolvidos por diversas vezes por pá-carregadeira a fim de se obter uma amostra homogênea e representativa. Os materiais coletados na pedreira (pós-de-pedra) foram acondicionados em tambores e transportados para o CT Engemix/SC, onde foram realizados os beneficiamentos necessários (peneiramento e lavagem).

#### 4.3.5.1 Preparo e obtenção das diversas areias de britagem

Para cada pó-de-pedra coletado (lamelar ou arredondado), foram preparadas 9 areias de britagem com diferentes peneiras de corte e teores de material pulverulento, conforme as combinações apresentadas no item 4.2. Cada pó-de-pedra coletado passou por um processo de peneiramento e remoção de material pulverulento à úmido conforme será apresentado neste item.

Primeiramente, cada pó-de-pedra (lamelar e arredondado) foi peneirado em peneiras de malha 2,80mm, menor peneira de corte do agregado miúdo de britagem avaliada neste trabalho, separando em material retido e material passante. Devido à grande quantidade de material a ser peneirado, fez-se inicialmente um peneiramento mecânico em peneiras quadradas de 50cm de lado (Figura 4.4) e malha igual ou menor que 2,80mm. Posteriormente, o material retido neste peneiramento mecânico era peneirado manualmente em peneiras de malha 2,80mm para que se obtivesse maior precisão e eficiência na separação.



Figura 4.4 – Peneiramento mecânico da areia de britagem.

Todo material retido na malha 2,80mm no peneiramento manual era posteriormente peneirado, também manualmente, nas outras duas malhas de corte avaliadas nesse trabalho: 3,36 e 4,00mm. Após esse peneiramento, o material retido na peneira 4,00mm era descartado e os demais separados nas frações 2,80-3,36mm e 3,36-4,00mm (retido-passante). Estas frações, retidas nas peneiras 2,80 e 3,36, eram lavadas separadamente utilizando água em abundância e jato de pressão sobre uma peneira de malha de 2,00mm para remoção do material pulverulento aderido aos grãos. Na seqüência, estas frações eram então secas e ensacadas separadamente para

posterior utilização. Vale ressaltar que este procedimento foi feito tanto para a areia de britagem lamelar quanto para a arredondada.

Já o material passante na peneira 2,80mm, ainda em estado úmido, era homogeneizado em betoneira de eixo inclinado e separado em duas metades. Uma metade era seca ao sol e armazenada. Já a outra era lavada em caixas plásticas, utilizando-se um procedimento pré-definido, para remoção de parte do material pulverulento. Vale ressaltar que outras metodologias foram avaliadas para remoção parcial do material pulverulento à úmido, incluindo a lavagem da areia de britagem dentro de betoneiras de eixo inclinado. No entanto, a metodologia mais eficiente e que apresentou menor variabilidade do teor de microfinos do material beneficiado foi a adotada neste trabalho, a qual é descrita a seguir:

1. Adicionavam-se areia de britagem e água dentro da caixa plástica na proporção 1:2 (areia:água), sendo que a areia era medida em volume unitário úmido;
2. Com auxílio de uma pá (Figura 4.5a), agitava-se a mistura por cerca de 30s deixando-se repousar ao final por aproximadamente 15s (Figura 4.5b);
3. Vertia-se a solução com parte do material em suspensão em duas peneiras sobrepostas com malhas de 0,15mm e 0,075mm (Figura 4.5c e d). O material passante na peneira 0,075mm era descartado e o material retido nas duas peneiras retornava à caixa (Figura 4.5e);
4. Nova quantidade de água era adicionada, conforme volume pré-estabelecido no item 1, e repetia-se os procedimentos 2 e 3 por um total de 7 vezes;
5. Ao final das 7 seqüências de lavagem, a areia de britagem lavada era espalhada sobre uma lona plástica e deixada secar ao sol (Figura 4.5f);
6. Durante o processo de secagem, a areia de britagem era homogeneizada por diversas vezes e quando estava praticamente seca era armazenada em tonéis plásticos até sua utilização.

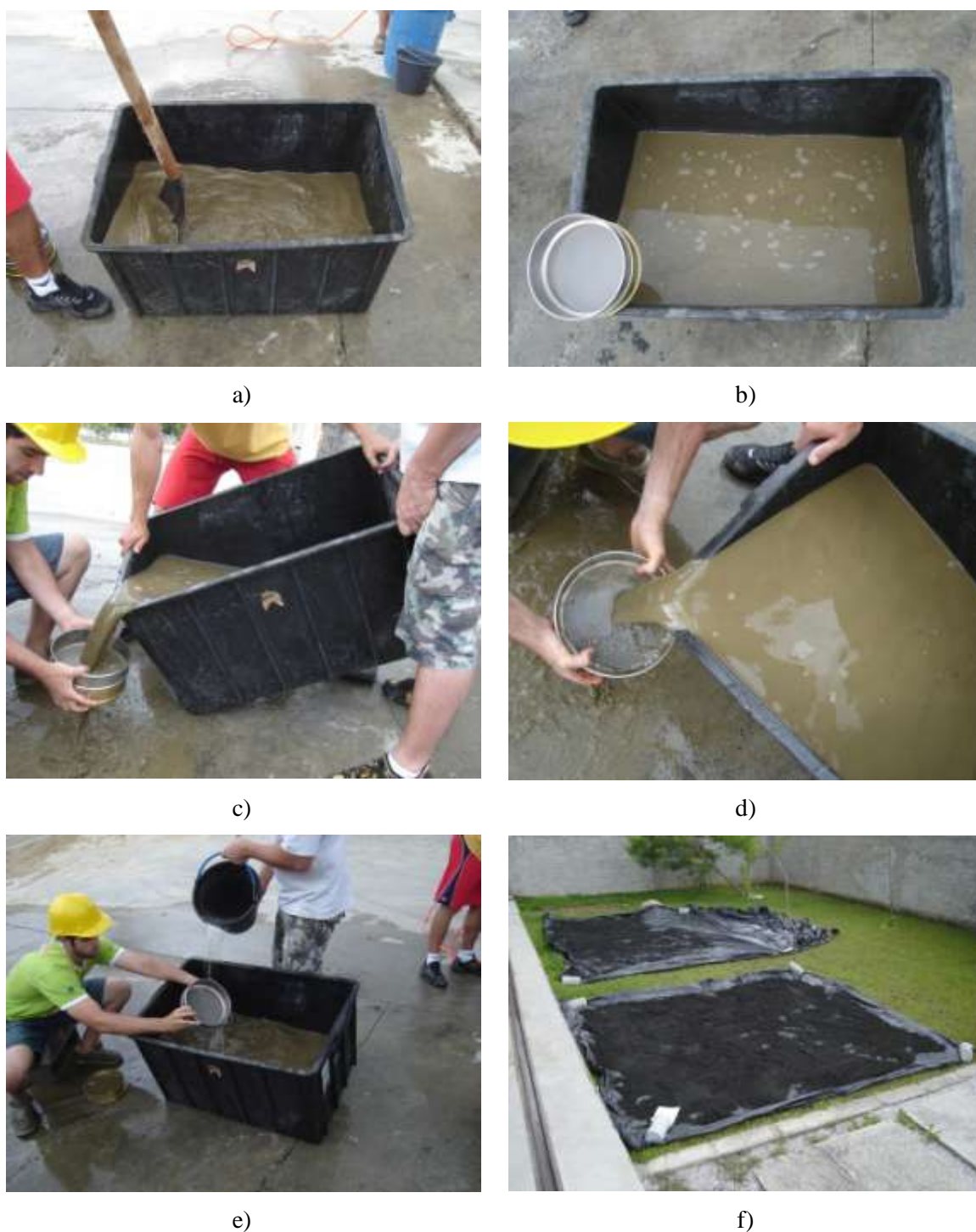


Figura 4.5 – Procedimento adotado para a lavagem das areias de britagem: a) mistura da areia e água na proporção 1:2 (areia:água, em volume unitário); b) repouso da mistura por cerca de 15s; c) vertendo a solução no conjunto de peneiras; d) material retido nas peneiras; e) retorno do material retido para a caixa e adição de nova quantidade de água; e f) secagem do material ao sol sobre lonas plásticas.

Ao final de todo esse processo, para cada forma de grão (pó-de-pedra lamelar e arredondado), tinham-se as seguintes frações separadas:

- Fração passante na malha de 4,00mm e retida na de 3,36mm (doravante representado por 4,00mm), lavada e seca;
- Fração passante na malha de 3,36mm e retida na de 2,80mm (doravante representado por 3,36mm), lavada e seca;
- Fração passante na peneira 2,80mm, lavada e parcialmente seca (menor teor de material pulverulento – P1);
- Fração passante na peneira 2,80mm sem lavar e parcialmente seca (maior teor de material pulverulento – P3).

A partir destas quatro frações foram compostas as 9 areias de britagem a serem estudadas para cada forma de grão (arredondada e lamelar). Os três teores de material pulverulento estudados foram conseguidos pela utilização do material passante na 2,80mm lavado, do passante na 2,80 não lavado e de uma composição de 50% de cada um dos dois materiais. Os diferentes pontos de corte da areia de britagem foram obtidos pela re-introdução da fração retida nas peneiras de malha 2,80mm e 3,36mm a cada um dos materiais passantes na peneira 2,80mm (lavado, não lavado e composição dos dois). Vale ressaltar que as frações retidas nas peneiras de 2,80mm e de 3,36mm foram lavadas e secas para que não alterassem o teor de material pulverulento da composição, definido pelo teor contido na fração passante na malha de 2,80mm.

A re-introdução das frações retidas nas peneiras 2,80mm e 3,36mm era feita em proporções equivalentes às aquelas contidas originalmente na curva granulométrica de cada pó-de-pedra, cuja determinação era feita previamente.

Para poder realizar estas composições, buscando se aproximar da composição granulométrica original, foram adotados os seguintes procedimentos de cálculo:

1. A partir da composição granulométrica de cada pó-de-pedra coletado na pedreira (lamelar e arredondado), calculava-se o teor de material retido na peneira 2,80mm ( $g_1$ ) e na #3,36mm ( $g_2$ ) em relação ao somatório das percentagens do material passante na malha 2,80mm e retido na 0,075mm, denominada de “areia base” e representado por “x”;
2. Calculava-se o teor de material pulverulento do material passante na malha 2,80mm também em relação à “areia base” (x) tanto para a fração lavada (P1) quanto para a fração não lavada (P3), com base nos ensaios de granulometria feitos após o peneiramento e lavagem do material;
3. Para a composição do teor intermediário de material pulverulento, eram misturados proporções iguais das frações lavada e não lavada do material passante na peneira



2,80mm. O teor de material pulverulento em relação à “areia base” desta composição (P2) é dado pela média harmônica de P1 e P2 acrescidos de uma unidade, conforme Equação 14.

$$P2 = \left( \frac{2}{\frac{1}{1+P1} + \frac{1}{1+P3}} \right) - 1 \quad \text{Equação 14}$$

De posse destes parâmetros ( $g1(x)$ ,  $g2(x)$ ,  $x$ ,  $P1(x)$ ,  $P2(x)$  e  $P3(x)$ ) de cada pó-de-pedra (arredondado e lamelar) era possível calcular a quantidade a ser pesada de cada fração de material para qualquer massa necessária ( $y$ ) conforme a equação a seguir:

$$y = x + Pi(x) + g1(x) + g2(x) \quad \text{Equação 15}$$

onde:

$y$  = massa desejada da areia de britagem;

$x$  = massa da “Areia Base”;

$Pi(x)$  = teor de material pulverulento P1, P2 ou P3 em relação à Areia Base ( $x$ ), de acordo com cada areia de britagem;

$g1(x)$  = teor de material retido na peneira 2,80 em relação à Areia Base ( $x$ ), de acordo com cada areia de britagem;

$g2(x)$  = teor de material retido na peneira 3,36 em relação à Areia Base ( $x$ ), de acordo com cada areia de britagem.

*Observação:* a quantidade de material passante na peneira 2,80 equivale ao somatório de  $x$  e  $Pi(x)$ .

Um exemplo de aplicação do método é apresentado a seguir: *Para se pesar 1000,0 gramas da areia de britagem arredondada passante na peneira 4,00mm e com teor intermediário de material pulverulento (P2), deve-se pesar as seguintes frações de cada um dos 4 materiais disponíveis para esta forma de grão:*

*Dados obtidos do peneiramento:*

Peneira		% Retida - Material Arredondado		
		Pó-de-pedra "In Natura"	<2,80mm Lavado	<2,80mm In Natura
# (mm)	Nº			
6,30	1/4"	0,0	0,0	0,0
4,75	4	4,1	0,0	0,0
4,00	5	3,0	0,0	0,0
3,36	6	6,8	0,0	0,0
2,80	7	6,8	0,0	0,0
2,36	8	6,7	7,5	3,7
1,18	16	24,5	38,3	29,4
0,60	25	13,4	18,5	17,6
0,30	50	8,9	12,2	12,4
0,15	100	7,4	9,7	10,6
0,075	200	5,2	7,0	7,8
Fundo	-	13,3	6,8	18,5
Total		100,0	100,0	100,0
<b>Areia Base - x</b>		<b>66,13</b>	<b>93,23</b>	<b>81,50</b>
<b>g2 (x)</b>		<b>10,25%</b>	-	-
<b>g1 (x)</b>		<b>10,28%</b>	-	-
<b>P1 (x)</b>		-	<b>7,26%</b>	-
<b>P3 (x)</b>		-	-	<b>22,69%</b>

Da Equação 1:

$$P2 = \left( \frac{2}{\frac{1}{1+P1} + \frac{1}{1+P3}} \right) - 1 = \left( \frac{2}{\frac{1}{1,0726} + \frac{1}{1,2269}} \right) - 1 = 14,46\%$$

Da Equação 2:

$$1000 = x + P2(x) + g1(x) + g2(x)$$

$$1000 = x + 0,1446 \cdot x + 0,1028 \cdot x + 0,1025 \cdot x \quad \therefore x = 740,8$$

Determinação dos pesos de cada fração:

$$\text{areia arredondada } P2 = x + P2(x) = x + 0,1446 \cdot x = 1,1446 \cdot 740,8 = 848,0g$$

(sendo 424,0g de areia <2,80mm lavada e 424,0g de areia <2,80mm in natura)

$$g1(x) = 0,1028 \cdot x = 0,1028 \cdot 740,8 = 76,1g$$

$$g2(x) = 0,1025 \cdot x = 0,1025 \cdot 740,8 = 75,9g$$

## **4.4 METODOLOGIA**

Com base nos resultados obtidos nos estudos preliminares e piloto, apresentados no Anexo B e C, respectivamente, foi definida a metodologia apresentada neste item. Primeiramente são apresentados os ensaios realizados na caracterização dos agregados miúdos, objeto de avaliação deste estudo. Na seqüência, é apresentada a metodologia de ensaios adotada em argamassa e em concreto.

### **4.4.1 Ensaios de caracterização dos agregados miúdos**

Pelo fato dos agregados miúdos representarem o foco principal do estudo desse trabalho, sobretudo os de britagem, foi desenvolvido um programa de caracterização destes materiais para que fosse possível, entre outros, buscar correlações com os resultados obtidos no estudo em argamassa e em concreto. Quanto aos agregados miúdos de britagem, buscou-se ainda avaliar as alterações provocadas pelos diferentes sistemas de britagem empregados, sendo esse um dos objetivos específicos do trabalho. Por esse motivo, neste item são apresentados apenas os ensaios e metodologias utilizadas na caracterização dos agregados miúdos, sendo os resultados apresentados no Capítulo 5.

As duas amostras de pó-de-pedra coletadas, assim como a amostra da areia natural utilizada, foram caracterizadas quanto à granulometria pela NBR NM 248:2003; quanto ao módulo de finura e dimensão máxima característica do agregado segundo critério da NBR 7211:2005; quanto ao teor de material pulverulento pela NBR NM 46:2003 e quanto à massa específica aparente em procedimento semelhante ao recomendado pela NBR NM 52:2002.

A determinação da massa específica aparente dos agregados miúdos foi realizada pelo processo do picnômetro, conforme recomenda a NBR NM 52:2002, porém com um picnômetro menor, com volume aproximado de 250cm<sup>3</sup>. Outra alteração foi a aplicação de sucção através de bomba de vácuo para auxiliar na remoção de micro-bolhas de ar adsorvidas aos grãos. Durante o ensaio, após a colocação da amostra no picnômetro com água, era aplicada sucção por 60 segundos até a pressão máxima de uma coluna de 55mm de mercúrio (Hg). Este procedimento é semelhante ao recomendado pela NBR 6508:1984, utilizado na determinação de massa específica de solos.

Foi determinada ainda a forma dos grãos dos agregados miúdos através de método desenvolvido pelo GTec-UFSC, que foi utilizado pela primeira vez no trabalho de OLIVEIRA

(2004) e desde então vem sendo utilizado e aprimorado pelo grupo. Os princípios do método estão apresentados no item 2.3.6.1 e o detalhamento do ensaio no Anexo A.

Complementarmente, para auxiliar na interpretação dos resultados, foram realizados alguns ensaios com o material passante na peneira 0,15mm das areias de britagem lamelar e arredondada. Foram coletadas amostras tanto dos materiais que passaram pelo processo de lavagem quanto daqueles que não passaram (material in natura). Para cada uma dessas quatro amostras (lamelar lavada (LL), lamelar in natura (LN), arredondada lavada (AL) e arredondada in natura (AN)) foram determinadas: massa específica, granulometria, superfície específica (método de Blaine) e avaliada a forma. A massa específica foi determinada pelo mesmo processo descrito anteriormente para as frações maiores e a granulometria foi determinada por dois métodos: pelo ensaio de sedimentação utilizado para solos (NBR 7181:1984) e pelo método de Fraunhöffer de granulometria à laser. Este último ensaio foi realizado pelo corpo técnico da Votorantim Cimentos, no Laboratório Central de Granulometria que fica em Curitiba/PR.

Já a superfície específica do material foi determinada pelo ensaio de permeabilidade ao ar – método de Blaine (NBR NM 76:1998). Este ensaio foi realizado pelo corpo técnico da Cia de Cimento Itambé, cujo laboratório também fica na cidade de Curitiba/PR. Vale ressaltar que o material utilizado no ensaio de Blaine foi peneirado na 0,075mm.

Quanto à forma, esta foi avaliada qualitativamente por análise de imagens obtidas com auxílio de máquina fotográfica acoplada à lupa estereoscópica, conforme procedimento descrito no Anexo A.

#### **4.4.2 Ensaio em argamassa**

Para a realização dos ensaios em argamassa, todos os agregados foram secos em estufa por um período mínimo de 16 horas, sendo resfriados em ambiente coberto do laboratório, onde permaneciam até sua pesagem.

Na pesagem dos materiais, estes eram colocados em sacos plásticos vedados e armazenados dentro da sala climatizada com temperatura controlada ( $23\pm 3^{\circ}\text{C}$ ), onde permaneciam por um período mínimo de 12 horas antes de sua utilização nos ensaios. Vale ressaltar que as diversas frações das areias, após pesadas, eram acondicionadas em um mesmo saco plástico, facilitando sua homogeneização. Já o cimento era acondicionado em um segundo saco plástico. A água e o aditivo utilizados permaneciam em recipientes também dentro da sala

climatizada, pelo mesmo período de tempo, sendo pesados momentos antes da realização da mistura.

Este procedimento foi tomado para que todos os materiais estivessem em equilíbrio e à mesma temperatura, juntamente com os equipamentos de ensaio e mistura, buscando avaliar todas as combinações de agregados miúdos nas mesmas condições. Como a umidade relativa do ar não era controlada nesta sala, esta variou entre 50 e 80% durante o estudo em argamassa. Todos os ensaios em argamassa foram executados dentro desta sala climatizada.

Para cada uma das 72 composições granulométricas avaliadas, foram confeccionadas 3 argamassas com diferentes teores de pasta de mesma relação água/cimento, totalizando 216 argamassas. Em outras palavras, foram confeccionadas 3 argamassas com diferentes teores de agregados miúdos em relação a uma pasta de relação água/cimento constante. A relação água/cimento utilizada foi de 0,559. Esta relação água/cimento é igual àquela empregada por uma central dosadora de concreto da Grande Florianópolis para um concreto de classe C30 (fck 30MPa), sendo esta a classe de concreto mais comercializada na região.

Para as composições com a areia de britagem arredondada foram confeccionadas argamassas com os teores de pasta de 43,8%; 45,0% e 46,1%, em volume (Tabela 4.4). Já para as argamassas com areia de britagem lamelar os teores de pasta foram de 45,0%; 46,1% e 47,3%, em volume (Tabela 4.5). Considerou-se o volume de aditivo como fazendo parte da pasta.

Vale ressaltar que os teores volumétricos de pasta de 45,0% e 46,1% foram comuns para as argamassas com as duas areias (lamelar e arredondada). No entanto, para que os resultados obtidos ficassem numa mesma faixa de avaliação, foi utilizado um teor maior para a areia lamelar (47,3%) e um teor menor para a areia arredondada (43,8%). Os traços, em massa e em volume, das argamassas com areia arredondada e com areia lamelar são apresentados na Tabela 4.4 e Tabela 4.5, respectivamente.

Tabela 4.4 – Traços e proporção em volume das argamassas com areia arredondada.

Material	Traço 1		Traço 2		Traço 3	
	Traço em massa <sup>1</sup>	Proporção em volume	Traço em massa <sup>1</sup>	Proporção em volume	Traço em massa <sup>1</sup>	Proporção em volume
Cimento	1,000	0,353	1,000	0,353	1,000	0,353
Areias	3,141	1,183	2,993	1,128	2,855	1,076
Água	0,559	0,559	0,559	0,559	0,559	0,559
Aditivo	1,10%	0,00917	1,10%	0,00917	1,10%	0,00917
H	13,50%	-	14,00%	-	14,50%	-
Teor de Pasta <sup>2</sup>	-	43,8%	-	45,0%	-	46,1%

<sup>1</sup> Traço em massa calculado para a areia natural utilizada (d=2,654);

<sup>2</sup> Teor de pasta considerando o volume de aditivo na pasta.

Tabela 4.5 – Traços e proporção em volume das argamassas com areia lamelar.

Material	Traço 2		Traço 3		Traço 4	
	Traço em massa <sup>1</sup>	Proporção em volume	Traço em massa <sup>1</sup>	Proporção em volume	Traço em massa <sup>1</sup>	Proporção em volume
Cimento	1,000	0,353	1,000	0,353	1,000	0,353
Areias	2,993	1,128	2,855	1,076	2,727	1,027
Água	0,559	0,559	0,559	0,559	0,559	0,559
Aditivo	1,10%	0,00917	1,10%	0,00917	1,10%	0,00917
H	14,00%	-	14,50%	-	15,00%	-
Teor de Pasta <sup>2</sup>	-	45,0%	-	46,1%	-	47,3%

<sup>1</sup> Traço em massa calculado para a areia natural utilizada (d=2,654);

<sup>2</sup> Teor de pasta considerando o volume de aditivo na pasta.

#### 4.4.2.1 Seqüência de mistura e dos ensaios em argamassa

Após pesagem e equilíbrio de temperatura dos materiais na sala climatizada, procedia-se a mistura dos mesmos e na seqüência eram realizados os ensaios com cada argamassa.

A mistura dos materiais foi realizada em misturador mecânico (argamassadeira – NBR 7215:1996) e obedecia a seguinte seqüência de colocação dos materiais e de tempos de mistura:

1. Colocava-se todo o cimento na cuba e acionava-se o misturador em velocidade baixa;
2. Iniciava-se a cronometragem do tempo e adicionava-se aproximadamente 90% da água de amassamento, deixando misturar por 30s;
3. Após este tempo, eram adicionados os agregados durante 30 segundos, sem desligar o misturador (1,0min);
4. Deixava-se misturar por mais 30 segundos em velocidade baixa (1,5min);

5. Parava-se o misturador por 30 segundos e com auxílio de uma espátula, raspava-se o material aderido às paredes da cuba e à pá, recolhendo esse material para a cuba (2,0min);
6. Acrescentava-se o aditivo e o saldo da água e deixava-se misturar em velocidade baixa por mais 60 segundos (3,0min).

Ao final do processo de mistura, o material da cuba era colocado em um recipiente plástico de aproximadamente 2,0 litros onde ficava acomodado durante a execução dos ensaios. Desta maneira, a cuba da argamassadeira era liberada para uma nova mistura e ganhava-se tempo no ciclo de mistura e ensaios.

Após a mistura, cada argamassa passava pela seguinte seqüência de ensaios:

- Determinação da fluidez (espalhamento) na mesa de consistência;
- Ensaio de escoamento pelo tubo (ensaio proposto – item 8.2.3);
- Determinação da massa específica.

A fluidez foi avaliada pelo ensaio de índice de consistência, seguindo o procedimento descrito na NBR 13276:2005, salvo algumas alterações. Após o preenchimento do molde tronco-cônico, o mesmo era içado verticalmente e, nesse instante, realizava-se a primeira medida do espalhamento da argamassa na mesa (Flow 0). Aplicavam-se 10 quedas da mesa em 10 segundos e media-se novamente o espalhamento (Flow 10). Como valor final de fluidez, em cada caso (Flow 0 e Flow 10), adotava-se a média de duas medidas ortogonais do espalhamento da argamassa na mesa. Estas alterações no procedimento recomendado pela NBR 13276:2005 foram feitas para evitar a perda de sensibilidade do ensaio tendo em vista que as argamassas eram muito fluídas.

O material excedente à avaliação da fluidez era utilizado no ensaio do tubo de escoamento (ensaio proposto – Figura 4.6). Maiores detalhes da definição desta geometria do tubo podem ser observadas no item 8.2.3. O preenchimento do tubo era realizado com auxílio de um funil plástico, apoiado na borda do tubo, padronizando assim a altura de queda das argamassas. Após preenchimento, procedia-se a rasadura do material excedente. Então era acionada a filmagem e retirava-se o tampão da extremidade inferior do tubo (CAP), avaliando o escoamento. Durante o ensaio, observava-se o escoamento no tubo pela vista superior (olhando dentro do tubo) para visualizar e comunicar em voz alta o momento em que fosse possível ver a entrada de luz na extremidade inferior do tubo, indicando o final do escoamento. Posteriormente,

na análise dos vídeos, o tempo de escoamento era determinado considerando o instante de retirada do tampão e a emissão do som de final de escoamento.

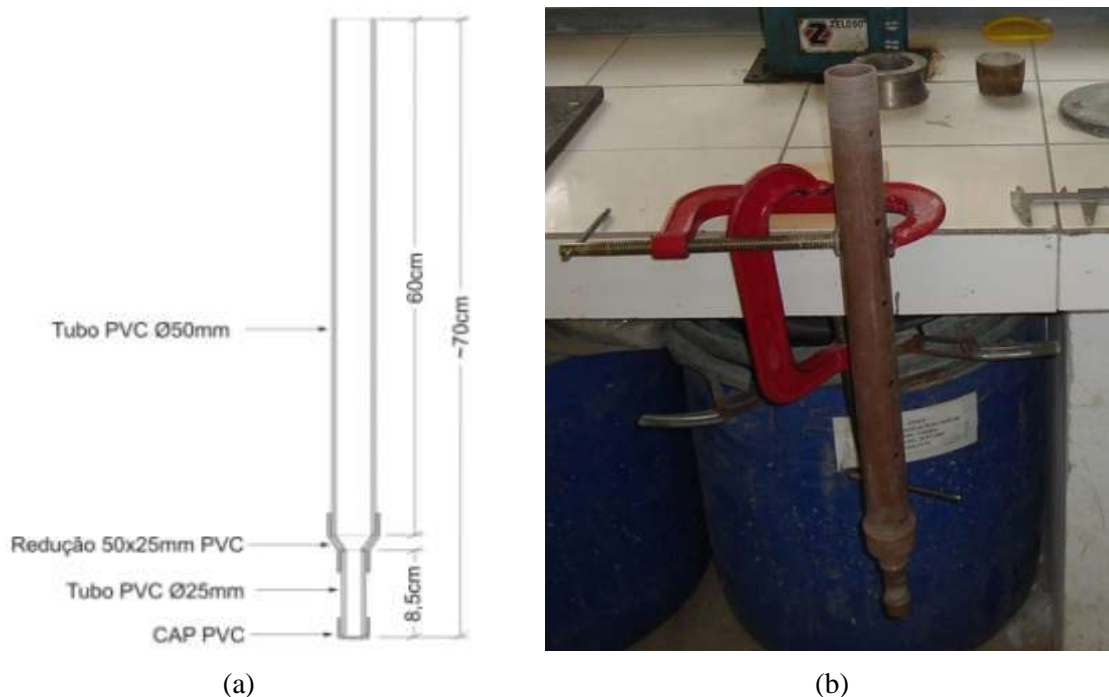


Figura 4.6 – Tubo para ensaio de escoamento de argamassas: (a) dimensões e (b) fixação na bancada.

Após o ensaio de escoamento, determinava-se a massa específica no estado fresco de cada argamassa, para posterior cálculo do teor de ar incorporado. O ensaio de massa específica foi realizado de maneira semelhante ao recomendado pela NBR 13278:2005, onde um recipiente indeformável e de volume constante era preenchido em 3 camadas adensadas com a aplicação de 20 golpes de espátula. Ao final do preenchimento, deixava-se o recipiente cair por 3 vezes de uma altura de aproximadamente 3cm, completando o adensamento.

Durante a realização dos ensaios no estado fresco, as argamassas foram avaliadas qualitativamente quanto a sua coesão, segregação e exsudação, sendo atribuídos índices de 1 a 3 quanto a intensidade de cada propriedade, onde 3 correspondia a maior intensidade (vide Tabela 8.19 e Tabela 8.20). Vale ressaltar que essas características são de elevada importância para o possível concreto a ser confeccionado com esses agregados, influenciando principalmente na facilidade de bombeamento e acabamento superficial.

#### 4.4.3 Ensaios em concreto

Diante dos resultados obtidos em argamassa, foram selecionadas algumas composições granulométricas dentre as avaliadas para o estudo em concreto. Procurou-se selecionar algumas



composições que representassem todas as variáveis estudadas, como forma dos grãos, peneira de corte e teor de material pulverulento das areias de britagem, além do teor de composição com areia natural. Foram selecionadas 7 composições granulométricas para cada forma de grão da areia de britagem (arredondada ou lamelar) para o estudo em concreto, totalizando 14 composições.

Para cada uma dessas composições granulométricas selecionadas do estudo em argamassa, foi realizado o estudo em concreto iniciando-se pelo ajuste do teor de argamassa ideal e posterior confecção de dois concretos com relação água/cimento distintas, caracterizando uma curva de dosagem com apenas dois pontos.

O ajuste do teor de argamassa ideal foi determinado em procedimento semelhante ao sugerido no método de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993), salvo algumas alterações. Conforme procedimento sugerido por estes autores, inicialmente dosa-se um concreto com baixo teor de argamassa, ficando visivelmente “empedrado”, e aumenta-se este teor até obter-se um concreto sem vazios e sem segregação. No entanto, na metodologia proposta por Helene e Terzian (1993), a definição do teor ideal de argamassa é subjetiva e depende muito da experiência do tecnologista. Neste trabalho, para eliminar a influência do operador e buscando-se definir uma condição semelhante de bombeabilidade para um mesmo abatimento, o teor ideal de argamassa foi definido com auxílio do ensaio de cone invertido (ensaio proposto), sendo essa uma das alterações. Durante o procedimento de ajuste do teor de argamassa, mantinha-se constante o abatimento do concreto e determinava-se o menor teor de argamassa para o qual a mistura escoava pelo ensaio proposto, sendo este considerado o teor de argamassa ideal. A configuração e metodologia do ensaio são apresentadas no item 8.2.2.

Outra alteração foi no procedimento de cálculo dos ajustes do teor de argamassa, onde se procurou manter constante a relação água/cimento ( $a/c$ ). Para tal, em cada novo ajuste do teor de argamassa ( $\alpha$ ) de uma determinada composição de agregados miúdos, o traço era recalculado alterando-se a relação água/materiais secos ( $H$ ) e mantendo-se constante  $a/c$ . Deste modo, poder-se-ia obter diferentes valores para o somatório dos agregados ( $m$ ), diferentemente do procedimento sugerido por Helene e Terzian (1993) que mantém este valor inalterado e permite a variação de  $a/c$  e  $H$  durante o ajuste. Em resumo, pelo procedimento proposto, em cada novo ajuste, adiciona-se cimento e água, na proporção definida pela relação água/cimento, e areia até obter-se um novo teor de argamassa. Este procedimento foi adotado por acreditar-se que a alteração das características da pasta (relação  $a/c$ ) poderia exercer grande influência sobre o

escoamento do concreto pelo cone invertido. A seqüência de cálculo adotada em cada ajuste foi a seguinte:

1. Inicialmente, atribuíam-se, arbitrariamente ou pela experiência de concretos anteriores, valores iniciais de  $\alpha_0$  e de  $H_0$  e calculava-se, utilizando-se a Equação 11 e Equação 12, os valores de  $m_0$ ,  $a_0$  e  $p_0$ , para determinada  $a/c$  pré-estabelecida;
2. Para o próximo ajuste do teor de argamassa ( $\alpha_1$ ), atribuíam-se novo valor para a relação água/materiais secos ( $H_1$ ), levando em consideração o valor real de  $H_0$  obtido na etapa 1, e calculava-se os pesos de areia ( $a_1$ ) e cimento ( $c_1$ ) para a mesma relação água/cimento, utilizando o seguinte procedimento:
  - a. Cálculo dos parâmetros auxiliares  $a'_1$  e  $c'_1$ :

$$a'_1 = c_0 - \frac{H_1 \cdot B}{a/c} - \frac{(H_1 - a/c) \cdot (\alpha_1 \cdot B - A)}{a/c \cdot (1 - \alpha_1)} \quad \text{Equação 16}$$

$$c'_1 = \frac{\alpha_1 \cdot (B + a'_1) - A - a'_1}{1 - \alpha_1} \quad \text{Equação 17}$$

onde:

$$A = c_0 + a_0$$

$$B = c_0 + a_0 + p_0$$

$$a/c = a/c_0 = a/c_1$$

- b. Cálculo do novo traço unitário  $c_1 : a_1 : p_1$ :

$$c_1 = \frac{c'_1 + c_0}{c'_1 + c_0} \quad \text{Equação 18}$$

$$a_1 = \frac{a'_1 + a_0}{c'_1 + c_0} \quad \text{Equação 19}$$

$$p_1 = \frac{p_0}{c'_1 + c_0} \quad \text{Equação 20}$$

Caso necessário, novos ajustes poderiam ser calculados utilizando as mesmas equações apresentadas neste item 2;

3. Após definidos os valores de  $a_i$  e  $p_i$ , calculava-se as proporções de cada uma das areias conforme a combinação a ser avaliada (composições avaliadas entre areia de britagem,  $a_B$  e areia natural,  $a_N$ ) e as proporções de cada uma das britas conforme composição pré-

definida (brita 9,5/25, p1 e brita 4,75/12,5, p0). Como estas proporções eram volumétricas, considerava-se a massa específica aparente de cada agregado nos cálculos. As equações utilizadas para estes cálculos são as seguintes:

$$a_{N,i} = a_i \cdot \text{Teor}_{AN} \quad \text{Equação 21}$$

$$a_{B,i} = a_i \cdot \text{Teor}_{AB} \cdot \frac{d_{AB}}{d_{AN}} \quad \text{Equação 22}$$

$$p1_i = p_i \cdot \text{Teor}_{p1} \quad \text{Equação 23}$$

$$p0_i = p_i \cdot \text{Teor}_{p0} \cdot \frac{d_{p0}}{d_{p1}} \quad \text{Equação 24}$$

onde:

$\text{Teor}_{AN}$  e  $\text{Teor}_{AB}$  são os teores de areia natural e de areia de britagem, respectivamente, sendo que a soma destes é igual a 1;

$\text{Teor}_{p1}$  e  $\text{Teor}_{p0}$  são os teores de brita 9,5/25 e de brita 4,75/12,5, respectivamente, sendo que a soma destes é igual a 1;

$d_{AB}$  e  $d_{AN}$  são as massas específicas aparentes da areia de britagem e da areia natural, respectivamente;

$d_{p1}$  e  $d_{p0}$  são as massas específicas aparentes da brita 9,5/25 e da brita 4,75/12,5, respectivamente.

A relação água/cimento e a proporção entre as britas adotadas no ajuste do teor de argamassa ideal para as composições de areias avaliadas foram as mesmas utilizadas pela central, de concreto de onde os agregados graúdos foram obtidos, para um concreto bombeável de fck 30,0MPa e abatimento  $10 \pm 2$ cm, conforme apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Relação a/c e proporção entre os agregados graúdos de um concreto bombeável fck 30MPa e abatimento  $10 \pm 2$ cm da central de onde foram obtidos os agregados graúdos utilizados neste trabalho.

Parâmetro	Valor
Relação água/cimento	0,559
Teor de brita 9,5 / 25 ( $\text{Teor}_{p1}$ )	0,700
Teor de brita 4,75 / 12,5 ( $\text{Teor}_{p0}$ )	0,300

Após definido o teor de argamassa ideal para cada composição de areia avaliada, eram confeccionados dois novos concretos, sendo um com uma relação água/cimento mais baixa (aproximadamente 0,50) e outro com uma mais alta (aproximadamente 0,60). Este procedimento

permitia a construção de curvas de dosagem, apesar de terem apenas dois pontos, possibilitando uma futura interpolação linear dos resultados.

O estudo em concreto foi feito com os materiais úmidos, sendo determinada a umidade para correção das pesagens antes de cada jornada de trabalho. Estes materiais permaneciam dentro de recipientes cobertos por lona plástica para evitar a perda de umidade para o ambiente. O procedimento de mistura e os ensaios são descritos em 4.4.3.1.

#### **4.4.3.1 Seqüência de mistura e dos ensaios em concreto**

Após determinação da umidade e pesagem dos materiais, estes eram misturados em betoneira de eixo inclinado com volume de cuba de 120 litros conforme procedimento a seguir:

1. Adicionavam-se todos os materiais na betoneira, com a umidade em que se encontravam no momento, na seguinte ordem: britas, cimento e areias;
2. Ligava-se a betoneira e deixava-se misturar por 30 segundos somente com a umidade dos materiais;
3. Sem interromper a mistura, adicionava-se parte da água e deixava-se misturar por mais 60 segundos (1,5min);
4. Acrescentava-se o aditivo, sem paralisar a betoneira e com cuidado para que este não entrasse em contato direto com as pás ou com a cuba da betoneira. Deixava-se misturar por mais 90 segundos (3,0 min);
5. Procedia-se a adição de água até atingir aproximadamente o abatimento desejado deixando-se misturar até completar um tempo total de mistura de 5,0 minutos (5,0 min);
6. Desligava-se o misturador e cobria-se a boca da betoneira com uma tampa plástica, para evitar a perda de umidade para o ambiente do laboratório, permanecendo neste estado por 5,0 minutos (10,0 min);
7. Religava-se a betoneira e procedia-se o ajuste final de água até obter-se o abatimento desejado, deixando-se misturar por mais 2,0 minutos (12,0 min).

Quando necessário, durante os cinco primeiros minutos de mistura, desligava-se brevemente a betoneira para raspagem do material aderido às pás e à cuba. Vale ressaltar que este procedimento mais prolongado de mistura, incluindo uma interrupção de 5 minutos, foi definido em função dos estudos preliminares e piloto (Anexo B e C, respectivamente), onde processos mais breves dificultavam o ajuste do abatimento. Nestes estudos, notava-se uma

instabilidade da mistura ficando esta muito vulnerável a pequenas adições de água, justificando assim o procedimento adotado.

Logo após o término da mistura, eram realizados simultaneamente os ensaios de abatimento e de escoamento pelo cone invertido (ensaio proposto). O abatimento foi determinado segundo procedimento da NBR NM 67:1998. Já o ensaio do cone invertido (ensaio proposto) executado conforme descrito no item 8.2.2 (página 246).

Vale ressaltar que durante o processo de ajuste do teor de argamassa, quando verificada necessidade de incremento neste teor pelo ensaio de cone invertido, os materiais correspondentes ao ajuste (pré-pesados, incluindo o aditivo) eram adicionados à betoneira sendo misturados por cerca de dois minutos antes da nova avaliação.

Quando da confecção dos concretos que iriam ser moldados (concretos com teor de argamassa já ajustado), após o ensaio de abatimento e de cone invertido, todo o material retornava à betoneira e era homogeneizado por 30 segundos. Na seqüência, determinava-se a massa específica do concreto fresco para posterior cálculo do teor de ar incorporado e do consumo real de cimento de acordo com procedimento semelhante ao indicado pela NBR 9833:1987. Simultaneamente, eram moldados 4 corpos-de-prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão aos 7 e 28 dias, sendo ensaiados 2 por idade. Os corpos-de-prova eram desmoldados 24 horas após suas moldagens e eram colocados em tanques com água saturada de cal à temperatura de  $23\pm 3^{\circ}\text{C}$ , onde permaneciam até a idade de ruptura. Antes do ensaio à compressão, os topos dos corpos-de-prova eram retificados com máquina fresadora.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo definitivo descrito no programa experimental. Primeiramente são apresentadas as características dos agregados miúdos, incluindo a fração passante na peneira 75 $\mu$ m dos de britagem. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos no estudo em argamassa e posteriormente os obtidos no estudo em concreto. Por fim, é feita uma análise entre os resultados obtidos nas duas fases de estudo, argamassa e concreto.

### 5.1 TERMINOLOGIA

As siglas apresentadas nos gráficos e tabelas deste capítulo, os quais contemplam os resultados obtidos, seguem a seguinte nomenclatura e lógica:

- **A**: areia de britagem com grãos com forma equidimensional, denominada neste trabalho de areia de britagem **arredondada**;
- **L**: areia de britagem com grãos de lamelares, denominada neste trabalho de areia de britagem **lamelar**;
- **0% / 20% / 35% ou 50%**: teor de substituição volumétrica de areia de britagem por areia natural;
- **<4,00 / <3,36 / <2,80**: malha de peneiramento de corte da areia de britagem, também denominado de ponto de corte;
- **P1, P2 e P3**: teor de material pulverulento da areia de britagem, correspondendo, em ordem, do menor para o maior teor;
- **43,8% / 45,0% / 46,1% e 47,3%**: teores de pasta presentes nas argamassas, em volume.

Assim, uma composição indicada pela sigla “A 20% <3,36 P1” corresponde a uma areia de britagem arredondada, peneirada na malha 3,36mm e com o menor teor de material pulverulento avaliado, composta com 20% de areia natural, em volume. Vale ressaltar que estas terminologias também estão apresentadas no Glossário.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS MIÚDOS

Neste item, são apresentadas as características físicas dos três agregados miúdos utilizados, conforme procedimentos descritos no programa experimental.

### 5.2.1 Areia natural

As características da areia natural utilizada, quanto à granulometria e massa específica aparente são apresentadas na Tabela 5.1. Já quanto à forma dos grãos, os resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Características da areia natural fina utilizada.

Parâmetro		Areia Natural
Granulometria - NBR NM 248:2003 % Retida Acumulada	Abertura das peneiras (mm)	2,36
		1,18
		0,60
		0,30
		0,15
		0,075
		Fundo
Dim. Máx. Caract. (mm) - NBR 7211:2005		0,30
Módulo de Finura - NBR 7211:2005		0,80
Material Pulverulento - NBR NM 46:2003		0,3%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) - NBR NM 52:2003		2,654

Tabela 5.2 – Coeficiente de forma dos grãos da areia natural utilizada.

Peneira		Areia Natural	
mm	Nº	% Retida	CF da Fração
0,60	25	0,0	-
0,30	50	3,9	0,261
0,15	100	71,9	0,279
0,075	200	23,9	-
Fundo		0,3	-
Soma		100,0	-
<b>CF da Areia</b>		<b>0,278</b>	

Observa-se que a areia natural utilizada é bastante fina (MF=0,80), com praticamente todos os grãos entre as malhas 0,30mm e 0,075mm e possui baixo teor de material pulverulento (0,3%). Quanto à forma, observa-se que os grãos são bastante esféricos e arredondados (vide Tabela 5.2), apresentando coeficiente volumétrico de forma médio ponderado de 0,278. Vale ressaltar que, por limite de precisão de pesagem dos grãos, foram determinados apenas os

coeficientes de forma das frações retidas nas malhas 0,15mm e 0,30mm, sendo que as imagens utilizadas foram obtidas com auxílio de máquina fotográfica acoplada a lupa estereoscópica.

Na Figura 5.1 são apresentadas duas formas de obtenção da mesma imagem, uma com luz incidindo diretamente sobre os grãos e outra com incidência indireta, sob os grãos. A primeira (a) era utilizada para calibração da imagem e a segunda (b) para análise computacional da imagem onde eram obtidos os parâmetros geométricos da projeção de cada grão para determinação do coeficiente volumétrico de forma. Maiores detalhes deste processo de determinação da forma dos grãos se encontram no Anexo A.

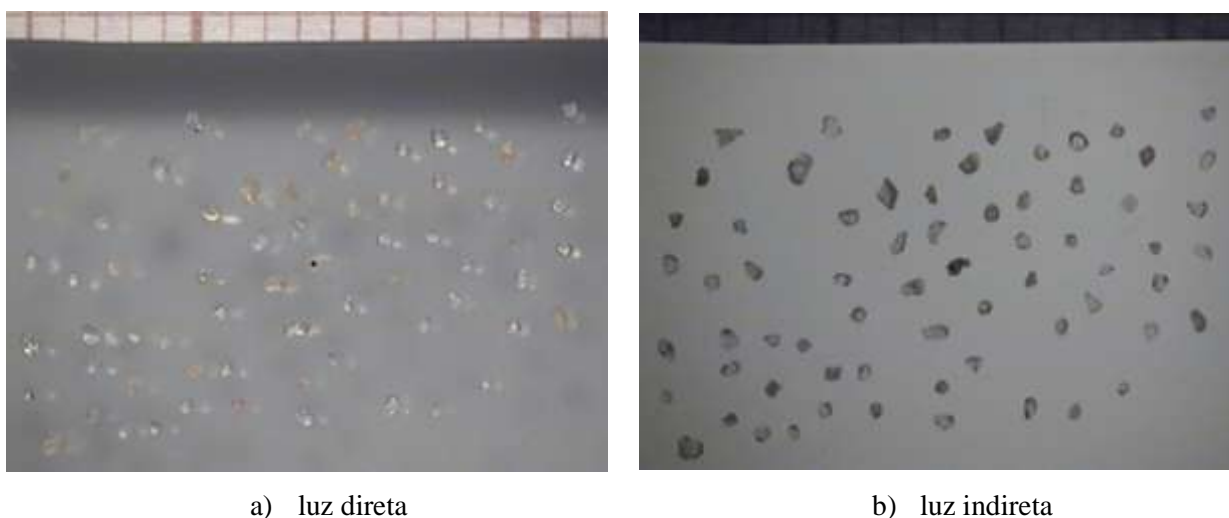


Figura 5.1 – Imagens obtidas com auxílio da lupa estereoscópica – aumento de 6,5x – para a fração retida na peneira de malha 0,30mm da areia natural com: a) luz incidindo diretamente; e b) luz incidindo indiretamente.

## 5.2.2 Agregados miúdos de britagem

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados dos ensaios de granulometria, realizado de acordo com a NBR NM 248:2003, do pó-de-pedra lamelar e do pó-de-pedra arredondado “in natura”, ou seja, da maneira como foram coletados na pedreira. Já na Tabela 5.4 são apresentados o módulo de finura e a dimensão máxima característica, segundo critério da NBR 7211:2005, assim como o teor de material pulverulento e a massa específica aparente, determinados, respectivamente, segundo NBR NM 46:2003 e NBR NM 52:2003, de cada um desses materiais. Na Tabela 5.5 são apresentados ainda os coeficientes volumétricos de forma de cada uma das frações e da média ponderada de cada um dos dois agregados (lamelar e arredondado).



Tabela 5.3 – Composição granulométrica dos pós-de-pedra coletados na pedreira sem qualquer beneficiamento (in natura).

Peneira		Pó-de-pedra "In Natura"			
		% Retida Simples		% Retida Acumulada	
mm	Nº	Lamelar	Arredondado	Lamelar	Arredondado
6,3	1/4"	0,0	0,0	0	0
4,75	4	6,0	4,1	6	4
4,00	5	3,6	3,0	10	7
3,36	6	7,1	6,8	17	14
2,80	7	6,9	6,8	24	21
2,36	8	6,6	6,7	30	27
1,18	16	23,3	24,5	53	52
0,60	25	12,6	13,4	66	65
0,30	50	8,8	8,9	75	74
0,15	100	7,5	7,4	82	81
0,075	200	4,9	5,2	87	87
Fundo		12,7	13,3	100	100

Tabela 5.4 – Características físicas dos pós-de-pedra coletados na pedreira sem qualquer beneficiamento (in natura).

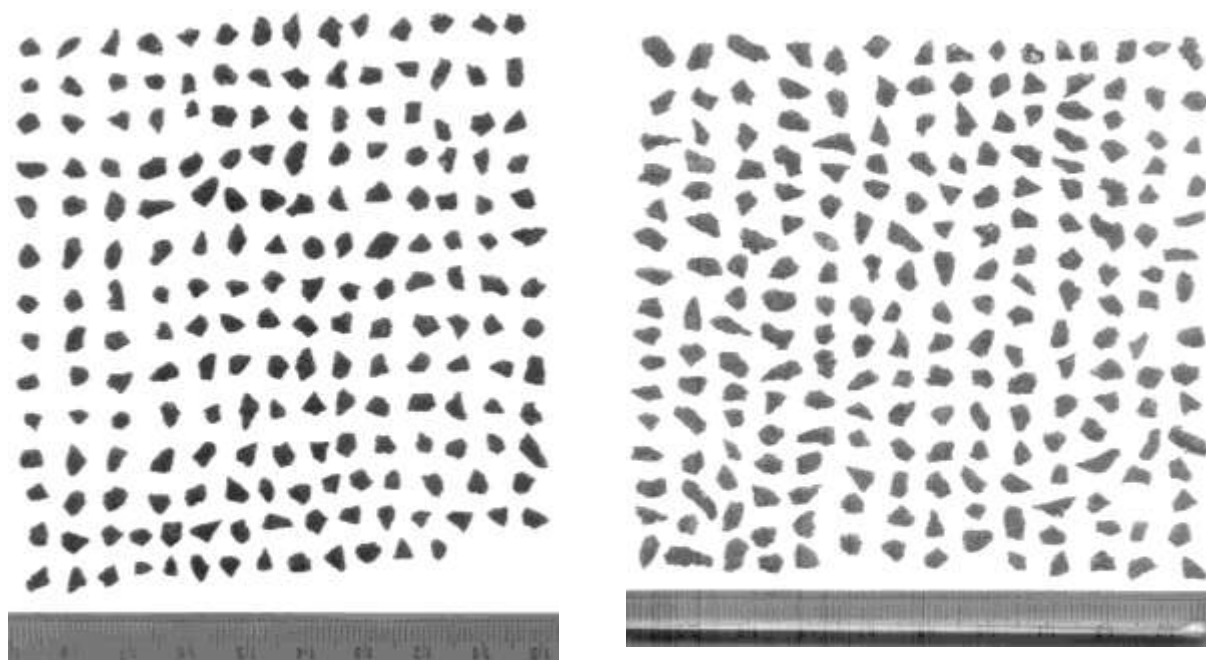
Parâmetro	Pó-de-pedra "In Natura"	
	Lamelar	Arredondado
Dim. Máx. Caract. (mm) - NBR 7211:2005	>4,75	4,75
Módulo de Finura - NBR 7211:2005	3,13	3,04
Material Pulverulento - NBR NM 46:2003	12,7%	13,3%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) - NBR NM 52:2003	2,952	2,971

Tabela 5.5 – Forma dos grãos de cada fração e da composição do pó-de-pedra lamelar e do pó-de-pedra arredondado (in-natura).

Peneira		Pó-de-pedra "In Natura"			
		Lamelar		Arredondado	
mm	Nº	% Retida	CF da Fração	% Retida	CF da Fração
6,3	1/4"	0,0	-	0,0	-
4,75	4	6,0	0,116	4,1	0,166
4,00	5	3,6	0,114	3,0	0,164
3,36	6	7,1	0,113	6,8	0,160
2,80	7	6,9	0,103	6,8	0,163
2,36	8	6,6	0,124	6,7	0,177
1,18	16	23,3	0,127	24,5	0,173
0,60	25	12,6	0,132	13,4	0,186
0,30	50	8,8	0,142	8,9	0,153
0,15	100	7,5	0,153	7,4	0,163
0,075	200	4,9	-	5,2	-
Fundo		12,7	-	13,3	-
Soma		100,0	-	100,0	-
CF da Areia		0,127		0,170	

Observa-se na Tabela 5.3 que tanto o pó-de-pedra lamelar quanto o arredondado possuem todos seus grãos passando na peneira 6,3mm, diferindo levemente na proporção de material retido na peneira 4,75mm (6,0% para o material arredondado e 4,1% para o lamelar). A semelhança bastante grande entre as curvas granulométricas destes dois materiais inclui módulo de finura e teor de material pulverulento (Tabela 5.4). Já quanto à massa específica aparente, também apresentada na Tabela 5.4, observa-se uma sensível diferença entre os dois materiais (lamelar e arredondado). Os valores apresentados foram obtidos, através de metodologia descrita no programa experimental, em ensaios de amostras representativas e com pelo menos duas repetições com aproximação na terceira casa decimal. Por se tratar de amostras da mesma pedreira, esta diferença na massa específica pode estar associada aos diferentes tipos de britadores empregados na britagem de cada um dos agregados (lamelar e arredondado) e/ou a frente de lavra explorada no dia da coleta, já que houve diferença de aproximadamente 20 dias entre a britagem dos dois materiais. Este assunto será melhor explorado no item 5.2.2.2.

Quanto à forma, observa-se na Tabela 5.5 que, apesar da diferença numérica entre os coeficientes parecer pequena, a diferença relativa é de 33,9%. Isto indica que o pó-de-pedra dito arredondado realmente possui forma mais esférica dos grãos se comparado ao pó-de-pedra lamelar. Vale ressaltar que foram utilizadas imagens obtidas de escâneres para a determinação do coeficiente de forma até a fração retida na peneira 0,60mm. Para as frações retidas na malhas 0,30 e 0,15mm, as imagens foram obtidas com máquina fotográfica acoplada à lupa estereoscópica. Na Figura 5.2 podem ser observados os grãos retidos na peneira de malha 2,36mm da areia de britagem arredondada e da lamelar. Maiores detalhes deste processo de determinação da forma dos grãos podem ser encontrados no Anexo A, onde também são apresentados outros parâmetros bidimensionais sugeridos por alguns autores para avaliação da forma, cujas referências foram apresentadas no item 2.3.6.



a) Arredondada – retido na #2,36mm

b) Lamelar – retido na #2,36mm

Figura 5.2 – Imagens obtidas com auxílio do escâner para a fração retida na peneira de malha 2,36mm da areia de britagem: a) arredondada; e b) lamelar.

### 5.2.2.1 Material passante na peneira 75 $\mu$ m

Na Figura 5.3 são apresentados os resultados do ensaio de sedimentação (NBR 7181:1984) realizado com fração passante na malha 150 $\mu$ m dos seguintes materiais: lamelar lavado (LL) e não lavado (LN), e arredondado lavado (AL) e não lavado (AN). Estas frações foram obtidas por peneiramento a seco de cada um destes quatro materiais após beneficiamentos de peneiramento e/ou lavagem dos dois pós-de-pedra coletados na pedreira (lamelar e arredondado), conforme descrito em 4.3.5.1. Já na Figura 5.4, são apresentadas as curvas granulométricas destes mesmos materiais e também do cimento utilizado, determinadas em ensaio de granulometria a laser pelo método de Fraunhofer.

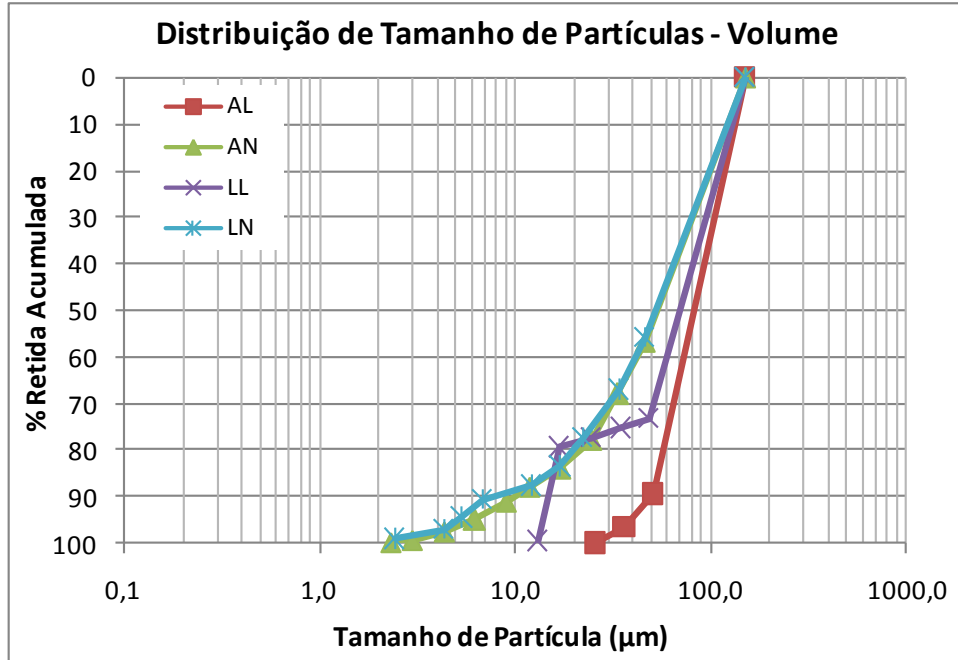


Figura 5.3 – Curvas granulométricas, obtidas por ensaios de sedimentação, da fração passante na peneira 150μm dos materiais: arredondado lavado (AL) e não lavado (AN), e lamelar lavado (LL) e não lavado (LN).

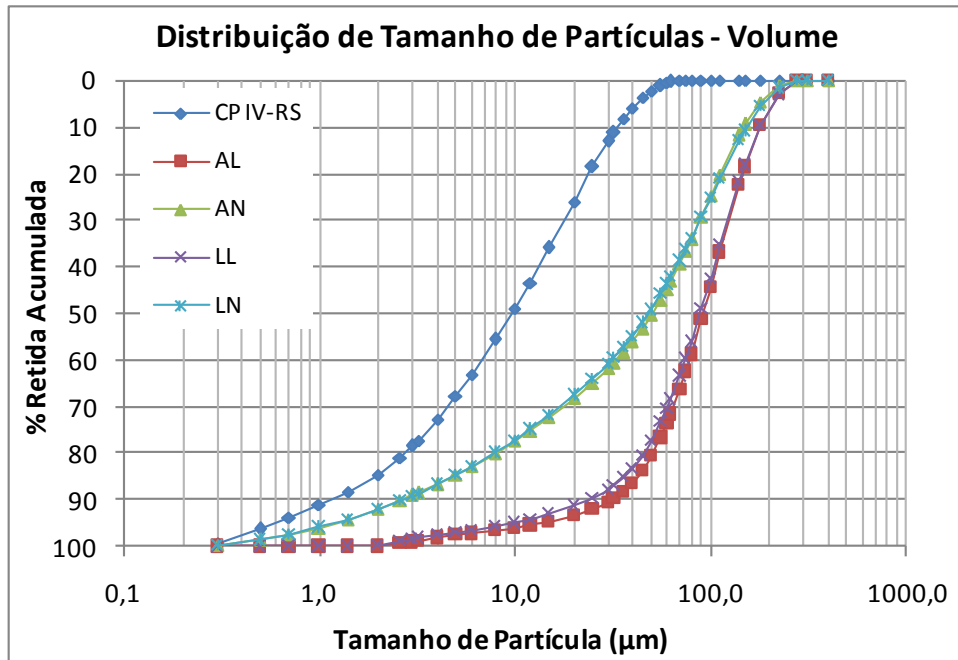


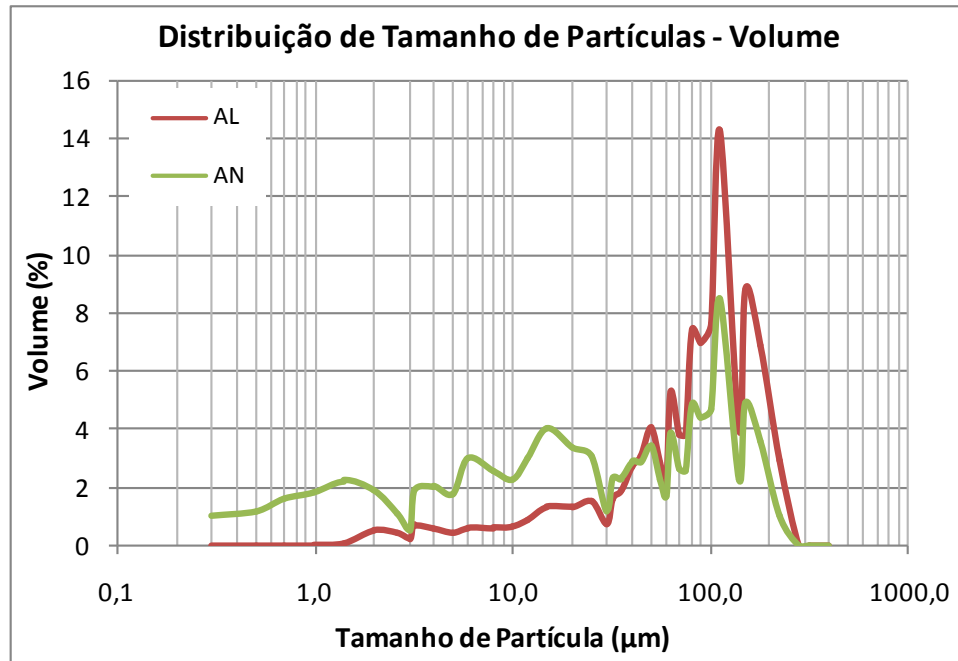
Figura 5.4 – Curvas granulométricas, obtidas por granulometria a laser, da fração passante na peneira 150μm dos materiais: arredondado lavado (AL) e não lavado (AN); lamelar lavado (LL) e não lavado (LN) e do cimento CP IV-RS utilizado.

Conforme pode ser observado na Figura 5.4, a distribuição de tamanho de partículas abaixo da peneira 150μm é idêntica para os dois materiais, lamelar e arredondado, tanto para a fração lavada quanto para a não lavada. A semelhança entre a composição granulométrica do material lamelar não lavado (LN) e arredondado não lavado (AN) também foi observada no

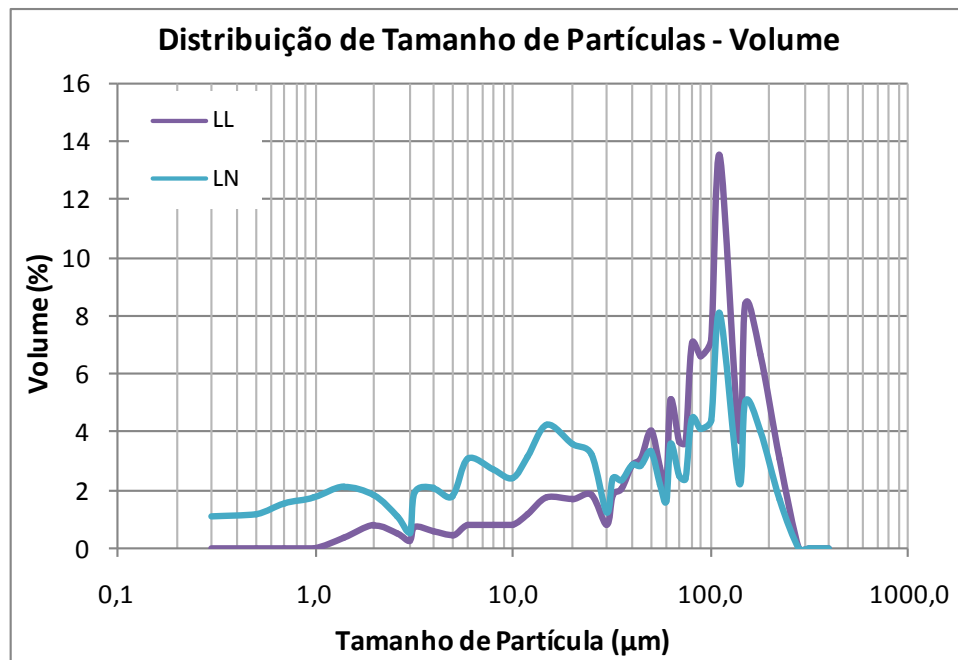
ensaio de sedimentação (Figura 5.3). No entanto, esta semelhança não foi observada para os materiais lavados (EL e LL), pois para estes, o processo de sedimentação foi muito rápido, dificultando a execução do ensaio e, provavelmente, por isto diminuindo sua precisão. Vale ressaltar também que, em valores absolutos, os resultados do ensaio de sedimentação são consideravelmente distintos daqueles obtidos com o ensaio de granulometria a laser.

Observa-se ainda na Figura 5.4, que a granulometria do material lavado ficou mais grossa que a do material não lavado, sendo que esta última ainda é mais grossa que a do cimento utilizado.

Destaca-se que o processo de lavagem das areias de britagem para redução do teor de material pulverulento removeu principalmente as partículas mais finas, conforme pode ser observado na Figura 5.5. Este fato se deve provavelmente ao processo utilizado. Neste, conforme descrito em 4.3.5.1, o material era misturado à água, agitado, deixado repousar por cerca de 15s e então vertido em uma peneira de 0,075mm,. Assim, apenas a fração mais fina, que ainda estava em suspensão, era eliminada. Resultados semelhantes foram obtidos com os materiais de uma pedreira da região da Grande Florianópolis que utiliza sistema de roda desaguadora para remoção de material pulverulento. Neste caso, os microfinos do pó-de-pedra antes de beneficiado e da areia de britagem após passar pela roda desaguadora apresentavam diferentes granulometrias, semelhantes aos observados para os materiais utilizados neste trabalho.



a)



b)

Figura 5.5 – Distribuição do tamanho de partículas, em volume, obtidas do ensaio de granulometria a laser da fração passante na peneira 150 $\mu\text{m}$  dos materiais: a) arredondado lavado - AL e não lavado - AN; e, b) lamelar lavado - LL e não lavado - LN.

A remoção das partículas mais finas conduziu a uma conseqüente redução considerável da superfície específica do material. Na Tabela 5.6 são apresentados alguns parâmetros, também obtidos do ensaio de granulometria a laser pelo método de Fraunhofer, que enfatizam o exposto.

Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos no ensaio de granulometria a laser para os materiais avaliados: arredondado lavado (AL) e não lavado (AN); lamelar lavado (LL) e não lavado (LN) e do cimento CP IV-RS.

Parâmetro	Material				
	CP IV-RS	AN	LN	AL	LL
Tamanho médio ( $\mu\text{m}$ ) <sup>1</sup>	14,0	63,6	64,4	99,5	96,4
Volume/superfície - média ( $\mu\text{m}$ ) <sup>2</sup>	3,0	6,3	6,1	42,4	35,6
D10 ( $\mu\text{m}$ ) <sup>3</sup>	1,2	2,7	2,7	31,5	23,9
D50 ( $\mu\text{m}$ ) <sup>4</sup>	9,7	50,8	48,5	91,9	88,7
D90 ( $\mu\text{m}$ ) <sup>5</sup>	33,6	147,5	153,6	179,1	178,5

1 - Média da distribuição do tamanho de partículas medida pelo seu volume ( $\mu\text{m}$ )

2 - Média do volume/superfície da distribuição do tamanho de partículas ( $\mu\text{m}$ )

3 - Diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) abaixo do qual encontram-se 10% das partículas

4 - Diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) abaixo do qual encontram-se 50% das partículas

5 - Diâmetro ( $\mu\text{m}$ ) abaixo do qual encontram-se 90% das partículas

Conforme pode ser observado Tabela 5.6, segundo parâmetros obtidos do ensaio de granulometria a laser, o processo de lavagem das areias de britagem proporcionou um aumento significativo na relação volume/superfície dos materiais AL e LL que em outras palavras, significa uma redução na superfície específica. Resultados semelhantes foram obtidos no ensaio de Blaine, conforme apresentado na Tabela 5.7, onde também constam os valores de massa específica aparente destes materiais.

Tabela 5.7 – Resultados de massa específica aparente e área específica pelo ensaio de Blaine.

Material	Massa Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
CP IV-RS*	2,83	4760
AL	3,08	810
AN	2,94	2740
LL	3,09	880
LN	2,72	2010

\* Dados fornecidos pelo fabricante (valores médios).

Quanto às massas específicas, observa-se que os materiais lavados apresentaram valores superiores aos materiais não lavados. Este fato pode estar relacionado com a eliminação, pelo processo de lavagem, dos grãos mais finos, os quais podem ser de origem argilosa, possuindo assim, menor massa específica. Vale ressaltar que estes valores foram obtidos durante os ensaios de determinação da área específica.

Já com relação à forma dos microfinos, conforme comentado anteriormente, por precisão insuficiente na pesagem do material não foi possível avaliá-la pelo método desenvolvido pelo GTec-UFSC. No entanto, analisando-se parâmetros bidimensionais sugeridos por outros autores

e obtidos das imagens captadas pela máquina fotográfica acoplada à lupa estereoscópica, observou-se que há uma pequena diferença entre a forma dos microfinos do material arredondado e lamelar. Estes resultados obtidos para análise de forma dos microfinos podem ser observados no Anexo A.

Na Figura 5.6 são apresentadas as imagens obtidas com auxílio da lupa estereoscópica para a fração passante na peneira de 0,075mm e retido no fundo dos materiais arredondado lavado e lamelar lavado. Conforme pode ser observado, aparentemente os diferentes sistemas de britagem empregados na produção de cada um dos dois pós-de-pedra exerce pequena influência sobre a forma dos grãos desta fração mais fina.



a) Arredondada lavada – fundo



b) Lamelar lavada – fundo

Figura 5.6 – Imagens obtidas com auxílio da lupa estereoscópica – aumento de 12,5x – com luz indireta para a fração passante na peneira de malha 0,075mm e retida no fundo dos materiais: a) arredondada lavada; e b) lamelar lavada.



### 5.2.2.2 Avaliação da influência do tipo de britador

Diante dos resultados apresentados, de maneira geral, pode-se afirmar que a inclusão do britador VSI pouco alterou a composição granulométrica do pó-de-pedra, porém melhorou significativamente a forma dos grãos, principalmente daqueles retidos em peneiras com malhas maiores que 0,30mm.

Quanto à granulometria, observa-se que houve uma alteração insignificante da composição granulométrica acima de 150 $\mu$ m após a instalação do britador VSI. Para o material menor que 150 $\mu$ m, não houve alteração alguma.

Já quanto à massa específica aparente, observa-se que esta aumentou após a inclusão do britador VSI. Este fato pode estar associado a um possível aumento na quantidade de fissuras geradas nos grãos pelo britador VSI e/ou por uma possível diferença na lavra em exploração na data da britagem de cada um dos materiais, conforme já comentado. A maior fissuração dos grãos aumentaria a comunicação entre poros antes impermeáveis, aumentando assim a permeabilidade de água e reduzindo, conseqüentemente, o volume aparente e a absorção dos grãos ao longo do tempo.

Para avaliar uma possível alteração na absorção dos grãos de cada um dos materiais, foi realizada uma nova determinação da massa específica, conforme procedimento descrito no programa experimental, porém ao final do procedimento, o material era mantido dentro do picnômetro. De tempos em tempos, o picnômetro era pesado novamente após ser completado com água destilada, que permanecia em uma pisseta ao lado do picnômetro dentro da sala climatizada. A variação da massa específica ao longo do tempo é apresentada na Figura 5.7.

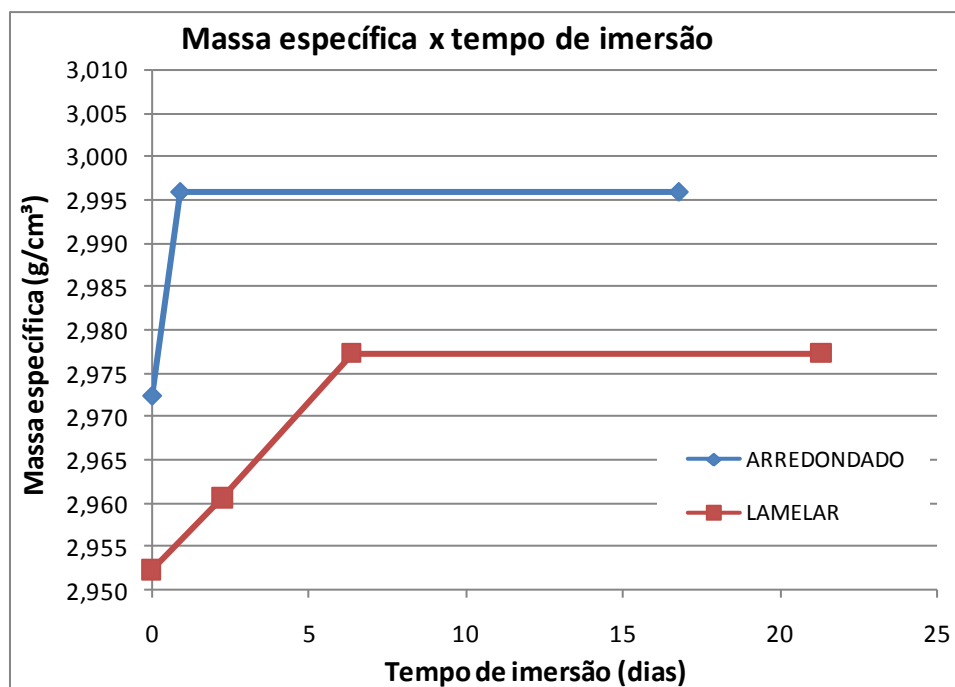


Figura 5.7 – Variação da massa específica com o tempo de imersão dos grãos do material lamelar e arredondado.

Conforme pode ser observado, houve uma alteração na absorção por capilaridade dos grãos dos dois materiais, tendo em vista a diferença na velocidade de estabilização da massa específica. No entanto, depois de estabilizadas, as massas específicas do material lamelar e do material arredondado mantêm uma diferença, semelhante à observada instantaneamente, que provavelmente está relacionada com as diferentes frentes de lavra. Considerando a massa específica inicial como sendo a aparente e a final como sendo a absoluta, chegar-se-ia a um volume de vazios permeáveis de 0,79% para o material arredondado e 0,84% para o material lamelar. Estes valores corresponderiam, respectivamente, a absorções de 0,27% e 0,28%, que são praticamente iguais.

Assim, com relação à influência do tipo de britador na massa específica dos materiais britados, pode-se afirmar que o tipo de britador pode ter influenciado na velocidade de absorção de água dos agregados, porém havia uma diferença intrínseca entre a massa específica dos dois materiais (lamelar e arredondado) provavelmente decorrente de diferentes frentes de lavra, conforme já comentado.

### 5.2.2.3 Características dos agregados de britagem utilizados nos estudos em concreto e argamassa

Para a utilização dos agregados miúdos de britagem nos estudos em argamassa e em concreto, foram realizados beneficiamentos nos materiais originais coletados na pedreira, conforme foi descrito no programa experimental. Após estes beneficiamentos (peneiramento e lavagem de uma parte), os materiais foram novamente caracterizados quanto à granulometria e teor de material pulverulento. As características do material lamelar e do arredondado após peneiramento são apresentadas na Tabela 5.8. Já na Tabela 5.9, são apresentadas as características dos dois materiais após peneiramento e lavagem.

Tabela 5.8 – Características dos materiais arredondado e lamelar **após peneiramento** na malha 2,80mm

Peneira		Material PENEIRADO na malha 2,80mm			
		% Retida Simples		% Retida Acumulada	
mm	Nº	Lamelar	Arredondado	Lamelar	Arredondado
4,75	4	0,0	0,0	0	0
4,00	5	0,0	0,0	0	0
3,36	6	0,0	0,0	0	0
2,80	7	0,0	0,0	0	0
2,36	8	4,4	3,7	4	4
1,18	16	29,9	29,4	34	33
0,60	25	16,8	17,6	51	51
0,30	50	12,1	12,4	63	63
0,15	100	10,7	10,6	74	74
0,075	200	7,4	7,8	81	82
Fundo		18,5	18,5	100	100
Dim. Máx. Caract. (mm) - NBR 7211:2005				2,36	2,36
Módulo de Finura - NBR 7211:2005				2,27	2,24
Material Pulverulento - NBR NM 46:2003				18,5	18,5
Parâmetros em relação à Areia Base - x		Areia Base - x		81,5	81,5
		Pulv - P3 (x)		22,77%	22,69%

Tabela 5.9 – Características dos materiais arredondado e lamelar **após serem peneirados** na malha 2,80mm e lavados.

Peneira		Material PENEIRADO (2,80mm) e LAVADO			
		% Retida Simples		% Retida Acumulada	
mm	Nº	Lamelar	Arredondado	Lamelar	Arredondado
4,75	4	0,0	0,0	0	0
4,00	5	0,0	0,0	0	0
3,36	6	0,0	0,0	0	0
2,80	7	0,0	0,0	0	0
2,36	8	6,5	7,5	6	8
1,18	16	37,2	38,3	44	46
0,60	25	19,1	18,5	63	64
0,30	50	12,7	12,2	75	77
0,15	100	10,6	9,7	86	86
0,075	200	7,1	7,0	93	93
Fundo		6,9	6,8	100	100
Dim. Máx. Caract. (mm) - NBR 7211:2005				> 2,36	> 2,36
Módulo de Finura - NBR 7211:2005				2,74	2,80
Material Pulverulento - NBR NM 46:2003				6,9	6,8
<b>Parâmetros em relação à</b>		<b>Areia Base - x</b>		<b>93,1</b>	<b>93,2</b>
<b>Areia Base - x</b>		<b>Pulv - P1 (x)</b>		<b>7,43%</b>	<b>7,26%</b>

Vale ressaltar que as características apresentadas na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9 correspondem a valores médios de pelo menos duas determinações realizadas durante todo o programa experimental, podendo haver pequena variação nos valores considerados no cálculo das composições em cada etapa do trabalho (argamassa e concreto).

Com base nos valores apresentados na Tabela 5.3, Tabela 5.8 e Tabela 5.9 foi possível calcular os parâmetros utilizados na obtenção das diversas composições utilizadas, conforme procedimento apresentado no item 4.3.5.1. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Parâmetros calculados com base nas composições granulométrica e utilizados para o proporcionamento das frações durante a pesagem dos materiais para os estudos em argamassa e concreto.

Parâmetros em relação à Areia Base - x	Lamelar	Arredondado
% retida na #3,36mm - <b>g2 (x)</b>	11,14%	10,25%
% retida na #2,80mm - <b>g1 (x)</b>	10,78%	10,28%
menor teor de mat. pulverulento - <b>P1 (x)</b>	7,43%	7,26%
teor intermediário de mat. pulverulento - <b>P2 (x)</b>	14,59%	14,46%
maior teor de mat. pulverulento - <b>P3 (x)</b>	22,77%	22,69%

\* A areia base - x engloba o material passante na peneira 2,80mm e retido na 0,075mm.

Com base nas informações apresentadas até aqui, foi possível calcular as composições granulométricas de cada uma das combinações avaliadas. Na Figura 5.8 são apresentadas as

composições granulométricas avaliadas para o material arredondado e também os limites granulométricos sugeridos pela NBR 7211:2005 para agregados miúdos destinados a concreto. As composições granulométricas do material lamelar não são apresentadas, pois se assemelham muito as do material arredondado.

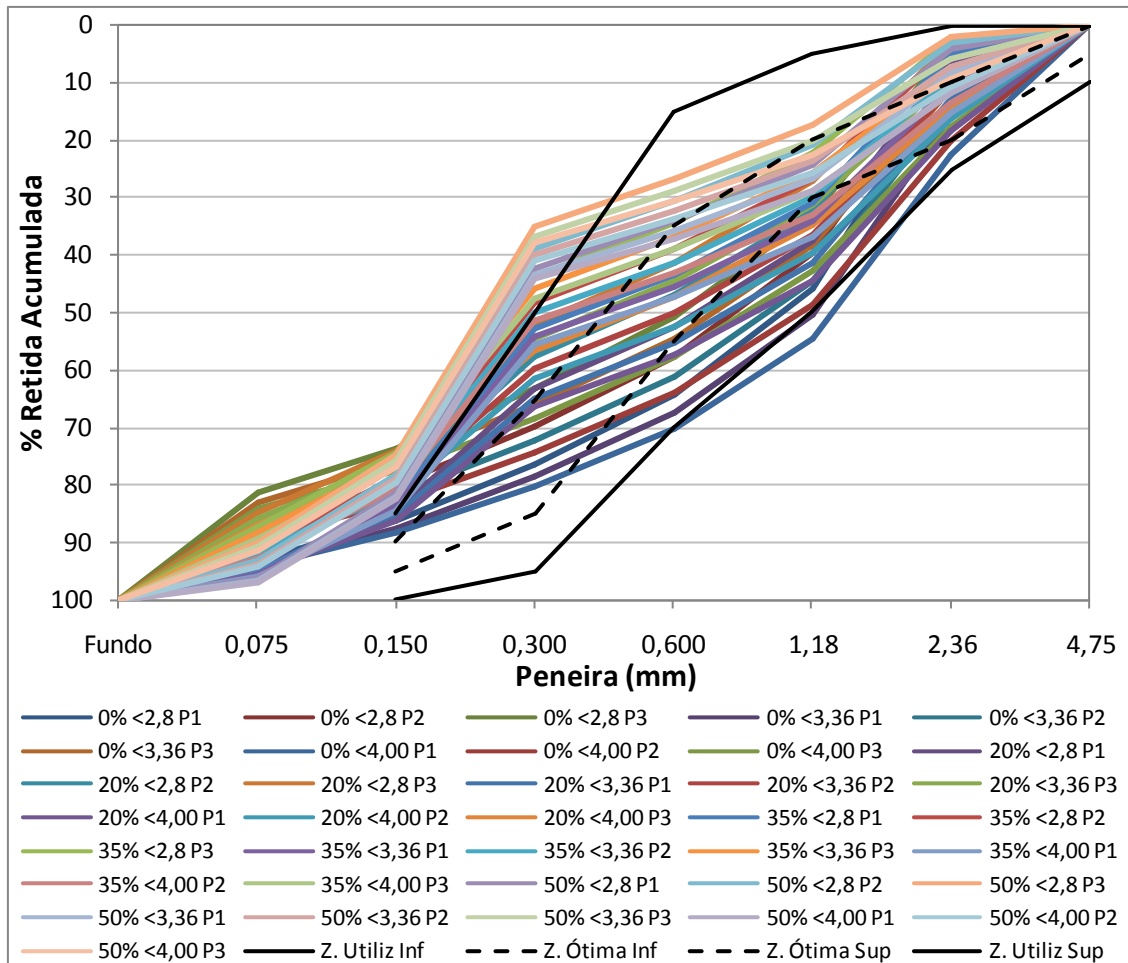


Figura 5.8 – Composições granulométricas avaliadas para o material arredondado bem como os limites sugeridos pela NBR 7211:2005.

Todas as curvas granulométricas apresentadas na Figura 5.8, que correspondem as composições avaliadas neste trabalho, foram obtidas a partir da composição nos teores pré-determinados das dez areias cujas curvas granulométricas são apresentadas na Figura 5.9. Cada uma das 9 areias de britagem obtidas do pó-de-pedra arredondado foram compostas com 4 diferentes teores da areia natural, cuja curva granulométrica também é apresentada, totalizando as 36 combinações avaliadas para esta forma de grão.

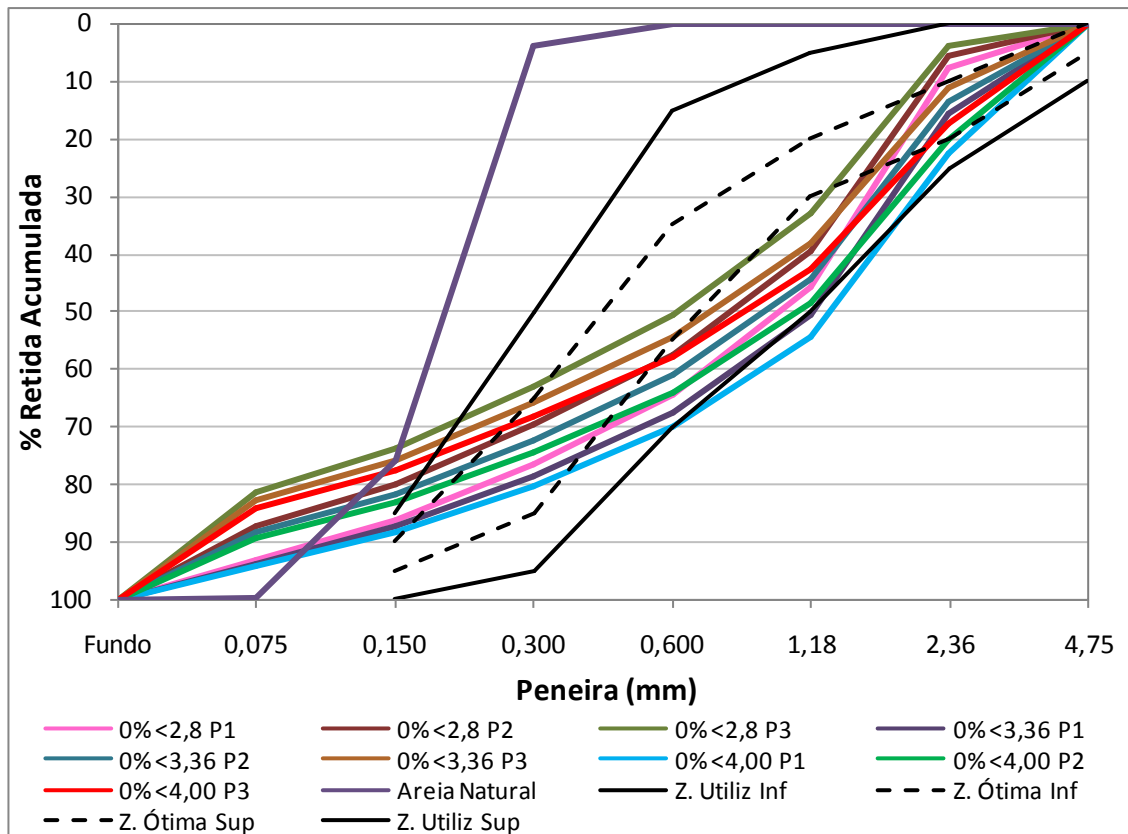


Figura 5.9 – Curvas granulométricas das areias de britagem arredondadas e da areia natural assim como os limites sugeridos pela NBR 7211:2005.

### 5.3 ESTUDO EM ARGAMASSAS

Nesta etapa do estudo foram avaliadas diferentes composições granulométricas de agregados miúdos quanto ao seu desempenho em argamassas. Estas diferentes composições granulométricas foram obtidas por alterações na peneira de corte, teor de material pulverulento e forma dos grãos da areia de britagem e no teor de substituição volumétrica por areia natural. Para cada composição de agregado miúdo obtida pela variação das características avaliadas, foram confeccionadas 3 argamassas, com diferentes teores de pasta de mesma relação água/cimento, as quais foram avaliadas quanto à fluidez (espalhamento), escoamento pelo tubo (ensaio proposto) e teor de ar incorporado, conforme metodologias definidas no programa experimental.

Neste item, primeiramente são apresentados os resultados obtidos separados de acordo com cada característica avaliada e na seqüência é realizada uma análise geral dos resultados, buscando correlações entre as características dos agregados e as propriedades das argamassas. Ao final são apresentadas as composições granulométricas selecionadas para o estudo em concreto. Vale ressaltar que os gráficos apresentados nas figuras dos itens 5.3.1 ao 5.3.3, correspondem aos mesmos resultados, os quais foram apenas organizados de forma a manter a

característica em análise no eixo das abscissas. Apesar de ser possível verificar a influência de mais de uma característica em um mesmo gráfico, sem reorganizá-los, optou-se em apresentar os resultados desta forma para facilitar a análise.

Para evitar estender-se muito nos resultados, em relação à fluidez serão apresentados apenas os resultados de espalhamento de Flow 0, definido conforme apresentado no programa experimental. Os resultados de Flow 10 são apresentados na forma de tabelas no Anexo D.

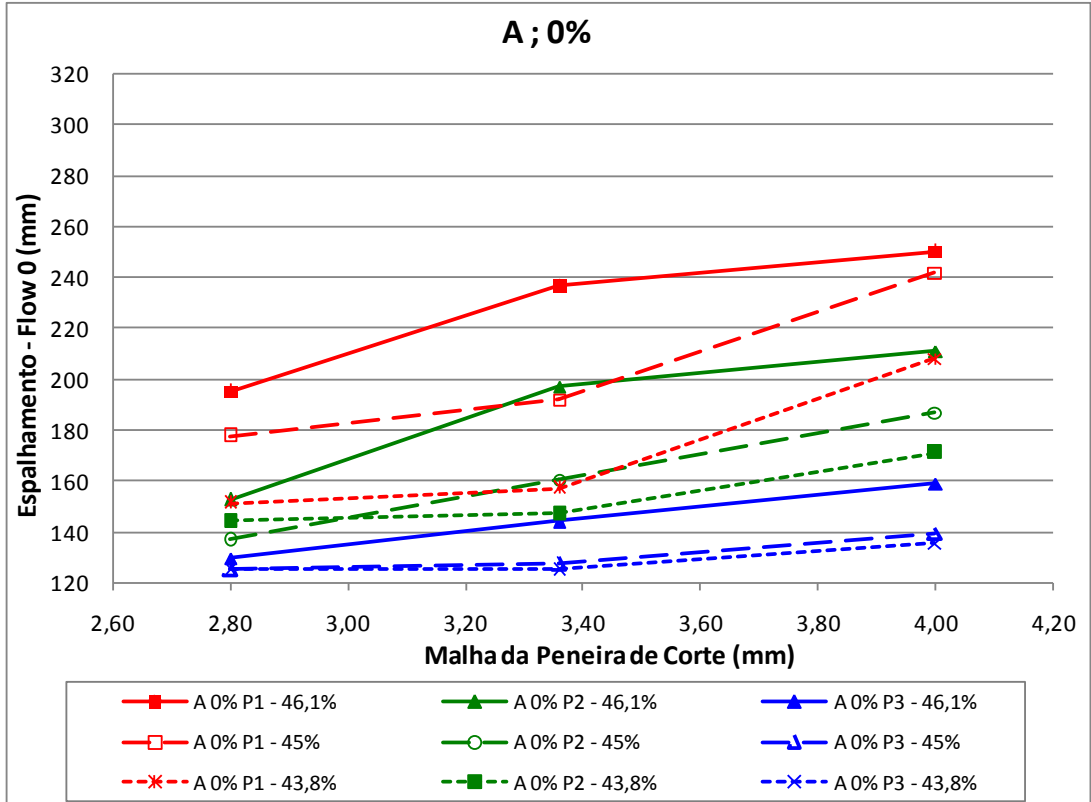
### **5.3.1 Avaliação da influência do ponto de corte do agregado miúdo de britagem**

Para cada forma de grão do agregado miúdo de britagem estudado (lamelar e arredondado), foi simulado o efeito de peneiramento do pó-de-pedra em 3 diferentes malhas: 4,00mm; 3,36mm e 2,80mm. Neste item é avaliado o efeito destes diferentes pontos de corte no desempenho destes agregados em argamassas.

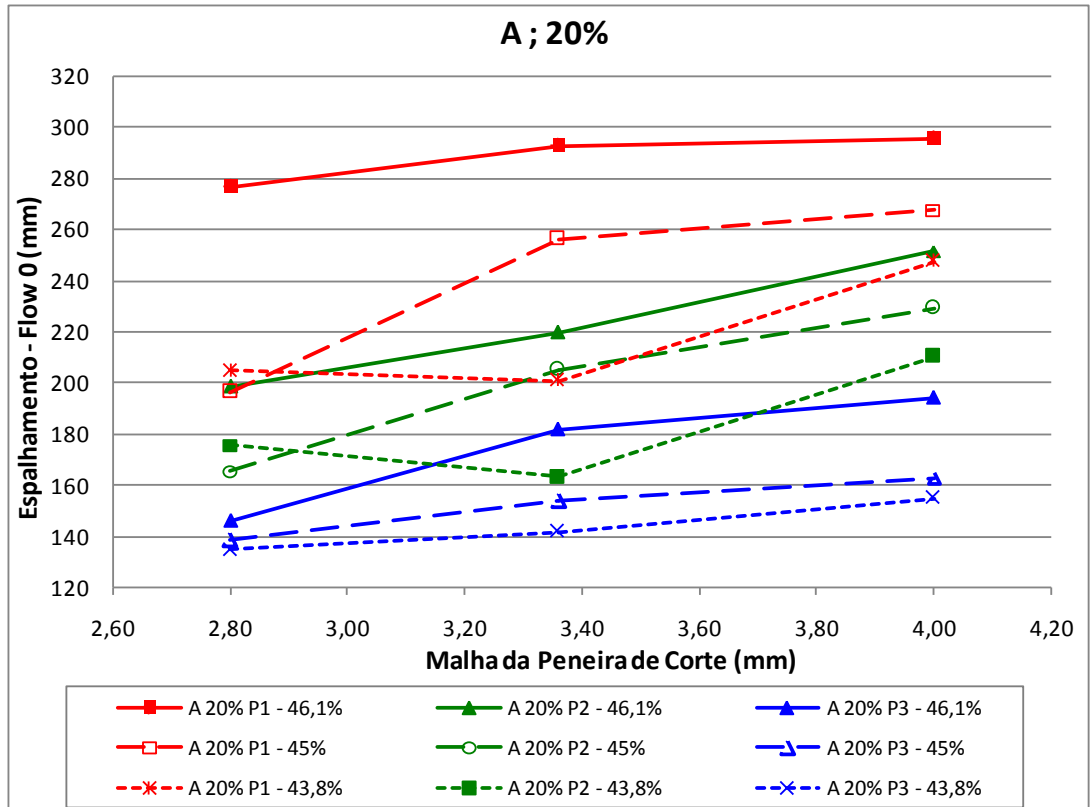
Nos gráficos das figuras apresentadas neste item, os estilos das linhas correspondem aos teores volumétricos de pasta avaliados, sendo que a linha cheia corresponde ao maior teor; a tracejada larga ao teor intermediário; e a tracejada fina ao menor teor. Já as cores representam os diferentes teores de material pulverulento, sendo que: vermelho é P1; verde é P2; e azul é P3.

#### **5.3.1.1 Quanto à fluidez**

Os resultados de espalhamento na mesa para ensaio de consistência para cada uma das argamassas contendo diferentes areias de britagem com forma arredondada dos grãos e obtidas por peneiramento em diferentes malhas de corte são apresentados na Figura 5.10. Já na Figura 5.11 são apresentados os resultados para a areia de britagem lamelar.



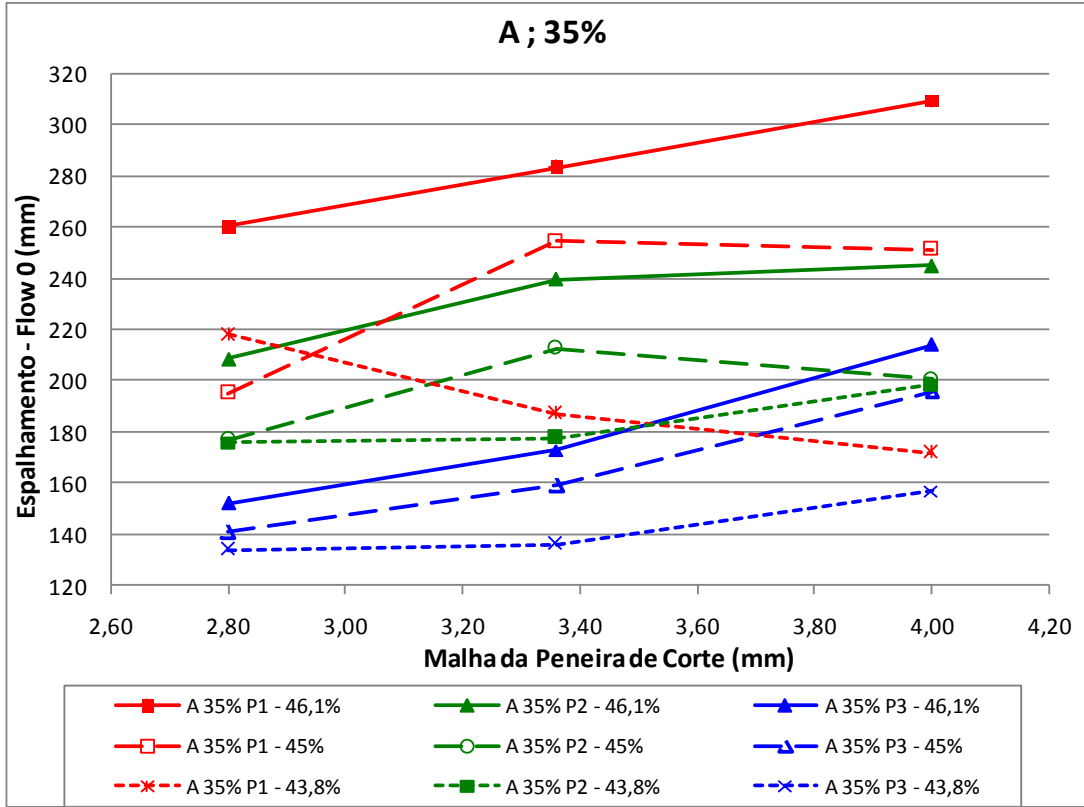
a) Sem areia natural



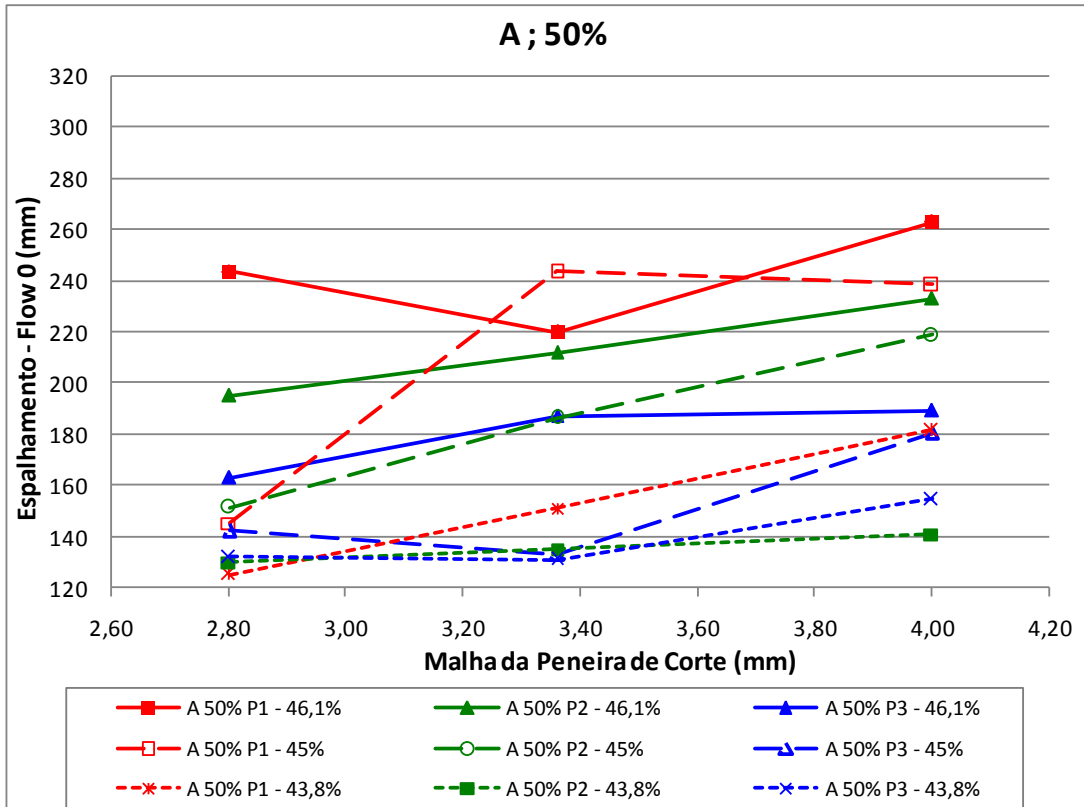
b) Substituição volumétrica por 20% de areia natural

Continuação...



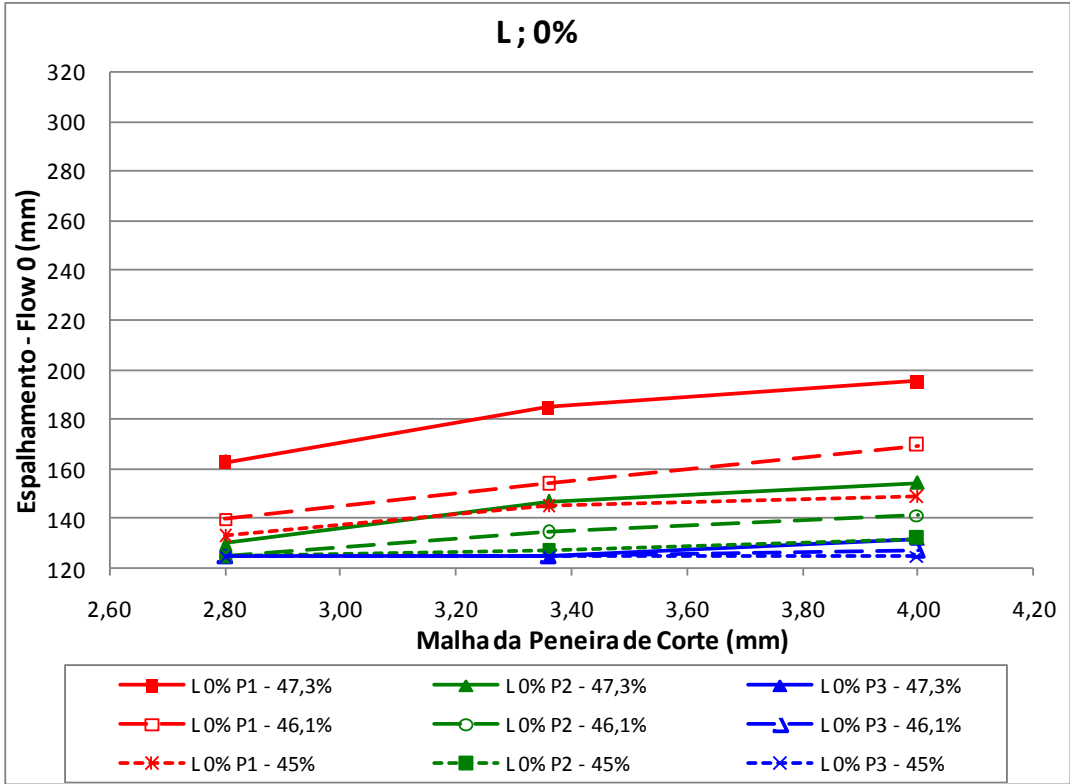


c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

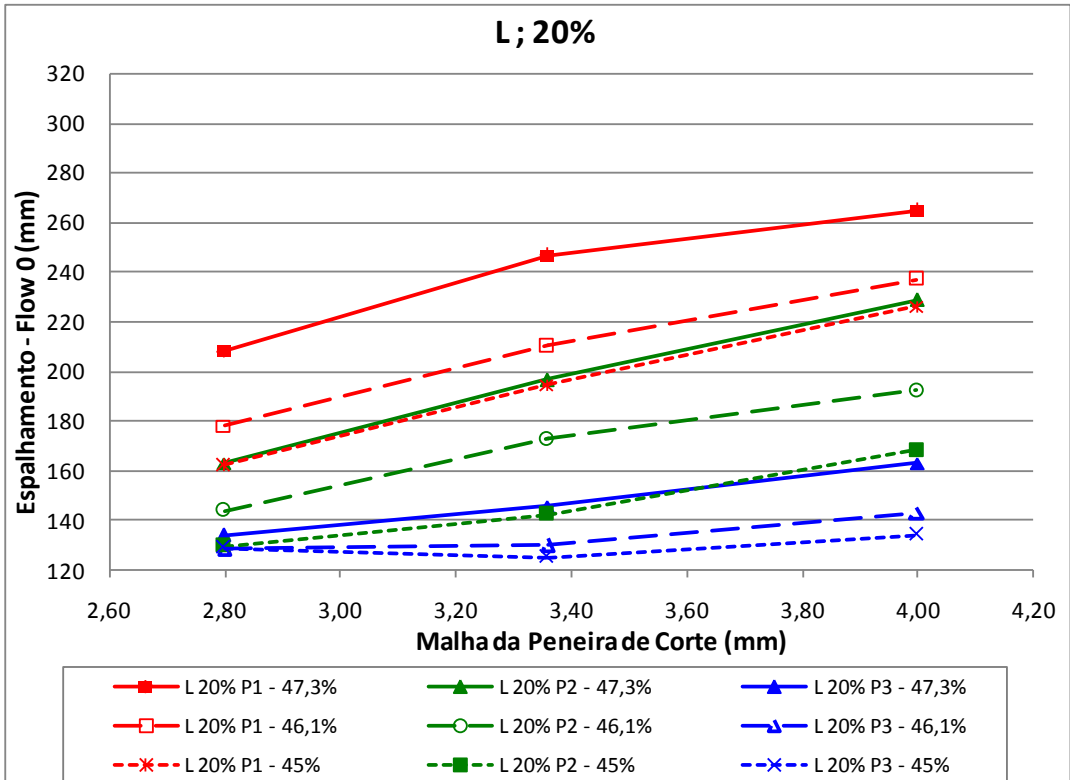


d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.10 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas em função dos diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

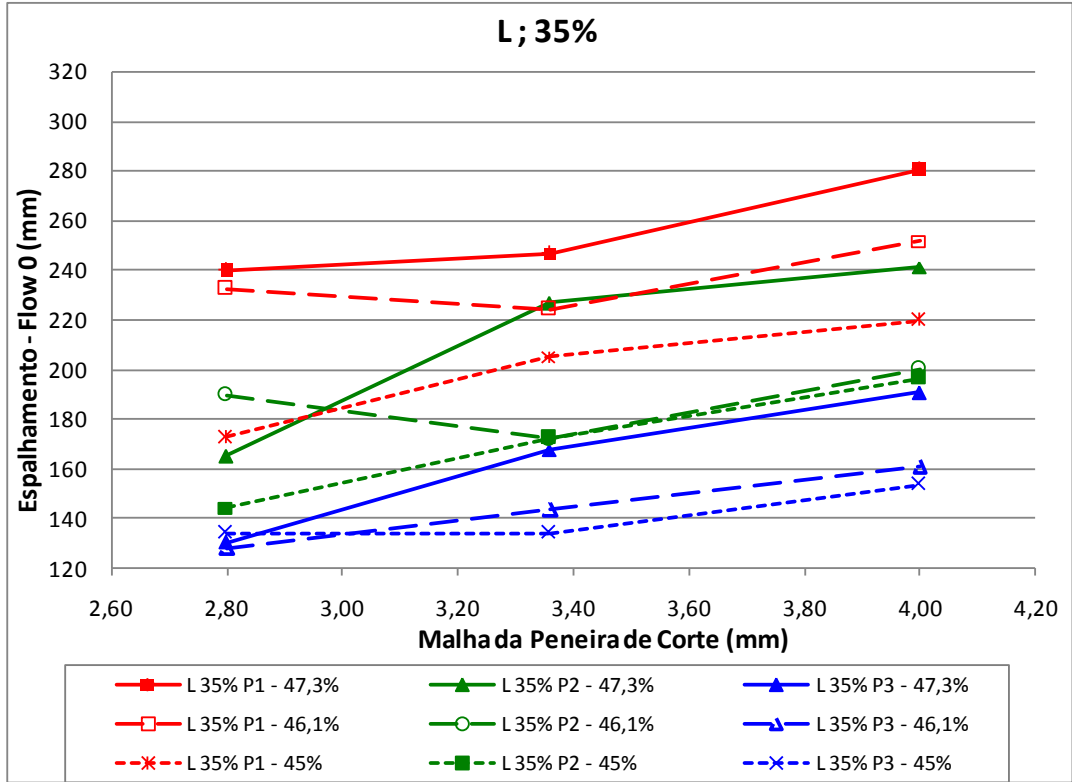


a) Sem areia natural

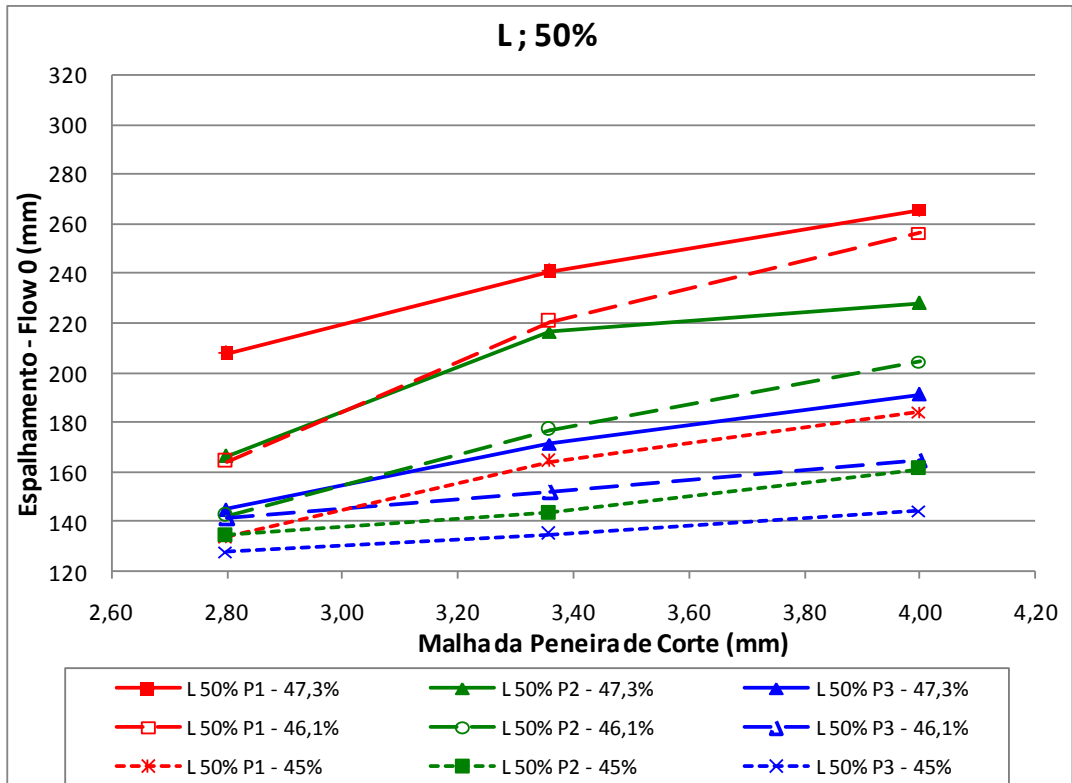


b) Substituição volumétrica por 20% de areia natural

Continuação...



c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural



d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.11 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares em função dos diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

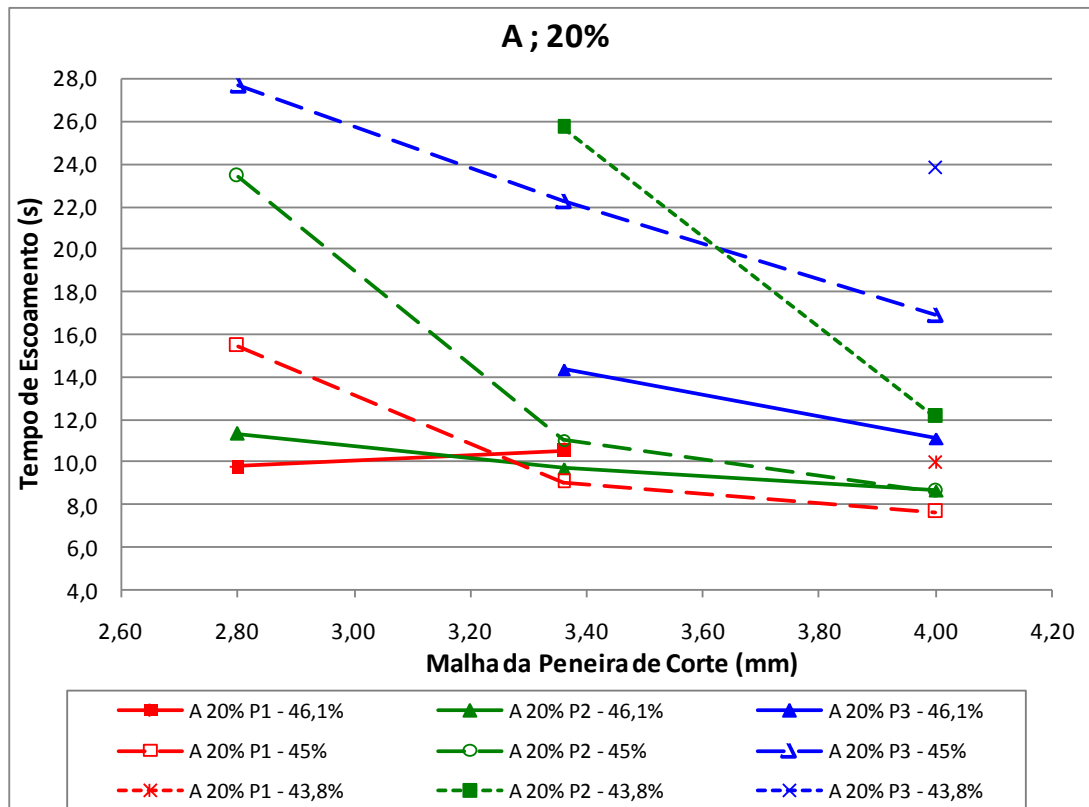
Conforme pode ser observado na Figura 5.10 e Figura 5.11, de maneira geral, houve um aumento no espalhamento das argamassas à medida que se aumentou a malha de peneiramento das areias de britagem. Este comportamento foi observado tanto, para as areias de britagem arredondadas (Figura 5.10) quanto para as lamelares (Figura 5.11). Este fenômeno provavelmente está associado a uma redução da área específica das areias. A redução do teor de material pulverulento em relação a todo o agregado de britagem, que era fixada em relação à areia base, provocada pela incorporação de maior quantidade de granilha, pode ter contribuído para este efeito.

A composição “A 35% P1 – 43,8%”, apresentada na Figura 5.10c, foi exceção à regra. Por motivo desconhecido, esta composição apresentou comportamento de redução de espalhamento com o aumento da peneira de corte da areia de britagem, destoando de todos os demais casos observados. Em alguns outros casos houve uma tendência a estabilização da fluidez na peneira de corte 3,36mm, não havendo um incremento considerável na fluidez quando o areia de britagem era peneirada em 4,00mm (p.e. “L 50% P2 – 47,3%” na Figura 5.11d, “L 35% P2 – 47,3%” na Figura 5.11c; “A 50% P1 – 43,8%” e “A 50% P3 – 46,1%” na Figura 5.10d, entre outros). Em outros casos, o menor espalhamento foi observado para a areia de britagem peneirada na 3,36mm, destoando, assim como o fenômeno anterior, do comportamento predominante em que houve aumento de fluidez em função do aumento da peneira de corte.

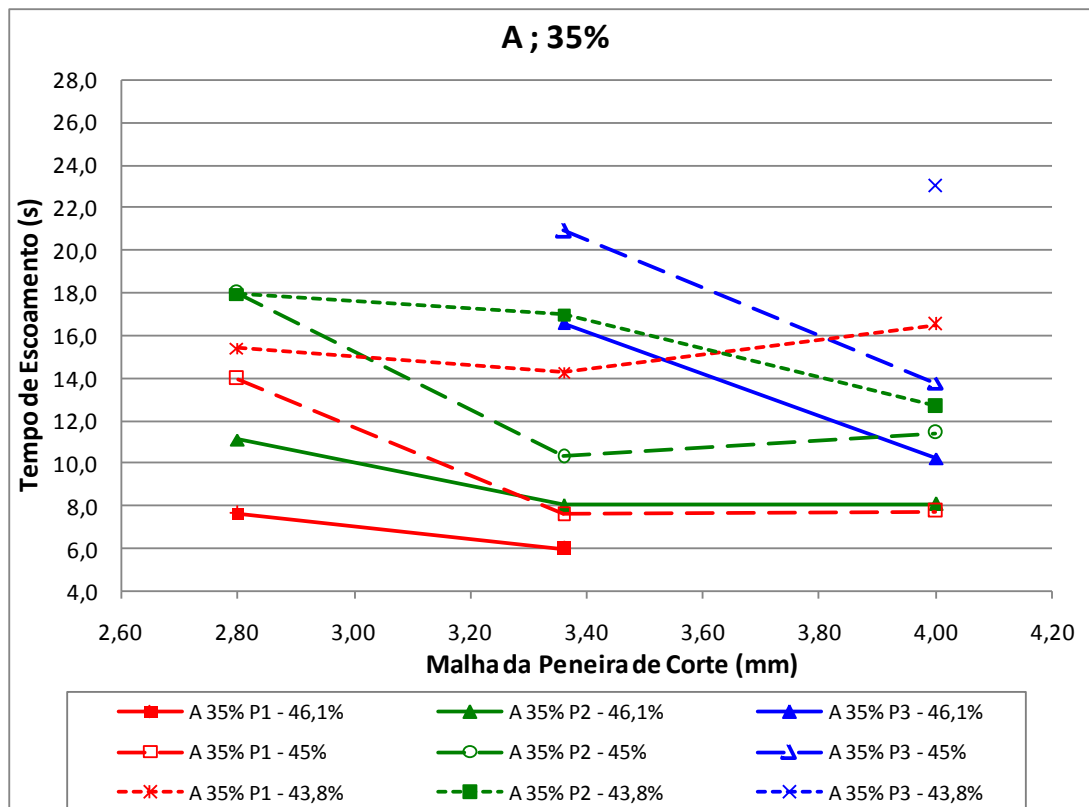
### **5.3.1.2 Quanto ao escoamento**

Os tempos de escoamento pelo tubo proposto das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondada e lamelar, e obtidas por peneiramento em diferentes pontos de corte, são apresentados nas Figura 5.12 e Figura 5.13, respectivamente.

Vale ressaltar que nenhuma composição contendo apenas areia de britagem (sem areia natural) escoou pelo tubo, apesar de apresentarem fluidez muitas vezes superior a algumas composições contendo parcela de areia natural. Por este motivo, não são apresentados gráficos para estas composições. Destaca-se ainda que, para algumas composições, houve escoamento das argamassas apenas para determinados teores de pasta, sendo apresentados somente estes pontos nos gráficos.

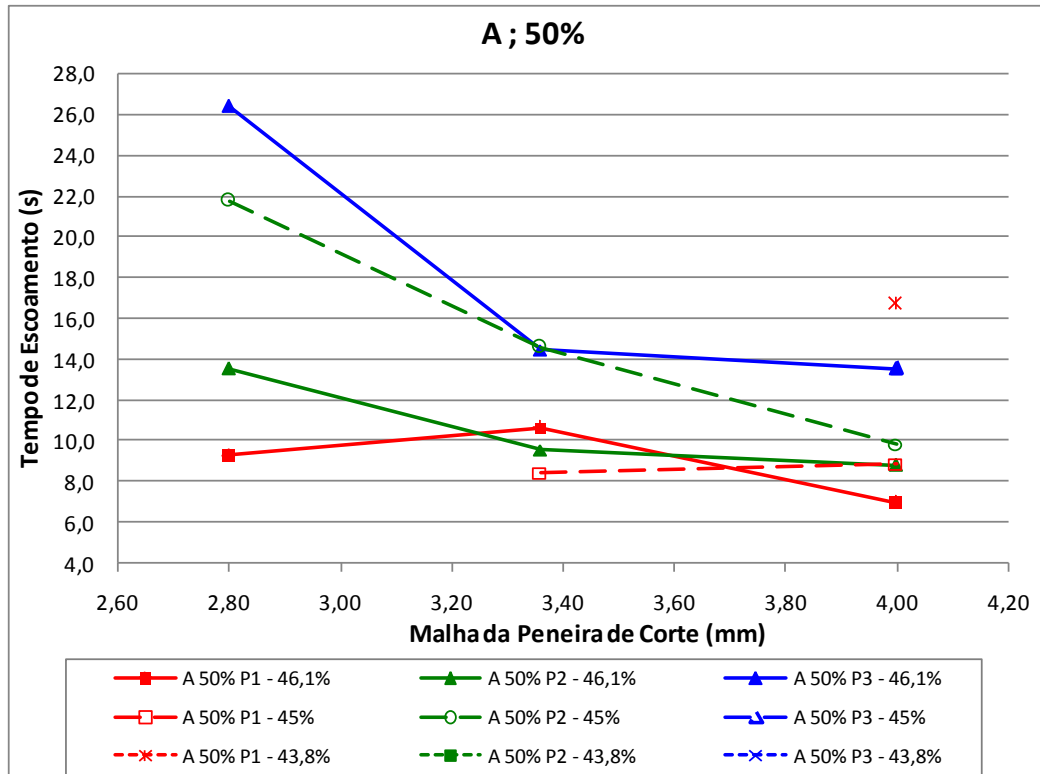


a) Substituição volumétrica por 20% de areia natural



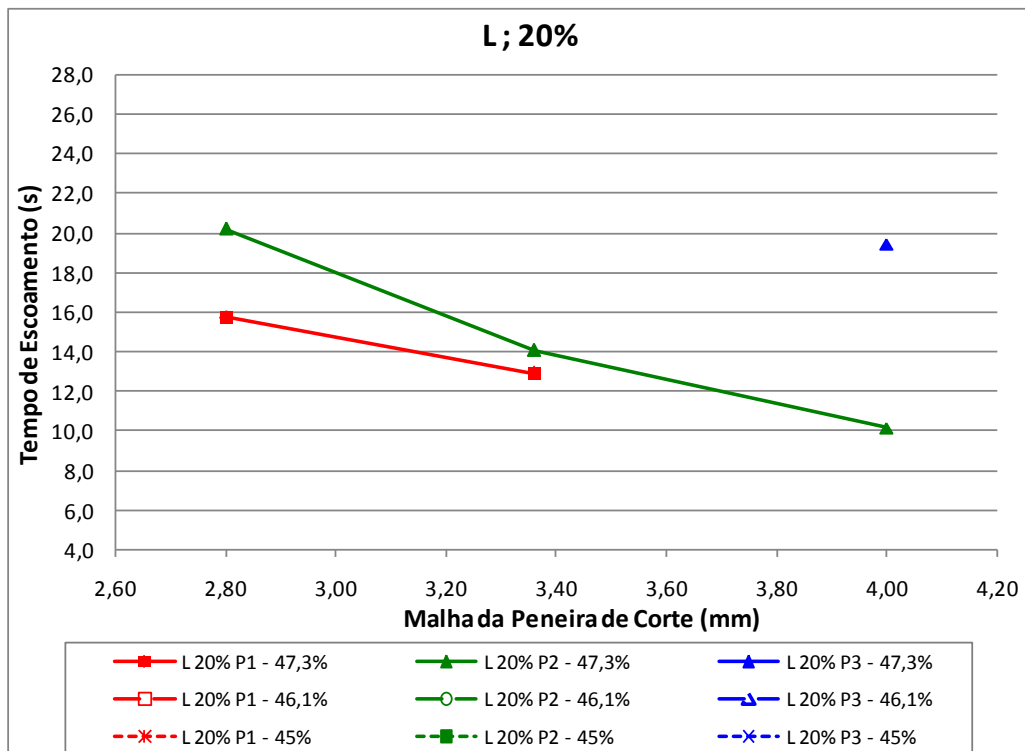
b) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

Continuação...



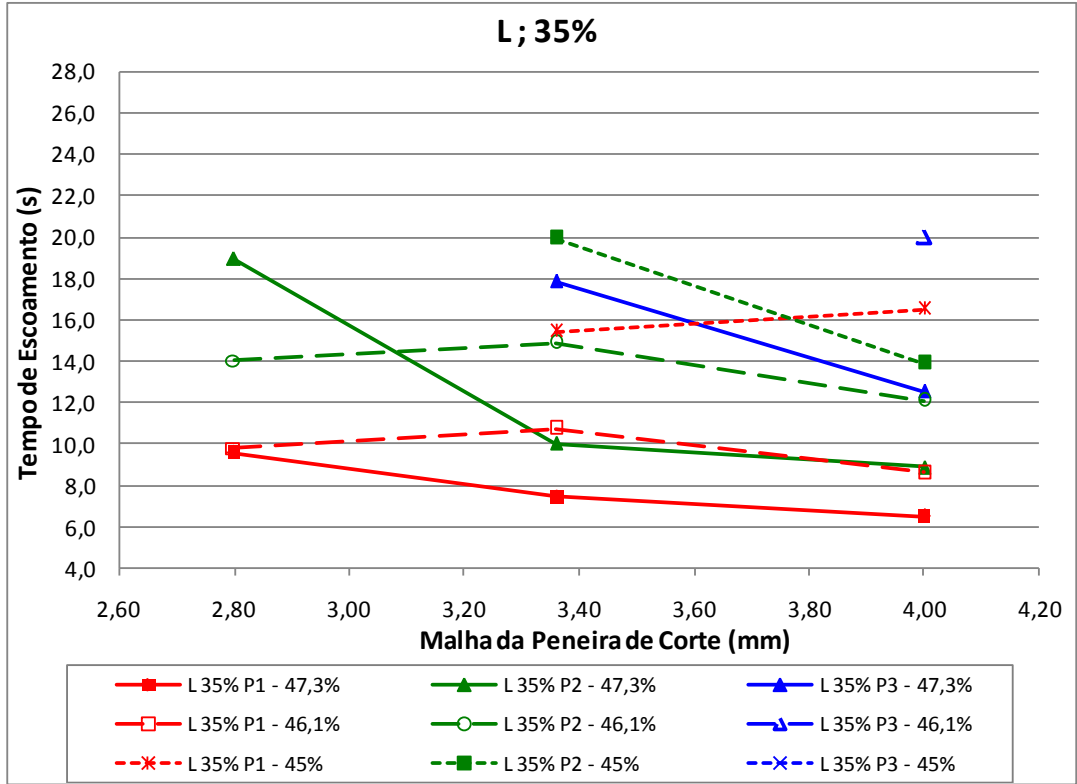
c) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.12 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas em função dos diferentes pontos de corte e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural.

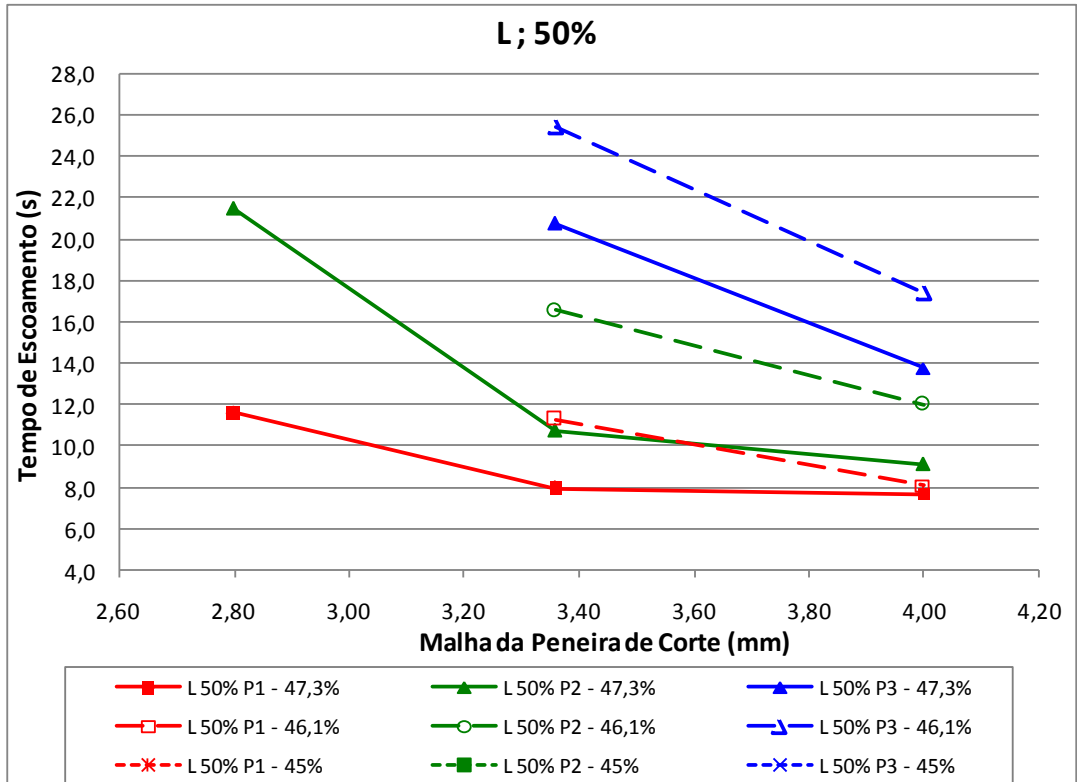


a) Substituição volumétrica por 20% de areia natural

Continuação...



b) Substituição volumétrica por 35% de areia natural



c) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.13 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares em função dos diferentes pontos de corte e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural.

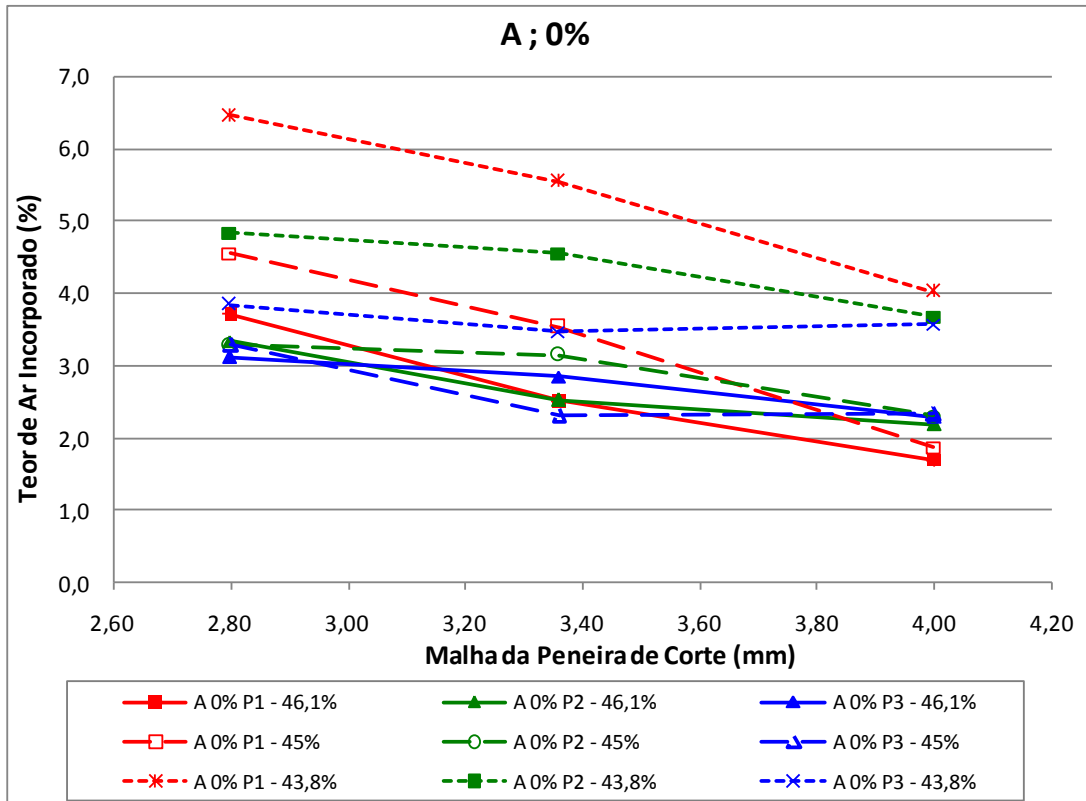
Conforme pode ser observado na Figura 5.12 e Figura 5.13, de maneira geral, houve uma redução do tempo de escoamento com o aumento da malha da peneira de corte da areia de britagem. Em alguns casos, só houve escoamento das argamassas com as composições com areias de britagem peneiradas nas malhas maiores (3,36 e 4,00mm). Já em outros, houve escoamento apenas das argamassas com areia de britagem peneirada nas malhas 2,80 e 3,36mm, não escoando aquelas com areia de britagem peneirada na malha 4,00mm. Nestes últimos casos, que foram os das composições “A 35% P1 – 46,1%” e “A 20% P1 – 46,1%” que possuíam baixo teor de microfinos e o maior teor de pasta dentre os avaliados para a areia de britagem arredondada, as argamassas apresentavam segregação e/ou exsudação já durante o ensaio de espalhamento (avaliado visualmente) e por este motivo travaram, durante a descida, na redução de seção do tubo proposto. Nestes casos, durante o ensaio, a argamassa começava a escoar e então ocorria o entupimento na redução de seção, não escoando nem com a aplicação de golpes de espátula no tubo (indicação PN nas tabelas de resultados). Estas observações visuais foram anotadas durante os ensaios, conforme pode ser observado no Anexo D.

Quanto aos tempos de escoamento das argamassas contendo areia de britagem lamelar, observa-se comportamento predominante semelhante aquele apresentado pelas argamassas contendo areia arredondada. No entanto, apesar desta semelhança de comportamento, houve uma redução significativa no número de argamassas contendo areia lamelar que escoaram pelo tubo se comparado ao número de argamassas com areia arredondada.

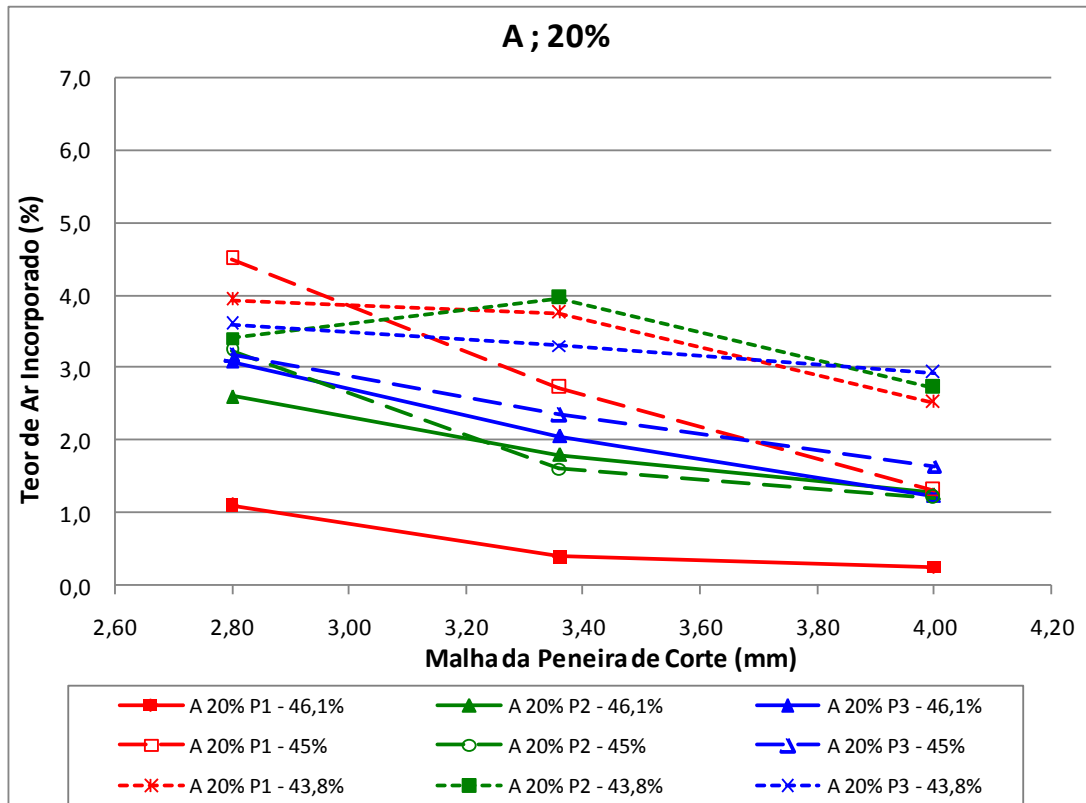
### **5.3.1.3 Quanto ao teor de ar incorporado**

Na Figura 5.14 e na Figura 5.15 são apresentados os teores de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias com forma arredondada e lamelar, respectivamente, em função dos pontos de corte do agregado miúdo de britagem.



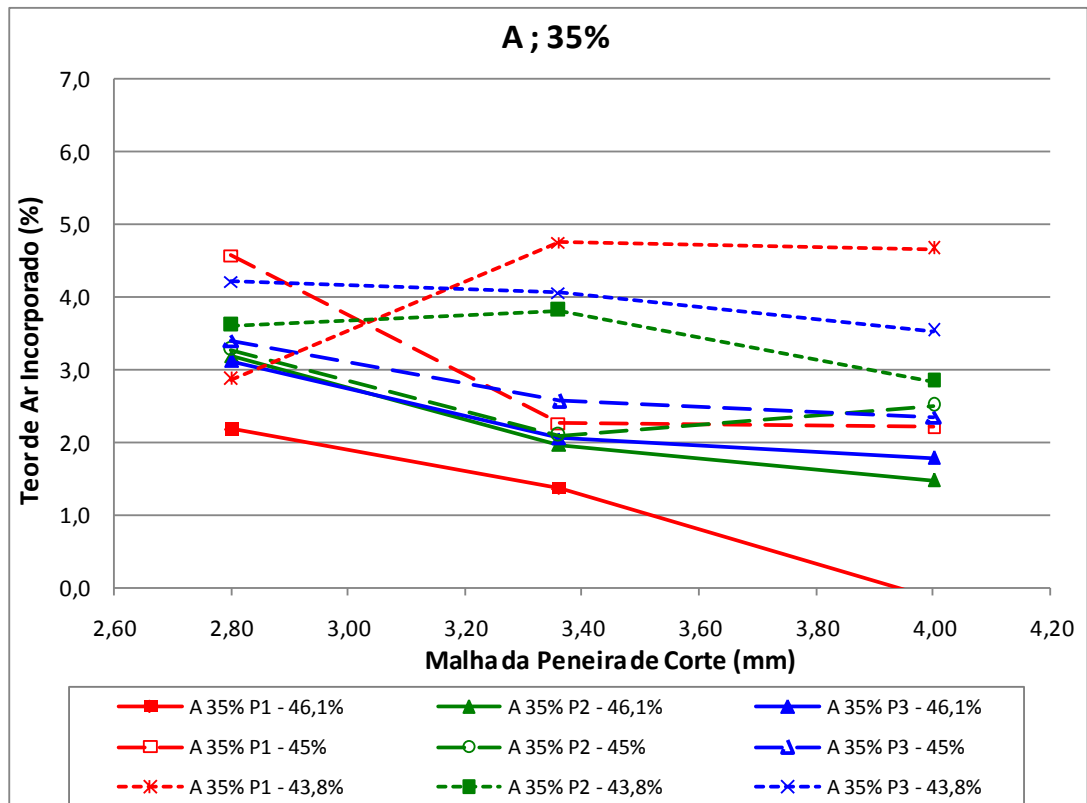


a) Sem areia natural

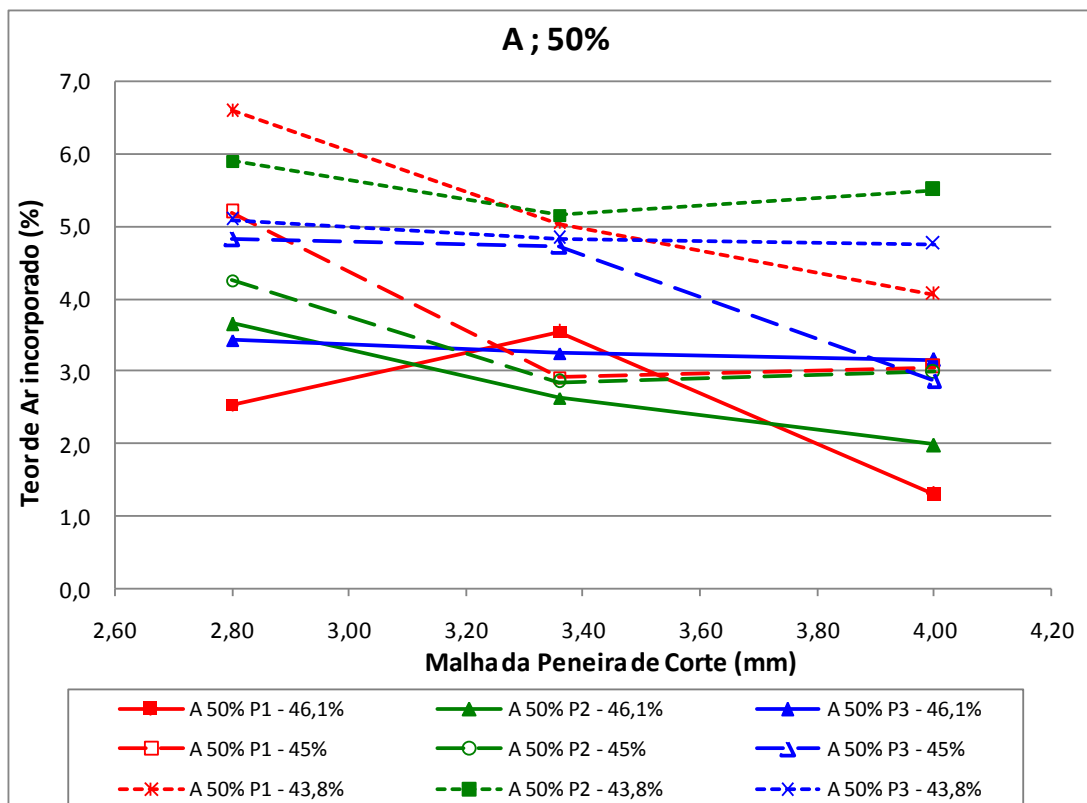


b) Substituição volumétrica por 20% de areia natural

Continuação...

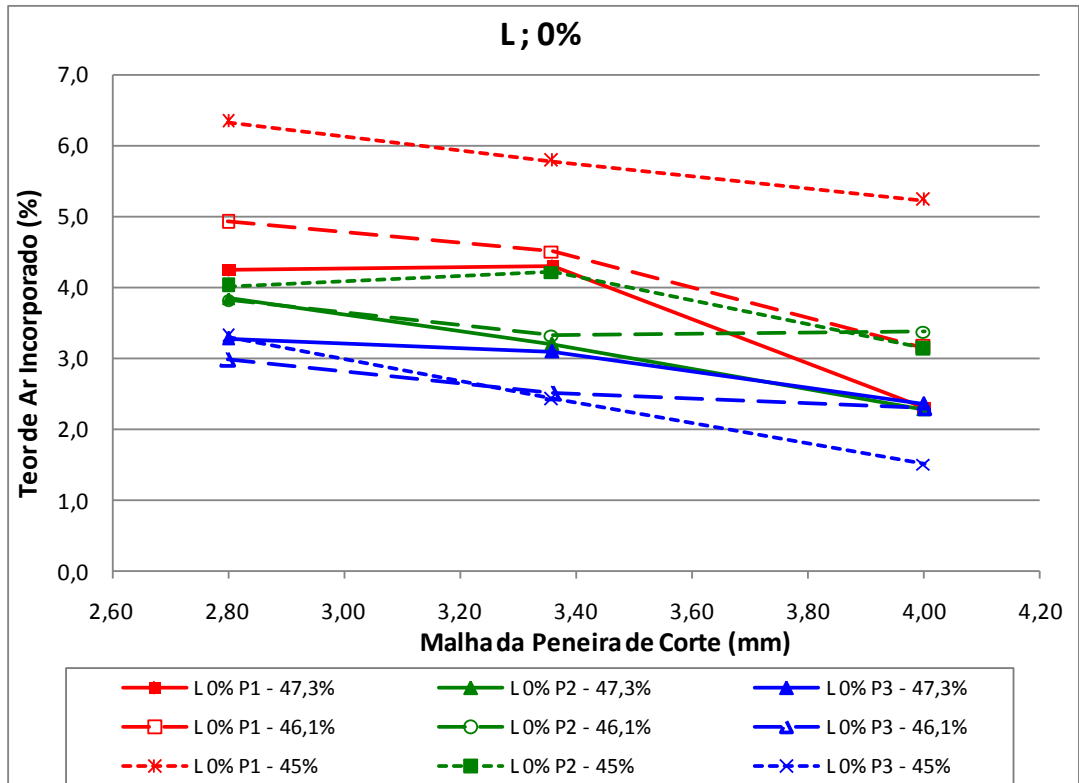


c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

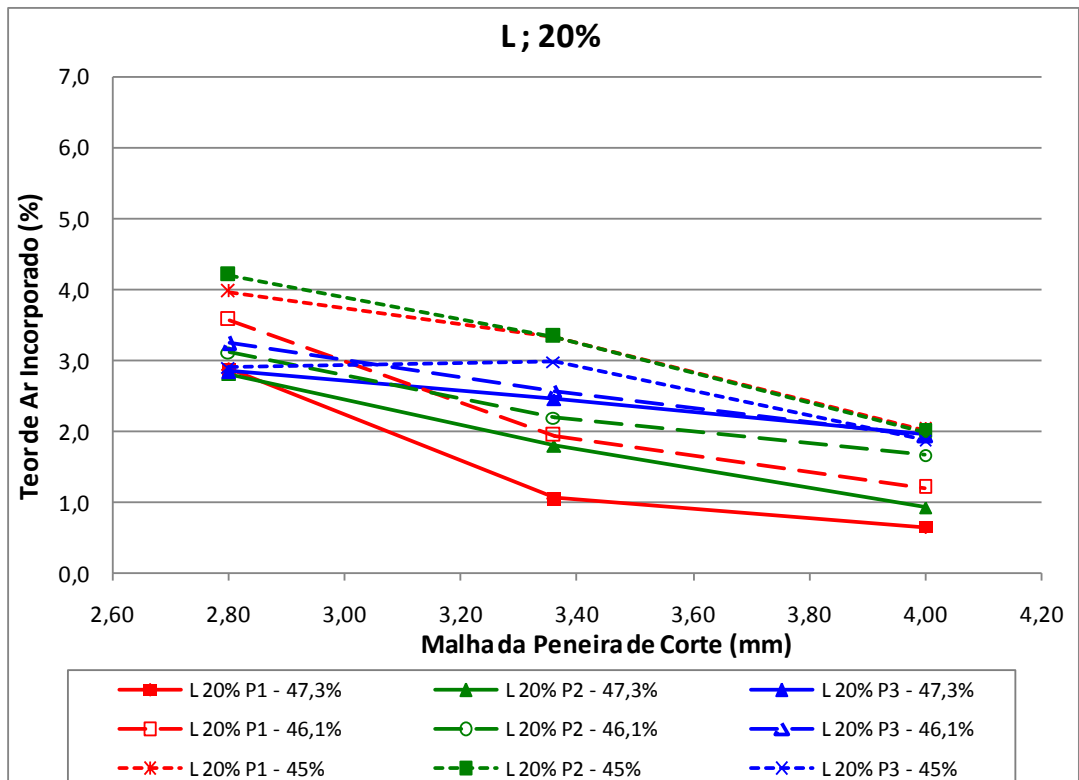


d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.14 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas para diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

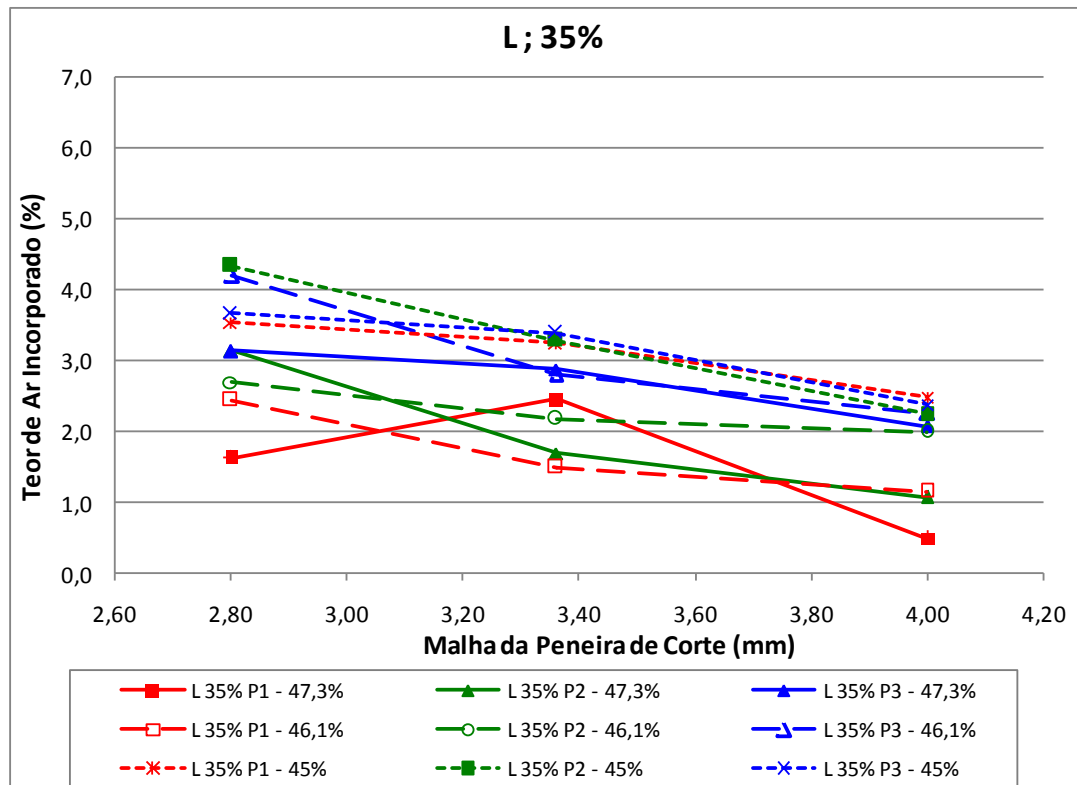


a) Sem areia natural

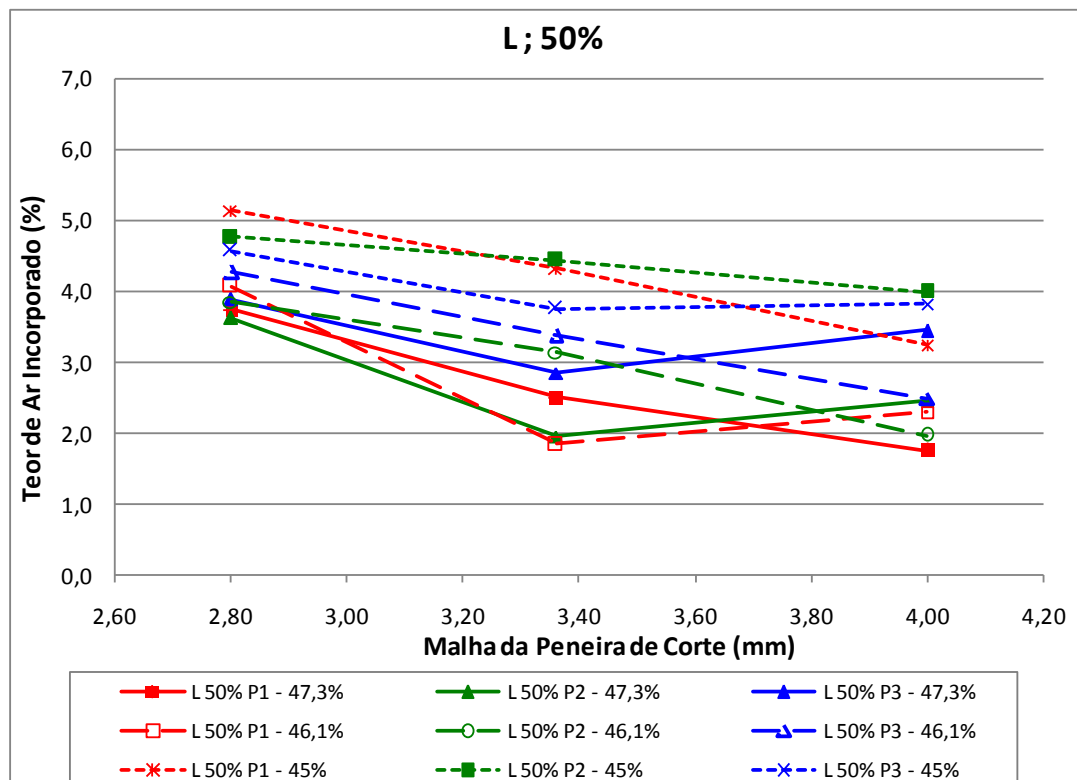


b) Substituição volumétrica por 20% de areia natural

Continuação...



c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural



d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.15 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares em função de diferentes pontos de corte e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

Conforme pode ser observado na Figura 5.14 e na Figura 5.15, houve uma tendência à redução do teor de ar incorporado com o aumento da malha de peneiramento do agregado miúdo de britagem. Este comportamento foi pouco significativo em alguns casos. A exceção foi a composição “A 35% P1 – 43,8%”, em que houve aumento do teor de ar incorporado para a argamassa com areia de britagem peneirada na malha 3,36mm em relação aquela com areia peneirada na malha 2,80mm, o qual se manteve estável para a argamassa com areia peneirada na malha 4,00mm. Outro ponto a ser destacado é que as argamassas contendo areia arredondada com teor de material pulverulento P3 e com teor de pasta de 43,8%, mantiveram o teor de ar incorporado constante independente da alteração da malha da peneira de corte e do teor de areia natural na mistura (Figuras 5.11a, b, c, d).

Vale ressaltar ainda que o valor negativo de teor de ar incorporado observado para a argamassa com a composição “A 35% P1 <4,00 – 46,1%” pode ser consequência de algum erro de pesagem ou da própria precisão do ensaio.

### **5.3.2 Avaliação da influência do teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem**

Para cada combinação de forma de grão (lamelar e arredondada) e peneira de corte do agregado miúdo de britagem e teor de substituição por areia natural, foi avaliada a influência do teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem na fluidez, escoamento pelo ensaio proposto e teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com estes agregados. Para cada uma dessas combinações foram estudados três teores de material pulverulento em relação à sua “areia base” (x), conforme definido em 4.3.5.1, sendo estes de aproximadamente 7,5%, 14,5% e 22,5%.

Vale ressaltar que caso seja considerado o teor de material pulverulento em relação a todo o agregado miúdo de britagem, incluindo a quantidade de granilha definida pelas peneiras de corte, estes variam para uma mesma forma de grão em função do próprio teor de granilha. Em outras palavras, duas areias de britagem passantes em diferentes peneiras de corte podem apresentar teores de microfinos em relação à areia base iguais, porém o teor de material pulverulento, na sua concepção original (em relação a todo o agregado), será diferente.

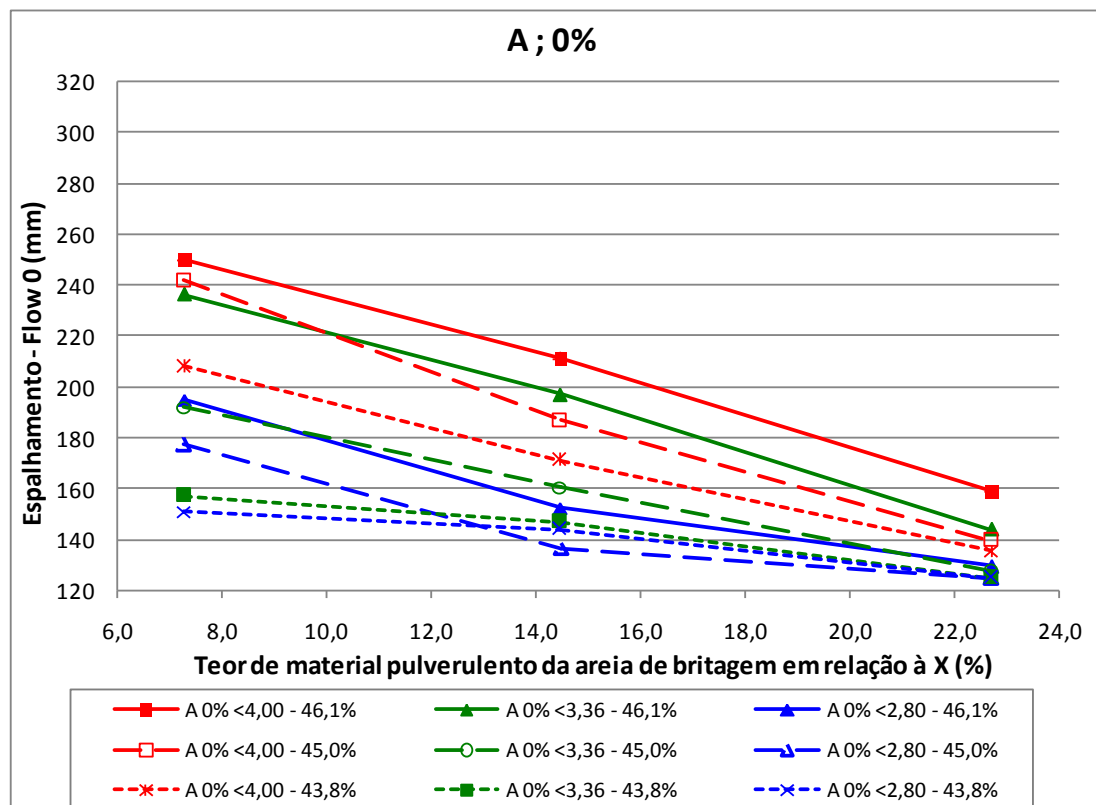
Neste item todos os resultados são apresentados considerando os teores de material pulverulento em relação à areia base, pois este era o parâmetro fixo em comum para uma mesma forma de grão independente da peneira de corte. No entanto, no final deste item é apresentada

uma breve análise considerando o teor de material pulverulento em sua concepção original (em relação a todo o agregado miúdo de britagem, incluindo a granilha) e também considerando o teor de material pulverulento de todo o agregado miúdo, incluindo a areia natural quando esta estiver em composição.

Nos gráficos das figuras deste item, os estilos das linhas correspondem aos teores volumétricos de pasta das argamassas, conforme definição apresentada em 5.3.1. Já as cores representam as diferentes malhas de corte do agregado miúdo de britagem, sendo que vermelho corresponde à malha de 4,00mm; verde a de 3,36mm; e azul a de 2,80mm.

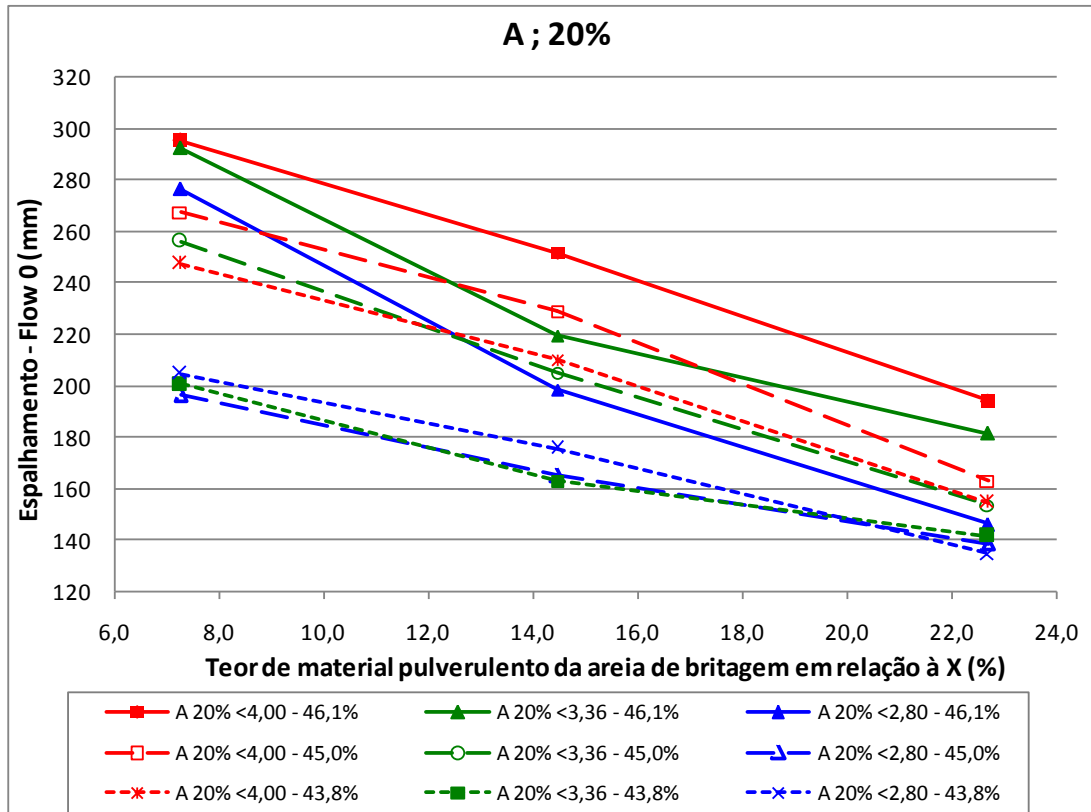
### 5.3.2.1 Quanto à fluidez

Os resultados de fluidez, medidos pelo espalhamento das misturas na mesa para ensaio de consistência, para cada uma das argamassas contendo areias de britagem com forma arredondada dos grãos e com diferentes teores de material pulverulento em relação à areia base (x), são apresentados na Figura 5.16. Os resultados de fluidez para as areias de britagem com forma lamelar dos grãos são apresentados na Figura 5.17.

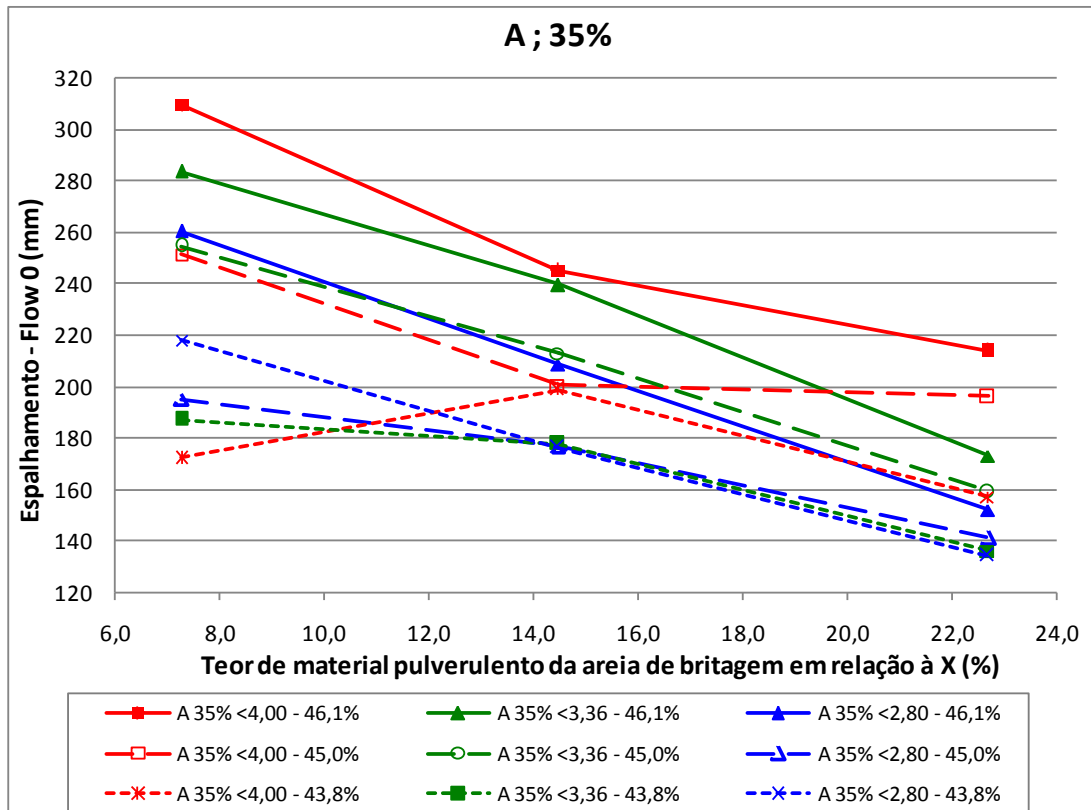


a) Sem areia natural

Continuação...

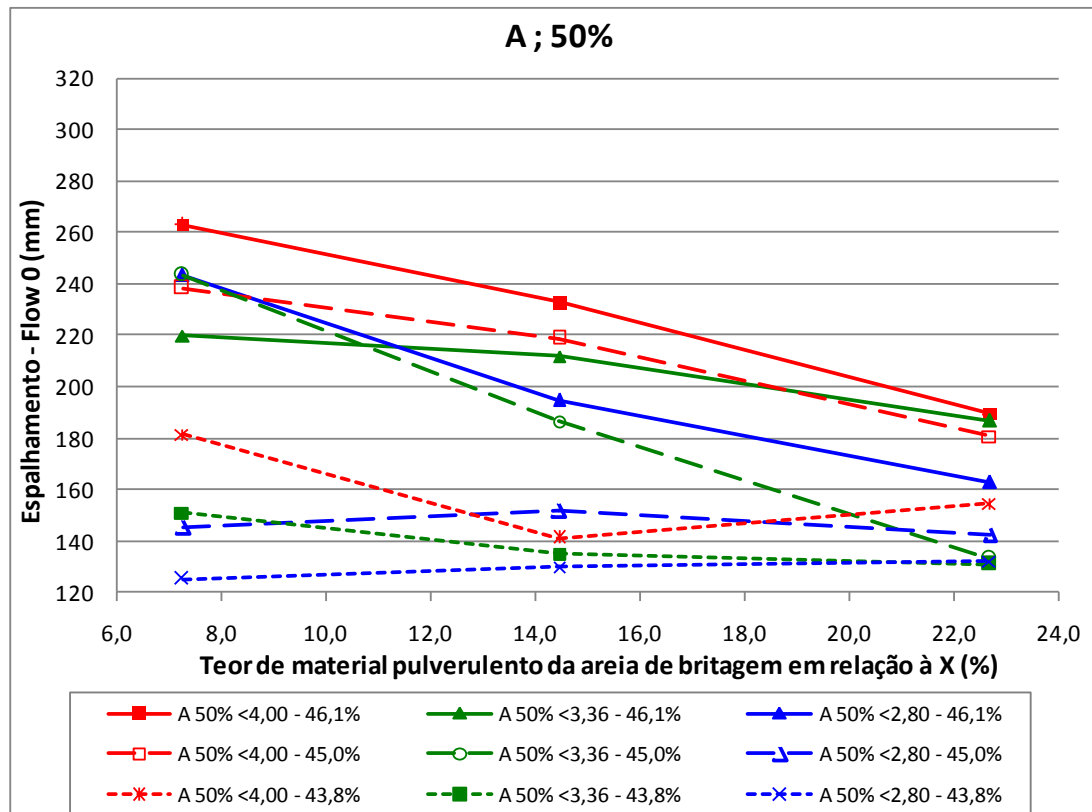


b) Substituição volumétrica por 20% de areia natural



c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

Continuação...

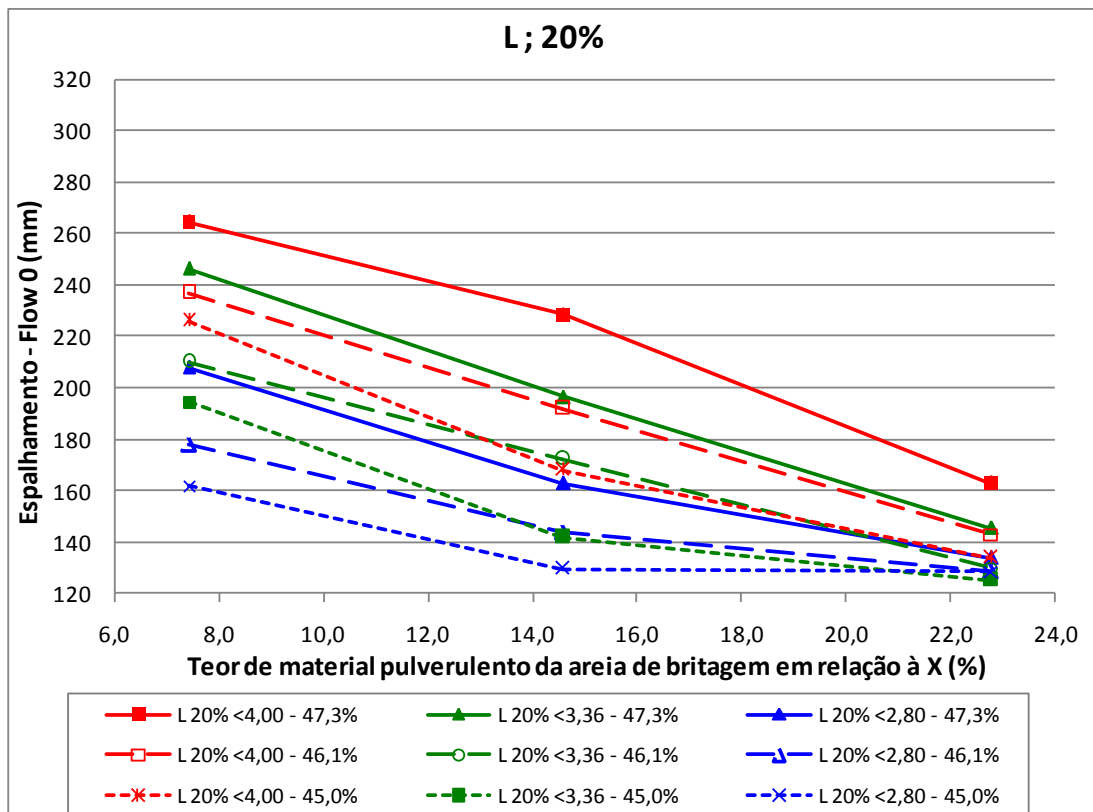
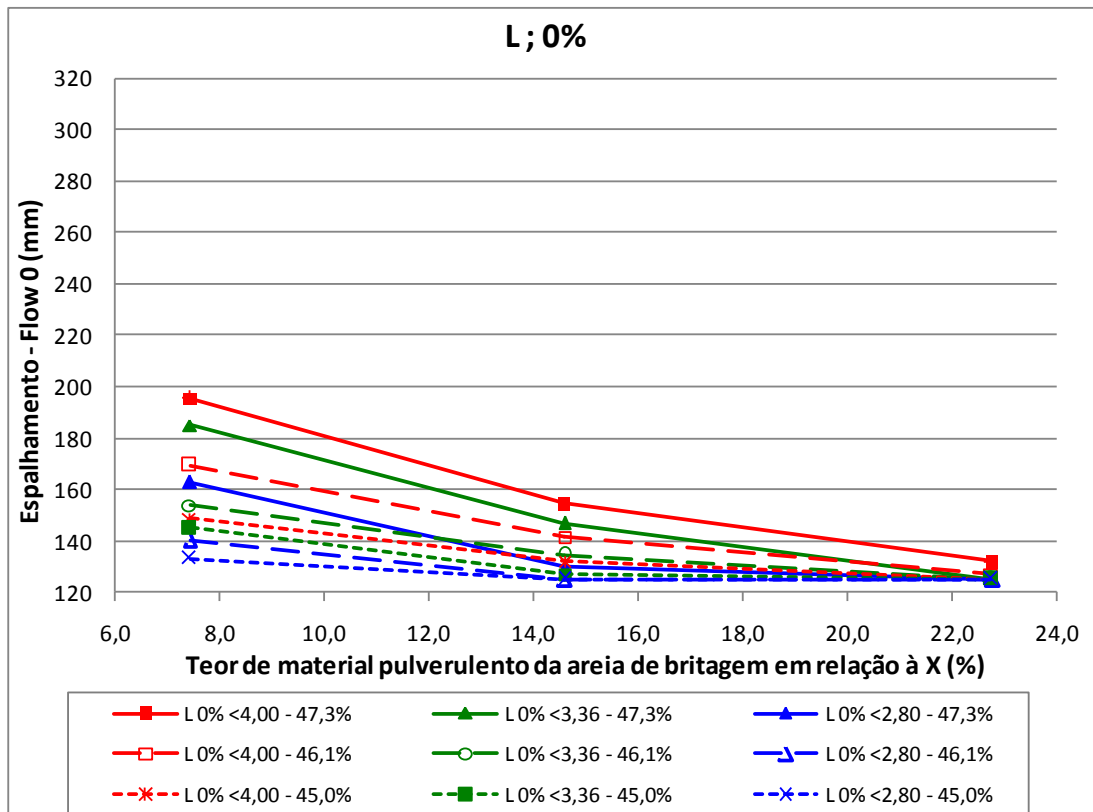


d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

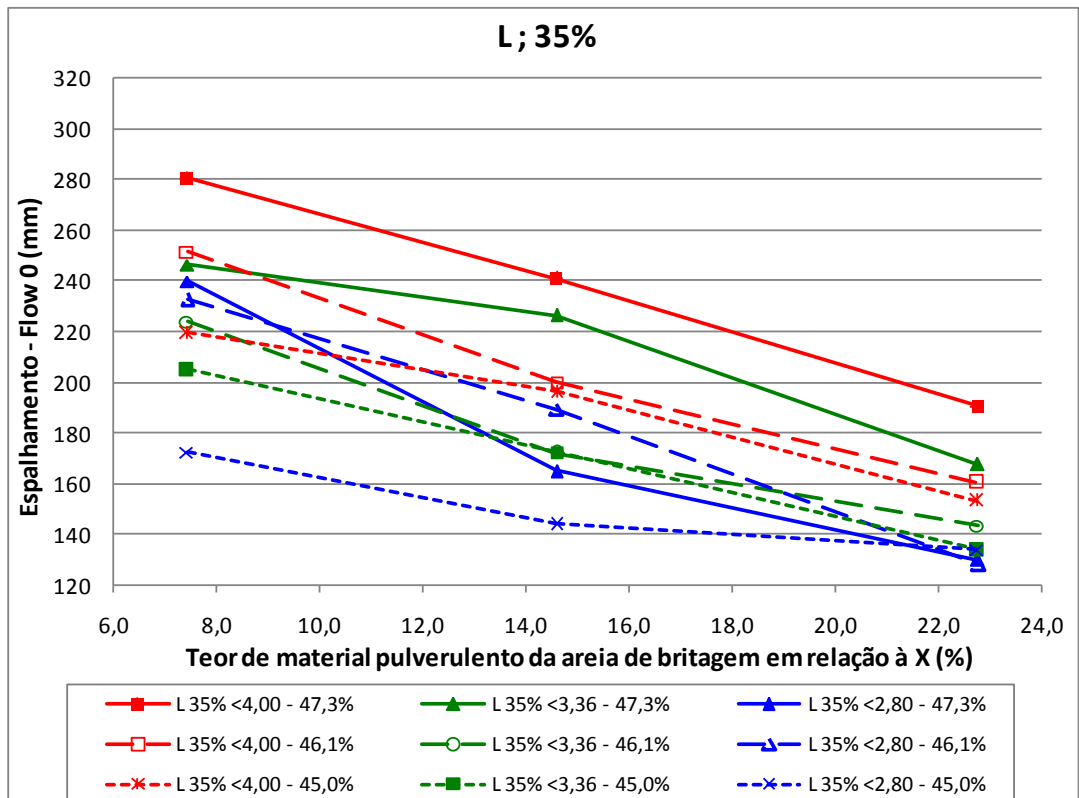
Figura 5.16 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas com diferentes teores de material pulverulento e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

Conforme pode ser observado na Figura 5.16, de maneira geral ocorreu um decréscimo da fluidez (espalhamento) com o aumento do teor de material pulverulento da areia de britagem. Esta redução da fluidez, que aparentemente poderia ser ajustada por uma função linear para cada teor de pasta e combinação de agregado (forma dos grãos, ponto de corte e teor de areia natural), é mais acentuada para as composições com menor teor de areia natural. Comportamento semelhante é observado para o caso das areias de britagem com forma lamelar dos grãos (Figura 5.17). No entanto, neste caso a redução não é tão acentuada para as composições sem areia natural, pois os espalhamentos já estão próximos ao diâmetro do próprio molde utilizado no ensaio (125mm). Contudo, se considerado o espalhamento após aplicação de 10 quedas na mesa de consistência (Flow 10) para as areias lamelares, conforme pode ser observado nos resultados apresentados no Anexo D, a taxa de redução mais acentuada seria para as composições sem areia natural da mesma maneira que ocorreu para as areias arredondadas.

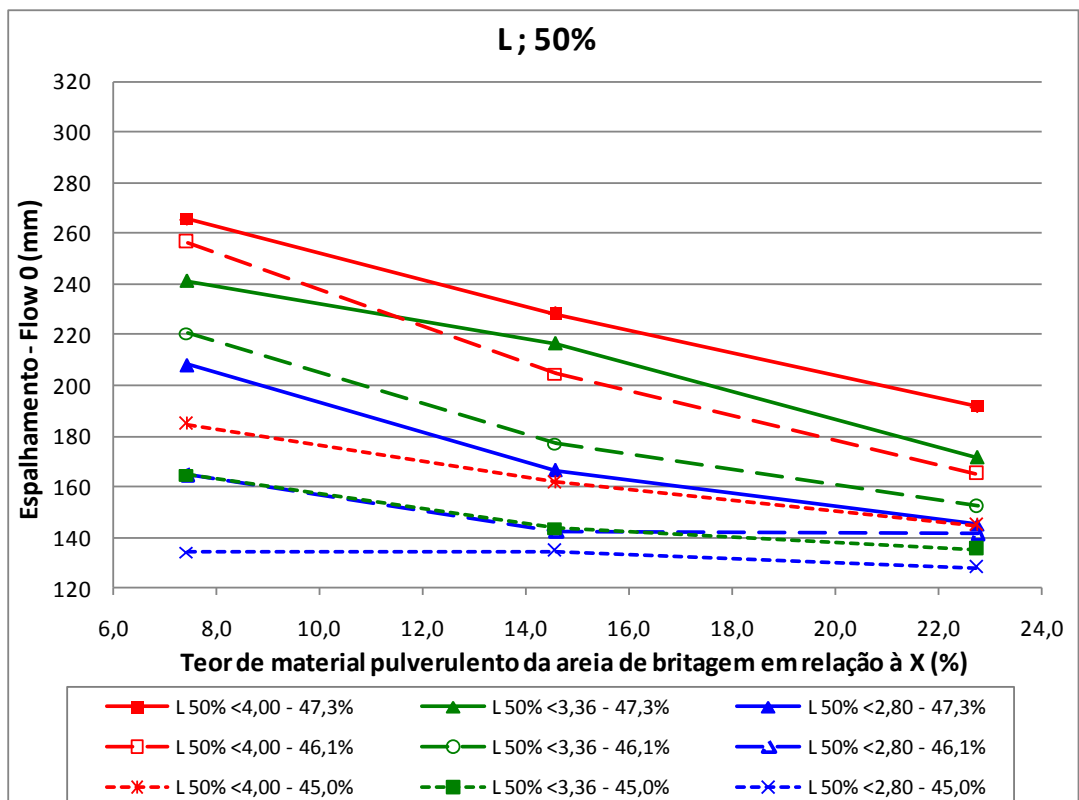




Continuação...



c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

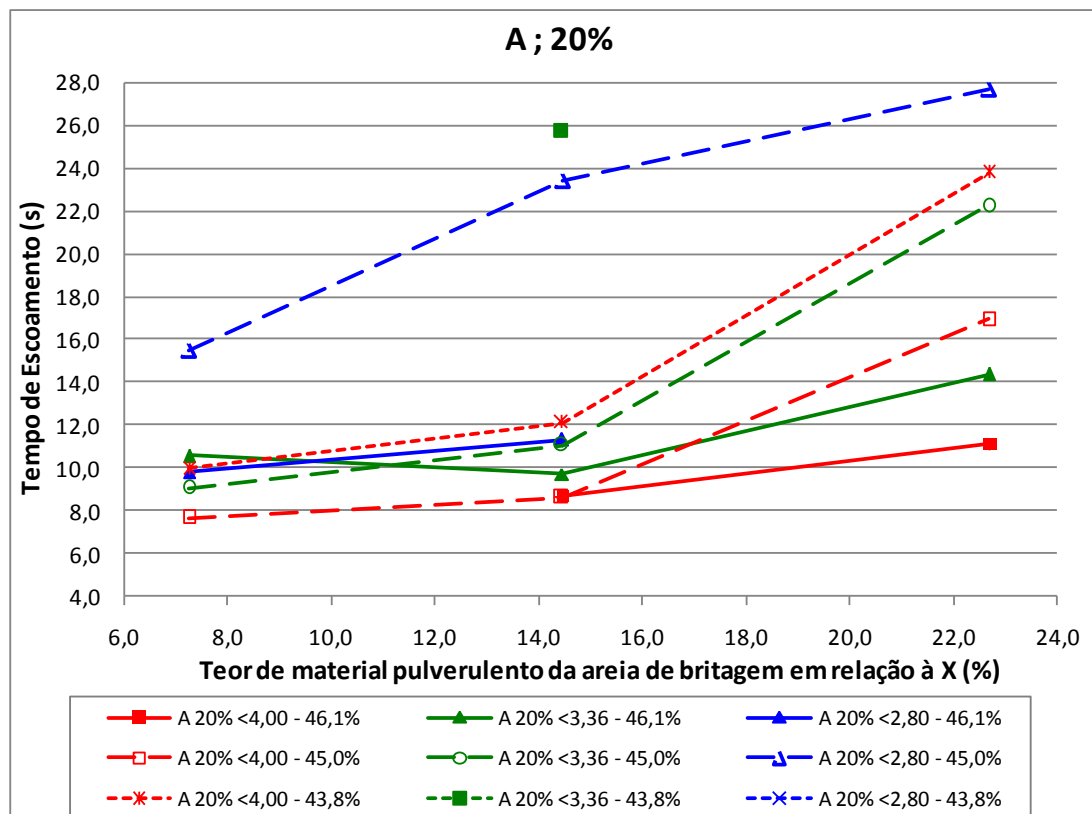


d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.17 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares com diferentes teores de material pulverulento e: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

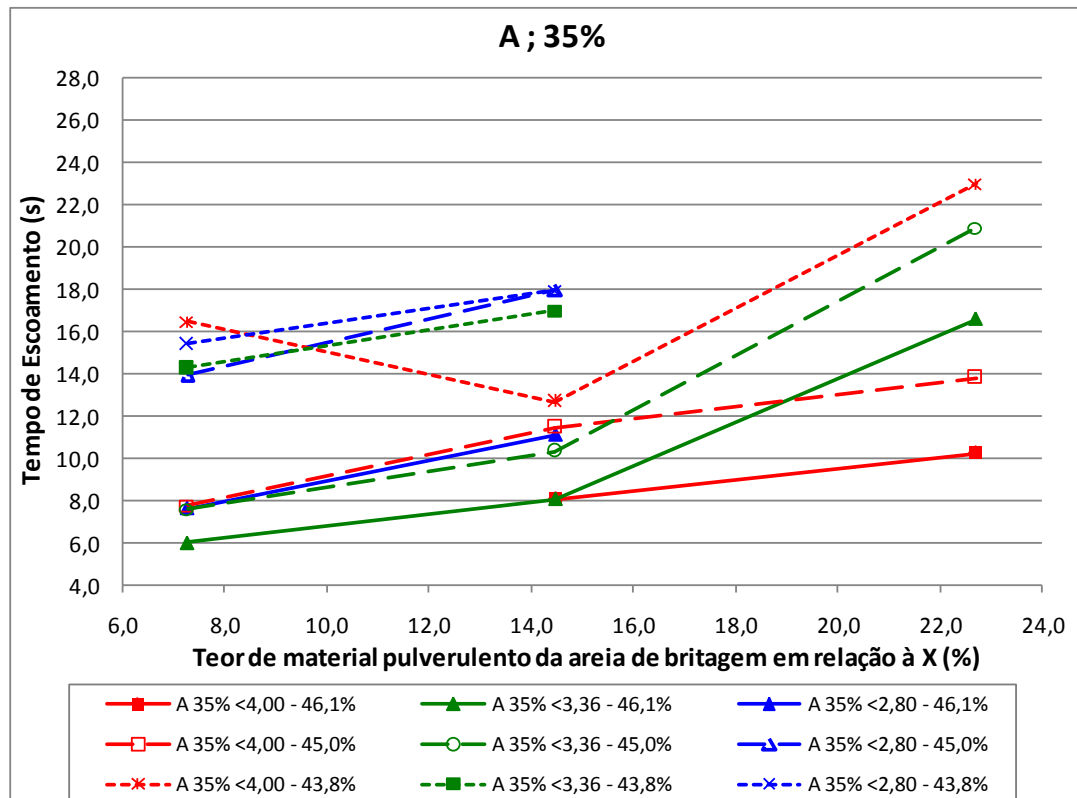
### 5.3.2.2 Quanto ao escoamento

Os tempos de escoamento pelo tubo proposto das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondada e lamelar em função dos teores de material pulverulento do agregado miúdo de britagem em relação à areia base (X) são apresentados na Figura 5.18 e na Figura 5.19, respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, nenhuma composição contendo apenas areia de britagem (sem areia natural) escoou pelo tubo do ensaio proposto e por isso, não são apresentados gráficos para estas composições.

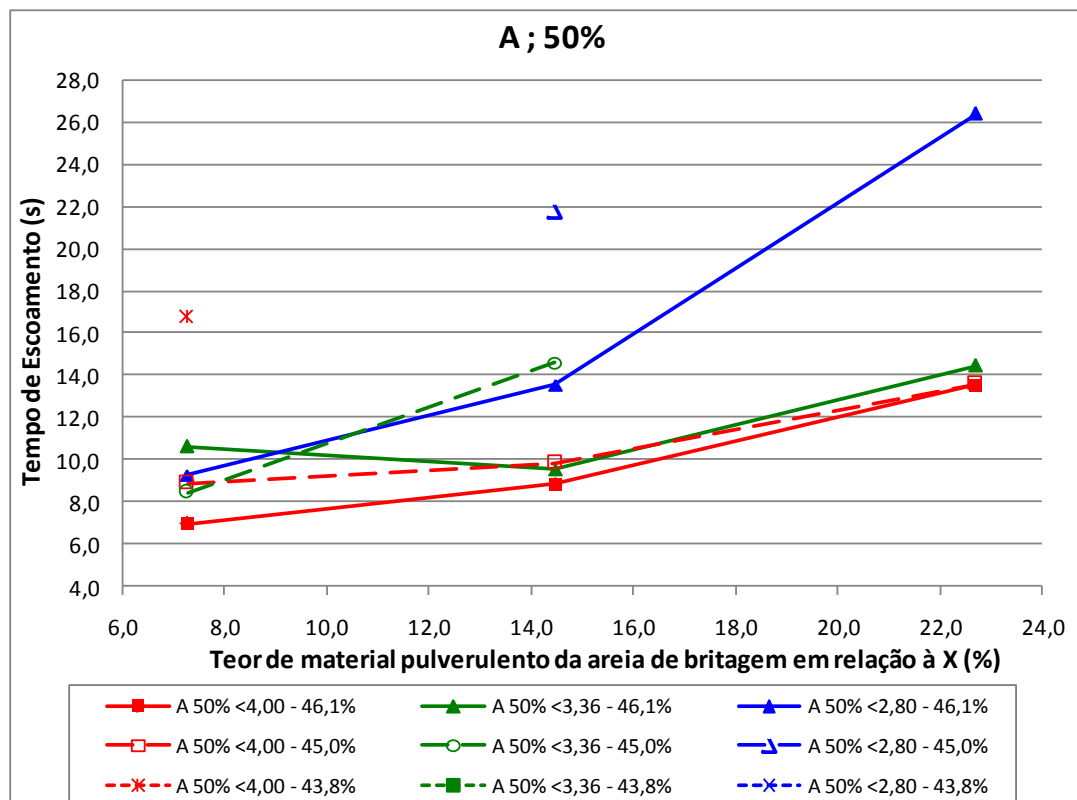


a) Substituição volumétrica por 20% de areia natural

Continuação...

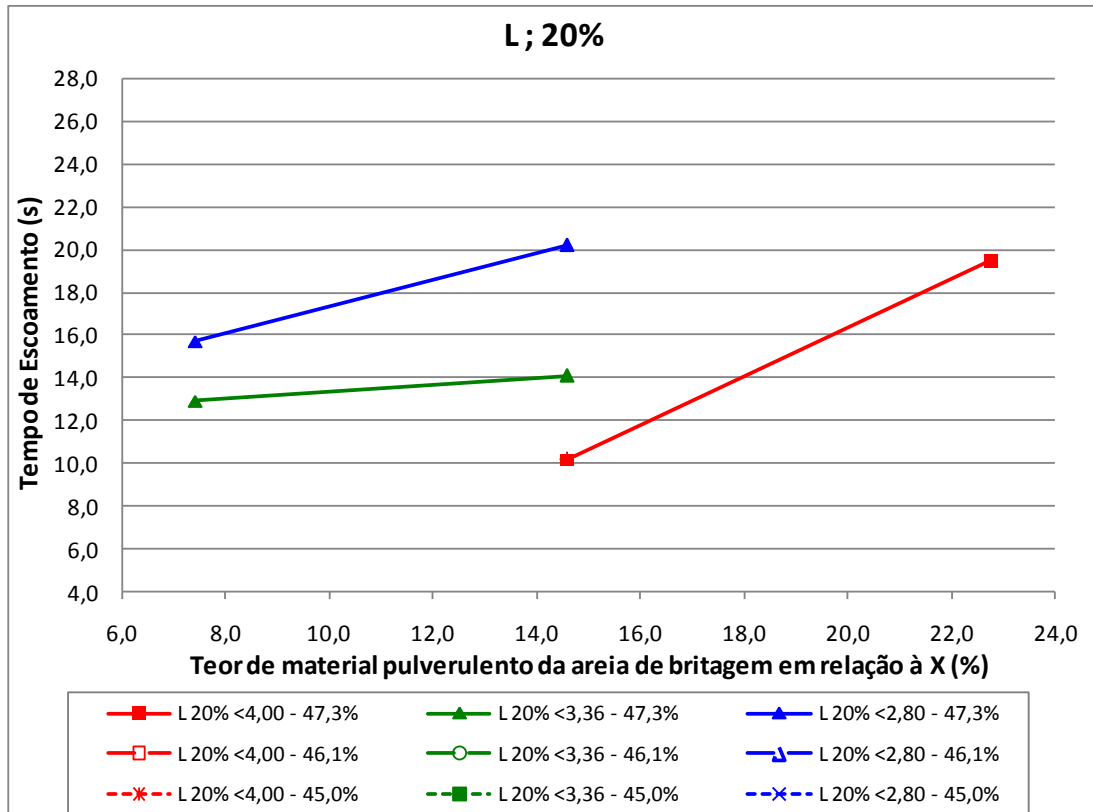


b) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

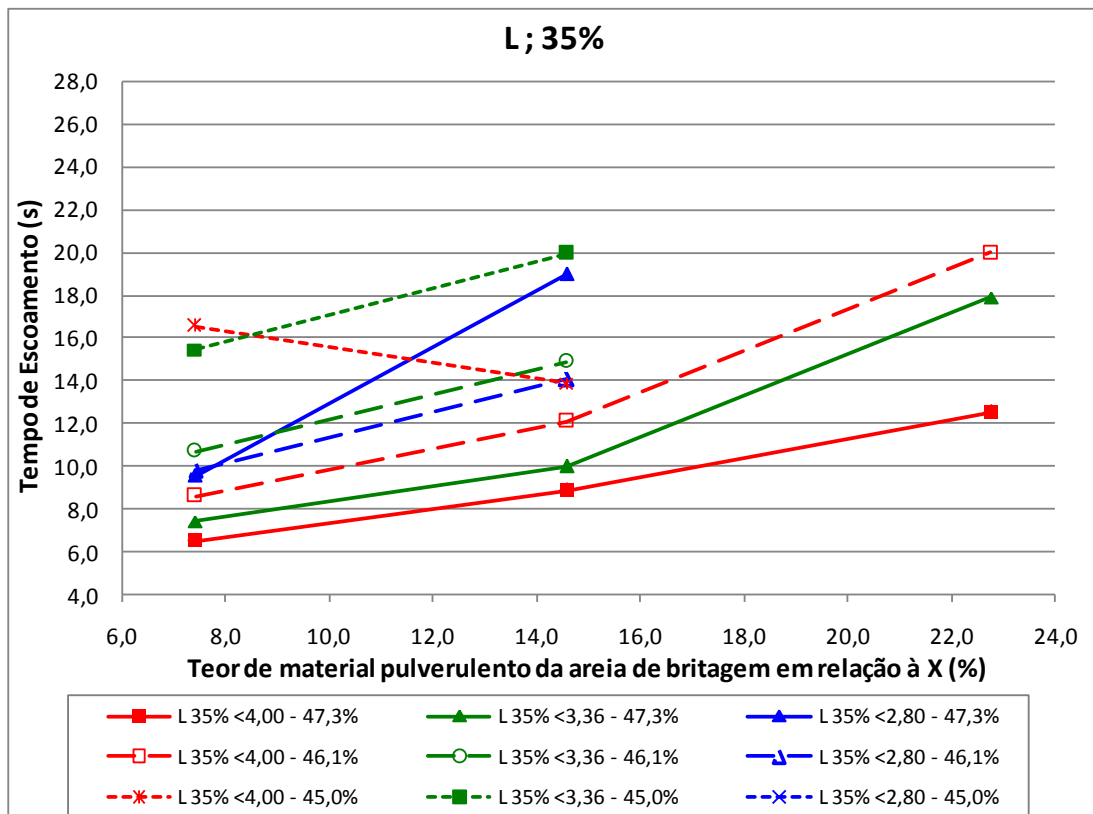


c) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.18 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas com diferentes teores de material pulverulento e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural.

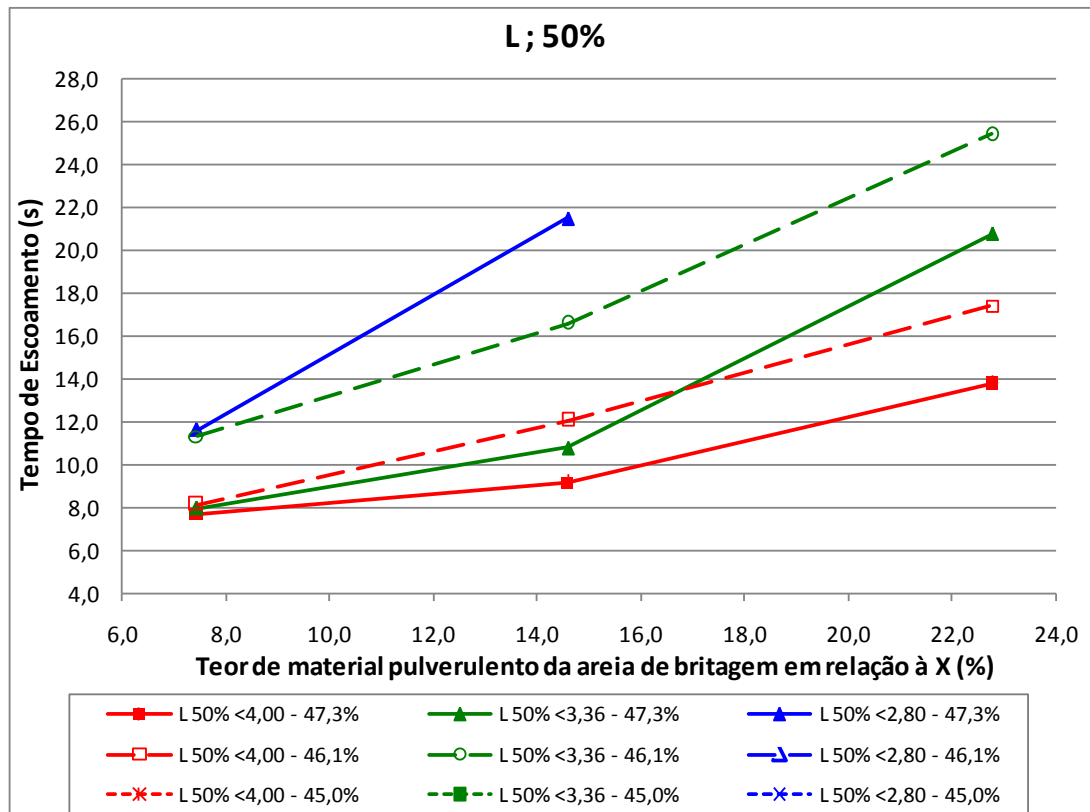


a) Substituição volumétrica por 20% de areia natural



b) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

Continuação...



c) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.19 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem lamelares com diferentes teores de material pulverulento e: a) com substituição de 20% por areia natural; b) com substituição de 35% por areia natural; e c) com substituição de 50% por areia natural.

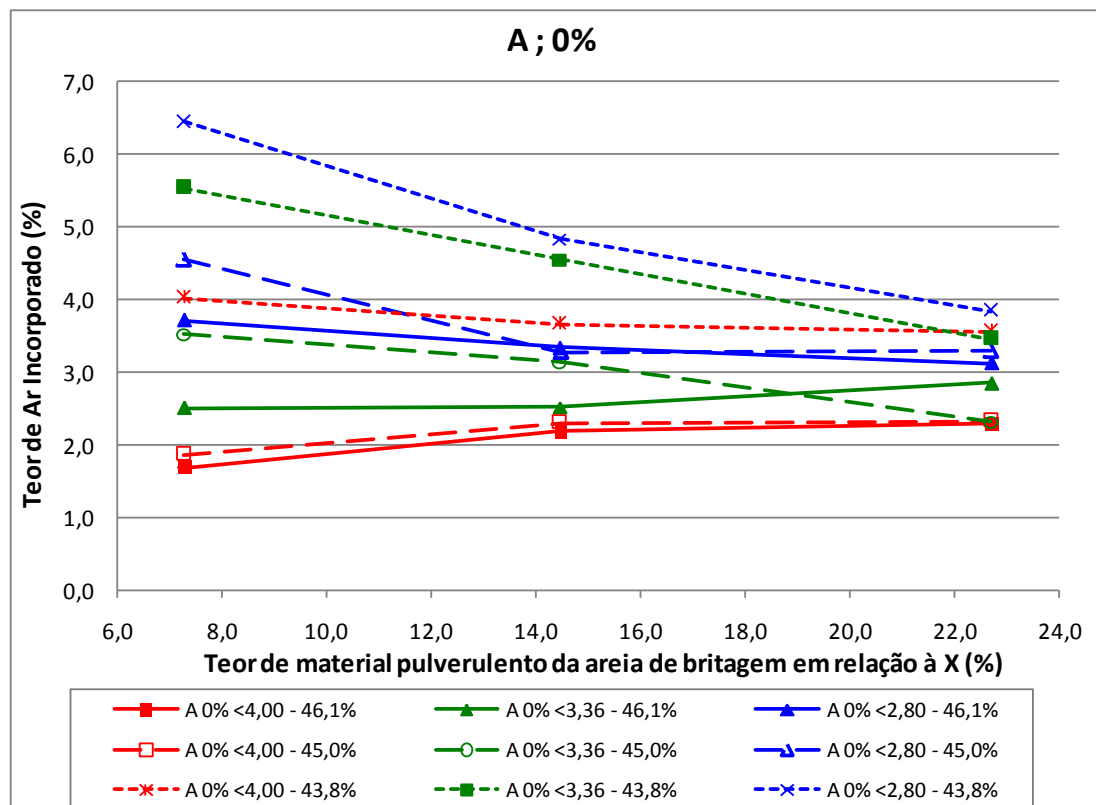
Conforme pode ser observado na Figura 5.18 e na Figura 5.19, de maneira geral, a redução do teor de material pulverulento da areia de britagem proporcionou redução dos tempos de escoamento das argamassas pelo tubo proposto. Na maioria dos casos, esta redução é mais pronunciada nos casos em que há menor volume de pasta na mistura. Além disso, esta redução não é linear para os três teores de material pulverulento avaliados, sendo mais acentuada entre o teor maior (P3) e o teor intermediário (P2) que deste para o menor teor (P1).

Em alguns casos das areias de britagem com forma arredondada, houve escoamento apenas para um dos dois teores mais baixos de material pulverulento. Um exemplo disto é a composição “A 20% <3,36 – 43,8%” da Figura 5.18a, para a qual apenas a argamassa com o teor intermediário de material pulverulento escoou. Para alguns outros casos, houve escoamento somente para os dois teores mais baixos de material pulverulento, onde normalmente o maior teor proporcionava elevada coesão à argamassa, dificultando seu escoamento. Contudo, quando utilizado o maior teor de pasta na mistura, areias de britagem com baixo teor de material pulverulento compostas com pequenos teores de areia natural, apresentavam segregação e

exsudação elevadas, limitando o escoamento pelo ensaio proposto. Alguns exemplos disto são as composições “A 20% <4,00 – 45,0%”; “A 35% <4,00 – 45,0%” e “L 20% <4,00 – 47,3%” (vide resultados no Anexo D).

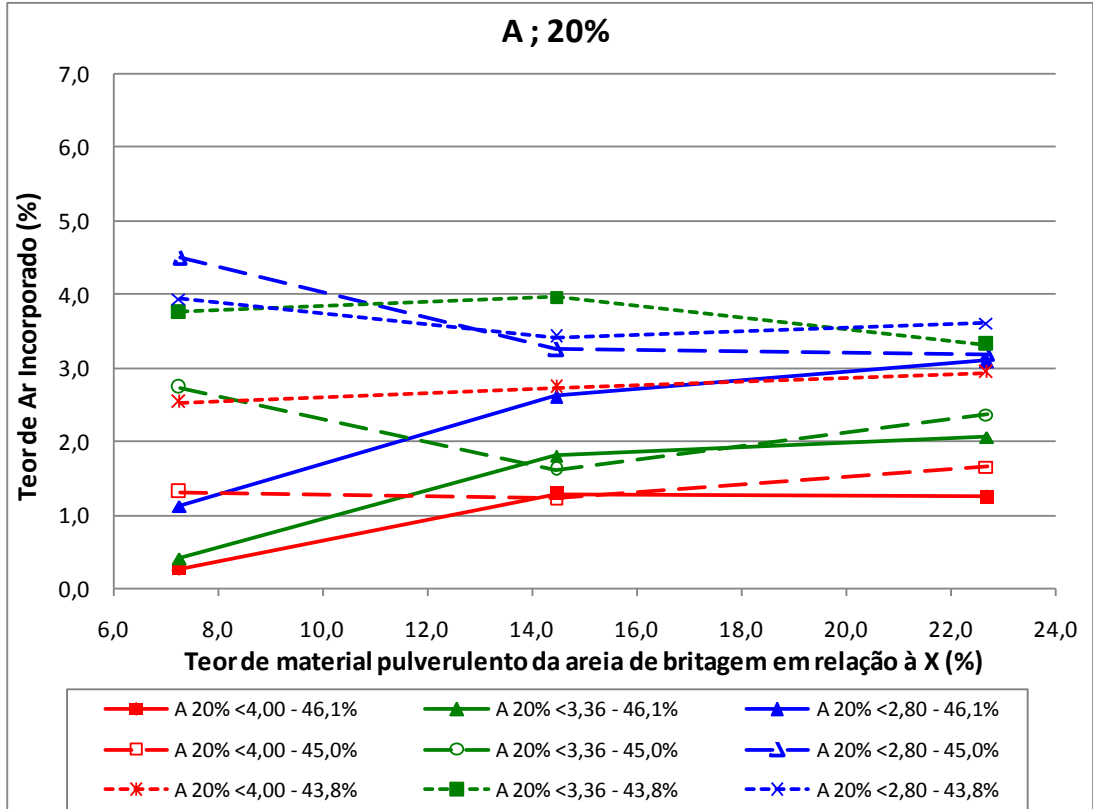
### 5.3.2.3 Quanto ao teor de ar incorporado

Nas Figura 5.20 e Figura 5.21 são apresentados os teores de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de forma arredondada e lamelar, respectivamente, em função dos pontos de corte do agregado miúdo de britagem.

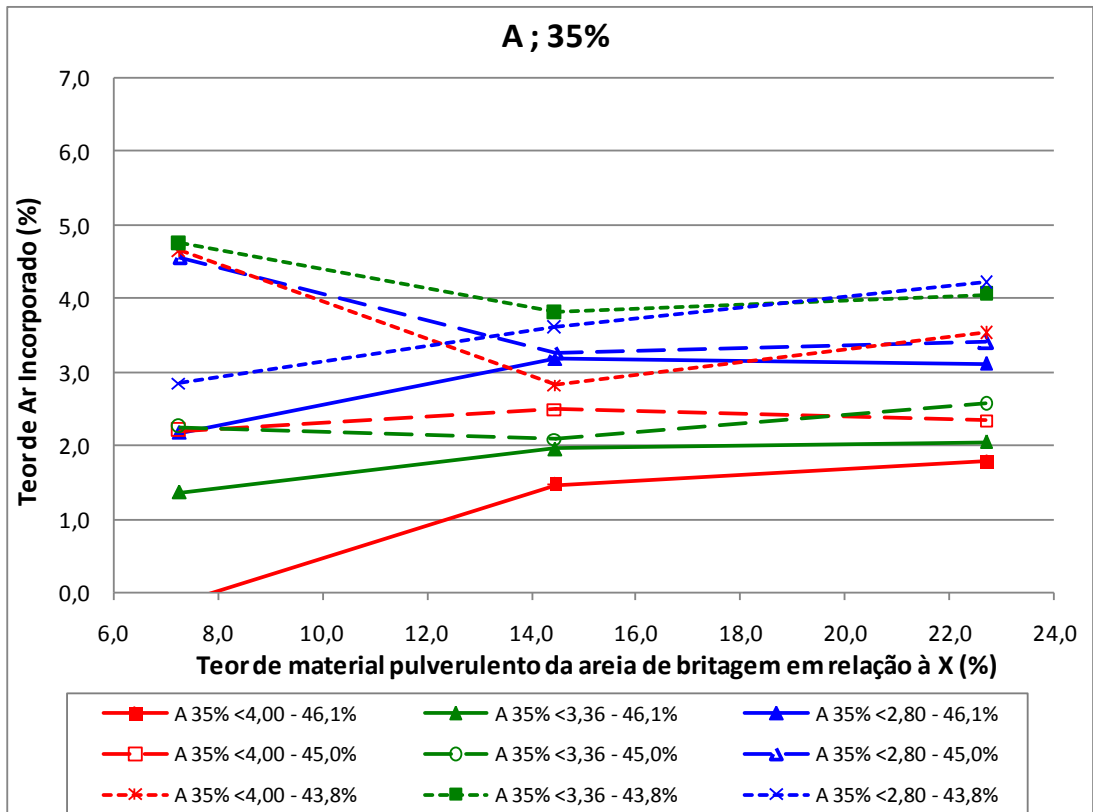


a) Sem areia natural

Continuação...



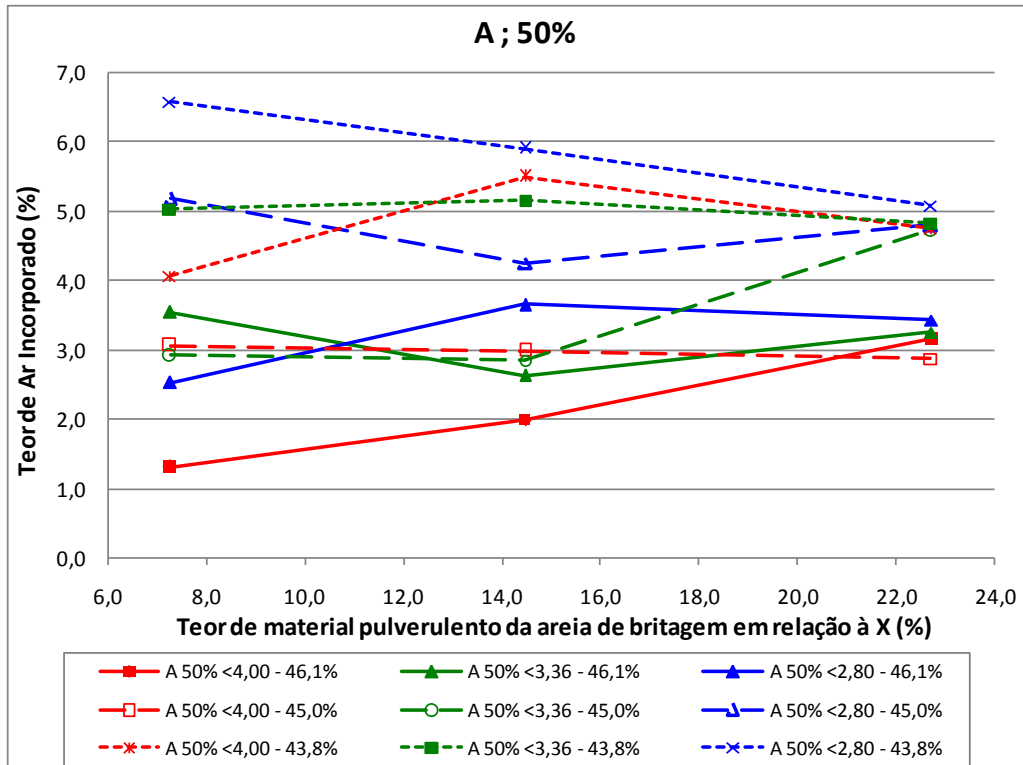
b) Substituição volumétrica por 20% de areia natural



c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

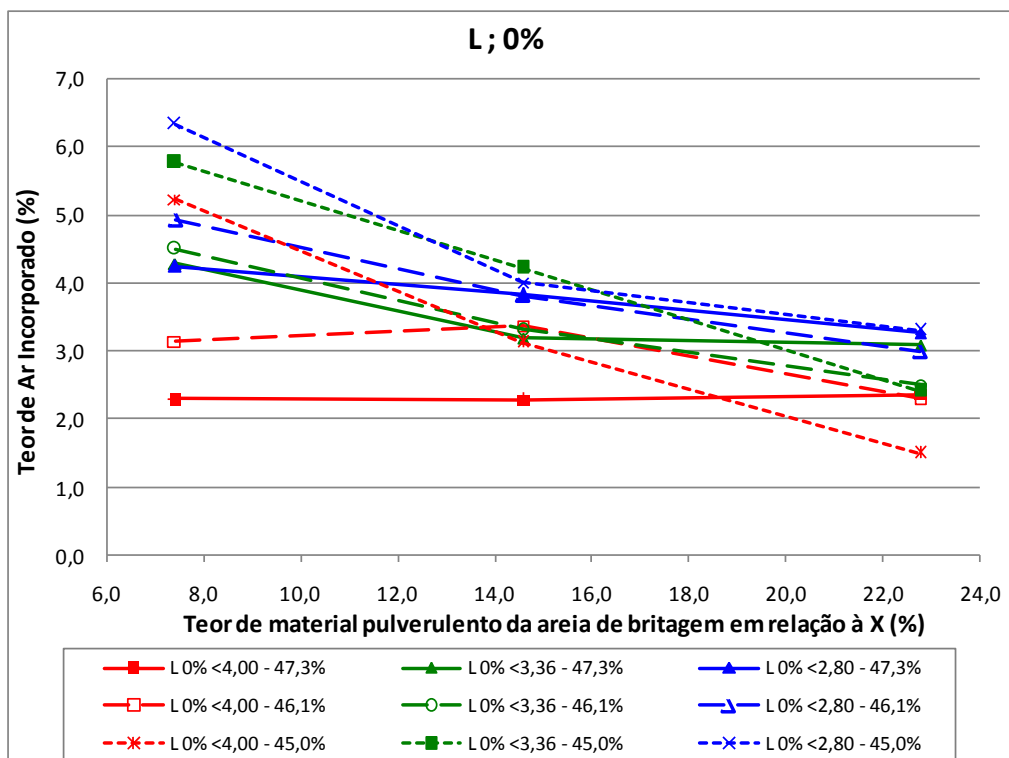
Continuação...





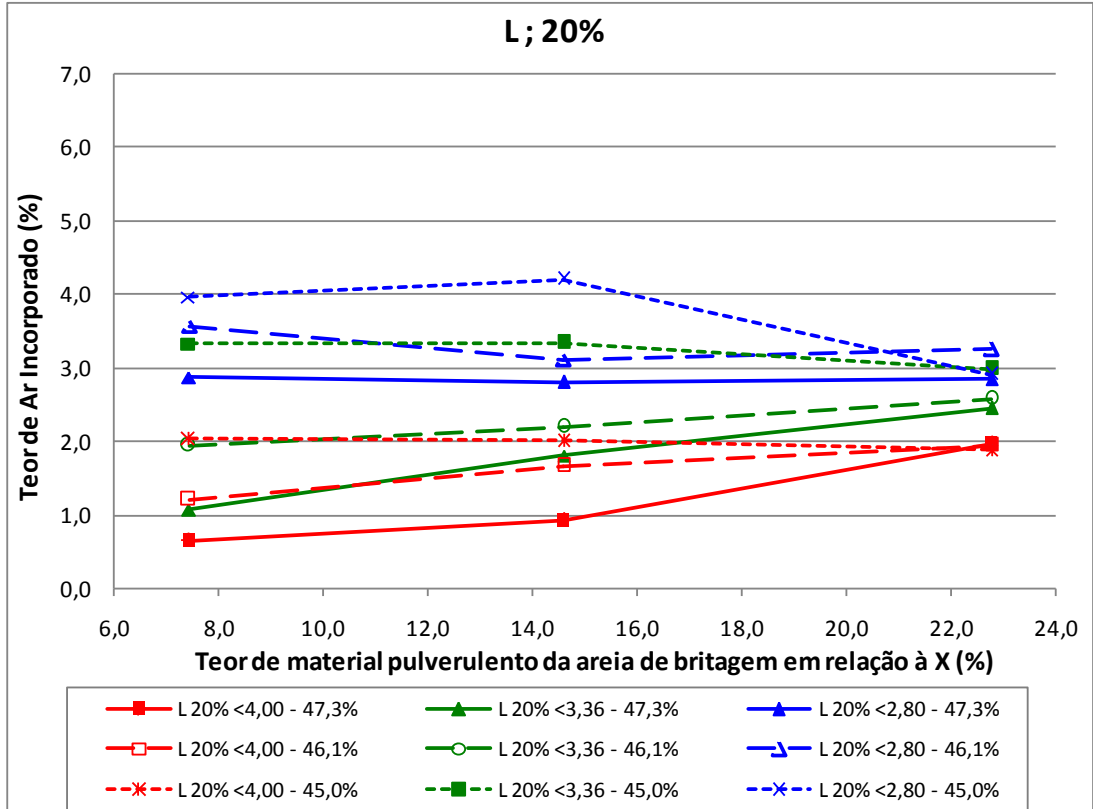
d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.20 – Teor de ar incorporado das argamassas com areias de britagem arredondadas em função do teor de material pulverulento para: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

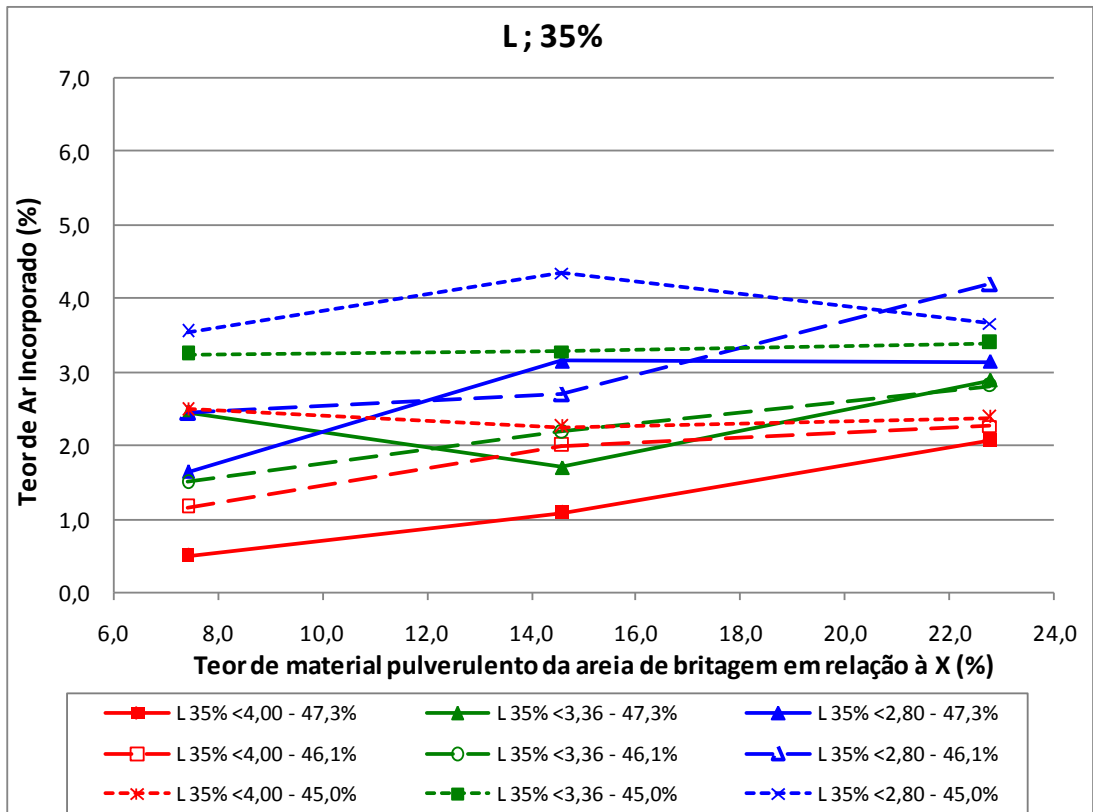


a) Sem areia natural

Continuação...

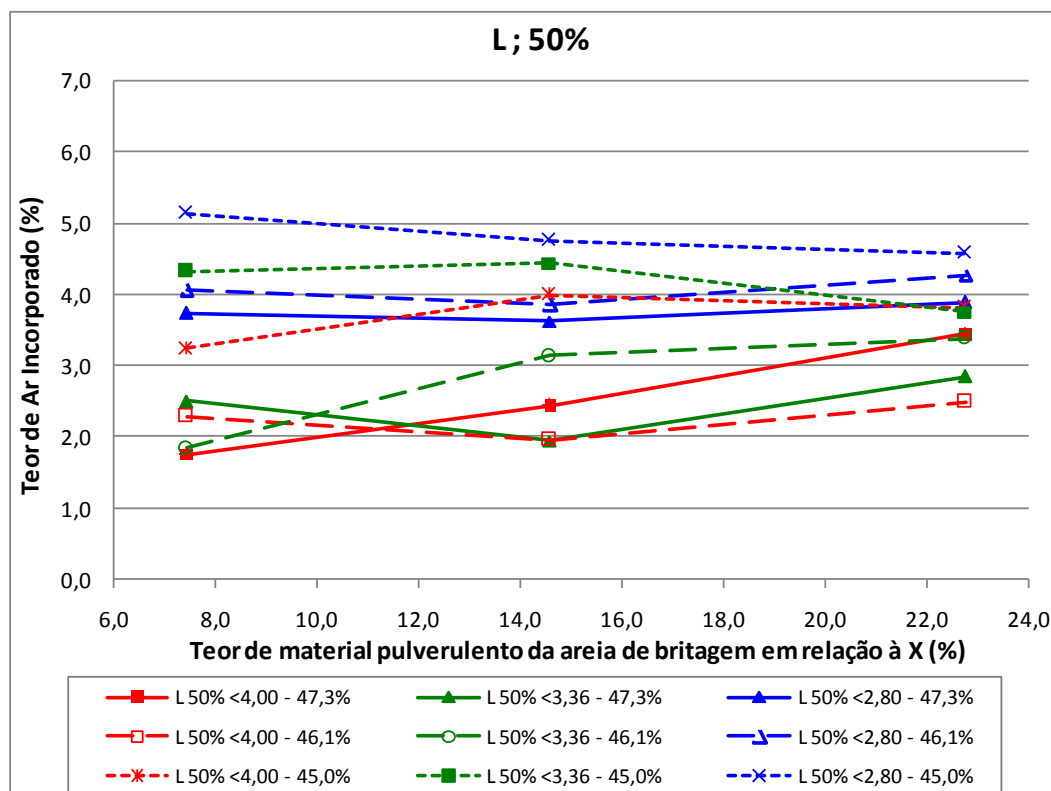


b) Substituição volumétrica por 20% de areia natural



c) Substituição volumétrica por 35% de areia natural

Continuação...



d) Substituição volumétrica por 50% de areia natural

Figura 5.21 – Teor de ar incorporado das argamassas com areias de britagem arredondadas em função do teor de material pulverulento para: a) sem areia natural; b) com substituição de 20% por areia natural; c) com substituição de 35% por areia natural; e d) com substituição de 50% por areia natural.

Conforme pode ser observado na Figura 5.20 e na Figura 5.21, não houve um comportamento nitidamente predominante que explicasse a influência do teor de material pulverulento da areia de britagem na incorporação de ar. Contudo, para as argamassas que não continham areia natural (Figura 5.20a e Figura 5.21a) o teor de ar incorporado reduziu ou ao menos se manteve constante com o aumento do teor de material pulverulento da areia de britagem. Por outro lado, quando da presença da areia natural, independentemente do teor, os comportamentos ficaram muito distintos e sem uma tendência predominante com relação à incorporação de ar.

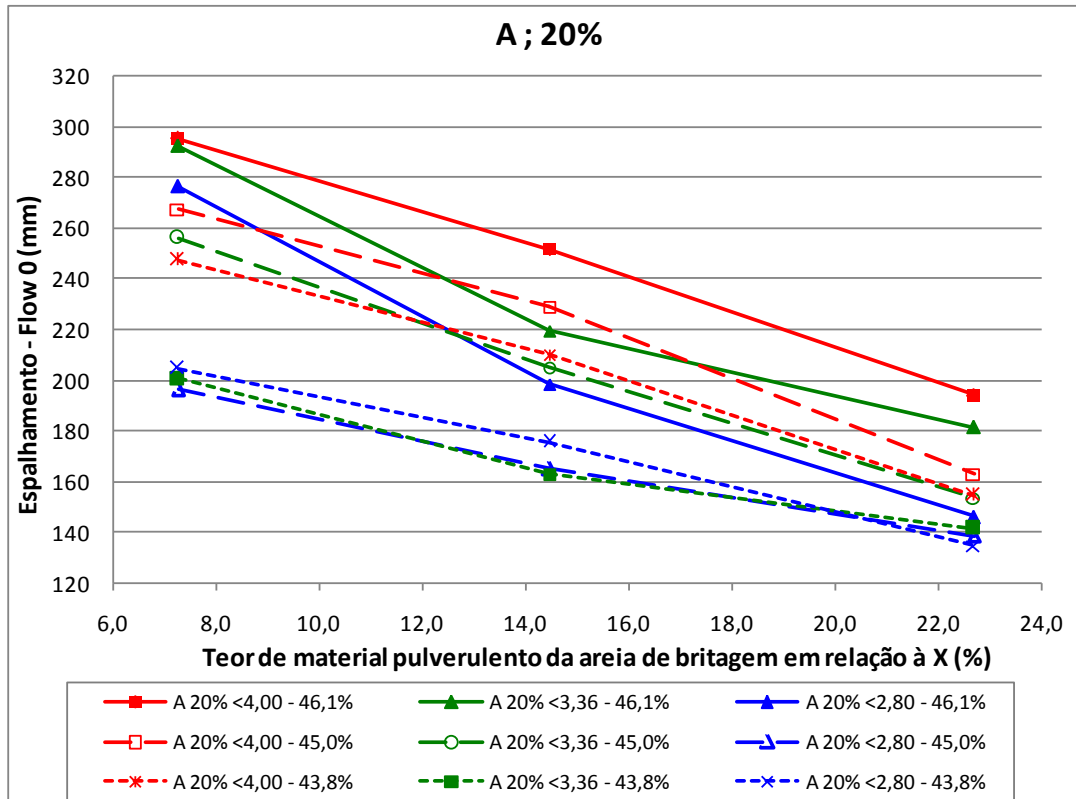
#### 5.3.2.4 Considerações complementares

Conforme mencionado anteriormente, as análises e gráficos apresentados no item 5.3.2 até aqui consideraram o teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem em relação a sua percentagem compreendida entre as peneiras 0,075mm e 2,80mm (areia base - X). No entanto, pode haver curiosidade quanto ao comportamento quando analisados os resultados com

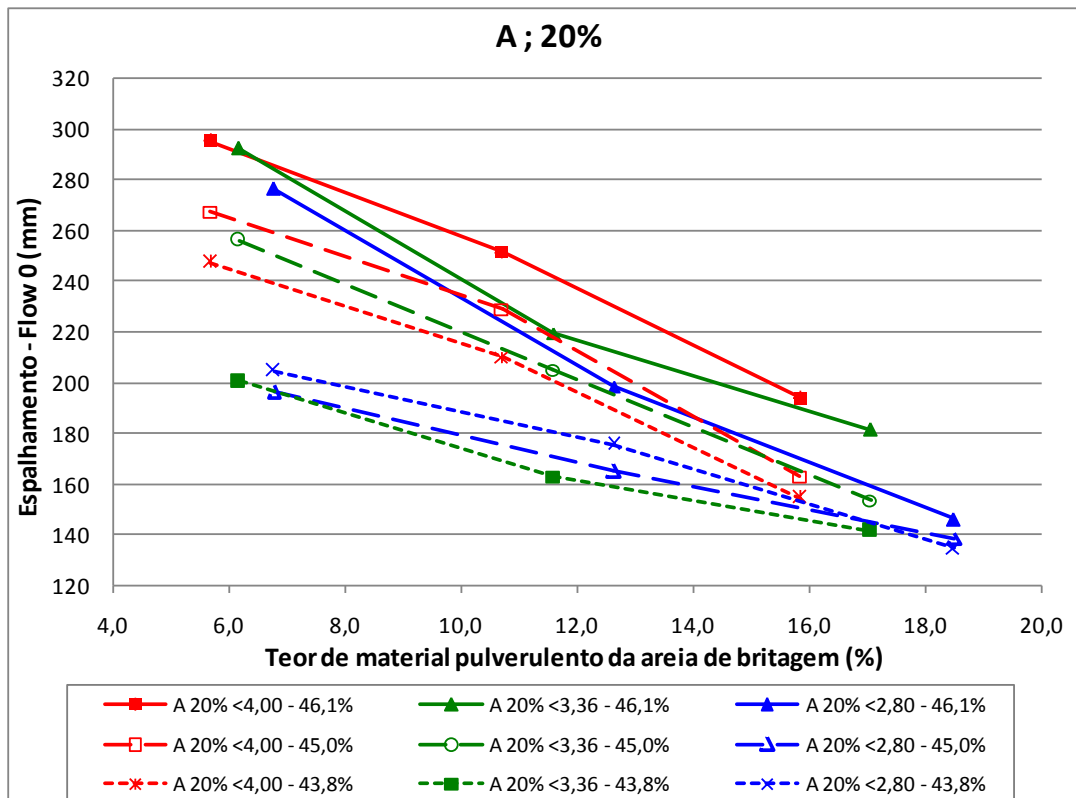
relação ao teor de material pulverulento dos agregados miúdos de britagem, conforme seu conceito original (em relação a todo este agregado). Na Figura 5.22 é apresentado um comparativo entre estas duas análises para um caso específico, servindo de referência para os demais casos. O caso analisado é referente à areia de britagem arredondada e teor de areia natural de 20%.

Conforme pode ser observado na Figura 5.22, a tendência do comportamento predominante não se altera. Ocorre apenas um deslocamento horizontal para a esquerda dos pontos das areias de britagem peneiradas nas malhas 3,36mm e 4,00mm quando considerado o teor de material pulverulento em relação a todo o agregado miúdo de britagem (Figura 5.22b). Vale ressaltar que este deslocamento é mais acentuado para a areia peneirada na malha 4,00mm, devido o maior teor de granilha, e para os teores maiores de material pulverulento, que possuíam conseqüentemente, menos areia base.

Em resumo, as tendências e o comportamento predominante não são alterados, apenas a propriedade da argamassa passa a ser relacionada com uma característica diferente dos agregados que a compõe, porém proporcional à anterior. Diante do exposto, as análises apresentadas em todo o item 5.3.2 são válidas também para o teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem, conforme sua concepção original.



a) Teor de material pulverulento em relação à X (idem Figura 5.16b)



b) Teor de material pulverulento em relação a todo o agregado miúdo de britagem

Figura 5.22 – Fluidez das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondadas em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem em relação: a) a todo o agregado miúdo de britagem; b) à areia base - X.

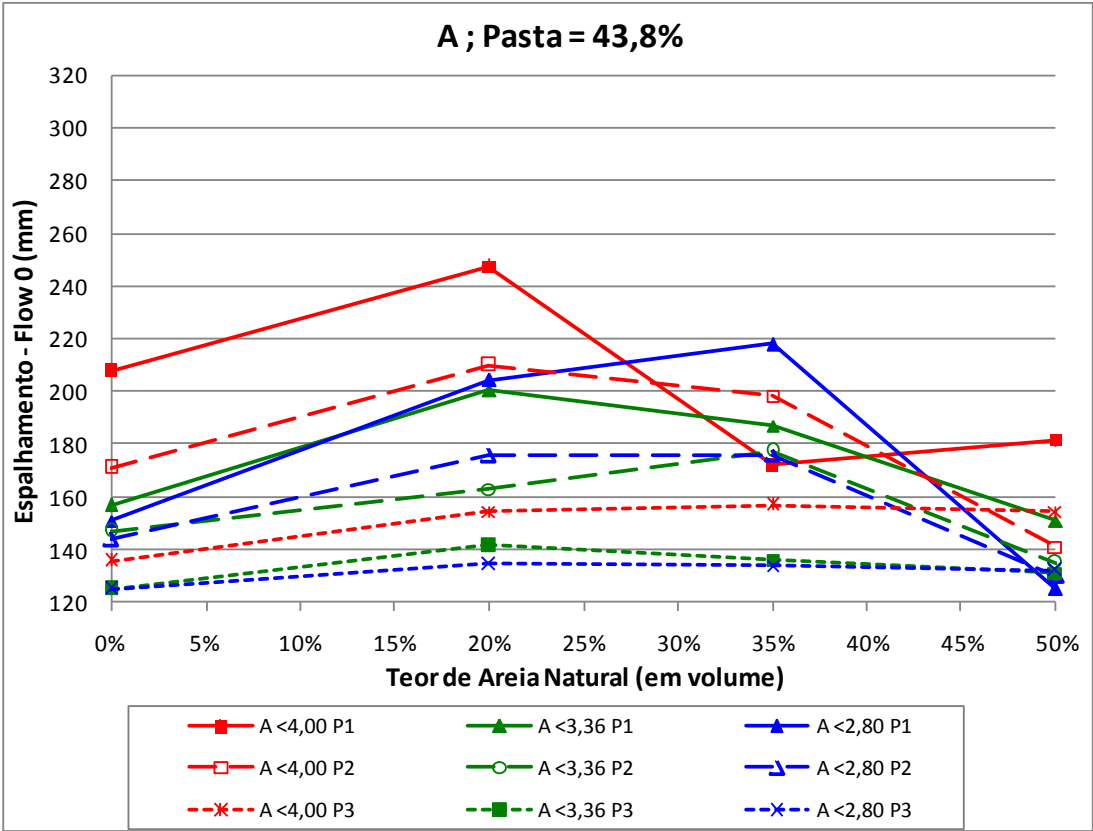
### **5.3.3 Avaliação da influência da substituição parcial de agregado miúdo de britagem por areia natural fina**

Cada agregado miúdo de britagem estudado, obtido por alterações na forma dos grãos, teor de material pulverulento e peneira de corte, foi composto com diferentes teores de areia natural e avaliado a influência no desempenho de argamassas quanto à fluidez, escoamento pelo tubo proposto e teor de ar incorporado. Para cada configuração do agregado miúdo de britagem, foram estudados os teores de substituição volumétrica de 0, 20, 35 e 50% por areia natural fina.

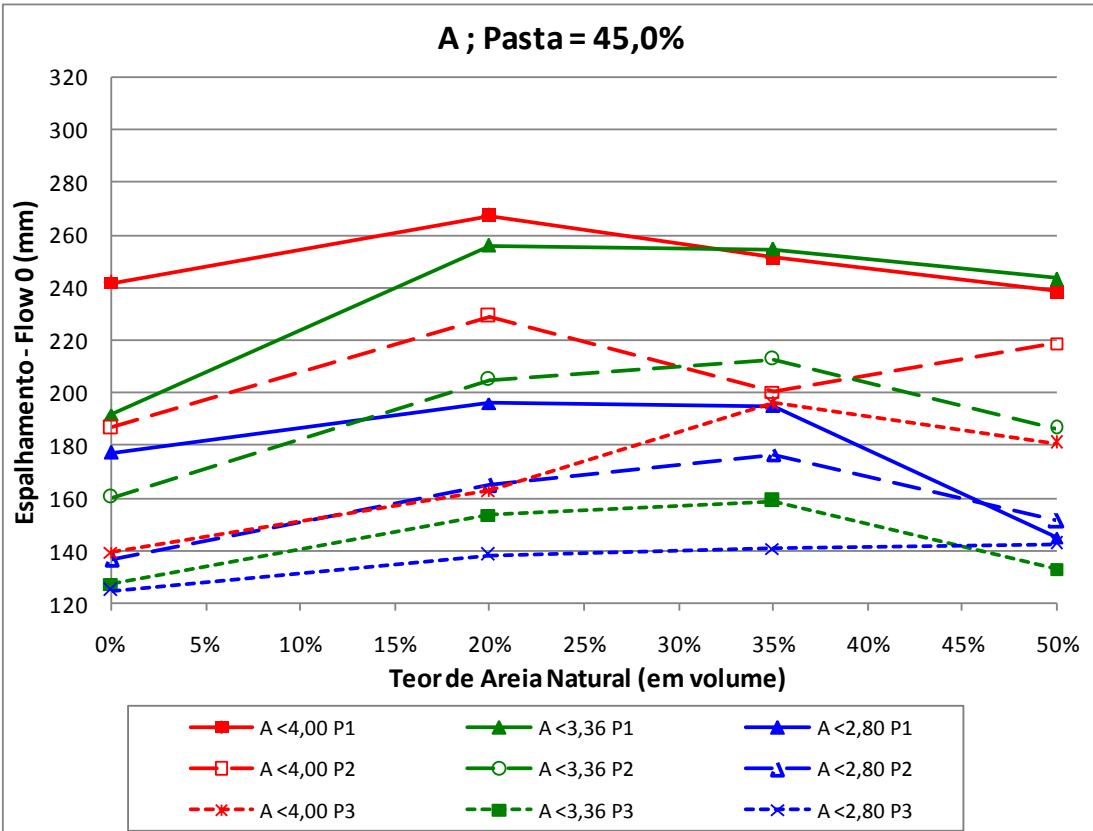
Nos gráficos das figuras apresentadas neste item, que contém os resultados obtidos, os estilos das linhas correspondem aos teores de material pulverulento das areias de britagem, sendo que a linha cheia corresponde ao menor teor (P1); a tracejada larga ao teor intermediário (P2); e a tracejada fina ao maior teor (P3). Já as cores representam as diferentes malhas de corte do agregado miúdo de britagem, sendo que vermelho corresponde à malha de 4,00mm; verde a de 3,36mm; e azul a de 2,80mm.

#### **5.3.3.1 Quanto à fluidez**

Os resultados de fluidez medidos pelo espalhamento das misturas na mesa para ensaio de consistência de cada uma das argamassas contendo areias de britagem com forma arredondada dos grãos são apresentados na Figura 5.23 em função dos diferentes teores de substituição por areia natural. Os resultados de fluidez para as areias de britagem com forma lamelar dos grãos são apresentados na Figura 5.24.

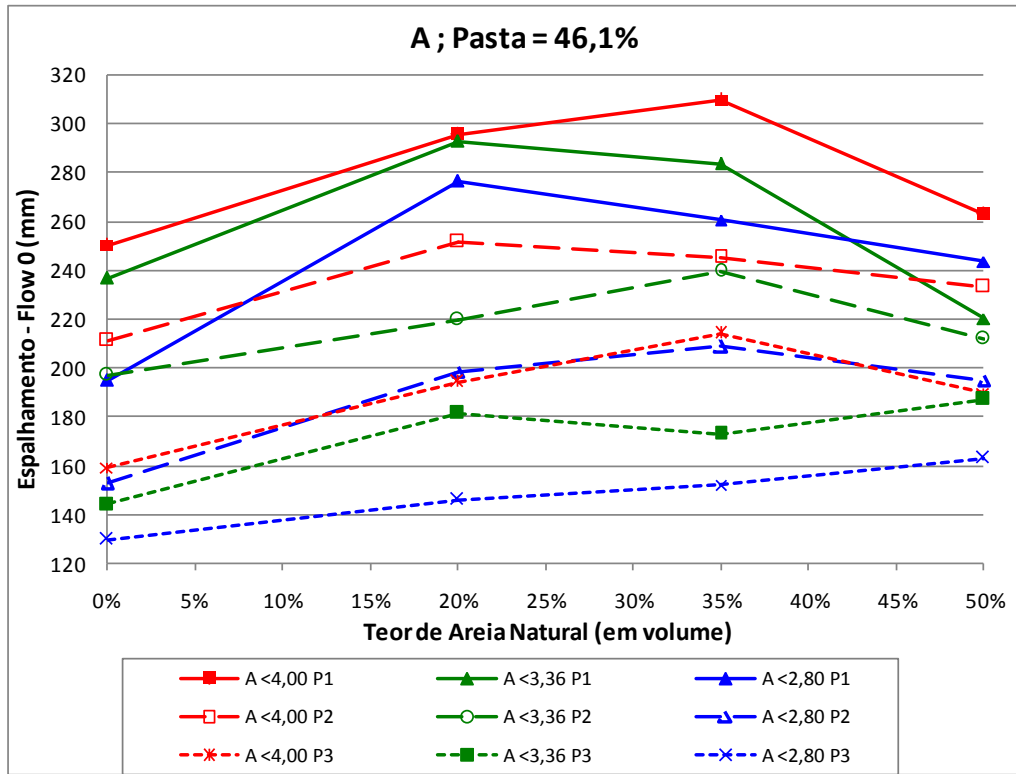


a) Teor Volumétrico de Pasta de 43,8%



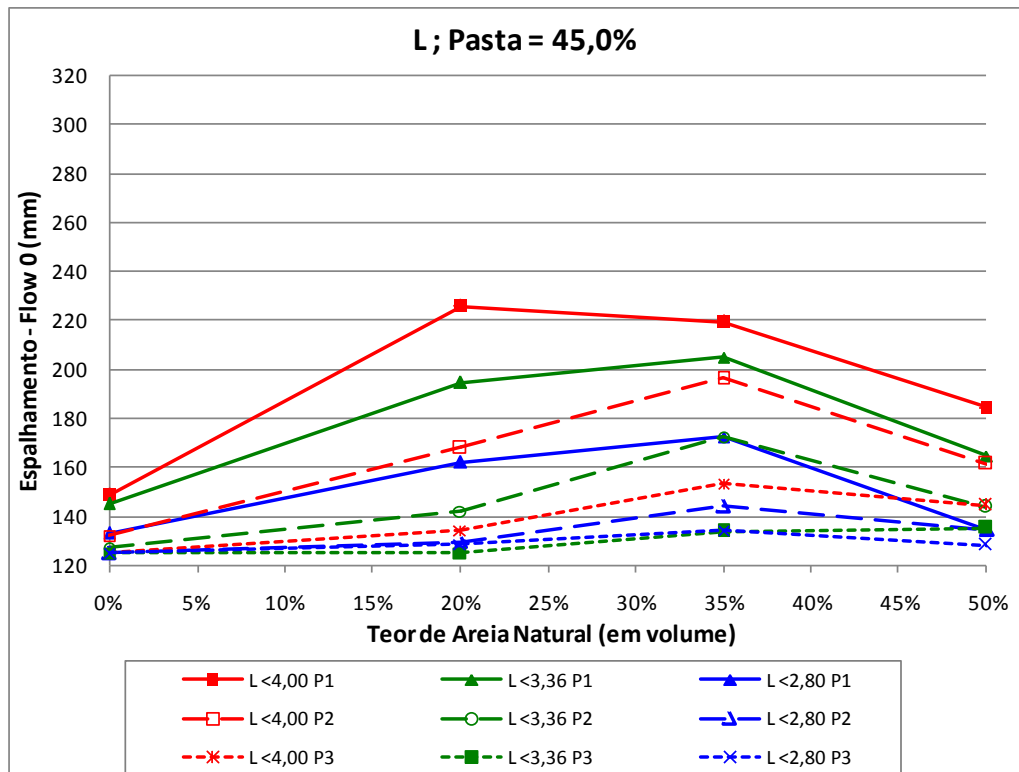
b) Teor Volumétrico de Pasta de 45,0%

Continuação...



c) Teor Volumétrico de Pasta de 46,1%

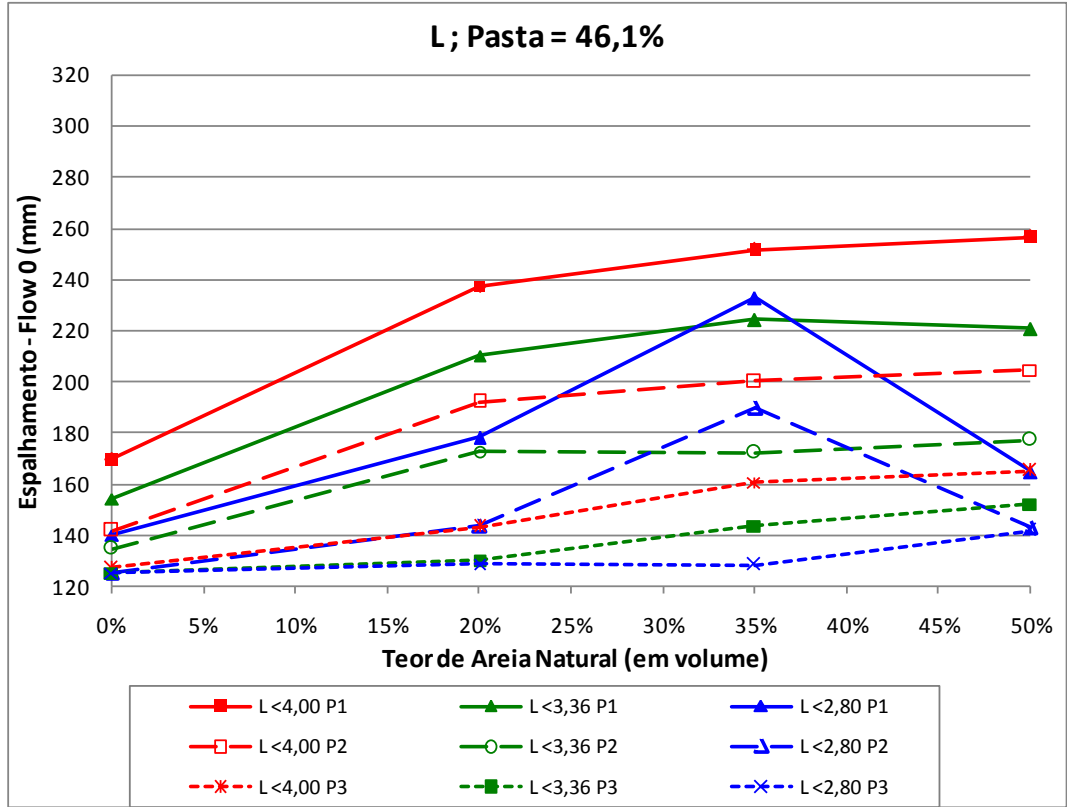
Figura 5.23 – Fluidez das argamassas contendo areias de britagem arredondadas em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 43,8%; b) 45,0%; e c) 46,1%.



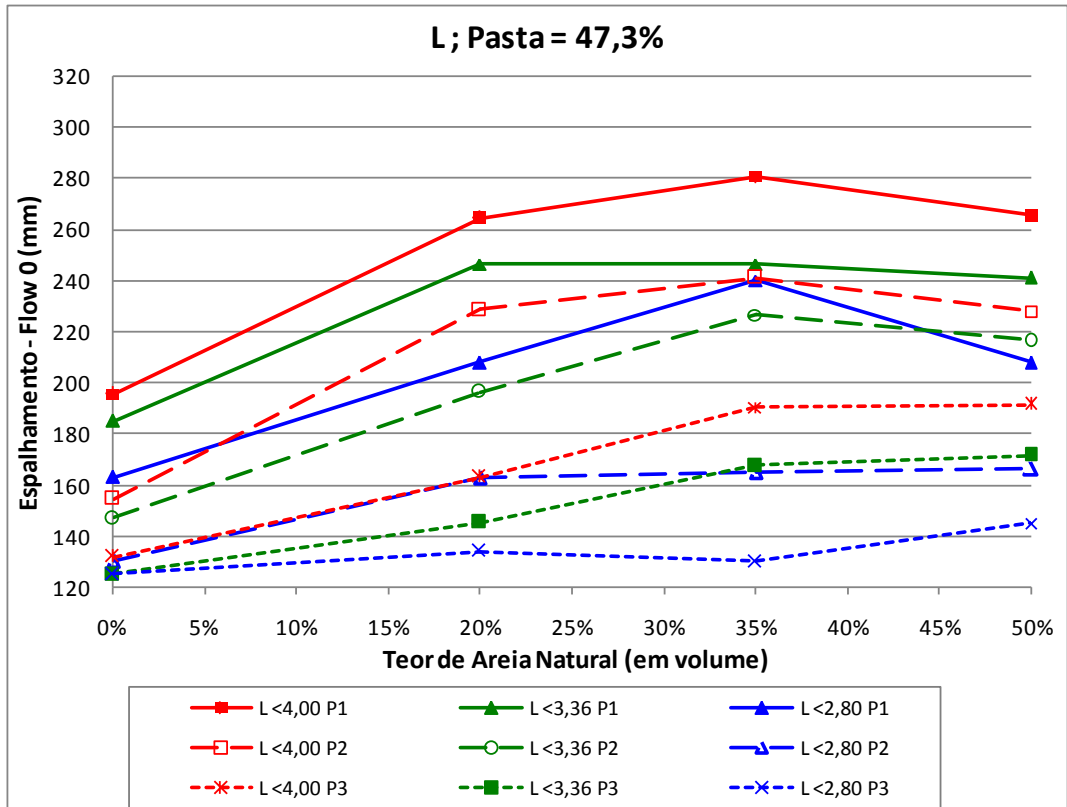
a) Teor Volumétrico de Pasta de 45,0%

Continuação...





b) Teor Volumétrico de Pasta de 46,1%



c) Teor Volumétrico de Pasta de 47,3%

Figura 5.24 – Fluidez das argamassas contendo areias de britagem lamelares em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 45,0%; b) 46,1%; e c) 47,3%.

Conforme pode ser observado na Figura 5.23, de maneira geral, quase todas as configurações de areia de britagem com forma arredondada apresentaram desempenho máximo quanto à fluidez das argamassas quando compostas com 20 ou 35% de areia natural, independente do teor de pasta. Apenas para o maior teor de pasta (46,1% - Figura 5.23c), as areias de britagem com o maior teor de material pulverulento e passantes nas peneiras de malha 2,80mm e 3,36mm (“A <2,80 P3” e “A <3,36 P3”) apresentaram aumento significativo de fluidez para substituições maiores que 35% de areia natural. Se feita uma análise separando as areias de britagem por teor de material pulverulento, para os teores P1 a maior parte das composições apresentou desempenho máximo com 20% de areia natural. Para P2, observa-se que os melhores desempenhos ficaram divididos entre substituições por 20 e 35% de areia natural, com maior número de casos para 35%. Já para P3, a maioria das configurações das areias de britagem com forma arredondada apresentou melhor desempenho com substituição de 35% por areia natural, com alguns casos com 50%, como foram os casos das duas exceções mencionadas anteriormente. Por outro lado, se feita uma análise em separado por peneira de corte do agregado miúdo de britagem, a maior parcela das composições peneiradas na malha 4,00mm obteve maior fluidez com substituições por de 20% de areia natural e as demais por 35% de areia natural.

Para as areias lamelares (Figura 5.24), os melhores desempenhos, na maioria dos casos, foram observados em composições com 35 e 50% de areia natural. Não houve um comportamento predominante com relação às diferentes peneiras de corte. Já para os teores de material pulverulento, observa-se que para P1 os melhores desempenhos são observados para composições com 35% de areia natural, tendendo para 20% em alguns casos. Já para P2 e P3, os melhores desempenhos são observados para substituições por 35% de areia natural, com alguns casos tendendo a substituições por 50% de areia natural, principalmente para P3.

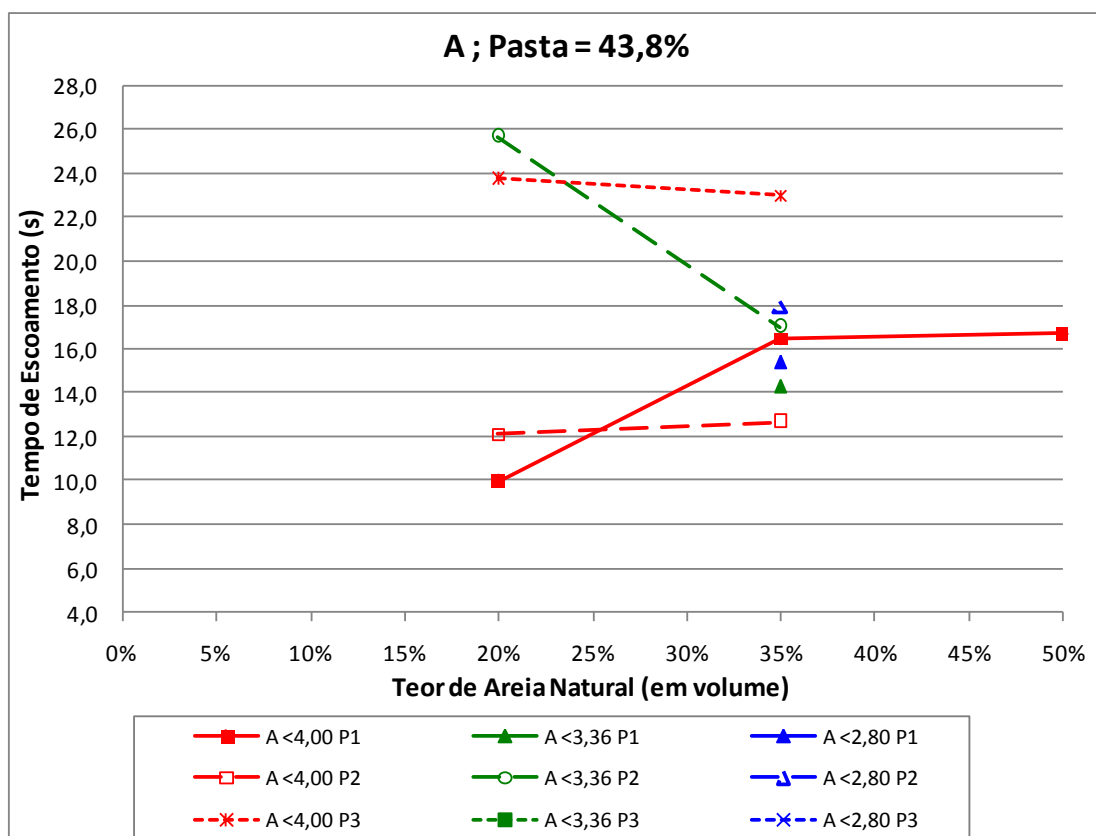
Diante destas observações, pode-se afirmar que para as areias de britagem com forma arredondada e lamelar, quanto maior o teor de material pulverulento existente maior foi a demanda por areia natural para um desempenho otimizado quanto à fluidez. Vale ressaltar que a areia natural tem teor de material pulverulento próximo a zero e isto pode ter contribuído para este fato, uma vez que maiores composições com este agregado reduziriam o teor de material pulverulento do agregado miúdo total.

Outro fato a ser mencionado é que, para as areias de britagem com forma arredondada, o teor ideal de substituição por areia natural esteve sempre entre 20 e 35%. Já para a areia lamelar, este teor esteve entre 35 e 50% de areia natural. Diante do exposto, pode-se afirmar que areias de

britagem com forma mais lamelar tendem a demandar maior teor de areia natural para manter a mesma trabalhabilidade.

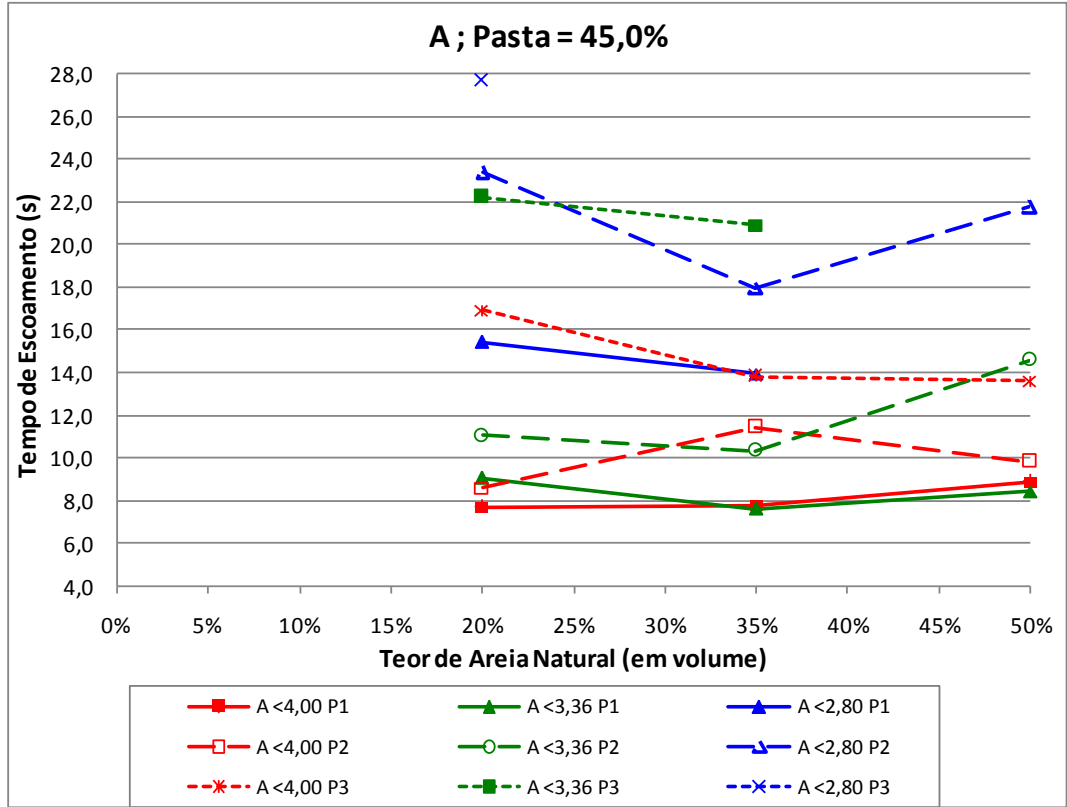
### 5.3.3.2 Quanto ao escoamento

Os tempos de escoamento pelo tubo proposto das argamassas confeccionadas com areias de britagem arredondada e lamelar, em função do teor de substituição por areia natural e para os três teores de pasta avaliados, são apresentados na Figura 5.25 e na Figura 5.26, respectivamente.

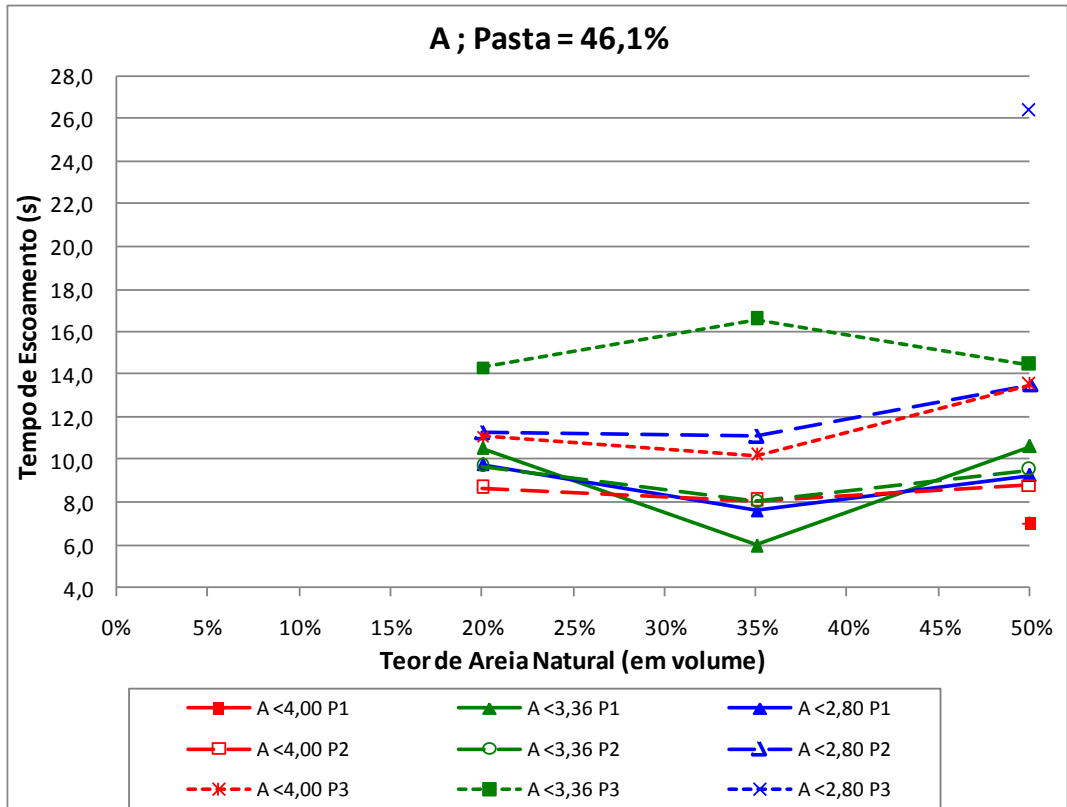


a) Teor Volumétrico de Pasta de 43,8%

Continuação...

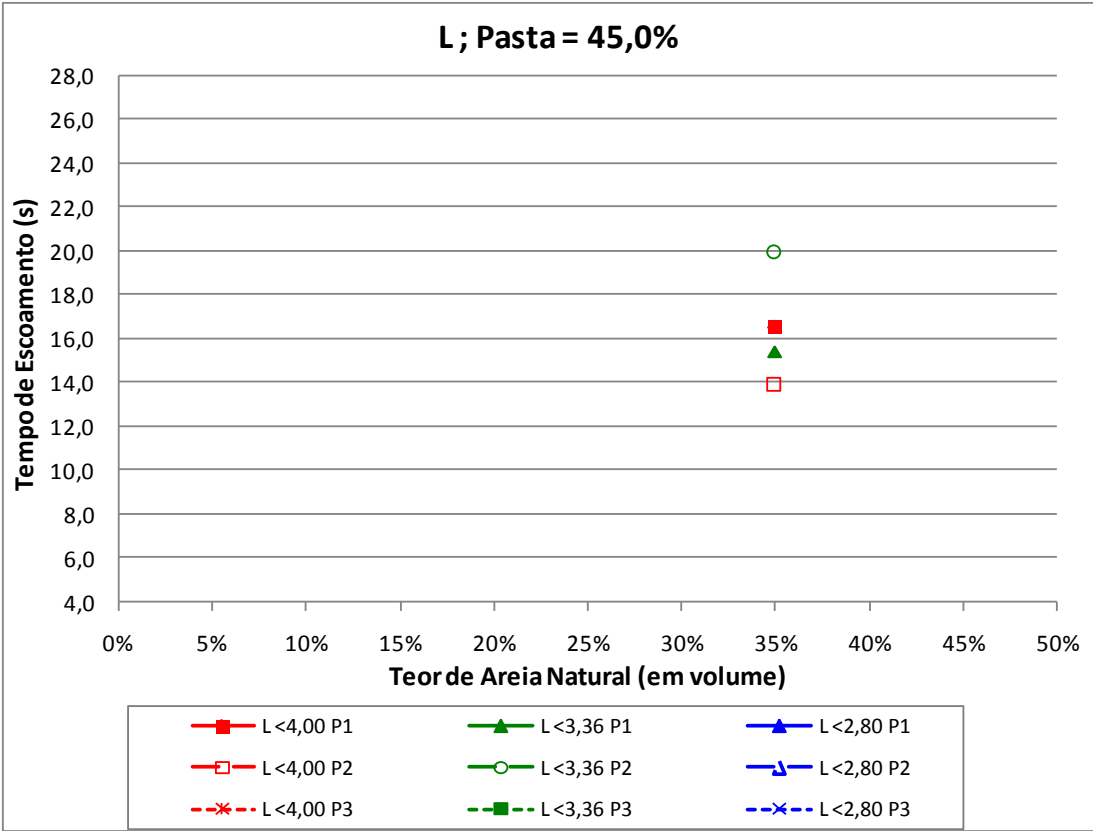


b) Teor Volumétrico de Pasta de 45,0%

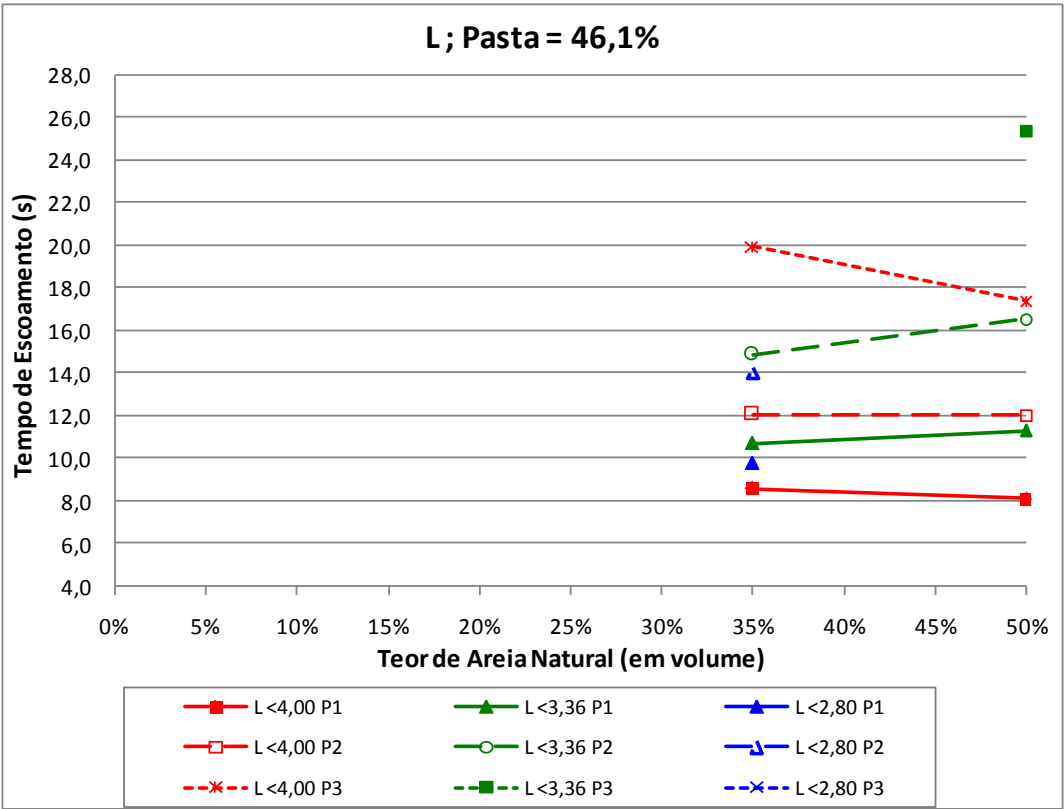


c) Teor Volumétrico de Pasta de 46,1%

Figura 5.25 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma arredondada em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 43,8%; b) 45,0%; e c) 46,1%.

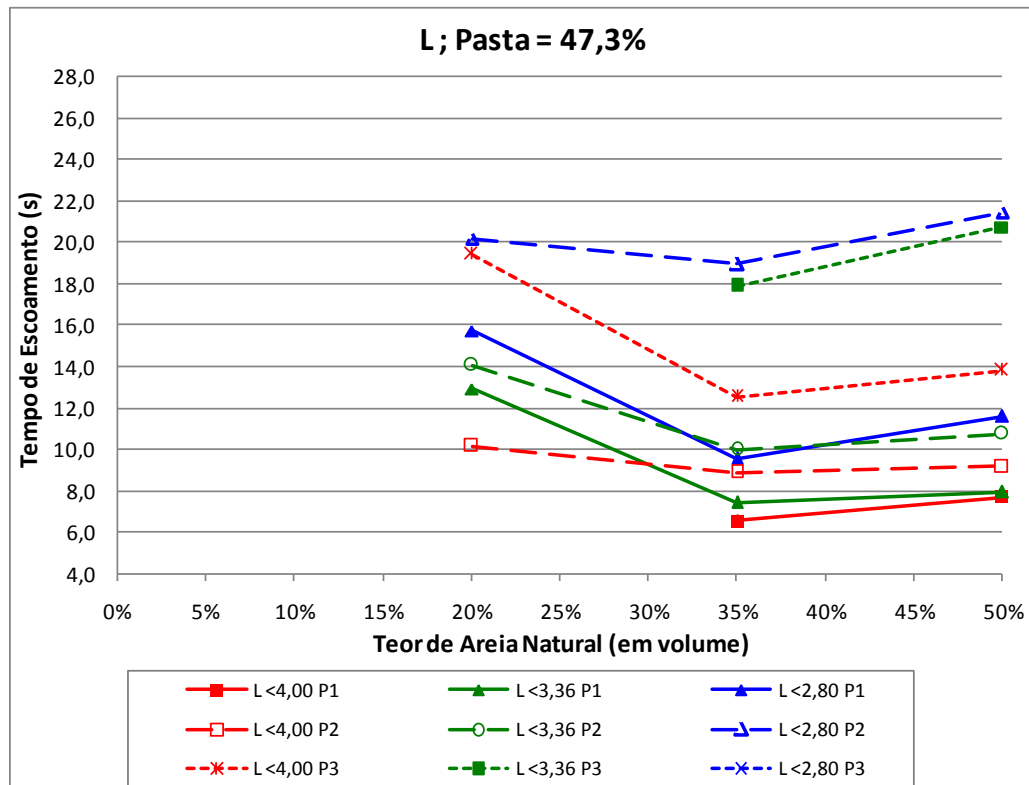


a) Teor Volumétrico de Pasta de 45,0%



b) Teor Volumétrico de Pasta de 46,1%

Continuação...



c) Teor Volumétrico de Pasta de 47,3%

Figura 5.26 – Tempos de escoamento das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma lamelar em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 45,0%; b) 46,1%; e c) 47,3%.

Conforme pode ser observado na Figura 5.25 e na Figura 5.26, de maneira geral, os menores tempos de escoamento foram observados para as composições com 35% de areia natural. Em alguns casos, este foi o único teor em que houve escoamento para determinado teor de pasta, peneira de corte e teor de material pulverulento, mesmo não sendo, em alguns casos, o maior espalhamento (principalmente para as composições com P3). Para as areias de britagem com forma arredondada, os melhores desempenhos quanto ao escoamento foram obtidos com substituições por 20 ou 35% de areia natural. Já para as areias com forma lamelar, os melhores desempenhos foram observados para as substituições por 35 ou 50% de areia natural.

Destaca-se que as argamassas com agregados lamelares, quando compostas com 20% de areia natural, apresentaram escoamento pelo tubo proposto somente para os maiores teores de pasta. Para as argamassas com areia de britagem com forma arredondada, houve escoamento com este teor de areia natural inclusive para o menor teor de pasta avaliado (4 casos para o teor volumétrico de pasta de 43,8% - Figura 5.25a). Este fato evidencia a dificuldade de escoamento das argamassas com agregados com grãos mais lamelares, que necessitam de maior teor de areia natural para rolamento e deslizamento, principalmente na redução de seção do tubo.

Se analisados os escoamentos, separando-os por teor de material pulverulento, os menores teores (P1) apresentaram problemas de escoamento em alguns casos devido elevada segregação e exsudação, principalmente com o maior teor de pasta e para peneira de corte 4,00mm (vide observações de segregação e exsudação nas tabelas de resultados no Anexo D). Para a forma arredondada e maior teor de pasta (46,1% - Figura 5.25c), as composições com 20 e 35% de areia natural, justamente as que apresentaram maior fluidez, não escoaram para esta peneira de corte. Já para a forma lamelar, apenas a composição com 20% de areia natural não escoou para o maior teor de pasta e peneira de corte 4,00mm (Figura 5.26c). No entanto, vale ressaltar que, neste último caso, o espalhamento era menor que os anteriores e por isso provavelmente havia menor segregação e exsudação. Além disso, o teor de pasta da argamassa com areia lamelar era maior.

Conforme já mencionado anteriormente, nenhuma composição sem areia natural (100% de areia de britagem), independente da forma, teor de pulverulento ou teor de pasta da argamassa, apresentou escoamento pelo ensaio proposto.

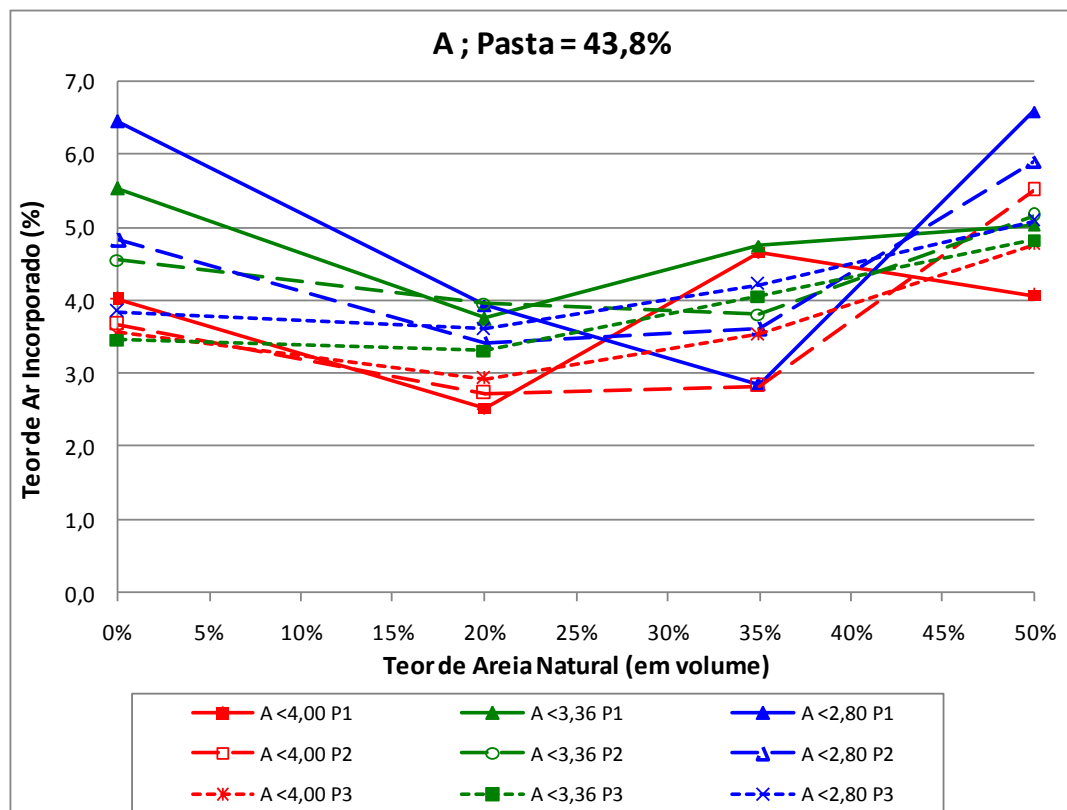
Vale destacar ainda que, o agrupamento dos resultados em função da forma dos grãos e dos teores de pasta das misturas, conforme apresentado da Figura 5.23 a Figura 5.26, possibilitou uma nova análise com relação à influência da peneira de corte e do teor de material pulverulento na fluidez e escoamento das argamassas. Conforme pode ser observado nas figuras mencionadas, tanto para o escoamento das argamassas quanto para a fluidez, o aumento da peneira de corte do agregado de britagem pode proporcionar melhores desempenhos das argamassas que reduções do teor de material pulverulento. Em outras palavras, observa-se que em certas circunstâncias, dependendo da forma dos grãos da areia de britagem e dos teores de pasta e de substituição por areia natural, peneirar uma areia de britagem em uma peneira maior e manter o teor de material pulverulento um pouco mais alto pode ser mais eficiente, com relação ao espalhamento e escoamento pelo tubo proposto, que a peneirar em uma malha menor e reduzir o teor de material pulverulento a níveis mais baixos. Esta afirmação é facilmente observada se comparadas, para um mesmo teor de pasta e forma dos grãos, areias de britagem peneiradas na malha 4,00mm e com teor intermediário de material pulverulento (<4,00 P2) com a mesma areia de britagem peneirada na malha 2,80mm e com teores mínimos de material pulverulento (<2,80 P1), ou então, areias peneiradas nestas mesmas malhas e com teores máximos (<4,00 P3) e médios (<2,80 P2), respectivamente.

Uma análise mais detalhada da influência de cada um dos parâmetros avaliados (forma dos grãos, ponto de corte, teor de material pulverulento e de substituição por areia natural) na

fluidez, tempo de escoamento e incorporação de ar das argamassas, será feita no final deste item 5.3.

### 5.3.3.3 Quanto ao teor de ar incorporado

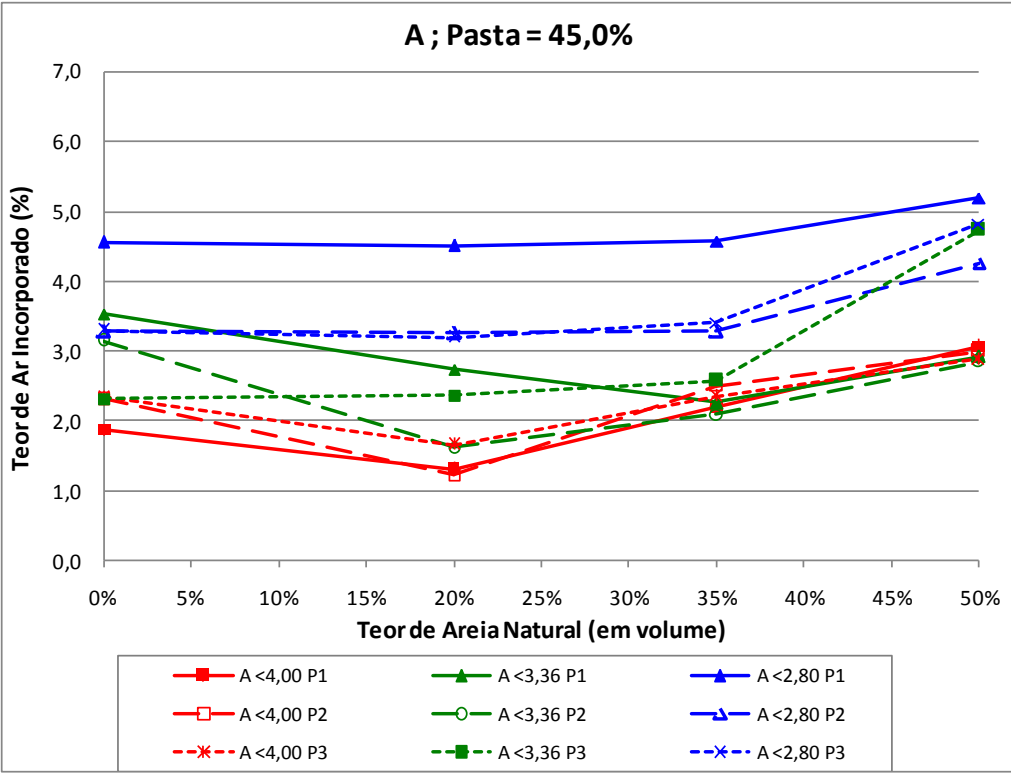
Na Figura 5.27 e na Figura 5.28, são apresentados os resultados de teor de ar incorporado em função do teor de substituição por areia natural para as areias de britagem com forma arredondada e lamelar, respectivamente.



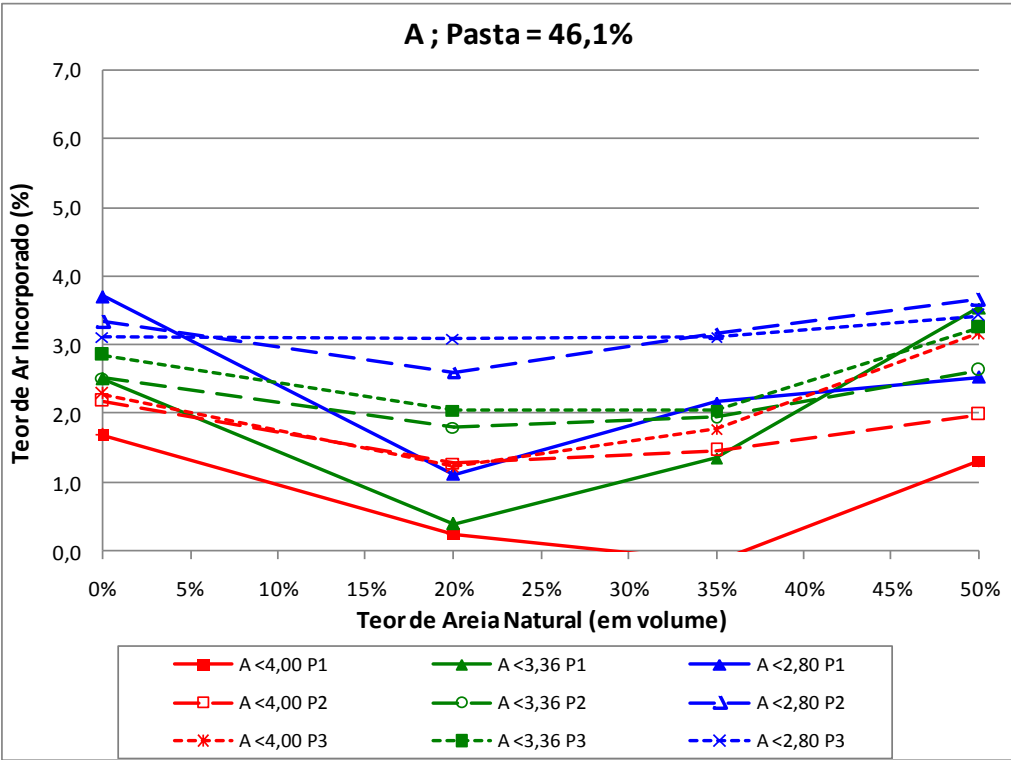
a) Teor Volumétrico de Pasta de 43,8%

Continuação...



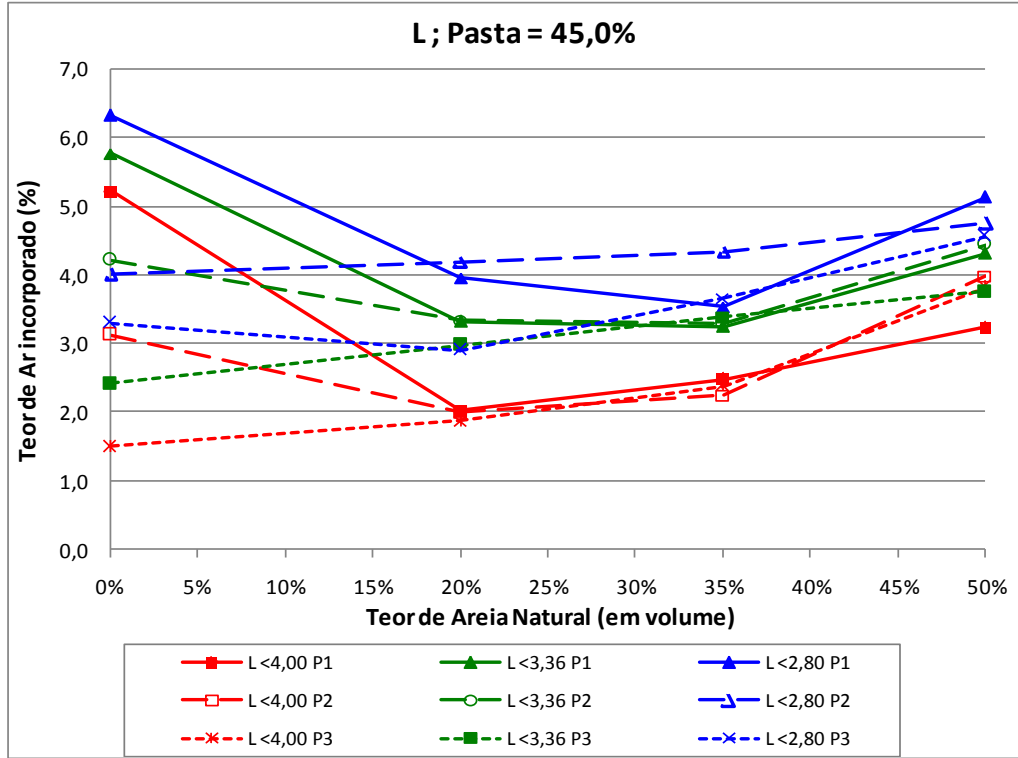


b) Teor Volumétrico de Pasta de 45,0%

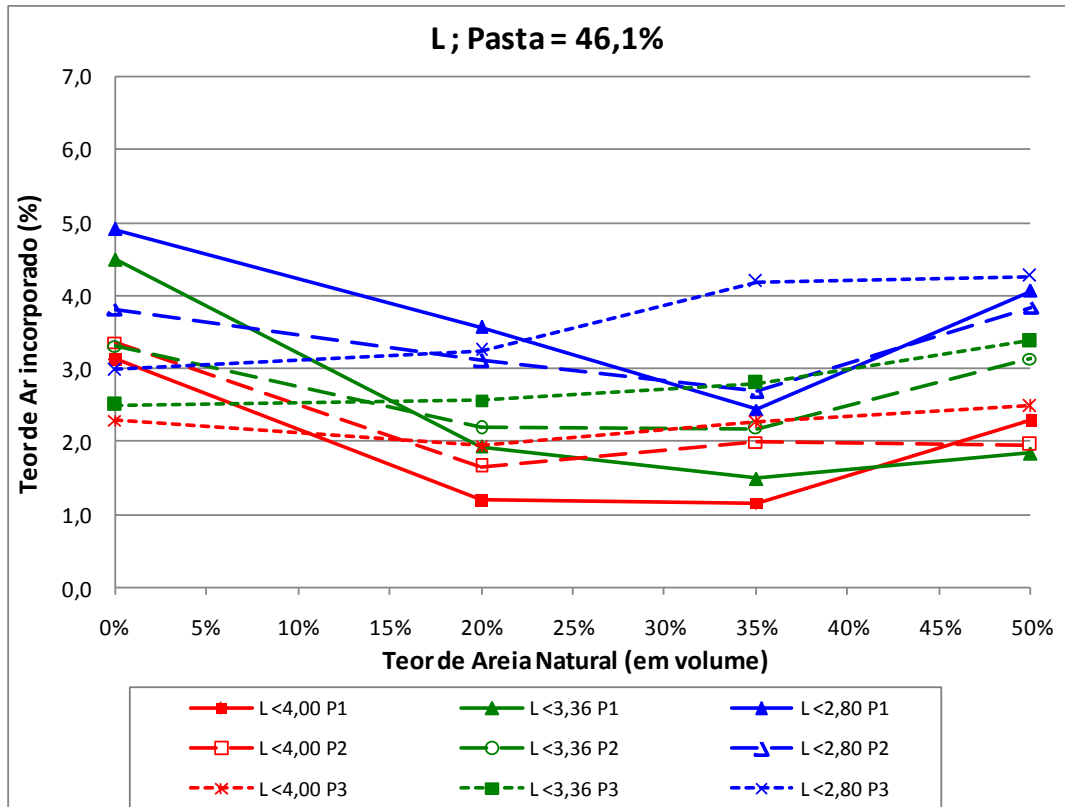


c) Teor Volumétrico de Pasta de 46,1%

Figura 5.27 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma arredondada em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 43,8%; b) 45,0%; e c) 46,1%.

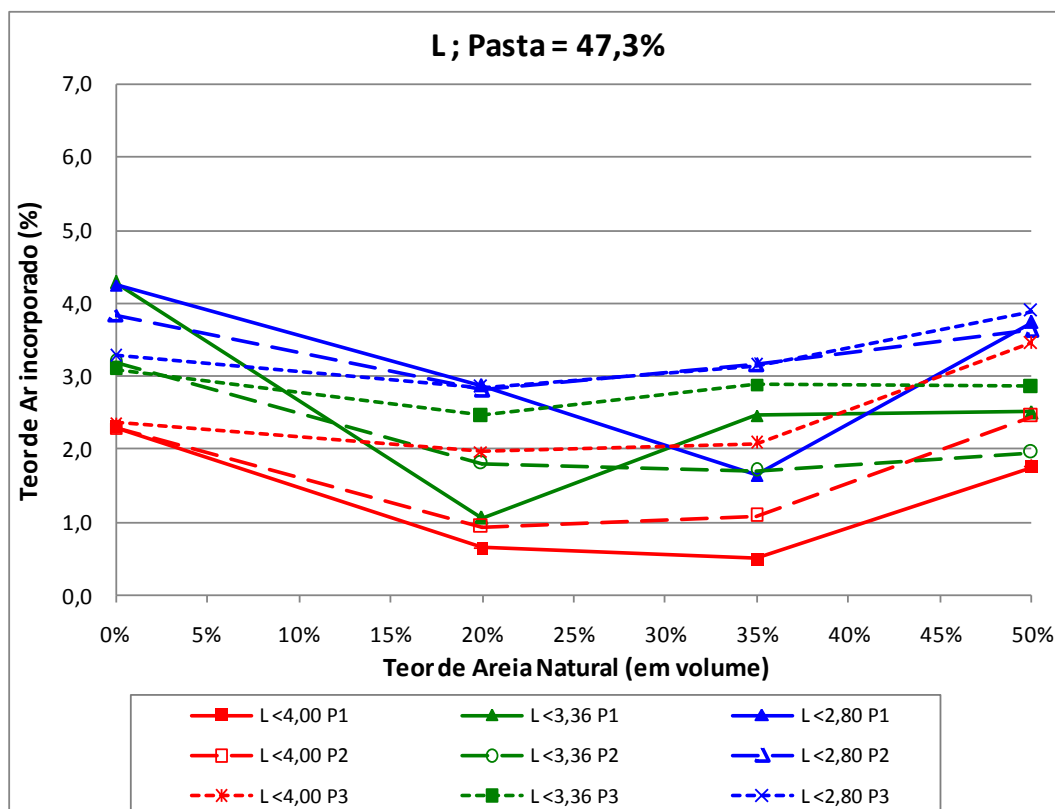


a) Teor Volumétrico de Pasta de 45,0%



b) Teor Volumétrico de Pasta de 46,1%

Continuação...



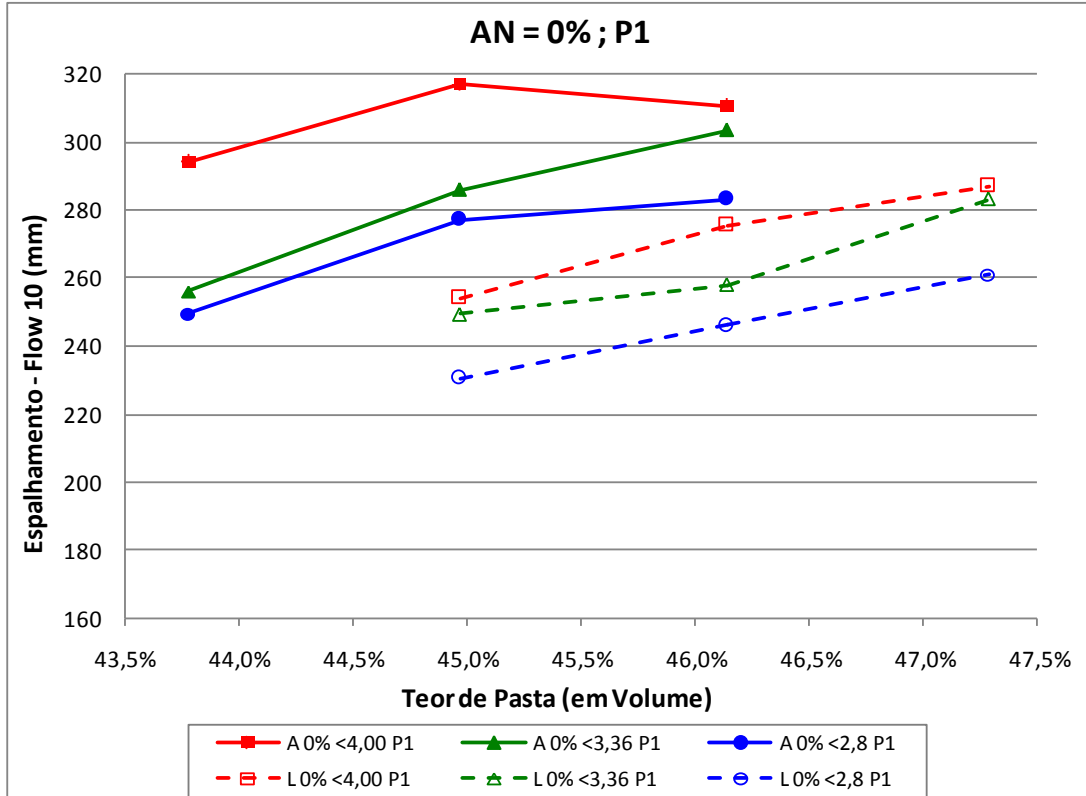
c) Teor Volumétrico de Pasta de 47,3%

Figura 5.28 – Teor de ar incorporado das argamassas confeccionadas com areias de britagem com forma lamelar em função do teor de substituição por areia natural para os teores volumétricos de pasta de: a) 45,0%; b) 46,1%; e c) 47,3%.

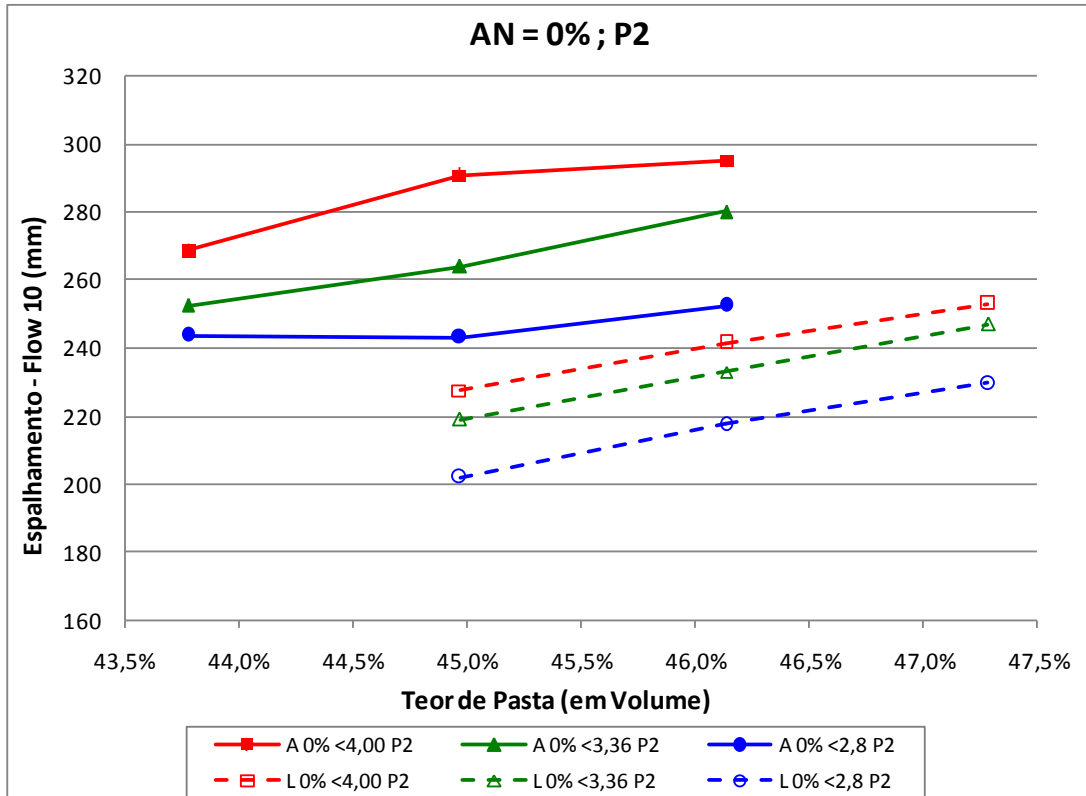
Conforme pode ser observado na Figura 5.27 e na Figura 5.28, de maneira geral os menores teores de ar incorporado foram observados para as substituições por 20 e 35% de areia natural. Apenas algumas argamassas contendo areias de britagem com forma lamelar dos grãos (Figura 5.28a e b) apresentaram menores teores de ar incorporado para 100% de areia de britagem.

### 5.3.4 Avaliação da influência da forma do agregado miúdo de britagem

Durante a apresentação dos resultados dos testes em argamassa, do item 5.3.1 ao item 5.3.3, foram feitos vários comentários comparando os resultados separando-os para as duas formas de grão das areias de britagem avaliadas. Neste item é realizada uma breve avaliação direta da influência da forma dos grãos das areias de britagem na fluidez (Figura 5.29), no escoamento pelo ensaio proposto (Figura 5.30) e no teor de ar incorporado (Figura 5.31).

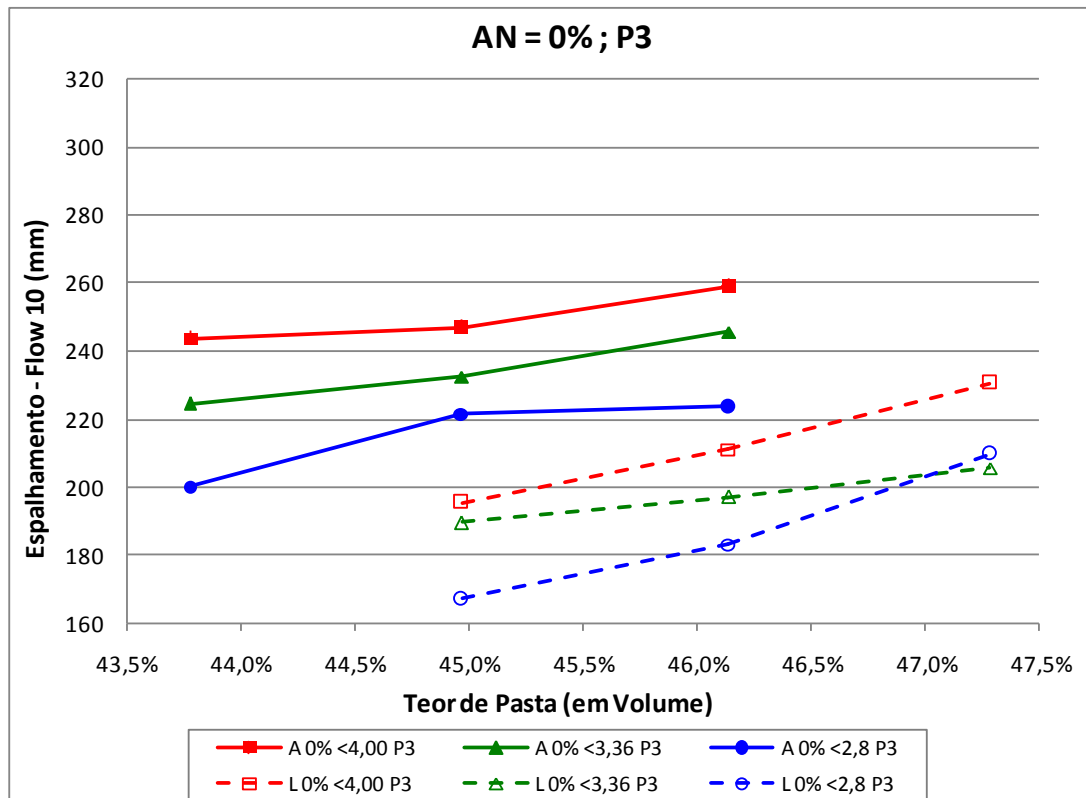


a) Menor teor de material pulverulento – P1



b) Teor intermediário de material pulverulento – P2

Continuação...



c) Maior teor de material pulverulento – P3

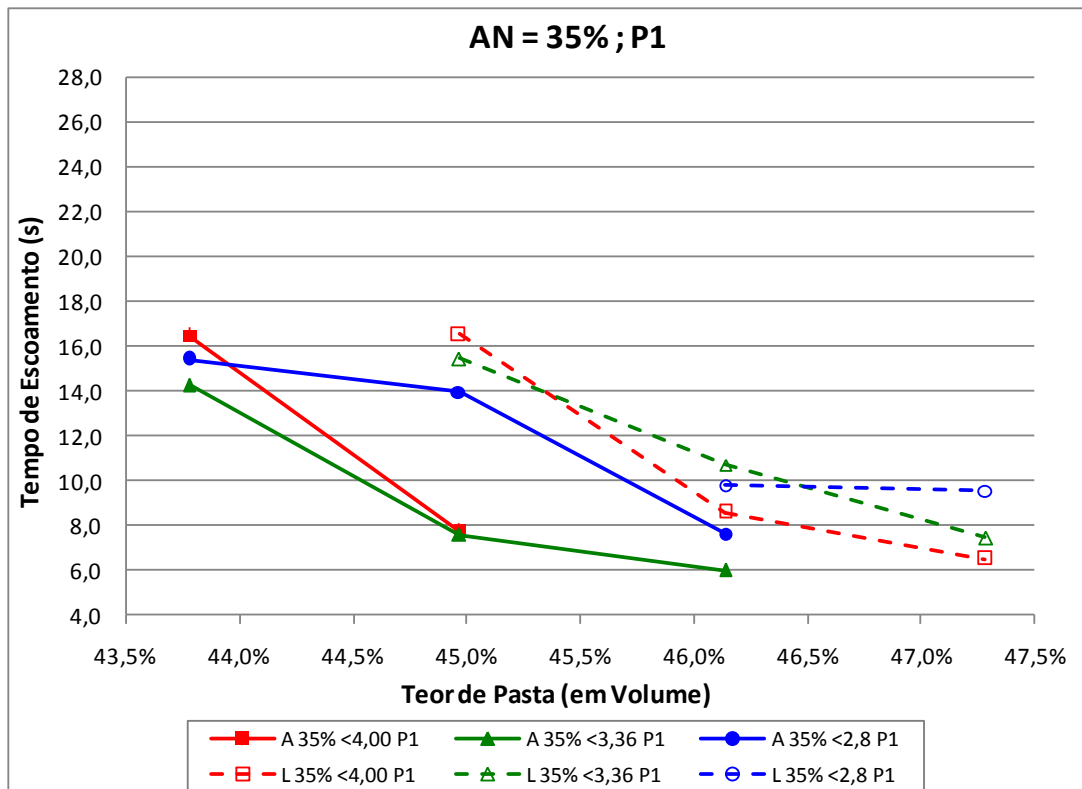
Figura 5.29 – Fluidez das argamassas em função do teor de pasta para as duas formas de grão, arredondada e lamelar, e para diferentes teores de material pulverulento do agregado miúdo de britagem: a) P1; b) P2; e c) P3.

Observa-se na Figura 5.29 que, para um mesmo teor de pasta, as areias de britagem com forma arredondada dos grãos apresentaram fluidez bastante superior àquelas com forma lamelar, independente do teor de material pulverulento presente ou da peneira de corte da granilha. Tendo em vista que as curvas granulométricas são semelhantes, conforme apresentado no item 5.2.2, inclusive para material passante na peneira 0,075mm, esta diferença pode ser atribuída exclusivamente a melhor forma dos grãos, que implica, conseqüente, em redução do atrito interno da mistura e da área específica dos grãos.

Vale ressaltar que foram apresentados os resultados de espalhamento após aplicação de 10 quedas na mesa (Flow 10) porque era difícil a avaliação para aqueles sem aplicação de quedas (Flow 0), pois os espalhamentos eram muito pequenos e próximos à dimensão inferior do molde para avaliação da consistência de argamassas (125mm), principalmente para a forma lamelar e com o maior teor de material pulverulento. Optou-se ainda em apresentar apenas os resultados com 100% de areia de britagem, pois para esta composição granulométrica as diferenças são exclusivamente devidas à areia de britagem, não havendo influência da areia natural. Contudo, notou-se que há diferença de fluidez entre as areias arredondadas e lamelares,

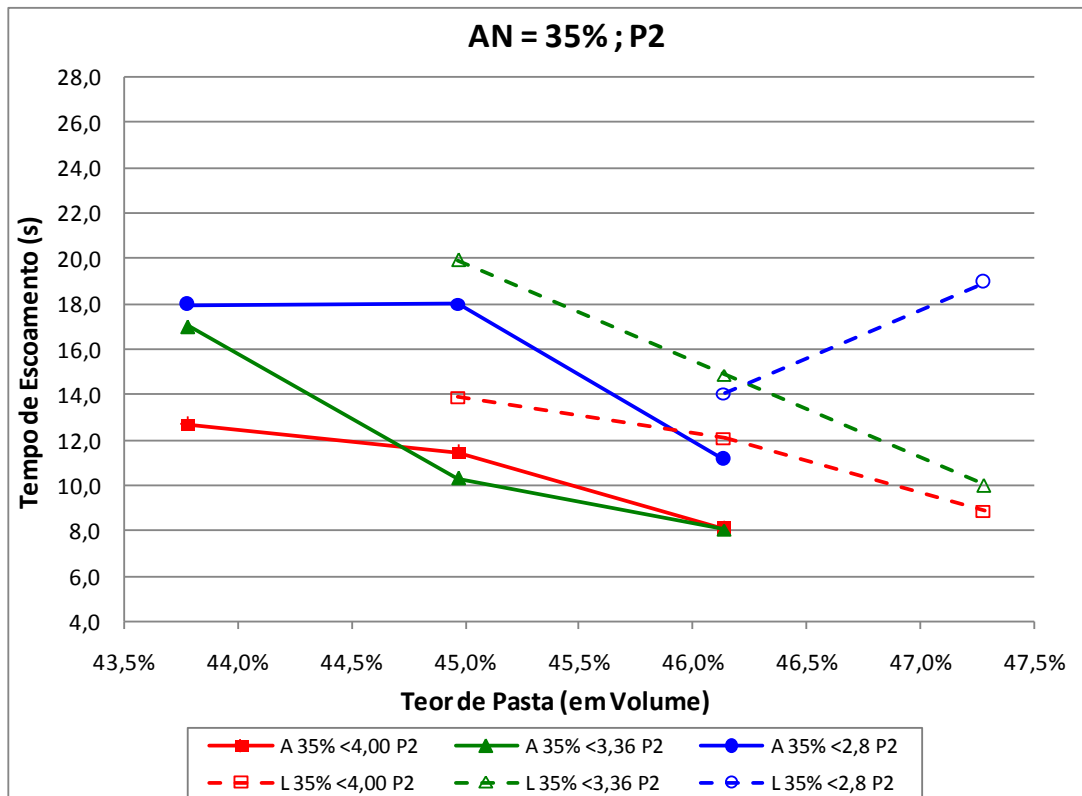
independentemente do teor de substituição por areia natural, mas, no entanto, esta diminui com o aumento do teor e substituição. Destaca-se ainda que não há uma tendência de comportamento ou uma diferença constante entre os espalhamentos das argamassas contendo as duas areias de britagem para diferentes teores de substituição por areia natural. Este fenômeno pode estar associado ao fato que cada areia de britagem apresentou desempenho otimizado com diferentes teores de substituição por areia natural (item 5.3.3).

Na Figura 5.30 são apresentados os tempos de escoamento, em função do teor de pasta das argamassas, para diferentes teores de material pulverulento e para cada forma de grão (arredondada e lamelar) dos agregados miúdos de britagem. Vale ressaltar que são apresentados os tempos de escoamento para as composições granulométricas com substituição por 35% de areia natural, pois foi para este teor de substituição que ocorreu o maior número de escoamentos para as duas formas de grão avaliadas.

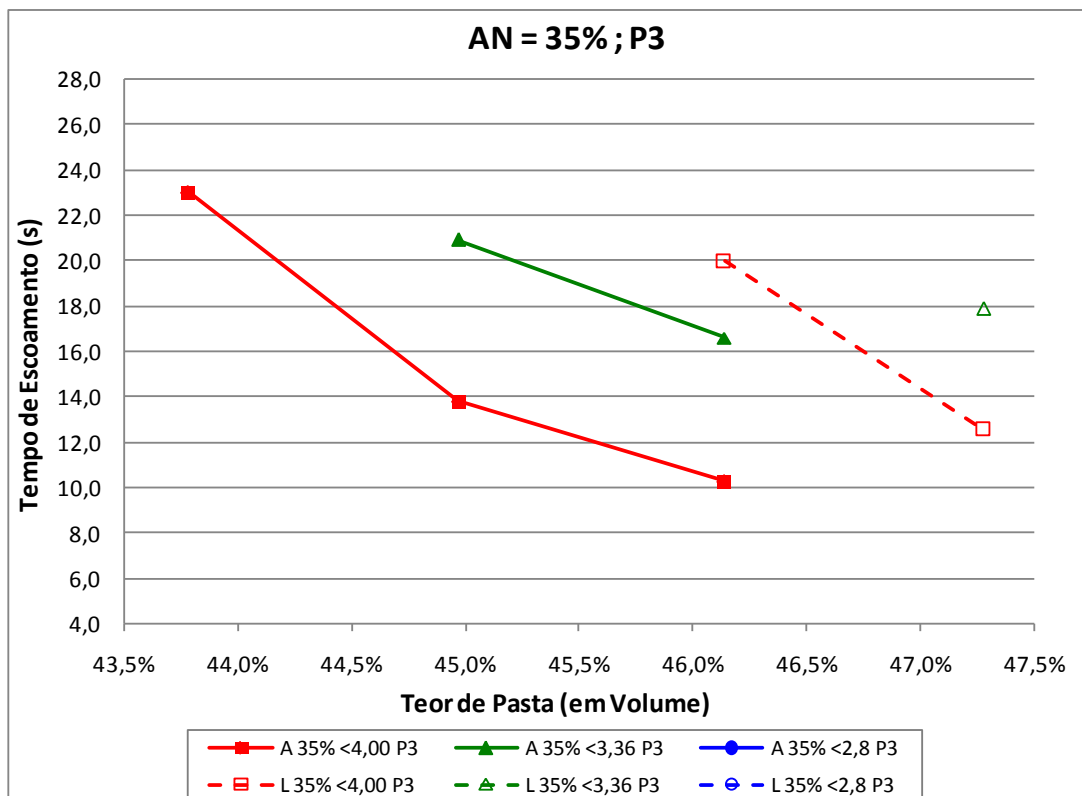


a) Menor teor de material pulverulento – P1

Continuação...



b) Teor intermediário de material pulverulento – P2



c) Maior teor de material pulverulento – P3

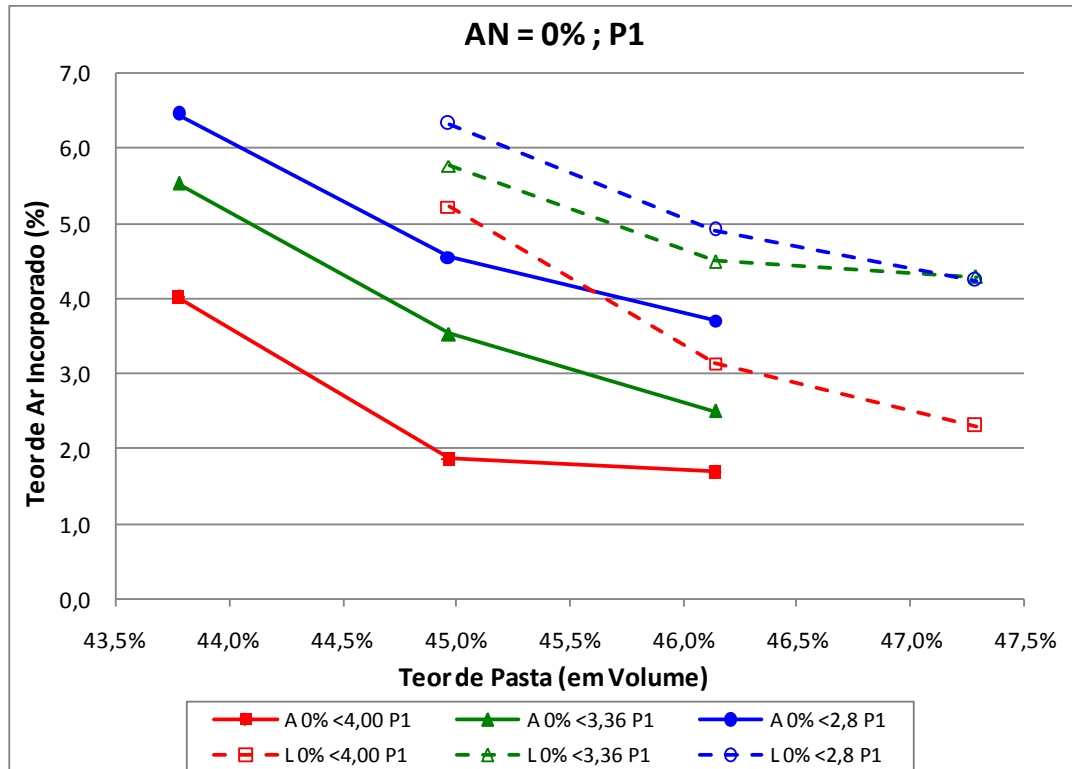
Figura 5.30 – Tempos de escoamento das argamassas em função do teor de pasta para as duas formas de grão, arredondada e lamelar, e para diferentes teores de material pulverulento do agregado miúdo de britagem: a) P1; b) P2; e c) P3.

Conforme pode ser observado na Figura 5.30, a forma dos grãos dos agregados miúdos de britagem também influenciou significativamente o escoamento das argamassas pelo tubo do ensaio proposto. Observa-se que para, mesmo teor de pasta, teor de material pulverulento e peneira de corte, há uma diferença de pelo menos 2,0s entre o tempo de escoamento das argamassas contendo areia de britagem com forma arredondada e com forma lamelar. Contudo, esta diferença pode chegar a quase 10,0s em alguns casos: “A 35% <4,00 P3” e “L 35% <4,00 P3” para o teor volumétrico de pasta de 46,1% (Figura 5.30c) e “A 35% <3,36 P2” e “L 35% <3,36 P2” para o teor volumétrico de pasta de 45,0% (Figura 5.30b). Mais importante ainda é haver escoamento para determinada configuração de argamassa com agregado miúdo de britagem de forma arredondada e não haver escoamento para a argamassa semelhante contendo agregado miúdo de forma lamelar. O inverso também ocorreu, porém neste caso houve segregação e exsudação da argamassa com areia de britagem arredondada (“A 35% <4,00 P1” para o teor volumétrico de pasta de 46,1% - Figura 5.30a), conforme já comentado anteriormente.

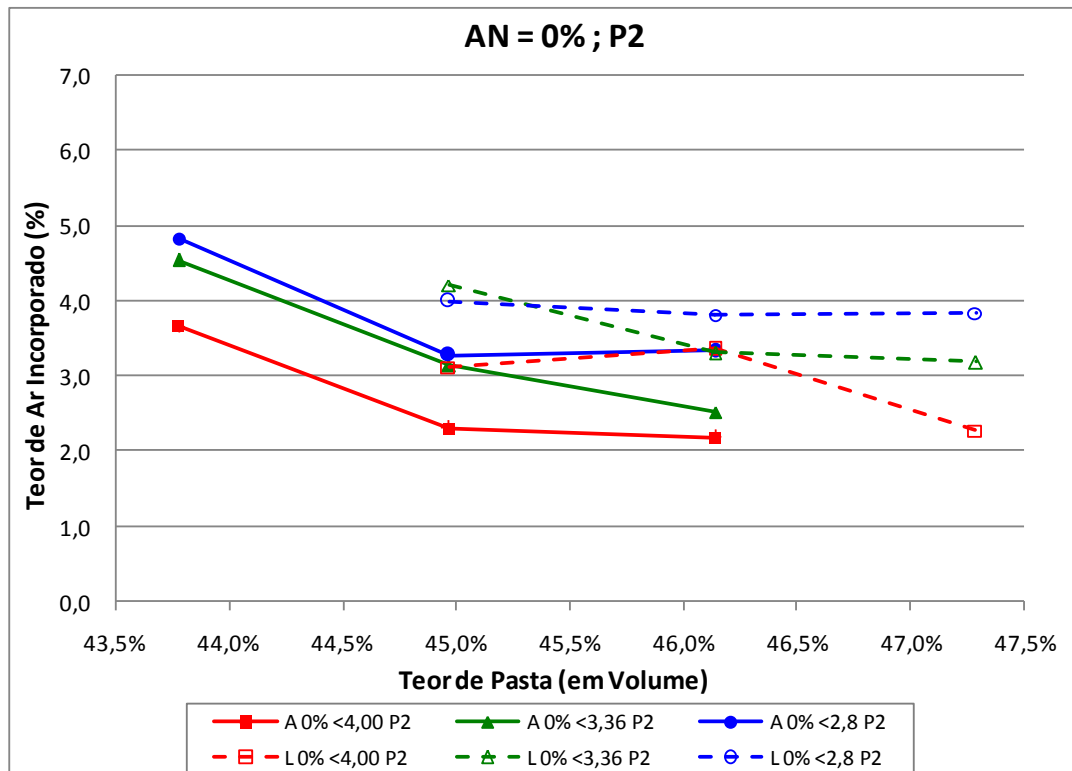
Quanto à influência do teor de pasta das misturas, observa-se que de maneira geral houve aumento da fluidez e redução dos tempos de escoamento com o aumento do teor de pasta, conforme pode ser observado na Figura 5.29 e na Figura 5.30, respectivamente.

Já na Figura 5.31 são apresentados os resultados de teores de ar incorporado das argamassas em função do teor de pasta e do teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem para cada forma de grão (arredondada e lamelar).



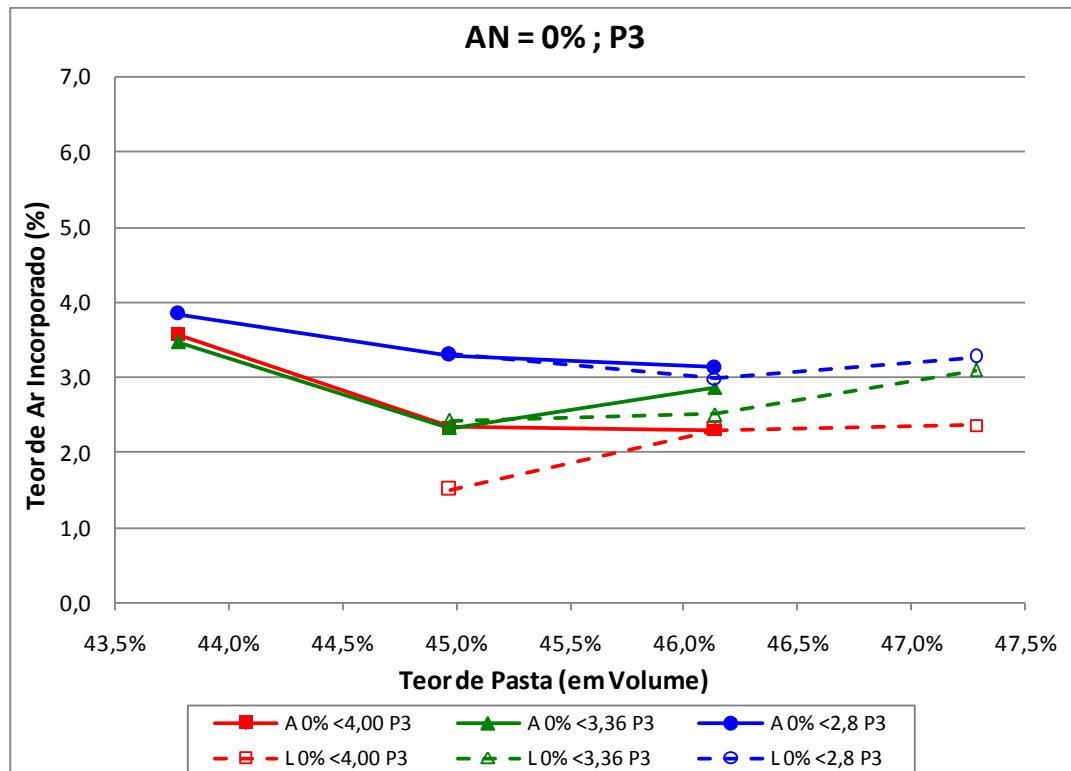


a) Menor teor de material pulverulento



b) Teor intermediário de material pulverulento

Continuação...



c) Maior teor de material pulverulento

Figura 5.31 – Teor de ar incorporado das argamassas em função do teor de pasta para as duas formas de grão (arredondada e lamelar) do agregado miúdo de britagem e para diferentes teores de material pulverulento do agregado miúdo de britagem: a) P1; b) P2; e c) P3.

Observa-se na Figura 5.31 que há uma leve tendência a redução do teor de ar incorporado com o aumento do volume de pasta, principalmente para os agregados miúdos de britagem com menor teor de material pulverulento. Quanto à influência da forma dos grãos da areia de britagem nesta propriedade, observa-se que os grãos mais arredondados proporcionaram redução do teor de ar incorporado das argamassas. No entanto, a diferença entre o teor de ar incorporado de argamassas semelhantes, uma contendo areia arredondada e outra areia lamelar, diminuiu à medida que se aumenta o teor de material pulverulento destes agregados. Comportamentos semelhantes foram observados quando se aumentou o teor de substituição da areia de britagem por areia natural.

### 5.3.5 Avaliação da correlação das características do agregado miúdo com as propriedades das argamassas

Foram realizadas algumas relações entre as propriedades medidas das argamassas e as características dos agregados que a compunham a fim de avaliar qual característica apresentaria

influência mais significativa em cada propriedade das argamassas. Foram avaliadas as seguintes características dos agregados:

- **Teor de areia natural na composição:** teores pré-definidos no programa experimental de 0%, 20%, 35% e 50% (em volume);
- **Malha da peneira de corte do agregado miúdo de britagem:** malhas pré-definidas no programa experimental de 2,80mm; 3,36mm e 4,00mm. Esta característica é correlata a dimensão máxima característica do agregado;
- **Teor de material pulverulento da areia de britagem:** as areias de britagem avaliadas no programa experimental apresentavam 3 teores de material pulverulento pré-definidos e semelhantes para cada configuração de forma dos grãos e peneira de corte da areia de britagem;
- **Módulo de finura da composição de agregados miúdos** (agregado miúdo total);
- **Coefficiente de forma da composição de agregados miúdos:** média ponderada do coeficiente de forma das frações de cada agregado contido na composição até a fração retida na malha 0,15mm (ponderação do coeficiente volumétrico de forma de cada fração pela sua massa, considerando os dados apresentados em 5.2);
- **Teor de material pulverulento da composição de agregados miúdos** (agregado miúdo total).

Cada uma das características apresentadas foi correlacionada com as propriedades de fluidez (medida pelo espalhamento - Flow 10), tempo de escoamento no tubo do ensaio proposto e teor de ar incorporado, avaliadas de cada argamassa. Vale ressaltar que foi avaliada a fluidez pela medida do espalhamento Flow 10, pois os coeficientes de correlação eram maiores que se considerado o espalhamento do Flow 0. Este fenômeno provavelmente está associado ao fato de que muitas argamassas, principalmente aquelas confeccionadas com areias contendo elevado teor de material pulverulento e sem composição com areia natural, apresentavam o espalhamento igual ou muito próximo ao diâmetro inferior do molde (125mm) no Flow 0, o que aumentava a dispersão dos resultados.

Os coeficientes de correlação  $R^2$  das curvas de ajuste linear entre as propriedades das argamassas e as características dos agregados são apresentados na Tabela 5.11. Nesta tabela são apresentados os coeficientes de correlação das características dos agregados para cada uma das propriedades das argamassas considerando os resultados separados por forma de grão da areia de britagem (lamelar e arredondado) ou em conjunto (todos).

Tabela 5.11 – Coeficientes de correlação  $R^2$  das funções lineares de ajuste das propriedades das argamassas e as características dos agregados.

Característica do Agregado	Teor de Pasta	Coeficiente de Correlação $R^2$ para Funções Lineares de Ajuste									
		Fluidez - Flow 10			Tempo de escoamento			Teor de Ar Incorporado			
		Todos	Arredond.	Lamelar	Todos	Arredond.	Lamelar <sup>1</sup>	Todos	Arredond.	Lamelar	
% Areia Natural <sup>3</sup>	45,0%	0,13	0,09	0,27	0,04	0,05	- <sup>2</sup>	0,03	0,08	0,00	
	46,1%	0,17	0,11	0,33	0,07	0,04	0,06	0,00	0,00	0,03	
A. Britagem	Malha de Corte	45,0%	0,13	0,24	0,14	0,31	0,36	0,31	0,34	0,49	0,28
		46,1%	0,09	0,12	0,11	0,02	0,08	0,00	0,34	0,34	0,40
	Pulverulento A. Britagem	45,0%	0,38	0,60	0,45	0,44	0,56	0,10	0,02	0,00	0,08
		46,1%	0,48	0,70	0,52	0,50	0,50	0,84	0,11	0,22	0,04
Agregado Total	Módulo de Finura	45,0%	0,00	0,04	0,01	0,17	0,19	0,28	0,04	0,15	0,00
		46,1%	0,00	0,03	0,02	0,33	0,30	0,44	0,04	0,14	0,00
	Coef. Forma	45,0%	0,31	0,06	0,20	0,04	0,02	0,28	0,00	0,10	0,01
		46,1%	0,31	0,08	0,25	0,00	0,08	0,15	0,03	0,01	0,01
	Pulverulento Ag. Total	45,0%	0,53	0,69	0,74	0,46	0,57	0,10	0,06	0,02	0,12
		46,1%	0,65	0,79	0,84	0,24	0,24	0,67	0,07	0,13	0,03

Observações:

- 1 - Apenas 4 argamassas com areia de britagem com forma lamelar escoaram para o teor de pasta de 45,0%;
- 2 - Só houve escoamento para composições com 35% de areia natural não sendo possível haver correlação entre a característica do agregado e a propriedade das argamassas;
- 3 - Funções polinomiais com pontos de mínimo ou máximo em torno de 35% de areia natural melhoram as correlações, mas ainda permanecem pequenas.

Conforme pode ser observado na Tabela 5.11, a maioria dos coeficientes de correlação obtidos para funções de ajuste linear são baixos, indicando que cada característica isoladamente pouco explica o desempenho das argamassas para determinada propriedade. Observa-se ainda nesta tabela que as funções de ajuste considerando todos os agregados, na maioria dos casos, apresentam coeficiente de correlação menor que quando separado por forma do grão. Isto indica que argamassas contendo agregados miúdos de britagem com formas diferentes dos grãos possuem comportamentos distintos.

Para a propriedade de teor de ar incorporado das argamassas, a característica do agregado que apresentou maior correlação foi a malha da peneira de corte, que ainda assim possui  $R^2$  menor que 0,60 em todos os casos. Mesmo alterando a função de ajuste para exponencial, logarítmica, potência ou polinomial de segunda ordem, as correlações se mantêm baixas. O limiar de 0,60 é sugerido por Shilstone (1988) apud Martins (2005), que considera este valor como um coeficiente de correlação significativo para materiais tão heterogêneos como argamassas e concretos.

Já para os tempos de escoamento, a característica que apresentou maior correlação com esta propriedade foi o teor de material pulverulento da areia de britagem, com coeficiente de correlação  $R^2$  igual a 0,44 para teor de pasta de 45,0% e 0,50 para teor de pasta de 46,1%, ambos

considerando todos os resultados (areia lamelar e arredondada juntas). Quando analisadas as correlações separadas por forma de grão, observa-se que os coeficientes de ajuste obtidos ainda não são significativos, com exceção das correlações com a areia de britagem com forma lamelar e teor de pasta de 46,1% que apresentou coeficiente de correlação de 0,84. Por outro lado, para o teor de pasta de 45,0% o coeficiente de correlação para este material foi de apenas 0,10, provavelmente prejudicado pelo baixo número de argamassas que escoaram pelo tubo (apenas quatro). Testes com outras funções de ajuste foram realizados e observou-se um pequeno aumento do coeficiente  $R^2$  na maioria dos casos, no entanto todos estes ainda estavam abaixo de 0,60, com exceção das argamassas com teor de pasta de 46,1% contendo areia de britagem com forma lamelar, comentadas anteriormente, que apresentaram coeficiente  $R^2$  de 0,88. Assim, com exceção deste último caso, as correlações obtidas entre esta propriedade das argamassas e o teor de material pulverulento da areia de britagem não são significativas se analisadas isoladamente.

Quanto à fluidez, foram observadas boas correlações desta propriedade com o teor de material pulverulento do agregado miúdo total, sendo estes, inclusive, os melhores coeficientes de correlação observados dentre todas as relações avaliadas. Estas relações entre a fluidez das argamassas e o teor de material pulverulento dos agregados miúdos que as compõe, são apresentados na Figura 5.32 para a avaliação de todos os agregados em conjunto. Já na Figura 5.33 são apresentadas estas relações para os agregados de britagem com forma arredondada dos grãos e na Figura 5.34 para os de forma lamelar. Conforme comentado anteriormente, pode-se observar nestas figuras que os coeficientes de correlação são maiores quando separados os resultados por forma dos grãos (Figura 5.33 e Figura 5.34). Observa-se que quanto mais se separa os resultados, seja por forma, peneira de corte do agregado de britagem e/ou teor de areia natural, os coeficientes de correlação aumentam consideravelmente. Em resumo, quanto mais aprofundada e detalhada a análise, mais significativa é a correlação.

Vale ressaltar que nos gráficos apresentados na Figura 5.32, Figura 5.33 e Figura 5.34, foram utilizadas funções lineares para ajuste das relações. Optou-se em manter as funções lineares para ajuste pois a diferença entre os coeficientes de correlação destas para funções exponenciais ou potenciais era menor que 2%. Destaca-se ainda que todas as relações apresentadas nos gráficos da Figura 5.32, da Figura 5.33 e da Figura 5.34 se mostraram significativas para uma confiabilidade de 95%.

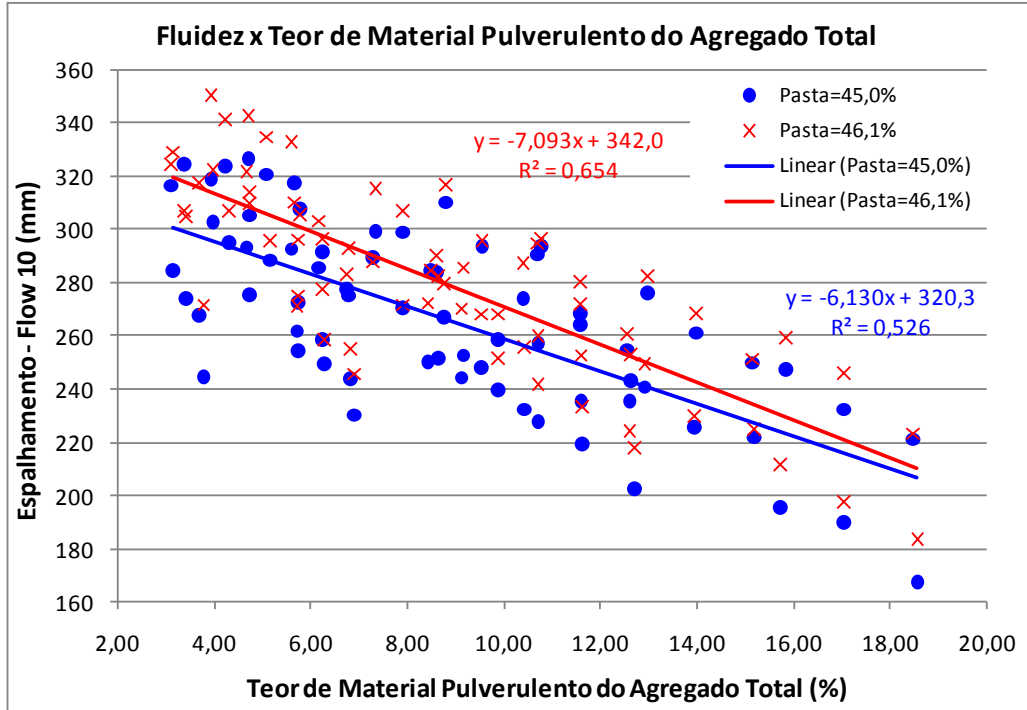


Figura 5.32 – Fluidez de todas argamassas com teores de pasta de 45,0% e 46,1% em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo total.

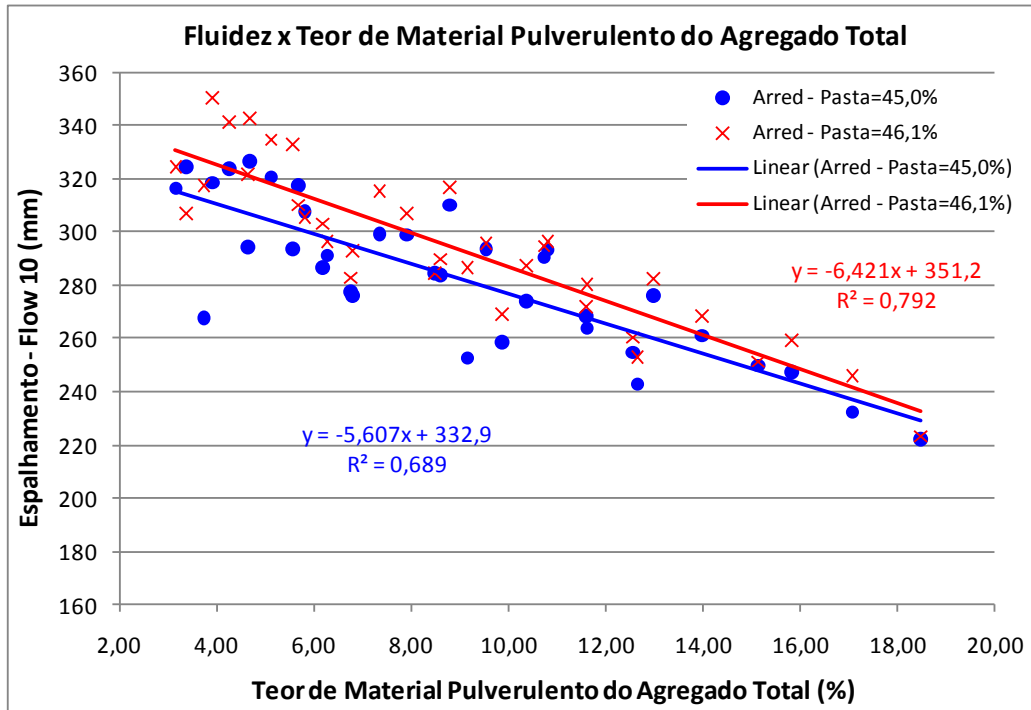


Figura 5.33 - Fluidez das argamassas com teores de pasta de 45,0% e 46,1% contendo agregado de britagem com forma arredondada em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo total.

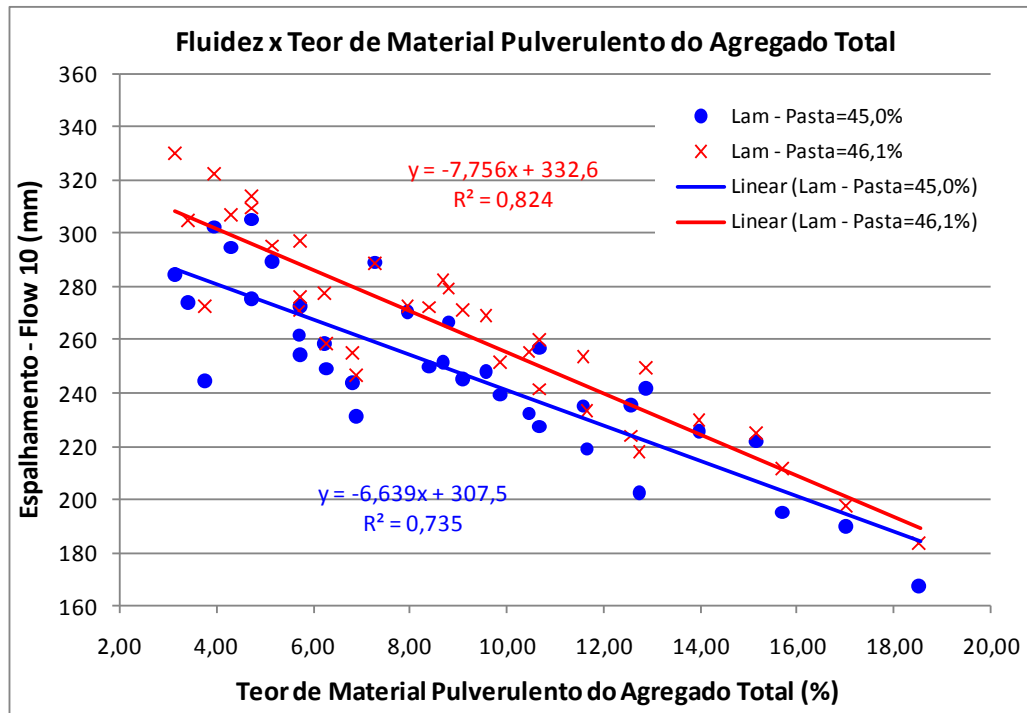


Figura 5.34 - Fluidez das argamassas com teores de pasta de 45,0% e 46,1% contendo agregado de britagem com forma lamelar em função do teor de material pulverulento do agregado miúdo total.

Apesar da boa correlação entre a fluidez das argamassas e o teor de material pulverulento do agregado miúdo total, acredita-se que reduzir o teor de material pulverulento da composição de agregados ao máximo pode não assegurar um desempenho otimizado. Prova disso é a grande dispersão dos resultados de fluidez em torno dos teores menores de material pulverulento.

### 5.3.6 Correlação entre os ensaios

Durante a análise dos resultados observou-se certa correlação entre os tempos de escoamento e os resultados de fluidez. Por conta disto, foi realizado um estudo de relação entre estas propriedades avaliadas das argamassas. Na Tabela 5.12 é apresentado um resumo dos coeficientes de correlação obtidos. Nesta tabela, na divisão superior esquerda são apresentados os coeficientes de correlação obtidos para funções lineares de ajuste e na parte inferior direita os das funções que apresentaram o maior coeficiente de correlação  $R^2$ . Juntamente com este valor é apresentado o tipo de função utilizada, que obedece a seguinte nomenclatura: Pot = função potencial; Pol = função polinomial de segunda ordem; e Log = função logarítmica.

Tabela 5.12 – Coeficientes de correlação  $R^2$  das funções de ajuste entre as propriedades das argamassas.

Propriedade	Teor de Pasta (%)							
	45,0	46,1	45,0	46,1	45,0	46,1	45,0	46,1
Fluidez - Flow 0	0,21	0,53	0,83	0,68	0,84	0,91		
Fluidez - Flow 10	0,10	0,39	0,87	0,63			Pol=0,98	Pol=0,98
Tempo escoamento	0,17	0,29			Log=0,89	Pol=0,78	Pot=0,88	Pol=0,88
Teor de Ar Incorp.			Pot=0,21	Pol=0,31	Pol=0,23	Pol=0,52	Log=0,22	Pol=0,58
	Teor de Ar Incorp.		Tempo escoam.		Fluidez - Flow 10		Fluidez - Flow 0	

Conforme apresentado na Tabela 5.12, observa-se que não há correlação significativa entre teor de ar incorporado e as outras propriedades avaliadas. Por outro lado há boa correlação entre as duas formas de avaliação da fluidez (Flow 0 e flow 10) e entre estas e o tempo de escoamento. A boa correlação entre Flow 0 e Flow 10, permite, de certa forma, utilizar qualquer um dos dois parâmetros para avaliação da fluidez, devendo ser observado apenas a faixa de variação dos resultados. Ou seja, espalhamentos muito próximos de 125mm prejudicam a sensibilidade de medida da fluidez para Flow 0 e espalhamentos muito elevados para o Flow 10.

Já quanto à relação da fluidez com o tempo de escoamento, observou-se boa correlação entre as propriedades. Esta relação também é válida para os outros dois teores de pasta que inicialmente não tinham sido considerados (43,8% para as areias com forma arredondada e 47,3% para as areias com forma lamelar). Na Figura 5.35 são apresentados os pontos da relação entre tempo de escoamento e fluidez (Flow 0) para todos os teores de pasta avaliados. Vale ressaltar que optou-se em apresentar a correlação com Flow 0, pois para este caso obteve-se a maior significância.

Conforme pode ser observado na Figura 5.35, há uma boa relação entre as duas propriedades das argamassas, sendo que os tempos de escoamento tendem a estabilizar em torno de seis segundos.

Quando forçado um comportamento linear para a relação, empregando-se de uma função do tipo exponencial entre as variáveis, observa-se correlação significativa entre as propriedades avaliadas para um nível de confiabilidade de 95%. Apesar da boa correlação entre as duas propriedades, vale ressaltar que ela só é válida para as argamassas que escoam pelo tubo. Em outras palavras, várias argamassas apresentaram espalhamentos elevados, porém não escoam pelo tubo e por isso não constam no gráfico da Figura 5.35. Exemplo disto são as argamassas contendo as composições “A 0% <4,00 P1” e “L 20% <4,00 P1”, que para teores de pasta de 46,1% apresentaram espalhamento (Flow 0) de 250 e 237mm, respectivamente, e não escoam pelo tubo. Esta última composição, contendo areia com forma lamelar, em argamassa com teor



de pasta de 47,3% proporcionou espalhamento (Flow 0) de 250mm e não escoou pelo tubo. Diante do exposto, pode-se afirmar que os ensaios são correlacionáveis, porém complementares.

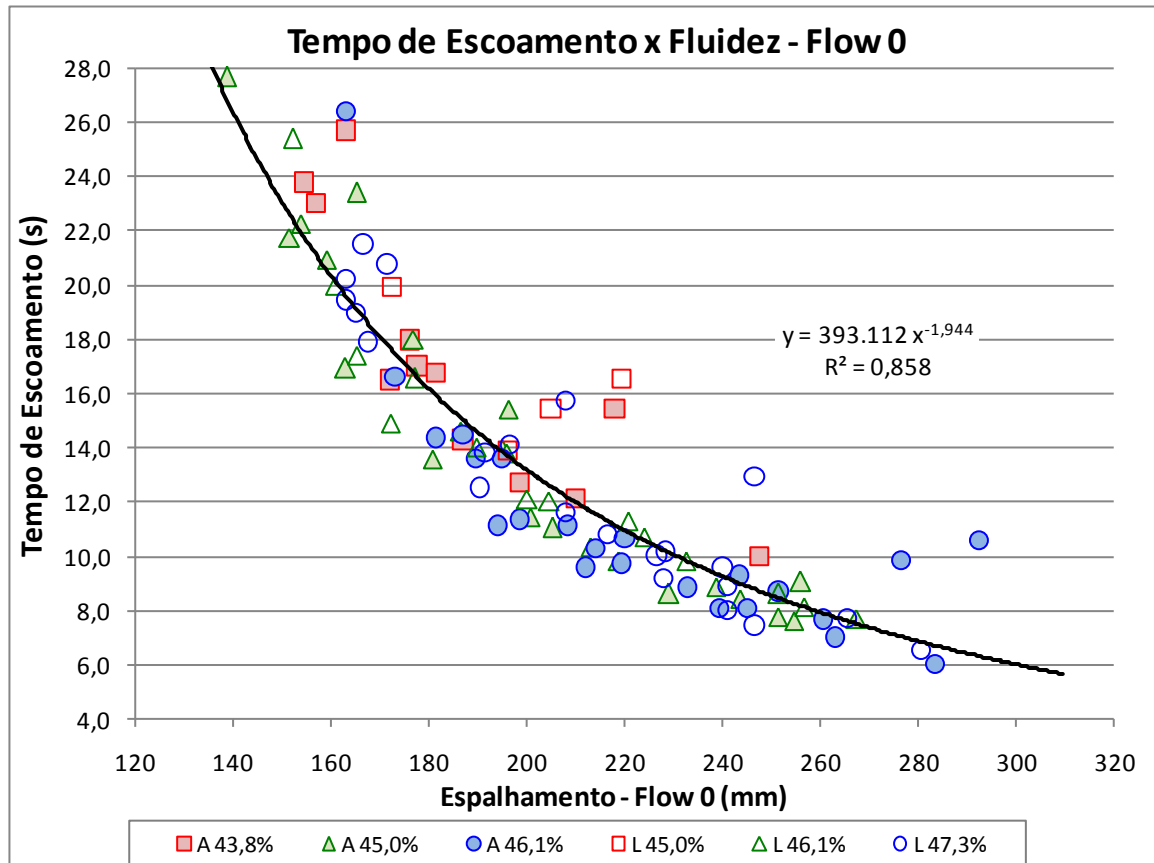


Figura 5.35 – Relação entre o tempo de escoamento no tubo do ensaio proposto e a fluidez, medida pelo espalhamento – Flow 0, das argamassas avaliadas.

### 5.3.7 Composições selecionadas para o estudo em concretos

Dentre as 72 composições de agregados avaliadas em argamassa, foram selecionadas 14 para o estudo em concreto, sendo 7 para cada forma de grão do agregado miúdo de britagem. A seguir, são apresentadas as composições selecionadas para cada forma de grão:

- 2,80; 35%; P2
- 3,36; 35%; P2
- 4,00; 35%; P2
- 4,00; 20%; P2
- 4,00; 50%; P2
- 4,00; 35%; P1
- 4,00; 35%; P3

Foram selecionadas estas 7 composições de agregados para cada forma de grão do agregado miúdo de britagem, pois estas representam todas as demais variáveis avaliadas no estudo em argamassa (peneira de corte, teor de substituição por areia natural e teor de material pulverulento) além da forma dos grãos, conforme esquema abaixo:

- **2,80**; 35%; P2      • 4,00; **20%**; P2      • 4,00; 35%; **P1**
- **3,36**; 35%; P2      • 4,00; 35%; P2      • 4,00; 35%; **P2**
- 4,00; 35%; P2      • 4,00; **50%**; P2      • 4,00; 35%; **P3**

Além disso, algumas dessas composições estão entre aquelas que apresentaram melhor desempenho quanto à fluidez e escoamento no tubo nos testes em argamassas, tanto para as areias de britagem com forma arredondada quanto para a lamelar. Na Tabela 5.13 é apresentado um resumo das propriedades das argamassas confeccionadas com cada uma dessas composições de agregados.

Tabela 5.13 – Resumo das propriedades das argamassas confeccionadas com as composições de agregados selecionadas para o estudo em concreto.

Composição de Agregados	Propriedades das argamassas para cada teor de pasta							
	Espalhamento - Flow 0 (mm)				Tempo de Escoamento (s)			
	43,8%	45,0%	46,1%	47,3%	43,8%	45,0%	46,1%	47,3%
A 35% <2,8 P2	176	177	209		18,0	18,0	11,1	
A 35% <3,36 P2	178	213	240		17,0	10,3	8,0	
A 35% <4,00 P2	199	201	245		12,7	11,4	8,1	
A 20% <4,00 P2	210	229	252		12,1	8,6	8,7	
A 50% <4,00 P2	141	219	233		#N/D	9,8	8,8	
A 35% <4,00 P1	172	251	310		16,5	7,8	#N/D	
A 35% <4,00 P3	157	196	214		23,0	13,8	10,2	
L 35% <2,8 P2		144	190	165		#N/D	14,0	19,0
L 35% <3,36 P2		172	172	227		19,9	14,9	10,0
L 35% <4,00 P2		196	200	241		13,9	12,1	8,9
L 20% <4,00 P2		168	192	229		#N/D	#N/D	10,2
L 50% <4,00 P2		162	205	228		#N/D	12,0	9,2
L 35% <4,00 P1		220	252	281		16,5	8,6	6,5
L 35% <4,00 P3		153	161	191		#N/D	20,0	12,5

## 5.4 ESTUDO EM CONCRETOS

Nesta etapa foram empregadas algumas composições granulométricas na confecção de concretos, dentre aquelas avaliadas no estudo em argamassa (item 5.3). Primeiramente, para cada composição de agregados miúdos avaliada nesta etapa, foi definido o teor de argamassa mínimo

necessário para que um concreto, de abatimento e relação água/cimento fixos, escoasse pelo ensaio de cone invertido (ensaio proposto). Após definido os teores ideais de argamassa, cada composição de agregados foi empregada na confecção de dois concretos com relações água/cimento distintas, sendo avaliada a demanda de água para obtenção de um abatimento pré-determinado, o escoamento pelo cone invertido, a massa específica e a resistência à compressão de cada um desses concretos.

A seguir, primeiramente são apresentados os resultados obtidos durante os ajustes dos teores de argamassa de cada concreto. Na seqüência, são apresentadas as curvas de dosagem obtidas para cada composição de agregados avaliada. Por fim, é feita uma análise de desempenho dos concretos, comprando-se os consumos de cimento para algumas resistências pré-definidas e para relações água/cimento fixas.

#### 5.4.1 Definição dos teores de argamassa

Conforme definido em 5.3.7, foram selecionadas 14 composições de agregados miúdos para avaliação em concreto, sendo 7 para cada forma de grão da areia de britagem. Estas composições e suas características são apresentadas na Tabela 5.14. Nesta tabela são apresentados os teores de material pulverulento da areia de britagem e do agregado miúdo total, assim como o módulo de finura e o coeficiente de forma médio ponderado da composição de agregados (agregado miúdo total). Estas informações serão utilizadas ao longo deste item em correlações com propriedades do concreto e para explicar determinados comportamentos.

Tabela 5.14 – Características das composições de agregados miúdos utilizados no estudo em concreto.

Composição de agregados	Areia de Britagem	Agregado Miúdo Total		
	Teor de Material Pulverulento (%)	Teor de Material Pulverulento (%)	Módulo de Finura	Coeficiente de Forma
A 35% <2,8 P2	12,6	8,6	1,96	0,205
A 35% <3,36 P2	11,6	7,9	2,10	0,204
A 20% <4,00 P2	10,7	8,8	2,52	0,188
A 35% <4,00 P1	5,7	3,9	2,39	0,202
A 35% <4,00 P2	10,7	7,3	2,22	0,203
A 35% <4,00 P3	15,8	10,8	2,04	0,204
A 50% <4,00 P2	10,7	5,8	1,91	0,219
L 35% <2,8 P2	12,7	8,7	1,95	0,179
L 35% <3,36 P2	11,6	7,9	2,09	0,176
L 20% <4,00 P2	10,7	8,8	2,52	0,154
L 35% <4,00 P1	5,7	4,0	2,36	0,172
L 35% <4,00 P2	10,7	7,3	2,22	0,174
L 35% <4,00 P3	15,7	10,7	2,07	0,177
L 50% <4,00 P2	10,7	5,8	1,91	0,196

Para cada uma das composições de agregados apresentadas na Tabela 5.14, foi definido o teor ideal de argamassa para um concreto de abatimento  $12\pm 1\text{cm}$ , com relação água/cimento, teor de aditivo e composição de agregados graúdos pré-definidos, conforme apresentado em 4.4.3. Este teor ideal de argamassa foi definido como sendo o menor teor de argamassa necessário para que o concreto, com as características especificadas, escoasse pelo cone de Abrams posicionado de cabeça para baixo (ensaio proposto – cone invertido). Para esta definição, eram empregados aumentos sucessivos no teor de argamassa do concreto de, no mínimo 1%, através da adição de cimento, areias e água, conforme descrito em 4.4.3.

Na Tabela 5.15 são apresentados os teores de argamassa definidos para as areias de britagem com forma arredondada dos grãos, juntamente com o abatimento, tempo de escoamento, relação a/c e volume de pasta do concreto ao final do ajuste. Além disso, também é apresentada uma estimativa do consumo de água por metro cúbico de concreto. Esta estimativa foi realizada com base nas massas dos materiais adicionados e suas respectivas massas específicas (não foi determinada a massa específica real do concreto). Já na Tabela 5.16, são apresentados estes mesmos parâmetros, porém para os concretos contendo agregados miúdos de britagem com forma lamelar dos grãos.

Vale ressaltar que o consumo de água estimado durante a fase de definição do teor de argamassa não pode ser utilizado como parâmetro comparativo da eficiência da composição de agregados em reduzir a demanda de água do concreto, pois este consumo estimado é função do tempo decorrido entre o início da mistura e seu ajuste final, que variou de uma definição para outra.

Tabela 5.15 – Resumo dos dados de ajuste do teor de argamassa dos concreto contendo areia de britagem com grãos de forma arredondada.

Composição de agregados	$\alpha_{\text{volume}}$	Abatimento (cm)	Tempo de Escoamento (s)	a/c	Volume de Pasta <sup>1</sup>	Consumo de água/m <sup>3</sup> <sup>2</sup>
<b>A 2,80; 35%; P2</b>	53,3%	12,0	5,0	0,572	33,6%	205
<b>A 3,36; 35%; P2</b>	52,2%	12,5	6,5	0,555	30,9%	187
<b>A 4,00; 35%; P2</b>	56,3%	12,0	4,7	0,563	34,6%	210
<b>A 4,00; 20%; P2</b>	57,2%	12,0	5,3	0,569	34,9%	213
<b>A 4,00; 50%; P2</b>	53,3%	12,0	2,4	0,588	32,8%	203
<b>A 4,00; 35%; P1</b>	56,2%	12,0	5,6	0,569	32,9%	201
<b>A 4,00; 35%; P3</b>	55,2%	12,0	3,8	0,574	33,3%	204

Observações:

1 - Volume de pasta do concreto considerando: cimento, água e aditivo;

2 - Consumo de água por metro cúbico de concreto estimado ao final do ajuste do teor de argamassa.

Tabela 5.16 – Resumo dos dados de ajuste do teor de argamassa dos concreto contendo areia de britagem com grãos de forma lamelar.

Composição de agregados	$\alpha_{\text{volume}}$	Abatimento (cm)	Tempo de Escoamento (s)	a/c	Volume de Pasta	Consumo de água/m <sup>3</sup> *
L 2,80; 35%; P2	51,3%	12,5	7,3	0,559	32,4%	197
L 3,36; 35%; P2	53,3%	12,5	3,1	0,588	33,7%	208
L 4,00; 35%; P2	54,2%	12,0	8,0	0,576	32,5%	200
L 4,00; 20%; P2	57,3%	12,5	6,4	0,570	35,8%	219
L 4,00; 50%; P2	52,3%	12,0	3,6	0,575	32,5%	199
L 4,00; 35%; P1	55,2%	12,0	8,4	0,555	32,6%	197
L 4,00; 35%; P3	53,2%	12,0	4,6	0,591	33,2%	206

Observações:

1 - Volume de pasta do concreto considerando: cimento, água e aditivo;

2 - Consumo de água por metro cúbico de concreto estimado ao final do ajuste do teor de argamassa.

Conforme pode ser observado na Tabela 5.15 e na Tabela 5.16, as relações água/cimento e os abatimentos foram bastante semelhantes durante o ajuste do teor de argamassa, apresentando pequena variação conforme se pretendia. Ainda nestas tabelas, observa-se que o teor ideal de argamassa variou para cada composição de agregado. De maneira geral, os concretos contendo composições de agregados com maior teor de areia natural demandaram menor teor de argamassa para escoarem pelo cone invertido, mantendo-se o abatimento especificado de 12±1cm. Além disso, cabe destacar que aumentos do teor de areia natural proporcionaram reduções nos tempos de escoamento.

Observa-se ainda que composições contendo agregado miúdo de britagem peneirados em menor malha de corte conduziram a concretos com menor teor de argamassa, mantendo-se condição semelhante de escoamento pelo cone invertido para o abatimento especificado. Da mesma maneira, areias de britagem com maior teor de material pulverulento também permitiram escoamento do concreto pelo cone invertido para menores teores de argamassa. Pode ser observado ainda que os concretos contendo a composição “4,00; 20%; P2”, para as duas formas de grão da areia de britagem, ficaram bastante ásperos e também demandaram maiores teores de argamassa para manter a condição de escoamento pelo cone invertido para o abatimento especificado. Com relação a diferença na forma dos agregados miúdos de britagem, observa-se que os concretos com areia arredondada demandaram, na maioria dos casos, teor maior de argamassa que aqueles contendo areia lamelar. Não foi encontrada uma justificativa plausível para este fato.

Diante de todo o exposto, pode-se afirmar que o ensaio de cone invertido proposto apresenta boa sensibilidade em avaliar os fatores que influenciam o bombeamento de concretos

com peso e abatimentos convencionais, conforme apresentado no item 3.3.2. Esta observação já havia sido colocada nos estudos preliminares e piloto, porém cabe aqui ser enfatizada.

Quando analisado o teor de argamassa ideal (Tabela 5.15 e Tabela 5.16) em conjunto com as características das composições de agregados (Tabela 5.14), observa-se boa correlação deste com o módulo de finura do agregado miúdo total. Esta correlação, que se mostrou significativa para um nível de confiabilidade de 95%, é apresentada na Figura 5.36.

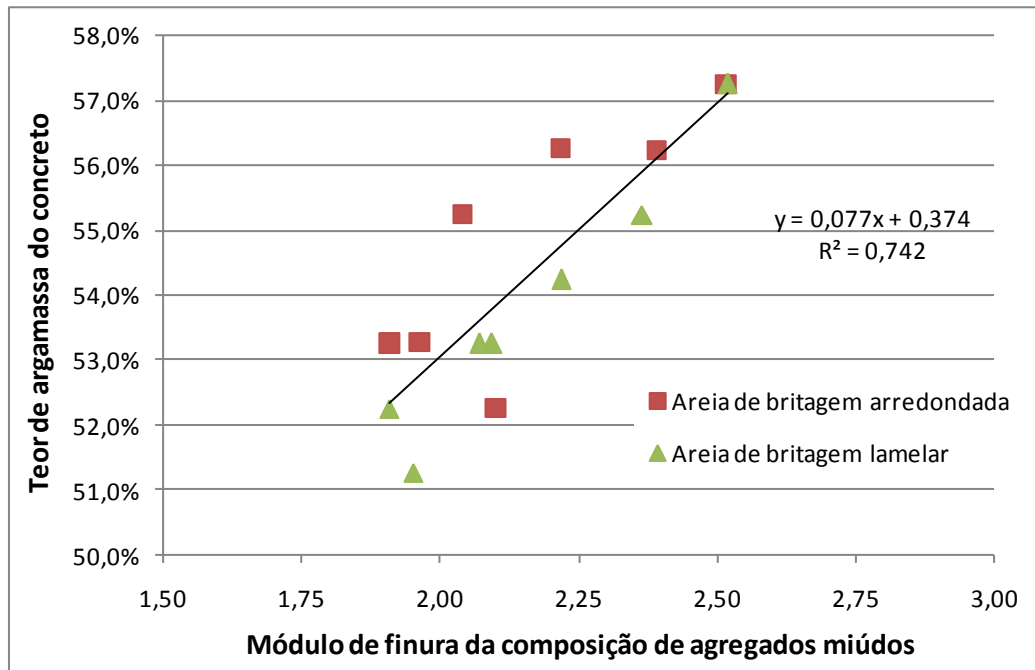


Figura 5.36 – Correlação entre módulo de finura do agregado miúdo total e teor de argamassa do concreto.

Algumas publicações e métodos de dosagem, como os do ACI e da ABCP comentados no item 2.3.1, já sugerem a adoção de teores de argamassa do concreto variáveis em função do módulo de finura das areias. A correlação aqui observada só veio a confirmar a experiência contida nestes métodos e publicações. Vale destacar que, se feitas as relações separadas por forma de grão do agregado miúdo de britagem, observa-se melhor correlação para a forma lamelar que para a forma arredondada.

#### 5.4.2 Curvas de dosagem

Após definidos os teores de argamassa para os concretos com cada composição de agregado miúdo, foram confeccionados dois novos traços de concreto com duas relações água/cimento distintas ( $a/c_1$  e  $a/c_2$ ), empregando-se os mesmos materiais, sendo os resultados finais expressos em forma de curvas de dosagem, mesmo que com apenas dois pontos. De cada

concreto confeccionado foi avaliado o abatimento (NBR NM 67:1996), consumo de água, escoamento pelo cone invertido (ensaio proposto) e massa específica no estado fresco (NBR 9833:1987), para posterior cálculo do teor de ar incorporado e consumo de cimento. Além disso, de cada concreto, foram moldados 4 corpos-de-prova para avaliação da resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

Os resultados obtidos em concreto, no estado fresco, para cada relação água/cimento e para cada composição de agregados contendo areia de britagem com forma arredondada são apresentados na Tabela 5.17. Já na Tabela 5.18 são apresentados os resultados obtidos dos concretos com composições contendo areia de britagem com forma lamelar dos grãos.

Tabela 5.17 – Resultados obtidos no estado fresco para os concretos contendo agregados de britagem com forma arredondada dos grãos.

Propriedade	a/c	Composição de agregados miúdos contendo areia de britagem com forma arredondada						
		4,00; 35%; P2	3,36; 35%; P2	2,80; 35%; P2	4,00; 50%; P2	4,00; 20%; P2	4,00; 35%; P1	4,00; 35%; P3
a/c	a/c1	0,469	0,476	0,485	0,470	0,493	0,484	0,473
	a/c2	0,562	0,562	0,567	0,576	0,592	0,578	0,588
Massa Esp. (kg/dm <sup>3</sup> )	a/c1	2,427	2,417	2,406	2,415	2,407	2,434	2,414
	a/c2	2,432	2,420	2,427	2,427	2,432	2,442	2,416
Teor de Ar Incorporado	a/c1	0,6%	0,5%	0,9%	0,8%	2,0%	1,2%	0,9%
	a/c2	0,7%	1,1%	0,7%	0,7%	1,2%	1,1%	1,1%
$\alpha_{\text{volume}}$	a/c1	56,3%	52,3%	53,3%	53,3%	57,2%	56,2%	55,3%
	a/c2	56,2%	52,2%	53,2%	53,2%	57,2%	56,2%	55,2%
Volume de pasta	a/c1	32,5%	32,7%	32,9%	31,0%	32,5%	30,2%	32,9%
	a/c2	29,8%	29,3%	29,5%	27,6%	30,0%	27,7%	29,7%
Abatimento (cm)	a/c1	12,0	12,5	11,5	12,0	12,0	12,0	12,0
	a/c2	11,5	12,0	14,0	11,5	11,5	12,0	12,0
Escoamento pelo cone *	a/c1	N. 3 golpes	6,8s	P. 4 golpes	7,9s	P. 4 golpes	P. 1 golpe	8,8s
	a/c2	14,3s	N. 4 golpes	P. 4 golpes	6,4s	N. 15 golpes	P. 3 golpes	N. 5 golpes
Consumo de água/m <sup>3</sup>	a/c1	183	185	188	174	185	171	186
	a/c2	181	177	180	169	185	169	183

\* Observações: - P: escoamento iniciou mas parou na metade ou terço final do volume. O número ao lado indica o número de golpes deferidos com a haste de adensamento, com **baixa** força, para o término do escoamento;  
- N: não houve escoamento devido ao peso próprio do concreto, ou o houve em pequeno volume. O número ao lado indica o número de golpes deferidos com a haste de adensamento, com força **moderada**, para o término do escoamento.

Tabela 5.18 – Resultados obtidos no estado fresco para os concretos contendo agregados de britagem com forma lamelar dos grãos.

Propriedade	a/c	Composição de agregados miúdos contendo areia de britagem com forma lamelar						
		4,00; 35%; P2	3,36; 35%; P2	2,80; 35%; P2	4,00; 50%; P2	4,00; 20%; P2	4,00; 35%; P1	4,00; 35%; P3
a/c	a/c1	0,487	0,493	0,495	0,492	0,489	0,493	0,488
	a/c2	0,584	0,587	0,568	0,562	0,590	0,576	0,579
Massa Esp. (kg/dm <sup>3</sup> )	a/c1	2,413	2,407	2,411	2,411	2,412	2,426	2,404
	a/c2	2,421	2,410	2,414	2,406	2,406	2,425	2,403
Teor de Ar Incorporado	a/c1	0,6%	0,6%	0,3%	0,4%	0,9%	0,6%	0,5%
	a/c2	0,4%	0,7%	0,5%	0,8%	1,4%	0,8%	0,7%
$\alpha_{\text{volume}}$	a/c1	54,2%	53,2%	51,2%	52,2%	57,2%	55,2%	53,2%
	a/c2	54,1%	53,2%	51,2%	52,2%	57,1%	55,1%	53,2%
Volume de pasta	a/c1	33,0%	33,2%	33,2%	31,6%	34,6%	32,0%	34,0%
	a/c2	30,6%	30,7%	30,8%	29,6%	31,9%	29,6%	31,4%
Abatimento (cm)	a/c1	11,5	12,0	12,0	11,5	12,0	12,0	12,0
	a/c2	12,5	12,5	12,0	12,5	12,0	13,0	12,0
Escoamento pelo cone *	a/c1	N. 10 golpes	8,3s	N. 6 golpes	P. 2 golpes	N. 7 golpes	N. 7 golpes	N. 7 golpes
	a/c2	10,3s	P. 1 golpe	12,6s	P. 1 golpe	N. 7 golpes	N. 6 golpes	N. 3 golpes
Consumo de água/m <sup>3</sup>	a/c1	189	191	192	182	198	184	195
	a/c2	189	189	188	179	196	181	192

\* Observações: - P: escoamento iniciou mas parou na metade ou terço final do volume. O número ao lado indica o número de golpes deferidos com a haste de adensamento, com **baixa** força, para o término do escoamento;  
- N: não houve escoamento devido ao peso próprio do concreto, ou o houve em pequeno volume. O número ao lado indica o número de golpes deferidos com a haste de adensamento, com força **moderada**, para o término do escoamento.

Conforme pode ser observado na Tabela 5.17 e na Tabela 5.18, houve pequena variação do abatimento dos concretos, ficando a maioria deles dentro da faixa especificada de  $12 \pm 1$ cm, com exceção de apenas um, que apresentou abatimento de 14,0cm. Observa-se ainda que algumas misturas não escoaram pelo cone invertido, conforme havia sido observado na etapa de ajuste do teor de argamassa. O maior teor volumétrico de pasta e/ou o maior consumo de água por metro cúbico dos concretos ao final do ajuste do teor de argamassa (Tabela 5.15 e Tabela 5.16), provavelmente facilitaram o escoamento naquela ocasião, tendo em vista que o teor de argamassa e o abatimento foram mantidos constantes nas duas situações (ajuste do teor de argamassa e curva de dosagem). Vale ressaltar ainda que, de alguma maneira estes fatos podem ter contribuído para a maior demanda de argamassa para as areias arredondadas naquela fase de ajuste. Contudo, conforme mencionado anteriormente, não há uma justificativa plausível para este fato.

Quanto à influência das características dos agregados miúdos nas propriedades dos concretos, observa-se que não houve um comportamento nítido quanto à influência dos parâmetros de forma dos grãos, teor de material pulverulento, peneira de corte da areia de britagem e teor de substituição por areia natural no teor de ar incorporado dos concretos. No entanto, vale ressaltar que os concretos com 20% de areia natural apresentaram o maior teor de



ar incorporado. Quanto ao escoamento dos concretos, esta avaliação ficou prejudicada, pois algumas misturas não escoaram pelo cone invertido.

Por outro lado, podem ser observadas algumas influências das características das composições de agregados na demanda de água dos concretos. Quanto à peneira de corte do agregado miúdo de britagem, não pode ser observada uma influência nítida e direta na demanda de água do concreto. Provavelmente, o benefício trazido pela redução da superfície específica, como consequência do aumento da peneira de corte, foi ocultado pela exigência de maior teor de argamassa para uma mesma condição de escoamento do concreto. Nesta mesma linha de raciocínio, observa-se que o aumento do teor de areia natural nos concretos, apesar de aumentar a superfície específica, proporcionou redução na demanda de água, provavelmente por conta da redução do teor de argamassa. A redução do teor de material pulverulento do agregado miúdo total, por conta da areia natural utilizada ser bastante limpa e praticamente não possuir material pulverulento, pode estar contribuindo neste último caso.

Quanto ao teor de material pulverulento do agregado miúdo total, observa-se que esta característica, quando considerados todos os resultados em conjunto (não separados por forma de grão), apresenta baixa correlação com a demanda de água do concreto. No entanto, quando analisados os resultados separados por forma de grão (Figura 5.37), observa-se correlações lineares significativas, para um nível confiabilidade de 95%, entre o teor de material pulverulento do agregado miúdo total e a demanda de água do concreto para cada forma de grão.

Apesar destas correlações lineares significativas, conforme pode ser observado na Figura 5.37, uma função polinomial ou logarítmica se ajustaria melhor aos resultados obtidos para cada forma de grão. Comportamento semelhante havia sido observado no estudo em argamassa (item 5.3.2). Provavelmente, a maneira como foi obtido o teor de material pulverulento intermediário (P2), misturando-se em partes iguais uma areia lavada com baixo teor de material pulverulento (P1) e baixa superfície específica (vide resultados do ensaio de Blaine na Tabela 5.7) e a mesma areia não lavada com alto teor de material pulverulento e superfície específica elevada, possa estar influenciando este comportamento. Em outras palavras, caso o teor intermediário de material pulverulento estivesse sido obtido de outra maneira, por exemplo, por uma lavagem menos eficiente da areia de britagem e com isso talvez fosse removido essencialmente partículas mais finas (menores que  $30\mu\text{m}$ , conforme observado na Figura 5.5), a tendência de comportamento fosse outra, quiçá linear.

Vale ressaltar ainda que, se considerado apenas os concretos com mesmo teor de substituição por areia natural, neste caso com teor de 35%, o coeficiente de correlação entre as variáveis aumenta consideravelmente. Em outras palavras, para determinada forma de grão e para um mesmo teor de substituição por areia natural, há uma melhor correlação entre a demanda de água do concreto e o teor de material pulverulento do agregado miúdo total, neste caso proporcional ao da areia de britagem.

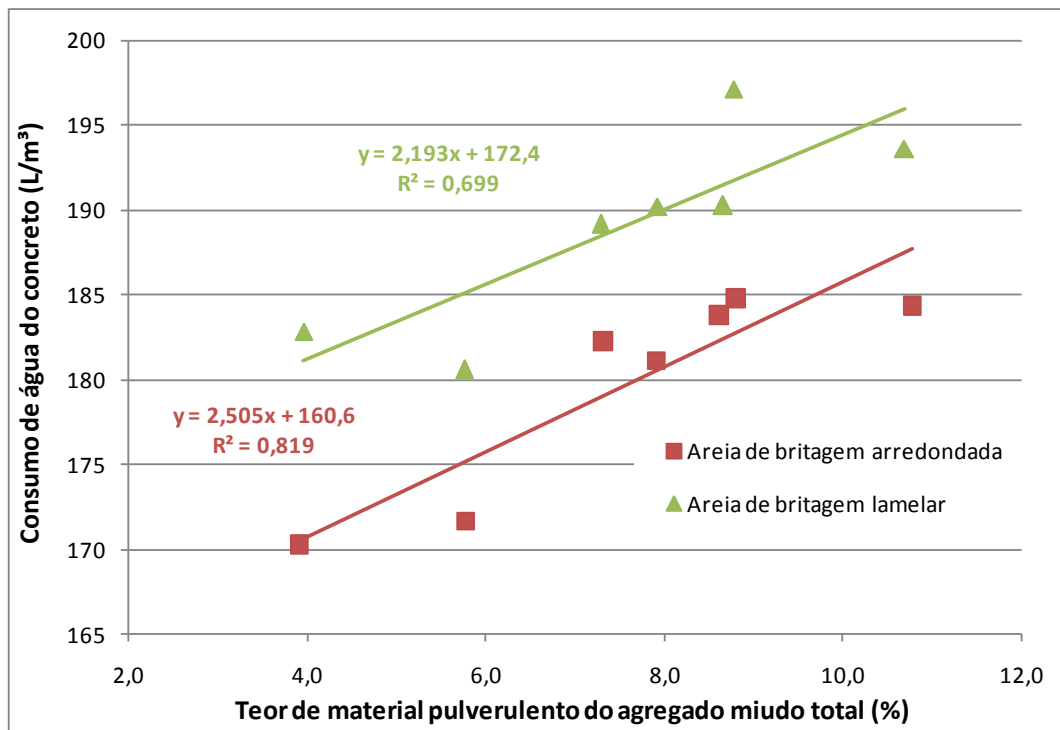


Figura 5.37 – Relação entre teor de material pulverulento do agregado miúdo total e consumo de água por metro cúbico dos concretos.

Ainda com relação à Figura 5.37, observa-se que, assim como no estudo em argamassa, a melhora da forma dos grãos dos agregados miúdos de britagem, obtida neste estudo específico, com a inclusão de um britador do tipo VSI na linha de britagem, proporcionou benefícios significativos na redução da demanda de água de concretos de mesmo abatimento e condição semelhante de bombeamento. Vale ressaltar que esta condição semelhante de bombeamento foi estimada pelo ensaio de escoamento no cone invertido (ensaio proposto).

Considerando todas as composições avaliadas contendo agregados miúdos com forma lamelar, observa-se que o menor consumo de água foi do concreto contendo a composição com 50% de areia natural e o maior para aquele da composição com 20%, sendo que em ambos o agregado miúdo de britagem era o mesmo (4,00; P2). Já para a areia arredondada, o menor consumo de água foi observado para a composição com menor teor de material pulverulento – A;

4,00; 35%; P1 – seguida pela composição composta com 50% de areia natural – A; 4,00; 50%; P2. Para os agregados miúdos com forma arredondada dos grãos, o maior consumo de água ocorreu para os concretos contendo as composições “A; 2,80; 35%; P2” e “A; 4,00; 20%; P2”, dependendo da relação água/cimento.

Quanto aos resultados no estado endurecido, de resistência à compressão aos 7 e 28 dias ( $f_{c7}$  e  $f_{c28}$ , respectivamente), estes são apresentados na Tabela 5.19 para os concretos contendo areia de britagem com forma arredondada e na Tabela 5.20 para aqueles contendo areia de britagem com forma lamelar. Nestas tabelas também são apresentados os dados de relação água/cimento, somatório dos agregados em relação ao cimento (m), consumo de cimento (C) e taxa de crescimento da resistência de 7 para 28 dias ( $f_{c28}/f_{c7}$ ) para cada um dos concretos. Com exceção dos dados de resistência aos 28 dias e de crescimento de resistência ( $f_{c28}/f_{c7}$ ), os demais foram utilizados na confecção das curvas de dosagem dos concretos (Figura 5.38 e Figura 5.39).

Tabela 5.19 – Resultados obtidos no estado endurecido para os concretos contendo agregados de britagem com forma arredondada dos grãos.

Propriedade	a/c	Composição de agregados miúdos contendo areia de britagem com forma arredondada						
		4,00; 35%; P2	3,36; 35%; P2	2,80; 35%; P2	4,00; 50%; P2	4,00; 20%; P2	4,00; 35%; P1	4,00; 35%; P3
a/c	a/c1	0,469	0,476	0,485	0,470	0,493	0,484	0,473
	a/c2	0,562	0,562	0,567	0,576	0,592	0,578	0,588
m	a/c1	4,73	4,72	4,72	5,02	4,91	5,38	4,66
	a/c2	5,97	6,11	6,08	6,69	6,19	6,76	6,17
C (kg/m <sup>3</sup> )	a/c1	391	390	387	371	375	354	393
	a/c2	322	315	317	293	312	292	311
fc 7 dias (MPa)	a/c1	36,9	34,6	35,8	33,2	33,2	33,2	34,6
	a/c2	28,4	28,2	28,6	25,4	26,2	25,5	25,9
fc 28 dias (MPa)	a/c1	49,8	48,1	48,8	48,7	48,6	39,3	48,8
	a/c2	42,5	42,1	41,1	38,1	38,6	39,0	37,6
fc 28 / fc 7	a/c1	1,35	1,39	1,36	1,47	1,46	1,18	1,41
	a/c2	1,49	1,49	1,43	1,50	1,47	1,53	1,45

Tabela 5.20 – Resultados obtidos no estado endurecido para os concretos contendo agregados de britagem com forma lamelar dos grãos.

Propriedade	a/c	Composição de agregados miúdos contendo areia de britagem com forma lamelar						
		4,00; 35%; P2	3,36; 35%; P2	2,80; 35%; P2	4,00; 50%; P2	4,00; 20%; P2	4,00; 35%; P1	4,00; 35%; P3
a/c	a/c1	0,487	0,493	0,495	0,492	0,489	0,493	0,488
	a/c2	0,584	0,587	0,568	0,562	0,590	0,576	0,579
m	a/c1	4,71	4,71	4,70	5,01	4,46	4,99	4,52
	a/c2	5,87	5,87	5,71	5,98	5,63	6,12	5,64
C (kg/m <sup>3</sup> )	a/c1	388	387	388	370	405	374	399
	a/c2	324	323	331	319	333	315	332
fc 7 dias (MPa)	a/c1	36,2	34,4	35,3	33,6	36,1	34,5	34,5
	a/c2	27,2	26,2	27,1	27,8	25,8	25,5	27,3
fc 28 dias (MPa)	a/c1	52,2	48,7	48,0	45,9	48,4	50,1	42,1
	a/c2	37,8	38,5	41,2	39,6	38,4	35,9	39,7
fc 28 / fc 7	a/c1	1,44	1,42	1,36	1,37	1,34	1,45	1,22
	a/c2	1,39	1,47	1,52	1,42	1,49	1,41	1,45

Conforme pode ser observado na Tabela 5.19 e na Tabela 5.20, alguns resultados de resistência aos 28 dias ficaram abaixo da expectativa, principalmente para as composições “A; 4,00; 35%; P1” e “L; 4,00; 35%; P3” na menor relação a/c (vide  $f_{c28}/f_{c7}$  nas referidas tabelas). Este fato somado as demais variações nos crescimentos de resistência, conforme pode ser observado nestas mesmas tabelas, estão associados a problemas técnicos no preparo e ensaio à compressão dos corpos-de-prova aos 28 dias. Por estes motivos, todas as análises seguintes serão realizadas para os resultados de resistência aos 7 dias que, se considerado um crescimento semelhante de resistência para os diversos concretos, seria semelhante para os resultados de 28 dias. Da mesma forma, nas curvas de dosagem apresentadas na Figura 5.38, para os concretos contendo areias de britagem com forma arredondada dos grãos, e na Figura 5.39, para aqueles com areias de britagem com forma lamelar, são considerados apenas os resultados de resistência aos 7 dias.

Com base nas curvas de dosagem apresentadas na Figura 5.38 e na Figura 5.39, foram obtidos os resultados de resistência à compressão aos 7 dias para cada composição de agregados avaliada, separados por forma dos grãos da areia de britagem, para duas relações água/cimento fixas e iguais a 0,559 e 0,500, conforme apresentado na Tabela 5.21. Foram definidas estas relações água/cimento porque a primeira é igual aquela utilizada em todo o estudo em argamassa e a segunda é a menor possível de ser avaliada para que não haja extrapolação de nenhum resultado. Sem haver extrapolação em pelo menos uma curva, também não é possível avaliar outra relação água/cimento maior que 0,559.

## CURVAS DE DOSAGEM DOS CONCRETOS CONTENDO AREIAS DE BRITAGEM ARREDONDADA

Abatimento: 12±1cm

Teor de brita 9,5/25: 70%

Teor de brita 4,75/12,5: 30%

Aditivo: Tec Mult 440LF a 1,1% m.c.

Composição de agregados	coeficientes						Q <sub>volum</sub>
	a1-7dias	b1-7dias	a2	b2	a3	b3	
4,00; 35%; P2	-91,80	79,98	13,42	-1,568	-0,01816	11,82	56,3%
3,36; 35%; P2	-73,54	69,56	16,21	-2,990	-0,01868	12,00	52,2%
2,80; 35%; P2	-87,38	78,21	16,47	-3,768	-0,01937	12,22	53,3%
4,00; 50%; P2	-73,53	67,72	15,77	-2,385	-0,02137	12,96	53,3%
4,00; 20%; P2	-70,58	67,98	12,94	-1,465	-0,02027	12,52	57,2%
4,00; 35%; P1	-82,29	73,04	14,73	-1,751	-0,02241	13,32	56,2%
4,00; 35%; P3	-75,65	70,42	13,03	-1,497	-0,01846	11,91	55,2%

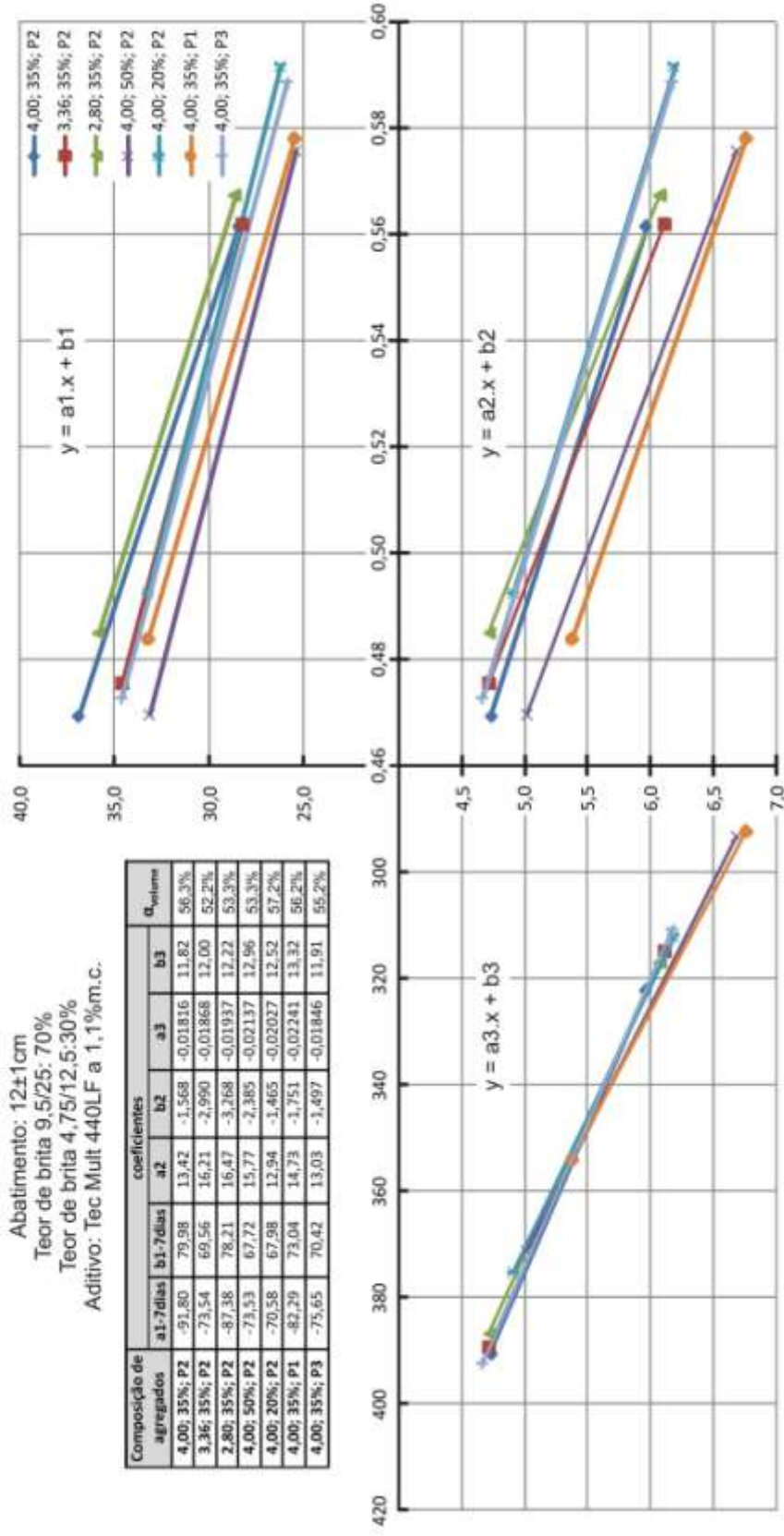


Figura 5.38 – Curvas de dosagem dos concretos contendo areia de britagem com forma arredondada dos grãos

## CURVAS DE DOSAGEM DOS CONCRETOS CONTENDO AREIAS DE BRITAGEM LAMELAR

Abatimento: 12±1cm

Teor de brita 9.5/25: 70%

Teor de brita 4.75/12.5:30%

Aditivo: Tec Mult 440LF a 1,1% m.c.

Composição de agregados	coeficientes						α <sub>original</sub>
	a1-7dias	b1-7dias	a2	b2	a3	b3	
4,00; 35%; P2	-92,78	81,38	11,89	-1,068	-0,01804	11,72	54,2%
3,36; 35%; P2	-87,54	77,56	12,35	-1,377	-0,01792	11,65	53,3%
2,80; 35%; P2	-110,87	90,16	13,68	-2,068	-0,01759	11,54	51,3%
4,00; 50%; P2	-82,28	74,08	13,78	-1,767	-0,01879	11,97	52,3%
4,00; 20%; P2	-101,49	85,69	11,65	-1,244	-0,01629	11,05	57,3%
4,00; 35%; P1	-108,26	87,87	13,55	-1,690	-0,01916	12,15	55,2%
4,00; 35%; P3	-79,22	73,20	12,25	-1,453	-0,01673	11,20	53,2%

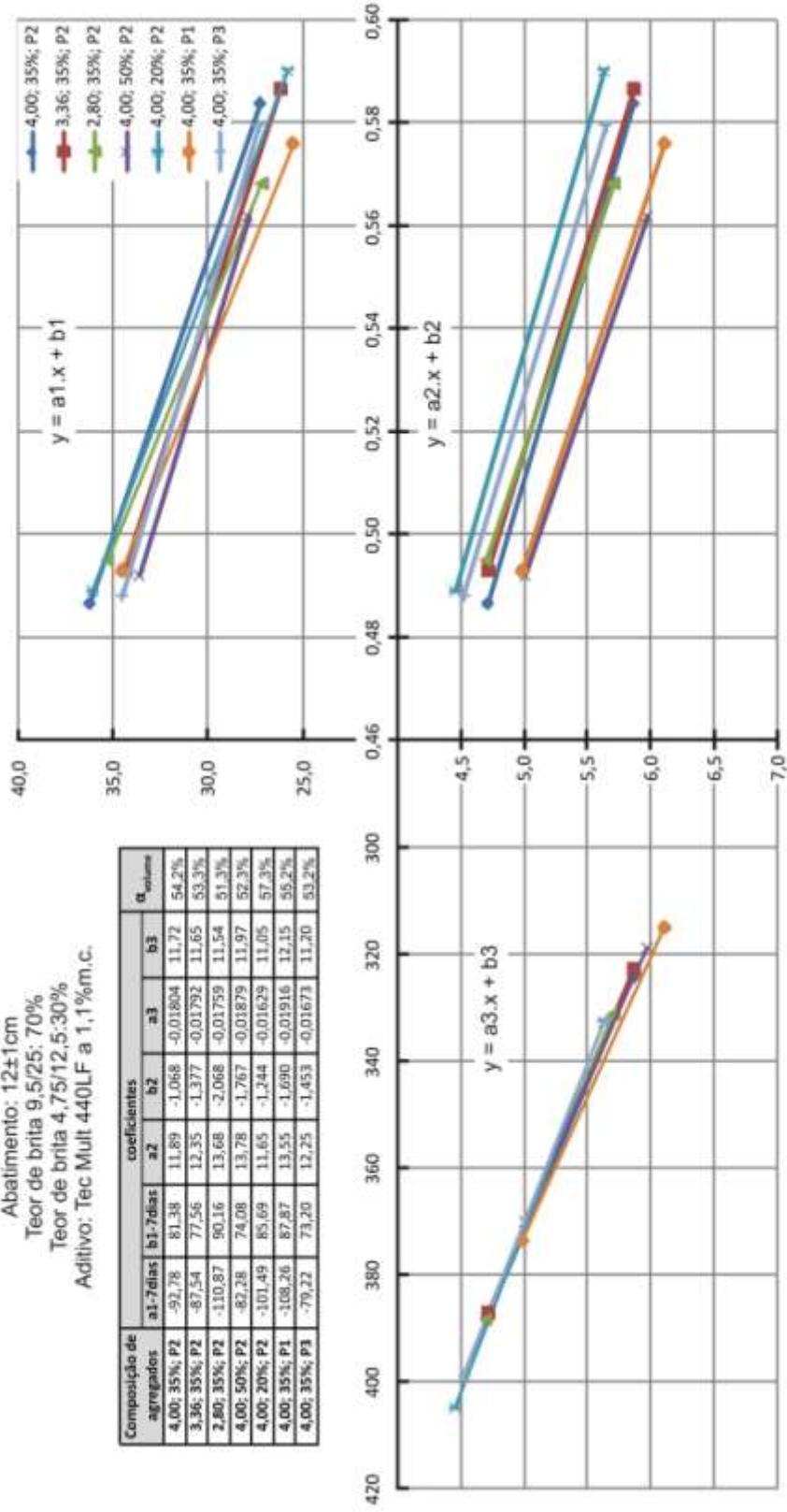


Figura 5.39 – Curvas de dosagem dos concretos contendo areia de britagem com forma lamelar dos grãos

Tabela 5.21 – Resistência à compressão aos 7 dias para duas relações água/cimento fixas e para todas as composições de agregados avaliadas em concreto.

Forma da A. Brit.	a/c	Resistência à compressão aos 7 dias para as composições de agregado						
		4,00; 35%; P2	3,36; 35%; P2	2,80; 35%; P2	4,00; 50%; P2	4,00; 20%; P2	4,00; 35%; P1	4,00; 35%; P3
Arredondada	0,500	34,1	32,8	34,5	31,0	32,7	31,9	32,6
	0,559	28,7	28,5	29,4	26,6	28,5	27,0	28,1
Lamelar	0,500	35,0	33,8	34,7	32,9	34,9	33,7	33,6
	0,559	29,5	28,6	28,2	28,1	29,0	27,4	28,9
Lam / Arred	0,500	1,027	1,030	1,006	1,064	1,069	1,058	1,030
	0,559	1,030	1,006	0,960	1,055	1,015	1,012	1,028

Conforme pode ser observado na Tabela 5.21, para determinada composição de agregados e relação água/cimento, os concretos contendo areias de britagem lamelar apresentaram resistência à compressão superior aqueles contendo areias de britagem arredondada, em quase todos os casos, com exceção de apenas um. Esta diferença de resistência chegou a mais de 5% em alguns casos (relação da resistência do concreto com areia lamelar sobre concreto com areia arredondada - Lam / Arred).

Este fenômeno pode estar associado à qualidade da aderência da pasta de cimento às partículas, que é função da rugosidade da superfície e da área específica das mesmas. Assim, os grãos da areia arredondada, que sofreram arredondamento e uma espécie de polimento ao passarem pelo britador do tipo VSI, que possui britagem autógena, podem estar apresentando menor aderência à pasta.

Quanto à influência das demais características dos agregados na resistência à compressão para determinada relação água/cimento, observa-se que, quanto aos três concretos que possuem variação apenas na peneira de corte da areia de britagem, as menores resistências foram observadas para aqueles em que o agregado miúdo de britagem foi peneirado na malha de corte de 3,36mm. Já para os três concretos em que houve variação apenas do teor de substituição por areia natural, para cada relação água/cimento e forma de grão, observa-se que aqueles contendo 50% de areia natural apresentaram as menores resistências e os com 35% as maiores. Os concretos contendo 50% de areia natural, dentre todos os concretos para cada forma e relação água/cimento, estão entre os que apresentaram menores resistências. Quanto ao teor de material pulverulento, dentre os três concretos com variação deste parâmetro para cada forma e relação água/cimento, observa-se que as maiores resistências foram observadas para aqueles contendo o teor intermediário de material pulverulento. Neste último caso, o teor intermediário de material pulverulento, por ser uma composição de dois materiais um lavado e outro não, pode estar apresentando um melhor empacotamento dos microfinos (efeito fíler). A seguir, é realizada uma análise quanto aos consumos de cimento para duas resistências à compressão fixas.

### 5.4.3 Análise de desempenho para mesma resistência

Com auxílio das curvas de dosagem apresentadas anteriormente, foram realizadas simulações de consumo de cimento para cada composição de agregado estudada e para determinadas resistências à compressão aos 7 dias. Vale ressaltar que estas simulações são válidas para os intervalos de resistências apresentados neste estudo, para abatimento de  $12\pm 1$ cm e para os materiais aqui utilizados. Na Tabela 5.22 são apresentados os consumos de cimento para cada composição de agregado para resistências de 28,0 e 33,0MPa aos 7 dias. Foram escolhidas estas resistências pois correspondem ao valor mínimo e máximo, respectivamente, de resistência para que não houvesse extrapolação em qualquer uma das curvas de dosagem desenvolvidas neste trabalho.

Tabela 5.22 – Consumos de cimento para concretos confeccionados com cada composição de agregado e para determinadas resistências à compressão aos 7 dias.

Forma A.Brit.	fc 7 (MPa)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> ) para as composições com agregados miúdos						
		4,00; 35%; P2	3,36; 35%; P2	2,80; 35%; P2	4,00; 50%; P2	4,00; 20%; P2	4,00; 35%; P1	4,00; 35%; P3
Arred	28,0	319	312	311	319	328	313	330
	33,0	359	371	360	370	373	353	377
Lam	28,0	330	337	337	320	348	331	339
	33,0	365	376	372	365	383	364	385
Lam/Arred	28,0	1,035	1,080	1,085	1,003	1,061	1,060	1,025
	33,0	1,017	1,015	1,036	0,987	1,027	1,032	1,021

Conforme pode ser observado na Tabela 5.22, para quase todas as composições de agregados avaliadas, os concretos contendo areia de britagem com forma lamelar demandaram maiores consumos de cimento se comparados aqueles idênticos contendo areias de britagem com forma arredondada para uma mesma resistência à compressão. Este aumento no consumo de cimento foi sistematicamente maior para os concretos de menor resistência (28,0MPa aos 7 dias) que para os de maior, chegando a 8,5% para a composição “2,80; 35%; P2” (vide relação Lam/Arred na referida tabela). Para os concretos de maior resistência, o aumento no consumo de cimento provocado pela diferença na forma dos grãos não passou de 3,6%. Vale ressaltar que, para este maior nível de resistência e para a composição de agregados miúdos contendo 50% de areia natural, houve redução no consumo de cimento para o concreto contendo areia de britagem lamelar, sendo este o único caso em que isto foi observado. Em outras palavras, de maneira generalista e simplista, para concretos de maior resistência, onde o consumo de cimento é maior, a influência da forma dos agregados miúdos de britagem foi minimizada. O mesmo ocorreu para os concretos contendo 50% de areia natural, onde a menor quantidade do agregado miúdo de britagem pouco influenciou no consumo de cimento para determinada resistência.



Quanto à influência dos demais parâmetros, para os concretos em que houve apenas variação da peneira de corte do agregado miúdo de britagem, não houve uma tendência nítida de comportamento em função desta característica, mas, na maioria dos casos, o menor consumo de cimento foi observado para as composições com ponto de corte de 4,00mm. A exceção foi para forma arredondada dos grãos e para a menor resistência, onde o menor consumo foi observado para a ponto de corte de 2,80mm.

Com relação ao teor de substituição por areia natural, para os concretos contendo areia arredondada onde foi variado apenas este parâmetro, observa-se um menor consumo de cimento para as composições contendo 35% de areia natural, principalmente para a maior resistência especificada. Para a menor resistência, onde o consumo de cimento é menor, a composição com 50% de areia natural apresentou desempenho idêntico aquela com 35% de areia natural. Diante do exposto, para concretos com menor consumo de cimento que os aqui avaliados, pode haver uma tendência de melhor desempenho para composições contendo 50% de areia natural. Para a forma lamelar dos grãos, houve efeito semelhante. Neste caso, para os concretos de menor resistência, o menor consumo de cimento foi observado para a composição contendo 50% de areia natural e, para o concreto de maior resistência (maiores consumos de cimento), o consumo de cimento foi igual para as composições contendo 35 e 50% de areia natural. Além do exposto, cabe ressaltar que, dentre todos os avaliados, os concretos contendo apenas 20% de areia natural estão entre aqueles com maior consumo de cimento, independente da forma dos grãos do agregado miúdo de britagem ou resistência avaliada. Provavelmente este fato esteja associado à necessidade de maior teor de argamassa demandado por estes concretos para manter o escoamento pelo cone invertido (vide Tabela 5.17 e Tabela 5.18).

Já quanto à influência do teor de material pulverulento do agregado miúdo de britagem, de maneira geral, observa-se que os maiores consumos de cimento, com exceção dos concretos contendo areia lamelar e para a menor resistência, foram dos concretos contendo composições de agregado com maior teor de material pulverulento. Analisando separadamente apenas os concretos em que esta variável foi isolada, observa-se uma redução significativa do consumo de cimento quando reduzido do maior teor (P3) para o teor intermediário de material pulverulento (P2). Já para reduções do teor intermediário de material pulverulento (P2) para o menor teor (P1), as diferenças nos consumos de cimento foram menores. Este fenômeno leva a crer que, apesar dos teores intermediários de material pulverulento não proporcionarem a maior redução do consumo de água (Figura 5.37, Tabela 5.17 e Tabela 5.18), estes podem conduzir a menores

consumos de cimento para determinada resistência. Este fato pode estar associado ao melhor empacotamento dos grãos e efeito fíler dos microfinos, conforme já comentado.

Vale ressaltar ainda que este comportamento não linear de redução de consumo de cimento em função da redução do teor de material pulverulento foi diferenciado para cada forma de grão. Para os concretos contendo areia arredondada, ainda houve certo benefício com a redução do teor intermediário (P2) para o menor teor de material pulverulento (P1). Já para a forma lamelar, não foi observada alteração no consumo de cimento quando passado do teor intermediário de material pulverulento (P2), para o menor teor (P1). Este fato pode estar relacionado à necessidade de maior teor de argamassa para manter o escoamento do concreto contendo agregado miúdo de britagem com menor teor de material pulverulento, conforme pode ser observado na Tabela 5.18.

Todo o exposto neste item ressalta, do ponto de vista das empresas produtoras de concreto, a importância da escolha adequada dos agregados miúdos para concreto, que pode trazer benefícios econômicos consideráveis. Como pôde ser observado, a simples troca de uma areia de britagem com forma lamelar por outra com forma mais arredondada e/ou adequações do teor de composição com areia natural pode trazer benefícios significativos de redução do consumo de cimento. Se considerado os dois casos extremos, o de maior e o de menor consumo de cimento para cada uma das resistências especificadas, chega-se a consideráveis diferenças de 37 e 32kg de cimento por metro cúbico de concreto, para a resistência de 28,0 e 33,0MPa, respectivamente, para um mesmo abatimento e condição semelhante de bombeamento. Percentualmente, estes valores representariam uma redução de 10,7% e 8,4% no consumo de cimento, respectivamente. Considerando uma redução média sistêmica de 9% no consumo de cimento de uma central dosadora de concreto de porte médio (fornecimento de 4 a 5 mil metros cúbicos de concreto por mês) que consome cerca 1500 toneladas de cimento por mês, por exemplo, em valores regionais e atuais para o custo do cimento utilizado neste trabalho (CP IV-RS), esta diferença de desempenho dos agregados poderia representar uma economia de aproximadamente R\$37.000,00 mensais em consumo de cimento. Vale ressaltar que, nestes casos, as comparações e avaliações devem ser feitas considerando o custo do metro cúbico do concreto com todos seus insumos.

Em algumas regiões, como o oeste e o médio vale catarinense, um metro cúbico de areia natural de boa qualidade pode custar de 2 a 3 vezes mais que um metro cúbico de agregado miúdo de britagem. No entanto, como a quantidade deste tipo de areia utilizada no concreto normalmente é pequena e outras areias naturais, que poderiam ser uma opção para serem

utilizadas isoladamente, geralmente também custam mais caro que os agregados miúdos de britagem, o balanço econômico considerando o custo de todos os insumos para confecção de um metro cúbico de concreto com as mesmas características, ainda é favorável à utilização de uma composição contendo areia natural e agregado miúdo de britagem. Para estes casos, a escolha de um fornecedor de agregado miúdo de britagem que produza um material com características melhoradas é essencial.

Do ponto de vista das pedreiras, se considerado que as composições “<4,00; P3”, pela semelhança da granulometria, representam o pó-de-pedra que originou cada areia de britagem avaliada, pode-se observar na Tabela 5.22 que, independente da forma dos grãos, apenas o beneficiamento de remoção parcial de material pulverulento pode conduzir a uma areia de britagem de melhor qualidade. Além disso, investir em um beneficiamento adequado para produzir areia de britagem de melhor qualidade a partir do pó-de-pedra, que geralmente tem baixo valor agregado e consumo sazonal, perdurando nos estoques, pode gerar um novo nicho de mercado que consuma um produto com maior valor agregado e de maneira constante.

## **5.5 RELAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE ARGAMASSA E CONCRETO**

Com o objetivo de avaliar o potencial dos estudos em argamassa em pré-selecionar um agregado miúdo adequado para concreto foram avaliadas as relações dos resultados obtidos entre as etapas de argamassa e concreto para as mesmas composições de agregados.

Com relação ao tempo de escoamento das argamassas, observa-se que esta propriedade apresentou boa correlação com o teor de pasta demandado pelos concretos para escoamento pelo cone invertido. No entanto, devido à variação de teor de argamassa para cada composição de agregado procurando manter o escoamento pelo cone invertido dos concretos, esta correlação ficou prejudicada quando avaliada diretamente. Contudo, foi observado que se multiplicado o tempo de escoamento pelo módulo de finura do agregado miúdo total ao quadrado, como uma forma de ponderação para compensar o efeito da variação do teor de argamassa em função desta propriedade, conforme relação observada na Figura 5.36, o coeficiente de correlação  $R^2$  fica maior. Esta correlação entre teor médio de pasta demandado pelo concreto (média do teor de pasta dos dois concretos,  $a/c1$  e  $a/c2$ ) e tempo de escoamento da argamassa correspondente, multiplicado pelo módulo de finura do agregado miúdo total ao quadrado, é apresentada na Figura 5.40. O ponto mais afastado da tendência apresentada, corresponde ao concreto e

argamassa contendo a composição “A 50% <4,00 P2”, que proporcionou uma das maiores reduções do consumo de água e possuía o menor módulo de finura dentre as composições avaliadas em concreto. Considerando este ponto como valor espúrio e fazendo-se uma regressão linear, obtém-se uma correlação significativa para nível de confiabilidade de 95%.

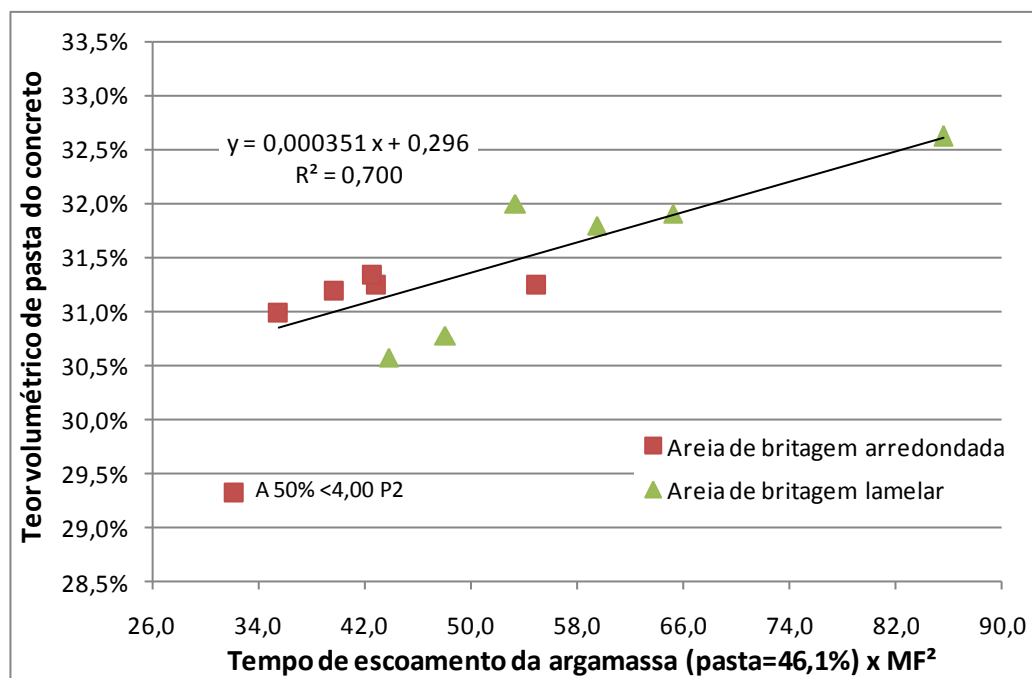


Figura 5.40 – Variação do teor de pasta do concreto em relação ao tempo de escoamento das argamassas multiplicado pelo módulo de finura do agregado miúdo total ao quadrado.

Vale ressaltar que, quando considerados os concretos que demandaram o mesmo teor de argamassa, esta correlação, apesar de não ser mais linear, melhora consideravelmente, neste caso sem qualquer ponderação pelo módulo de finura do agregado miúdo total. Na Figura 5.41 é apresentada esta correlação entre o tempo de escoamento das argamassas e o teor de pasta de concretos confeccionados com os mesmos materiais e com mesmo teor de argamassa em volume (vide Tabela 5.17 e Tabela 5.18).

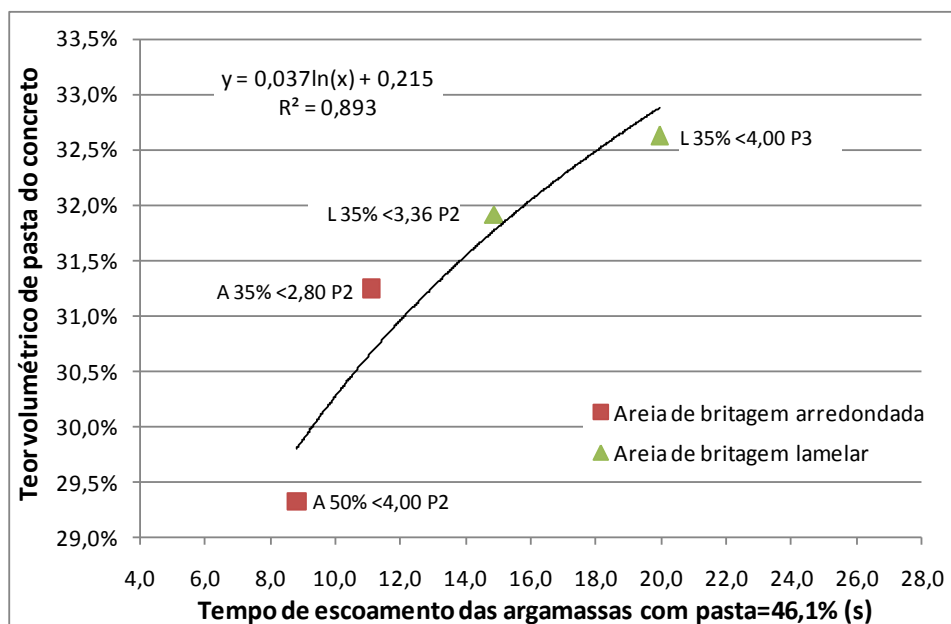


Figura 5.41 – Variação do teor de pasta do concreto em relação ao tempo de escoamento das argamassas para concretos com mesmo teor de argamassa.

Vale ressaltar que a avaliação do escoamento das argamassas foi uma proposta de ensaio complementar ao ensaio de fluidez, medido pelo espalhamento na mesa para ensaio de consistência. Este ensaio complementar tinha por objetivo auxiliar na identificação de argamassas que, apesar de possuírem fluidez elevada, pudessem apresentar segregação ou dificuldade de escoamento, o que poderia comprometer seu desempenho em concreto. Este ensaio, conforme pode ser observado no item 5.3, cumpriu com este objetivo tendo em vista que várias argamassas, apesar de apresentarem espalhamento elevado, não escoavam pelo tubo. Exemplos disto foram as argamassas com 100% de areia de britagem. O mesmo ocorreu para diversas argamassas contendo composições de agregados com 20% de areia natural, que apesar de apresentarem espalhamentos elevados não escoavam pelo tubo proposto, principalmente aquelas contendo areia de britagem com forma lamelar (vide Tabela 5.23).

Tabela 5.23 – Propriedades de todas as argamassas contendo 20% de areia natural avaliadas para cada teor de pasta estudado.

Composição de agregados	Propriedades das argamassas para cada teor de pasta avaliado							
	Flow 0 (mm)				Tempo de escoamento (s)			
	43,8%	45,0%	46,1%	47,3%	43,8%	45,0%	46,1%	47,3%
A 20% <2,8 P1	205	196	277		#N/D	15,4	9,8	
A 20% <2,8 P2	176	165	199		#N/D	23,4	11,3	
A 20% <2,8 P3	135	139	146		#N/D	27,7	#N/D	
A 20% <3,36 P1	201	256	293		#N/D	9,0	10,6	
A 20% <3,36 P2	163	205	220		25,7	11,0	9,7	
A 20% <3,36 P3	142	154	182		#N/D	22,2	14,4	
A 20% <4,00 P1	248	267	296		10,0	7,7	#N/D	
<b>A 20% &lt;4,00 P2</b>	<b>210</b>	<b>229</b>	<b>252</b>		<b>12,1</b>	<b>8,6</b>	<b>8,7</b>	
A 20% <4,00 P3	155	163	194		23,8	16,9	11,1	
L 20% <2,8 P1		162	178	208		#N/D	#N/D	15,7
L 20% <2,8 P2		130	144	163		#N/D	#N/D	20,2
L 20% <2,8 P3		129	129	134		#N/D	#N/D	#N/D
L 20% <3,36 P1		195	210	247		#N/D	#N/D	12,9
L 20% <3,36 P2		142	173	197		#N/D	#N/D	14,1
L 20% <3,36 P3		125	130	146		#N/D	#N/D	#N/D
L 20% <4,00 P1		226	237	265		#N/D	#N/D	#N/D
<b>L 20% &lt;4,00 P2</b>		<b>168</b>	<b>192</b>	<b>229</b>		<b>#N/D</b>	<b>#N/D</b>	<b>10,2</b>
L 20% <4,00 P3		134	143	163		#N/D	#N/D	19,4

Dentre as dezoito composições contendo 20% de areia natural avaliadas no estudo em argamassa, foram selecionadas duas delas para o estudo em concreto (destacadas em negrito na Tabela 5.23), sendo que estas estavam entre aquelas que apresentavam o melhor desempenho para este teor de areia natural: fluidez elevada e menores tempos de escoamento, principalmente nos maiores teores de pasta. No entanto, o desempenho destas argamassas era baixo se comparado a outras composições com maiores teores de areia natural. O mesmo ocorreu em concreto, onde estas composições com 20% de areia natural avaliadas não apresentaram bom desempenho, pois demandaram elevado teor de argamassa para manter o escoamento pelo cone invertido (ensaio proposto em concreto). Se considerados os resultados apresentados na Tabela 5.23, observa-se que, para um mesmo teor de pasta (p.e. 46,1%), a composição “A 20% <4,00 P2” apresentou maior espalhamento que a composição “L 20% <4,00 P2” e a primeira escoou com 8,6s e a segunda não escoou. Fazendo comparativo semelhante em concreto, observa-se que, apesar dos concretos terem o mesmo teor de argamassa (vide Tabela 5.17 e Tabela 5.18), a composição contendo areia arredondada demandou, em média, menos água e menor teor volumétrico de pasta que a composição contendo areia lamelar para um mesmo abatimento e condição semelhante de escoamento pelo cone invertido. Assim, o espalhamento da argamassa

teria relação com o abatimento do concreto, ou demanda de água para um mesmo abatimento, e o escoamento da argamassa estaria relacionado ao teor de pasta exigido para um determinado escoamento pelo cone invertido. De outra maneira, se interpolado os resultados de fluidez em função do teor de pasta destas duas argamassas para um mesmo espalhamento (Flow 0 de 229mm, por exemplo), que aproximadamente corresponderia a um mesmo abatimento em concreto, observa-se na Tabela 5.23 que a argamassa com areia lamelar demandaria um volume de pasta de 47,3%, e escoaria em 10,2s. Já a argamassa contendo areia arredondada, demandaria apenas 45,0% de pasta em volume, para o mesmo abatimento e ainda escoaria com tempo sensivelmente menor. Em resumo, de duas diferentes maneiras de avaliação chega-se a resultados semelhantes, os quais apontam que o ensaio foi capaz de prever que o concreto contendo a composição com areia lamelar demandaria um teor de pasta maior que aquele contendo a composição com areia arredondada, mantendo-se um mesmo abatimento e condição semelhante de escoamento pelo cone invertido em concreto.

Realizando-se procedimento semelhante a este apresentado, interpolando os resultados em argamassa para as 4 composições de agregado utilizadas na correlação da Figura 5.41, obter-se-ia a correlação apresentada na Figura 5.42 entre o teor de pasta da argamassa e o teor de pasta do concreto para uma mesma condição de escoamento e abatimento.

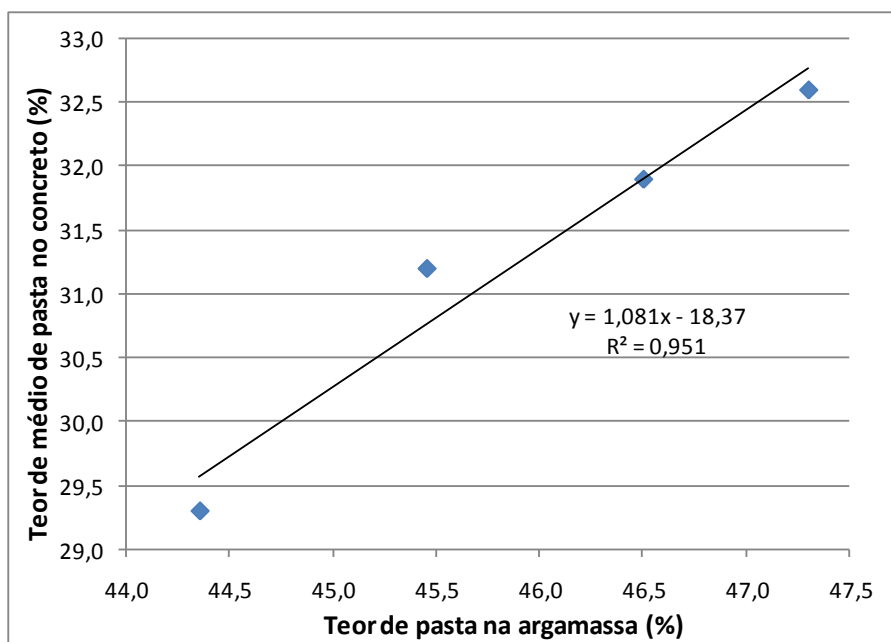


Figura 5.42 – Correlação entre teor de pasta do concreto e da argamassa para condições semelhantes de consistência, abatimento e espalhamento, respectivamente, e de escoamento pelo cone invertido e pelo tubo proposto, respectivamente. Concretos com igual teor de argamassa.

Já quanto à fluidez das argamassas, relacionou-se esta propriedade com a demanda de água dos concretos, tendo em vista que o abatimento dos concretos foi mantido constante neste

trabalho. Na Figura 5.43 são apresentadas as relações de demanda de água média por metro cúbico de concreto e fluidez das argamassas contendo os mesmos materiais. Vale ressaltar que a fluidez das argamassas foi avaliada pelo espalhamento do Flow 0 e para o teor de pasta de 46,1% que era comum para as duas formas de grão. Descartando os dois pontos espúrios, conforme apresentado na Figura 5.43, obteve-se uma correlação linear significativa para nível de confiabilidade de 95%.

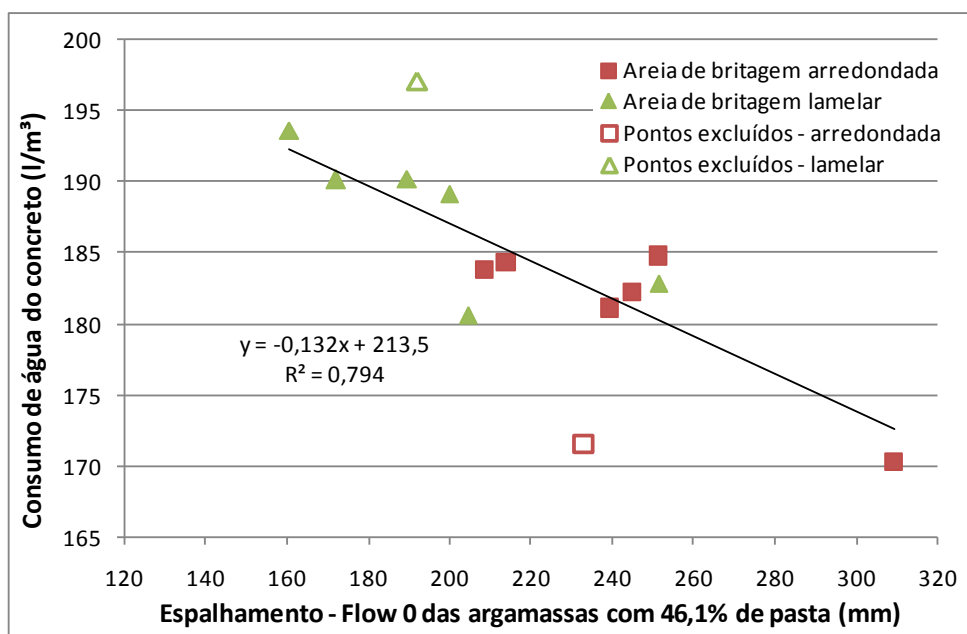


Figura 5.43 – Correlação entre consumo de água (litros/m<sup>3</sup>) e fluidez (espalhamento – flow 0), de concretos e argamassas, respectivamente, confeccionados com os mesmos materiais e relação água/cimento semelhantes.

Os pontos excluídos da Figura 5.43 correspondem as composições com 20% de areia natural para a areia de britagem lamelar e com 50% de areia natural para a areia de britagem arredondada. A composição de areia de britagem lamelar e 20% de areia natural pode estar se distanciando do comportamento predominante por conta do elevado teor de argamassa demandado pelos concretos contendo esta composição. Já quanto à composição de areia de britagem arredondada e 50% de areia natural, observa-se que em argamassa estas apresentaram coesão elevada e por conta disto pequeno espalhamento. Contudo, em concreto, estas composições demandaram menor teor de argamassa e isso pode ser um dos responsáveis pela baixa demanda de água para um mesmo abatimento e escoamento pelo cone invertido.

Diante do exposto, observa-se que em casos onde há variação muito grande no módulo de finura das composições de agregados miúdos, como foi neste trabalho<sup>3</sup>, pode haver baixa

<sup>3</sup> As composições de agregados miúdos utilizadas em concreto apresentavam módulo de finura entre 1,91 e 2,52, correspondentes àquelas contendo 50% e 20% de areia natural, respectivamente.



correlação direta entre os resultados de fluidez da argamassa e demanda de água do concreto, devido, principalmente, a diferentes teores de argamassa demandados no concreto para que seja mantida uma mesma condição de escoamento. Contudo, tendo em vista que o teor de argamassa dos concretos apresentou boa correlação com o módulo de finura do agregado miúdo total, se ponderado os resultados de fluidez em argamassa por esta característica dos agregados, pode-se obter uma melhora significativa da correlação entre os resultados de fluidez das argamassas e de demanda de água dos concretos. Na Figura 5.44 são apresentados os mesmos dados de demanda de água em concreto utilizados na Figura 5.43, porém relacionando-os com o parâmetro da razão do espalhamento das argamassas pelo módulo de finura do agregado miúdo total que as compõe. Este novo parâmetro foi denominado neste trabalho de índice de fluidez.

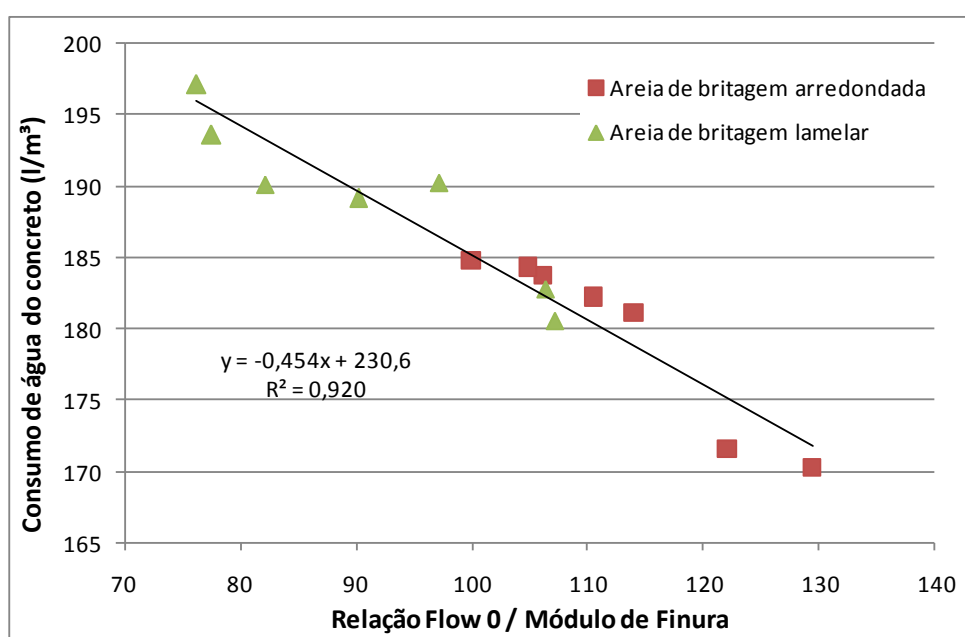


Figura 5.44 – Variação do consumo de água do concreto (litros/m<sup>3</sup>) em função da relação Flow 0, obtido nos ensaios em argamassas, sobre módulo de finura do agregado miúdo total para materiais e relação água/cimento semelhantes. Argamassa com teor de pasta de 46,1%, em volume.

Observa-se na Figura 5.44 uma correlação significativa dos parâmetros avaliados, para uma confiabilidade de 95%. Outra maneira de fazer-se esta avaliação é traçando-se curvas de índice de fluidez no eixo das abscissas pelo teor de pasta das argamassas nas ordenadas para cada composição de agregado. Destas curvas, interpola-se os teores de pasta necessários para atingir um determinado índice de fluidez fixo. Os teores de pasta necessários para cada composição de agregados também apresentam boa correlação com o consumo de água do concreto correspondente. No entanto esta correlação foi menos significativa que a apresentada na Figura 5.44.

Se considerados os resultados de índice de fluidez juntamente com os tempos de escoamento das composições utilizadas no estudo em concreto, ter-se-ia o gráfico apresentado na Figura 5.45. Nesta figura, observa-se que, de maneira geral, as composições que apresentaram melhor desempenho em concreto, quanto à redução da demanda de água para condição semelhante de bombeamento e mesmo abatimento, estão localizadas no canto inferior direito (menor tempo de escoamento e maior índice de fluidez).

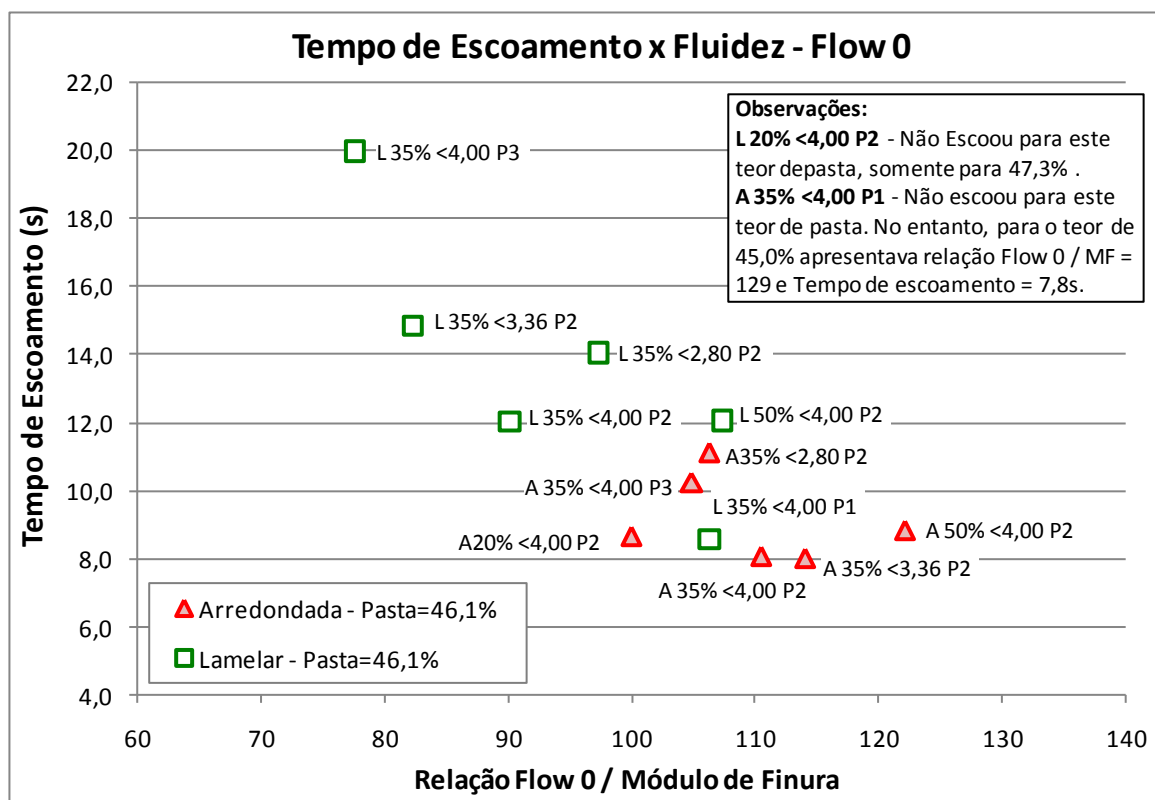


Figura 5.45 - Relação dos resultados em argamassa entre tempo de escoamento e fluidez, medida pelo espalhamento – Flow 0 e ponderada pelo módulo de finura do agregado miúdo, para as composições avaliadas em concreto.

Além de todas as relações expostas neste item, vale ressaltar ainda que, de maneira geral, observou-se que as considerações feitas com relação aos parâmetros influentes no desempenho das composições de agregados em argamassa foram bastante coerentes com as observações feitas em concreto. A única propriedade avaliada em argamassa para a qual não foi observada boa correlação com qualquer resultado em concreto foi a de teor ar incorporado.

## **5.6 PROPOSTA DE METODOLOGIA DE ENSAIOS EM ARGAMASSA PARA COMPARAÇÃO DE AGREGADOS MIÚDOS PARA USO EM CONCRETOS**

Com base nos resultados obtidos e nas correlações apresentadas no item 5.5, é proposta neste item uma metodologia para avaliar comparativamente o desempenho de agregados miúdos, ou composições deles, destinados a concretos, tanto bombeáveis quanto convencionais, a partir de ensaios em argamassa. Contudo, esta é uma metodologia comparativa e por isso necessita de uma composição de agregados miúdos de referência, com histórico de utilização em concretos, principalmente se bombeáveis, ou então de mais de uma composição para comparação de resultados.

Apesar desta metodologia proposta estar fundamentada apenas nos resultados desta dissertação, na qual foi avaliado um universo restrito de agregados e apenas um tipo de cimento e um tipo de aditivo plastificante polifuncional, acredita-se que ela seja válida para outros tipos de cimentos, aditivos e agregados, principalmente devido ao seu caráter comparativo. Além disso, por ser prática, rápida e fácil de ser executada a metodologia proposta merece ser melhor investigada. A seguir são apresentadas as etapas de execução.

### **1) Definição do teor de pasta a ser utilizado:**

O teor de pasta a ser utilizado na avaliação em argamassa pode variar para cada tipo de cimento, tipo e teor de aditivo e/ou agregados miúdos a serem avaliados. Por este motivo, antes de iniciar o estudo comparativo propriamente dito, é preciso definir qual será o teor de pasta a ser utilizado. Nesta dissertação foram utilizados teores de pasta volumétricos para facilitar as análises, tendo em vista que se estava trabalhando com agregados com massas específicas muito distintas. Contudo, os cálculos podem ser realizados considerando o teor de pasta em massa ou a relação água/materiais secos da argamassa, mas, no entanto, a relação volumétrica pasta/agregados deve ser mantida constante em todas as argamassas avaliadas.

A definição do teor de pasta a ser utilizado em argamassa deve ser feita utilizando o agregado miúdo ou composição de referência ou, quando este não existir, uma areia ou composição intermediária dentre aquelas que serão avaliadas. Neste último caso vale um julgamento subjetivo e intuitivo na definição de uma composição ou agregado miúdo de desempenho intermediário que passará a ser a composição ou agregado de referência.

Para esta areia ou composição, deve-se preparar uma argamassa com relação água/cimento e teor de aditivo pré-definidos e com teor de pasta tal que o espalhamento na mesa para ensaio de consistência sem a aplicação de golpes – Flow 0 – obtido esteja entre 200 e 220mm. Neste caso, sugere-se preparar uma pasta, com a relação água/cimento pré-definida e o aditivo e teor que será utilizado posteriormente em concreto e a esta, acrescentar gradativamente a areia (ou composição) até se atingir um espalhamento – Flow 0 dentro da faixa especificada. Após esta definição preliminar, sugere-se repetir esta argamassa com todos os materiais pré-pesados e avaliar novamente o espalhamento. Se confirmado o espalhamento dentro da faixa sugerida, está definido o teor de pasta a ser utilizado.

A dosagem de aditivo a ser empregada nos testes deverá ser aquela que já vem sendo utilizada em concreto, ou se não existir este histórico de utilização em concreto, uma dosagem média recomendada pelo fabricante. Já a relação água/cimento será definida em função dos requisitos de durabilidade e/ou de solicitações mecânicas a que o futuro concreto será submetido (resistência à compressão, à tração, módulo de elasticidade, etc). Em caso de avaliação de novos agregados ou composições para centrais ou pré-fabricadores de concreto que já possuem um histórico de desempenho de concretos, pode-se utilizar aquela relação água/cimento do traço mais utilizado/comercializado pela empresa ou daquele para o qual se pretende definir um novo agregado ou nova composição deles.

## **2) Estudo em argamassa:**

Para cada areia ou composição a ser avaliada, deve-se preparar uma argamassa com o teor de pasta definido na etapa 1, mantendo-se constante este teor em volume para todas as misturas. Exemplificando, se a argamassa de referência possuir 45% de pasta no volume total da mistura, todas as demais argamassas deverão ser confeccionadas com este mesmo teor volumétrico de pasta.

Para cada uma das argamassas confeccionadas, avaliar o espalhamento – Flow 0, o escoamento pelo tubo proposto e o teor de ar incorporado, conforme metodologia de ensaios descrita no item 4.4.2. Quando se tratar de concretos convencionais (não bombeáveis) o ensaio de escoamento pode ser dispensado.

Vale ressaltar que argamassas com espalhamento – Flow 0 muito baixos diminuem a precisão da avaliação da fluidez e isso pode prejudicar significativamente a correlação dos resultados de argamassa com os de concreto. Como sugestão, aconselha-se que todas as

argamassas apresentem espalhamento – Flow 0 igual ou superior a 160mm. Caso contrário, sugere-se aumentar o teor de pasta de todas as argamassas e proceder nova avaliação.

Pode-se optar ainda em avaliar o escoamento e fluidez das argamassas com cada agregado ou composição para diferentes teores de pasta. Neste caso, ao final constroem-se curvas de índice de fluidez e índice de escoamento em função do teor de pasta da argamassa e interpolam-se os resultados para um mesmo índice (de fluidez ou de escoamento), obtendo assim a composição que demandaria menor teor de pasta para determinado parâmetro pré-estabelecido. Conforme comentado no item 5.5, este tipo de determinação também apresentou boa correlação com o desempenho dos agregados em concreto. Outra flexibilidade da metodologia seria a avaliação da resistência à compressão das misturas buscando identificar misturas que, por motivo qualquer, possam comprometer a resistência quando utilizadas em concreto.

### **3) Cálculo do Índice de Fluidez e comparação dos resultados:**

Após cumprida a etapa 2, calcular o parâmetro Índice de Fluidez para cada argamassa. O índice de Fluidez é definido pela razão do espalhamento - Flow 0 sobre o módulo de finura da areia (ou composição) que compõe a respectiva argamassa. Quando se tratar de avaliação de agregados para concretos bombeáveis, calcular também o parâmetro Índice de Escoamento, definido pelo tempo de escoamento multiplicado pelo módulo de finura da areia (ou composição) ao quadrado.

Após calculados os índices de fluidez e de escoamento, quando for o caso, comparar os valores obtidos com o teor de ar incorporado de cada argamassa. Observar se não houve incorporação excessiva de ar em alguma argamassa. Como resultado, obtém-se que os agregados ou composições utilizados nas argamassas que apresentaram o maior índice de fluidez, desde que não apresentaram incorporação excessiva de ar, tenderão a demandar menor consumo de água em concretos de igual abatimento e trabalhabilidade<sup>4</sup>.

No caso de concretos bombeáveis, deve-se atentar também para o parâmetro de índice de escoamento das argamassas, pois este pode servir de critério de desempate ou vetar a utilização de uma areia para concretos desta finalidade. Os agregados contidos em argamassas que apresentarem dificuldade ou não escoarem pelo tubo proposto (índice de escoamento muito elevado ou nulo, respectivamente), principalmente quando por motivo de segregação, deverão ter

---

<sup>4</sup> O termo generalista trabalhabilidade pode estar associado a concretos contendo diferentes teores de argamassa, dependendo principalmente das areias utilizadas e da aplicação do mesmo.

seu uso evitado em concretos bombeáveis. Sua utilização pode acarretar em concretos não bombeáveis ou que demandem elevado teor de argamassa para tal, o que pode torná-los onerosos. Nestes casos, sugere-se optar por outra areia (ou composição) ou buscar outras soluções, como a incorporação de pequena quantidade de ar, o uso de aditivos específicos para melhorar esta propriedade, entre outros.

As areias (ou composições) pré-selecionadas com auxílio desta metodologia devem ser avaliadas em concreto para ratificação dos resultados, onde o teor de argamassa deverá ser devidamente ajustado para cada areia (ou composição). Este ajuste poderá ser realizado com auxílio do ensaio de cone invertido proposto neste trabalho, principalmente quando se tratar de concretos bombeáveis, empiricamente ou por outro método, dependendo da experiência do tecnologista e da aplicação a que se destinará o concreto. O ajuste do teor de argamassa com auxílio do ensaio proposto do cone invertido pode ser utilizado conforme apresentado no item 4.4.3.

#### **4) Fluxograma:**

Na Figura 5.46 – Fluxograma da proposta de metodologia de ensaios em argamassa para comparação de agregados miúdos para uso em concreto. é apresentado um fluxograma que resume os passos a serem tomados para a utilização da metodologia proposta.

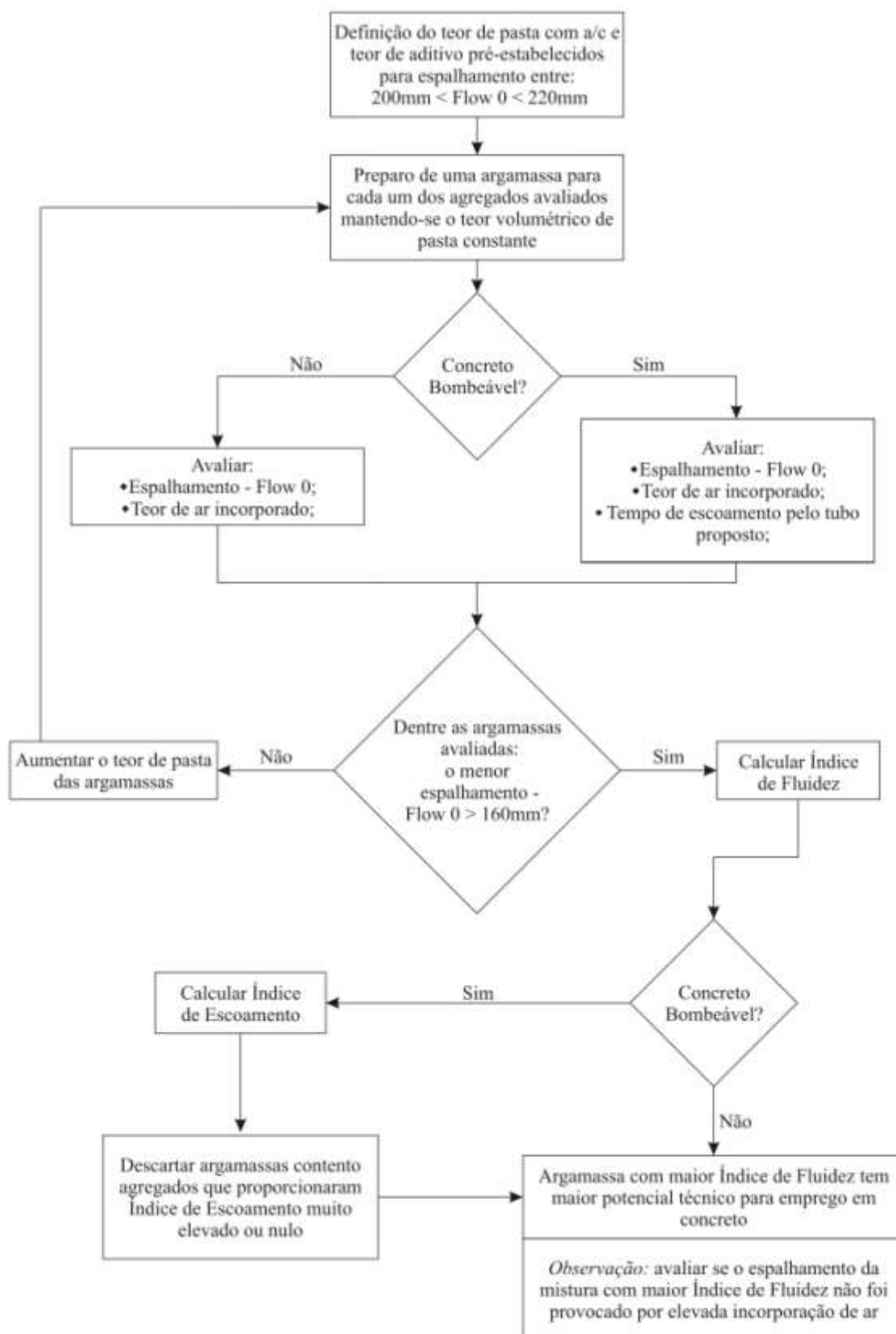


Figura 5.46 – Fluxograma da proposta de metodologia de ensaios em argamassa para comparação de agregados miúdos para uso em concreto.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no programa experimental desta dissertação torna-se possível tecer algumas conclusões com relação à influência da composição granulométrica e da forma dos grãos de agregados miúdos de britagem, assim como da composição destes com agregados miúdos naturais, nas propriedades de concretos de cimento Portland. Para chegar a estas conclusões, foi indispensável o desenvolvimento, adaptação e/ou aprimoramento de alguns ensaios e metodologias para avaliação das características dos agregados e das propriedades de argamassas e concretos.

Dentre os ensaios de caracterização dos agregados, destaca-se o de determinação do coeficiente de forma de agregados miúdos pelo método GTec-UFSC. Este método sofreu alguns aprimoramentos nesta dissertação, merecendo destaque a utilização de programas computacionais de análise de imagens para determinação automática dos parâmetros geométricos dos grãos e a utilização de lupa estereoscópica para avaliação, mesmo que qualitativa, da forma dos grãos das frações mais finas (passantes na malha 0,15mm). Comparado a outras metodologias que consideram apenas relações bi-dimensionais das imagens dos grãos, as quais podem distorcer e superestimar a forma de grãos mais lamelares, este método considera o volume dos grãos e o relaciona com o volume de esferas perfeitas e por isso é mais eficiente na avaliação da forma. Além disso, o coeficiente volumétrico de forma obtido com este ensaio possui um significado físico e prático de aplicação em tecnologia do concreto. A determinação desta propriedade foi de suma importância pois possibilitou a comparação quantitativa da forma dos grãos dos agregados utilizados nesta dissertação.

Além da avaliação da forma dos grãos, merecem destaque os ensaios de caracterização dos microfinos dos agregados miúdos de britagem, com a determinação da superfície específica pelo ensaio de Blaine e da distribuição granulométrica pelos ensaios de sedimentação e de granulometria à laser. O ensaio de Blaine, apesar de ser uma adaptação de um ensaio direcionado a avaliação de materiais cimentícios, se mostrou bastante eficiente na avaliação da superfície específica dos microfinos das areias de britagem. Através deste ensaio, pode-se perceber que os microfinos (material passante na peneira 75 $\mu$ m) podem apresentar redução significativa da superfície específica quando o agregado miúdo é submetido a um processo de remoção parcial do teor de material pulverulento por lavagem. Além disso, pôde-se observar que os microfinos



das duas areias de britagem avaliadas, passante e não passante no britador VSI, apresentaram superfície específica bastante semelhante antes e após a remoção parcial de material pulverulento por lavagem. Quanto aos ensaios de sedimentação e granulometria à laser, observou-se que, apesar dos resultados obtidos nos dois ensaios apresentarem coerência (mesma tendência), possuem uma diferença significativa dos valores absolutos. Por este motivo, o ensaio de sedimentação necessita de algumas adaptações, frente a maneira como foi utilizado nesta dissertação, para poder ser utilizado com a finalidade de avaliar a distribuição granulométrica de microfinos de agregados de britagem destinados a concretos de cimento Portland. Com os resultados dos ensaios de granulometria a laser, pode-se observar que os dois agregados miúdos de britagem avaliados apresentaram microfinos com distribuição de tamanhos de partículas bastante semelhantes entre si, antes e após o processo de lavagem para remoção parcial do material pulverulento. Além disso, pôde-se perceber que este processo removeu predominantemente as partículas mais finas. Observou-se que, a redução do teor de material pulverulento de 18,5% para 6,9% das areias de britagem passantes na peneira de corte de 2,80mm, além de reduzir a quase zero a quantidade de partículas menores que aproximadamente  $3\mu\text{m}$  que antes era de mais de 10%, fez a superfície específica medida no ensaio de Blaine cair de  $2375\text{cm}^2/\text{g}$  para  $845\text{cm}^2/\text{g}$  (valores médios das duas areias). Os resultados destes ensaios foram de grande valia para o entendimento de alguns comportamentos de argamassas e concretos com relação à influência do teor e também da qualidade do material pulverulento dos agregados miúdos de britagem.

Estes ensaios de caracterização dos agregados permitiram ainda concluir que a inclusão de um britador do tipo VSI no circuito de britagem pouco ou nada afetou a distribuição granulométrica do agregado miúdo de britagem, incluindo a fração menor que  $75\mu\text{m}$ , mas melhorou significativamente a forma dos grãos. Esta melhora na forma dos grãos foi mais significativa para frações maiores que 0,60mm e proporcionou alterações significativas no desempenho dos agregados miúdos de britagem, principalmente quanto à trabalhabilidade das argamassas e concretos.

Com relação aos ensaios para avaliação das propriedades das argamassas e concretos, merecem destaque os ensaios propostos de escoamento pelo tubo e pelo cone invertido, utilizados em argamassa e concreto, respectivamente. Estes ensaios, foram propostos e utilizados para auxiliar a avaliação da influência dos agregados miúdos na facilidade de bombeamento. Apesar do ensaio de cone invertido não ter sido validado totalmente perante bombeamento real de concretos que tivessem sido nele avaliados, de certa forma, este conseguiu distinguir traços de

concreto tidos como bombeáveis e não bombeáveis para algumas centrais de concreto e materiais da região da grande Florianópolis. A dificuldade neste tipo de validação, com bombeamentos reais de concreto, está na demanda de grandes quantidades de materiais e principalmente de equipamentos específicos. Além da aferição mencionada, o ensaio apresentou boa sensibilidade de avaliação de concretos contendo pequenas variações em propriedades conceituadas pela literatura como influentes na bombeabilidade de concretos. Outro fato a ser destacado é que não se tinha a pretensão de medir a propriedade de bombeabilidade com o ensaio de escoamento pelo cone invertido, mas sim de fixar uma condição limite de escoamento, e pretensiosamente de bombeamento, para uma avaliação mais justa dos agregados miúdos destinados a concretos bombeáveis. Vale ressaltar ainda que este ensaio foi utilizado na definição do teor ideal de argamassa dos concretos.

Quanto às variáveis estudadas, estas foram definidas com o intuito de abranger a maior gama possível de beneficiamentos empregados em agregados miúdos de britagem e de composições destes com areias naturais, dentro de limites exequíveis e condizentes com a realidade. As variáveis relacionadas aos agregados miúdos de britagem foram definidas e concebidas procurando simular os efeitos proporcionados por equipamentos reais que pudessem ser implantados inclusive em pedreiras existentes e que estivessem interessadas em produzir areia de britagem de boa qualidade. As variáveis estudadas foram: peneira de corte, forma dos grãos e teor de material pulverulento das areias de britagem; e teor de substituição de cada areia de britagem por areia natural.

Com o estudo em argamassa foi possível combinar todas estas variáveis entre si e assim avaliar a influência de cada uma e da combinação delas nas propriedades do estado fresco de argamassas. Como esta análise foi muito extensa, aqui são apresentadas apenas algumas conclusões principais. Com relação à fluidez, de maneira geral, esta foi influenciada pela superfície específica dos agregados miúdos de britagem, pois quanto maior a peneira de corte e quanto menor o teor de material pulverulento, maior foi o espalhamento observado para as argamassas. O mesmo aconteceu para a forma dos grãos, onde as areias com grãos mais esféricos, que possuem menor superfície específica, proporcionaram maior fluidez às argamassas, independente do teor de material pulverulento, da peneira de corte ou do teor de substituição por areia natural. Já quanto à composição com areia natural, observou-se que os teores que proporcionaram maior fluidez variaram para cada teor de material pulverulento, peneira de corte e principalmente forma dos grãos. Provavelmente, devido ao maior atrito interno

dos grãos, areias de britagem com grãos mais lamelares tenderam a demandar maior teor de areia natural para manter a mesma trabalhabilidade.

Quanto ao escoamento das argamassas pelo tubo proposto, observou-se que argamassas com fluidez mais elevadas tenderam a apresentar menores tempos de escoamento. Desta maneira, o tempo de escoamento sofreu influência das variáveis semelhantemente à fluidez. No entanto, algumas argamassas mesmo apresentando elevada fluidez, não escoaram pelo tubo, como foi o caso de todas as argamassas contendo 100% de areia de britagem e boa parte daquelas contendo 20% de areia natural. Além destas, argamassas com forte tendência à segregação e exsudação também apresentavam dificuldade de escoamento. Nestes casos, observou-se que aumentos no teor de areia natural ou no teor de material pulverulento melhoravam este aspecto. Além disso, observou-se que as composições contendo areia de britagem com forma mais lamelar dos grãos apresentaram maior dificuldade de escoamento, quando comparados para um mesmo teor de areia natural e fluidez semelhante. Este fato provavelmente está associado ao maior atrito interno da mistura.

Com relação ao teor de ar incorporado, a influência mais significativa foi observada para a peneira de corte, sendo que, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor o teor de ar incorporado. Nas composições contendo 100% de areia de britagem, houve uma tendência de redução do teor de ar incorporado com o aumento do teor de material pulverulento. No entanto, nas demais composições que continham parcela de areia natural, esta tendência não foi observada. Observou-se ainda que de maneira geral, composições contendo 20% ou 35% de areia natural apresentaram os menores teores de ar incorporado.

Quando correlacionadas as características de cada composição de agregados com as propriedades das respectivas argamassas, observou-se maior nível de significância para a correlação do teor de material pulverulento das composições com a fluidez das argamassas, sendo esta a correlação mais significativa dentre todas as observadas. Destaca-se que o módulo de finura das composições, apesar de apresentar baixa correlação com a fluidez das argamassas, apresentou correlação significativa com o teor de argamassa do concreto, sendo que, areias mais grossas (maior módulo de finura) demandaram maiores teores de argamassa para manter escoamento semelhante no ensaio de cone invertido. Diante desta observação, foi proposta uma ponderação da fluidez das argamassas pelo módulo de finura da composição para que se pudesse obter melhor correlação deste parâmetro obtido em ensaios em argamassas com a demanda de água de concretos correspondentes. A correlação do índice obtido (índice de fluidez que é a

relação da fluidez da argamassa pelo módulo de finura do agregado) com a demanda de água do concreto foi bastante significativa para os materiais estudados.

Desta maneira, agregados com menores superfícies específicas, apesar de conduzirem a maiores espalhamentos em argamassa, podem não conduzir a menor demanda de água em concreto, pois podem aumentar significativamente o teor de argamassa dos concretos para que seja mantida uma mesma trabalhabilidade. Diante do exposto, preconizou-se que as areias que proporcionarem o maior índice de fluidez em argamassa apresentarão maior potencial para uso em concreto.

Nos estudos em concreto, observou-se que os agregados com forma arredondada, apesar de demandarem teores de argamassa semelhantes aos agregados lamelares para mesmo abatimento e condição semelhante de bombeamento, por possuírem menor superfície específica e menor atrito entre partículas, conduziram a redução da demanda de água. Contudo, no estado endurecido, observou-se que, para uma mesma relação água/cimento, agregados miúdos de britagem com forma arredondada proporcionaram menores resistências à compressão que aqueles contendo grãos mais lamelares. Contudo, quando feita a comparação para uma mesma resistência à compressão, observou-se que os concretos contendo areia de britagem com grãos mais lamelares demandaram maiores consumos de cimento. Este aumento no consumo de cimento foi sistematicamente menor para os concretos de maior resistência, ou seja, para concretos com maior consumo de cimento, a influência da forma dos agregados miúdos de britagem foi minimizada. O mesmo ocorreu para os concretos contendo 50% de areia natural, onde a menor quantidade do agregado miúdo de britagem fez com que a forma dos grãos deste agregado pouco influenciasse no consumo de cimento para determinada resistência.

Com relação ao teor de substituição da areia de britagem por areia natural, foi observado que, para uma mesma relação água/cimento, houve redução da resistência à compressão quando aumentado o teor de areia natural. Acredita-se que este fenômeno pode estar associado à qualidade da aderência da pasta de cimento às partículas, que é função da rugosidade da superfície e da área específica das mesmas. Neste caso, o maior número de partículas lisas e arredondadas da areia natural estaria prejudicando esta aderência. Quando considerada uma mesma resistência à compressão, de maneira geral, os menores consumos foram obtidos para composições com 35% de areia natural para a areia arredondada e com 50% para a lamelar. Já os concretos contendo apenas 20% de areia natural estão entre aqueles com maior consumo de cimento, independente da forma dos grãos do agregado miúdo de britagem ou resistência, quando mantidos abatimento e escoamento pelo cone invertido.

Quanto ao efeito do teor de material pulverulento, para uma mesma relação água/cimento, as maiores resistências foram observadas para os teores intermediários, provavelmente devido a uma maior compacidade da mistura. Assim, quando considerada uma mesma resistência à compressão, apesar dos teores intermediários de material pulverulento não proporcionarem a maior redução do consumo de água, principalmente para o caso das areias lamelares, estes conduziram a consumos de cimento idênticos àqueles proporcionados pela areia com menor teor de material pulverulento.

De maneira geral, diante dos resultados obtidos nesta dissertação, pode-se concluir que alterações na composição granulométrica e na forma dos agregados miúdos de britagem podem influenciar significativamente o desempenho de concretos. Assim, a combinação adequada de cada uma das variáveis estudadas nesta dissertação pode conduzir a reduções significativas no consumo de cimento para uma mesma resistência e trabalhabilidade. Do ponto de vista das pedreiras, entender a influência destas variáveis pode ser importante para beneficiar adequadamente seu pó-de-pedra e produzir uma areia de britagem que atenda as especificações dos concretos de maior demanda na região, garantindo assim a comercialização de um produto com maior valor agregado.

Outra consideração importante a ser destacada é que, apesar de não haver a comprovação científica, observou-se durante esta dissertação que a consistência do concreto exerce maior influência sobre o escoamento pelo cone invertido, e provavelmente sobre a bombeabilidade, que o teor de argamassa. Diante do exposto, em determinadas situações e dentro de certos limites, pode ser mais interessante técnica e economicamente adotar maiores abatimentos para concretos bombeados que aumentar demasiadamente os teores de argamassa ou de areia natural destes concretos. No entanto, esta prática de utilização de abatimentos maiores que os usualmente comercializados, demandaria um trabalho técnico/comercial para conscientização e convencimento do mercado local.

Frente todas as considerações apresentadas, talvez a maior e principal contribuição desta dissertação está em ter mostrado que cada característica do agregado miúdo vai influenciar diferentemente seu desempenho em concreto em função da resistência almejada ou das condições de aplicação. Assim, para cada nível de resistência, trabalhabilidade e/ou aplicação do concreto haverá uma combinação ideal das variáveis estudadas. Além disso, mostrou-se que um grande potencial de redução de custos de produção de concreto está na otimização das características dos agregados, principalmente dos miúdos.

## **6.1 LIMITAÇÕES DAS CONCLUSÕES**

As conclusões aqui apresentadas, bem como boa parte das considerações apresentadas ao longo do trabalho, quando não é apresentada ressalva durante sua colocação, possuem limitações de validade, pois foram obtidas a partir de ensaios, materiais e condições específicas.

Assim, destaca-se que as considerações relacionadas ao estudo em argamassa referem-se a um único tipo de cimento e de uma fábrica específica; um tipo e teor de aditivo; uma areia natural específica; dois agregados miúdos de britagem com forma distinta dos grãos e oriundos do mesmo tipo de rocha; e uma relação água/cimento específica. Com relação aos estudos em concreto, acrescentam-se as limitações quanto a uma composição específica de agregados graúdos; uma faixa de abatimento de  $12\pm 1$ cm; e a variações aproximadas da relação água/cimento de 0,45 a 0,60. Além disso, nestas duas etapas do estudo foram apresentadas considerações quanto às influências do teor de material pulverulento, que são válidas para os teores utilizados neste trabalho e para a maneira como foram obtidos.

## **6.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Diante das limitações desta dissertação e das dúvidas que surgiram devido ao avanço do conhecimento após sua conclusão, torna-se possível fazer algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência das mesmas variáveis avaliadas neste estudo nas propriedades dos concretos para outros agregados miúdos de britagem, preferencialmente de outro tipo de rocha, para diferentes consumos de cimento e/ou para outros tipos de concreto, como o auto-adensável;
- Avaliar o comportamento quando empregados alguns tipos de aditivos que incorporem diferentes teores de ar, que alterem a viscosidade e/ou coesão do concreto, entre outras funções, pois estes podem aumentar a utilização de agregados miúdos de britagem;
- Estudar a influência de alterações na chamada areia base no desempenho dos concretos tanto no estado fresco quanto endurecido que podem ser obtidas na prática com novos e diferentes processos de britagem e/ou re-britagem;
- Estudar a eficácia do emprego dos ensaios de argamassa propostos na seleção de agregados miúdos para concretos convencionais e bombeáveis para diferentes materiais constituintes e resistências à compressão.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AITCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho.** São Paulo: Pini, 2000.

ALMEIDA, I.R. **Concretos dosados em central com 100% de areia artificial.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

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

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 304.2R-96:** Placing Concrete by Pumping Methods. Reported by ACI Committee 304, 1996.

ANDERSON, W.G. **Analyzing Concrete Mixtures for Pumpability.** Journal of the American Concrete Institute, vol.74, sept, 1977.

ARAÚJO, G. S.; BICALHO, K. V. & TRISTÃO, F. A. **Determinação da forma de areias através da análise de imagens.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas V, 2003, São Paulo. **Anais.** SBTA, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto. Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7221:** Agregados - Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

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

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

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

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 9936:** Agregados - Determinação do teor de partículas leves. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9938:** Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Rio de Janeiro, 1987.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

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

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49:** Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

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

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **XP P18-540:** Granulats - Définitions, conformité, specifications. AFNOR, 1997.

\_\_\_\_\_. **NF EN 933-4:** Tests for geometrical properties of aggregates - Part 4: determination of particle shape - Shape index. AFNOR, 2000.



BATISTA, E.L.; GRAÇA, N.G.; CARASEK, H.C.; CASCUDO, O. **Investigação da influência de diferentes teores de agregados pulverizados nas propriedades do concreto compactado com rolo para barragens.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

BASTOS, S. R. B. **Uso de areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção e concretos convencionais.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

BARBOSA, M.P.; SILVA, L.M.; MENOSSI, R.T.; SALLES, F.M.; RÓS, P.S. **A influência da adição de finos basálticos nas características reológicas e mecânicas dos concretos auto-adensáveis (CAA).** In: 46º Congresso Brasileiro de Concreto. Anais. Florianópolis, 2004.

BEST, J.; LANE, R. **Testing for Optimum Pumpability of Concrete.** Concrete International, Oct, 1960.

BIGAS, J.P.; GALLIAS, J.L. **Effect of Fine Mineral Additions on Granular Packing of Cement Mixtures.** Magazine of Concrete Research, Vol. 54, 2002.

BONIN, L. C. **Considerações sobre a elaboração de um vocabulário controlado para a tecnologia de argamassas.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas VI, 2005, Florianópolis. Anais. SBTA, 2005.

BROWNE, R.D.; BAMFORTH, P.B. **Tests to Establish Concrete Pumpability.** ACI Journal, Vol. 74. May, 1977.

BRUM FILHO, G. P.; BERTOCINI, S.R. **O Uso de Areia de Britagem da Pedreira Financial em Concretos Convencionais – Campo Grande – MS.** In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Rio de Janeiro, 2006.

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

CABRERA, O. A.; IRASSAR, E. F. **Empleo de arena triturada em hormigones estructurales.** In: XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estructural. Anais. Vol IV – Porto Alegre, 1991.

CARBOCZI, E.J. **Three-dimensional mathematical analysis of particle shape using X-ray tomography and spherical harmonics: Application to aggregates used in concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 32. October, 2002.

CHAPDELAINÉ, F. **Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton.** Thèse. Faculté des Sciences et de Génie. Université Laval. Canada, 2007.

CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios.** Britagem, peneiramento e moagem, Vol 3. Signus Editora. São Paulo, 2006.

COSTA, D. W.; CARANJO, D.; BASTOS, S. R. B.; SOUZA, W. A. **Influência da granulometria do agregado miúdo na produção de concretos convencionais** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

\_\_\_\_\_. **Influência da granulometria do agregado miúdo na produção de concretos convencionais.** In: 47º Congresso Brasileiro de Concreto. Anais. Recife, 2005.

CUCHIERATO, G. **Caracterização tecnológica dos resíduos da mineração de agregados da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico.** Dissertação. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

CUCHIERATO, G.; SANT'AGOSTINO, L.M. **Excelente Desempenho Comprovado em Pavimentos de Concreto Simples Elaborados com Pó de Pedra.** In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, Práticas Recomendadas. São Paulo, 2001. IBRACON, Comitê Técnico 206, Meio Ambiente.

\_\_\_\_\_. **Pó de Pedra: produção na região metropolitana de São Paulo (RMSP) e principais características.** In: III Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, Práticas Recomendadas. São Paulo, 2000. IBRACON, Comitê Técnico 206, Meio Ambiente.

CUCHIERATO, G.; SBRIGHI NETO, C. QUITETE, E.B. **A revisão das normas ABNT de agregados: NBR 7211 e NBR 9935 – quais as alterações nas terminologias e especificações para os fins de pedreiras.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

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

D'AGOSTINO, L.Z.; SOARES, L. **Uso de finos de pedreira de rocha granítica e basáltica no preparo de argamassa.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

\_\_\_\_\_. **Diferentes tipos de areia no preparo de argamassa: principais características.** In: 10º Congresso Brasileiro de geologia de Engenharia e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto, 2002. ABGE.

\_\_\_\_\_. **Preparo de argamassas com emprego de finos de pedreira.** In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, Práticas Recomendadas. São Paulo, 2001. IBRACON, Comitê Técnico 206, Meio Ambiente.

DAL MOLIN, D.C.C. **Técnicas Experimentais para Estudo da Microestrutura.** In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.* São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712p.

DE LARRARD, F.; HU, C.; SEDRAN, T. **A New Rheometer for Soft-to-Fluid Fresh Concrete.** *ACI Material Journal*, vol.94. Mai-jun, 1997.

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

ERDOGAN, S.T.; FOWLER, D.W. **Determination of Aggregate Shape Properties Using X-ray Tomographic Methods and the Effect of Shape on Concrete Rheology.** Research Report 106-1. International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin. 2005.

ERDOGAN, S.T.; QUIROGA, P.N.; FOWLER, D.W.; SALEH, H.A.; LIVINGSTON, R.A.; GARBOCZI, E.J.; KETCHAM, P.M.; HAGEDORN, J.G.; SATTERFIELD, S.G. **Three-dimensional shape analysis of coarse aggregates: New techniques for and preliminary results on several different coarse aggregates and reference rocks.** *Cement and Concrete Research*, Vol. 36. 2006.

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

FERRARIS, C.; DE LARRARD, F. **Testing and modelling of fresh concrete rheology.** National Institute of Standards and Technology, NISTR. Gaithersburg, 1998.

FERRARIS, C.; HACKLEY, V.A.; AVILES, A.I.; BUCHANAN, C.E. **Analysis of the ASTM Round-Robin Test on Particle Size Distribution of Portland Cement: Phase 2.** National Institute of Standards and Technology, NISTR. December, 2002.

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

GONÇALVES, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial.** Tese. Universidade Federal do rio de Janeiro. 2005.

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

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

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

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

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

KAPLAN, D. **Pompagem des bétons.** Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. 2000.

KAPLAN, D.; DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. **Avoidance of Blockages in Concrete Pumping Process.** ACI Materials Journal, V. 102. May-June, 2005.

KOEHLER, E.P., FOWLER, D.W. **Summary of Concrete Workability Test Methods. Technical Report.** Technical Report. International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin. 2003.

\_\_\_\_\_. **Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete.** Technical Report. International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin. 2004.

KREMPEL, A.F.; CREVILARO, C.C.; PAULON, V.A. **Adição de pó ao concreto como fator econômico e de durabilidade.** In: 34ª REUNIÃO DO IBRACON, Curitiba, 1992. Anais. IBRACON. p. 193-206.

KREMPEL, A.F.; CREVILARO, C.C.; TERNES NETO, H.J.; PEREIRA, M.A.C. **Pisos de alta resistência – execução e proteção.** In: 36ª REUNIÃO DO IBRACON, Porto Alegre, 1994. Anais. IBRACON. p. 369-382.

KRONLOF, A. **Effect of Very Fine Aggregate on Concrete Strength.** Materials and Structures, Vol. 27. 1994.

KWAN, A.K.H.; MORA, C.F.; CHAN, H.C. **Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing.** Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1403-1410. 1999.

LIMA, R.C.; ALMEIDA, S.L.M. **Areia Artificial: uma alternativa para uso em construção civil.** In: XIII Jornada de Iniciação Científica. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Anais.

LODI, V.H. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó-SC.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

MAGALHÃES, A.G.; CALIXTO, J.M.; VASCONCELOS, W.L. FRANÇA, E.P.; RESENDE, C.J. **Análise da influência de teores elevados de material pulverizados presentes nos agregados miúdos artificiais sobre as propriedades do concreto.** In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Recife, 2006.

MARTINS, V. C. **Otimização dos processos de dosagem e proporcionalamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos superplastificantes.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

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

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

MENDES, S.E.S.; MOREIRA, K.A.W.; VIEIRA, J.M.; GARCIA, A.R. **Viabilidade do uso de areia artificial em concretos para estruturas pré-fabricadas.** In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Bento Gonçalves, 2006.

MENOSSE, R.T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** Dissertação. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2004.

MENOSSE, R.T.; CAMACHO, J.S.; SALLES, F.M.; MELGES, J.L.P. **A influência do uso de pó de pedra nas características do concreto.** In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Florianópolis, 2004.

METSO MINERALS. **Brochure N° 1123-05-04-CSR.** Matamata (New Zealand), 2004.

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

MORA, C.F.; KWAN, A.K.H.; CHAN, H.C. **Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing.** Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 6, pp. 921-932. 1998.

MORA, C.F.; KWAN, A.K.H. **Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing.** Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 351-358. 2000.

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

NOLAN, E.; JAN, P.G. **Methods for Testing Fresh LightWeight Aggregate Concrete.** Technical Report. The European Union – Brite EuRam III. 1999.

NOGUEIRA, C.D.M.; DIAS, G.P.; SANTOS, J.B.; BARROSO, E.V. **Comparando argamassas produzidas com areias fluviais e com finos de pedreiras.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

NUGENT, F.R. **Ensaio com areia artificial – Como melhorar o concreto.** Colóquio sobre Agregados para Concreto. Anais, IBRACON. São Paulo, 1979.

OLIVEIRA, A. L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação.** Florianópolis, 2004. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina.

PANDOLFO, L.M.; SILVEIRA, A.A.; TRES A.C.; FARIA E.F. **Absortividade de concretos compostos com areia natural e areia de britagem.** In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Recife, 2005.

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

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

PUTZMEISTER AG. **Concrete Tecchnology for Concrete Pumps.** 2004.

SANTOS, S.; CERVI, S.C.; SAGAVE, A.M. **Utilização de fonolito em substituição parcial do agregado miúdo na produção de concreto.** In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Recife, 2005.

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

\_\_\_\_\_. **Agregados para Concreto.** In: ISAÍÁ, G.C. (Ed.). Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. 1600p.

SHILSTONE, J.M. **Concrete Mixture Optimization.** Concrete International: Design and Construction, Vol. 12, No. 6, June 1990.

SCHUMACHER, H.R.S.; VALENTINA, L.V.D.; FOLGUERAS, M.V.; SANTOS, C.C. **Uso de pó de pedra gnaïsse em substituição parcial a areia natural no concreto convencional.** In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON. Bento Gonçalves, 2007.

SILVA, N.G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V.C. **A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

SILVA, C. B.; COSTA, D. W.; BASTOS, S. R. B. **Estudo de caso – Traços de concreto para uso em estruturas pré-moldadas.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

\_\_\_\_\_. **Estudo de caso – Traços de concreto para uso em estruturas pré-moldadas.** In: 47º Congresso Brasileiro de Concreto, Olinda, 2005. Anais.

SOARES, L.; MENDES, K.S. **The use of stone quarry fines in roller-compacted concrete.** In: Aggregates 2001 – Environmental and Economy – IEAG Congress, 2001. Helsinki, Finland.

SOARES, L.; PISSATO, E. **Addition of Quarry Fines in Soil Cement Mixtures.** In: Aggregates 2001 – Environmental and Economy – IEAG Congress, 2001. Helsinki, Finland.

\_\_\_\_\_. **Utilização de finos de pedra em misturas de solo-cimento – correção granulométrica de um solo argiloso.** In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

SOARES, L.; ZANCHETTA, L.M. **Use of Distinct Sand Types for Mortar Preparation.** In: Aggregates 2001 – Environmental and Economy – IEAG Congress, 2001. Helsinki, Finland.

\_\_\_\_\_. **Diferentes tipos de areia no preparo de argamassa: principais características.** In: 10º Congresso Brasileiro de geologia de Engenharia e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto, 2002. ABGE.

STEWART, J.; NOVELL, M.J. FOWLER, D.W. **Characterizing Minus No. 200 Fine Aggregate for Performance in Concrete.** Report No. 107. International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin. 2006.

TARTUCE, R. e GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto de cimento Portland.** São Paulo: Ibracon/Pini, 1990.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

QUIROGA, P. N.; NAMSHIK, A.; FOWLER, D.W. **Concrete mixtures with high microfines.** ACI Materials Journal, V 103. July, 2006.

QUIROGA, P.N. **The Effect of the Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete.** Dissertation. Doctor of Philosophy Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin. December, 2003

QUIROGA, P.N.; FOWLER, D.W. **The Effects of the Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete.** International Center for Aggregates Research of The University of Texas at Austin. 2004.

WEIDMANN, D.F. **Contribuição para determinação de metodologia de avaliação da forma de agregados e análise da influência desta propriedade em argamassas.** Trabalho e Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 2005.



## **8 ANEXOS**

### ***8.1 ANEXO A – MÉTODO GTEC-UFSC PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE FORMA DE AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS.***

## **Anexo A: Método GTec-UFSC para determinação do coeficiente volumétrico de forma de agregados graúdos e miúdos.**

O método GTec-UFSC para determinação do coeficiente volumétrico de forma dos grãos de agregados graúdos e miúdos foi inicialmente proposto por Oliveira (2004). Desde então este método vem sendo utilizado em trabalhos desenvolvidos por este grupo de pesquisa, tendo sofrido alguns aperfeiçoamentos. Este autor, em 2005 (WEIDMANN, 2005), validou este método frente determinações manuais da forma de grãos de agregados graúdos, utilizando paquímetro, e avaliou a variabilidade dos resultados obtidos com este método proposto.

Nesta dissertação, é proposto mais um aperfeiçoamento deste método, sendo incluído a análise da forma dos grãos passantes na peneira de malha de 0,30mm pela utilização de máquina fotográfica acoplada a uma lupa estereoscópica. A seguir são descritos os equipamentos necessários e as etapas da metodologia. Por fim, são apresentados os resultados para os agregados utilizados nesta dissertação.

### **a) Equipamentos necessários:**

- Jogo de peneiras para ensaio de granulometria de agregados, de acordo com NBR 7211:2005;
- Balança com precisão mínima de 0,1g para a determinação da massa das frações de agregados graúdos e de 0,0001g para agregados miúdos. Balanças com menor precisão podem limitar a fração mínima de análise ou exigir a medição de um maior número de grãos;
- Picnômetro de 50ml para determinação da massa específica de agregados miúdos. Para agregados graúdos, aconselha-se utilizar picnômetros de 500ml ou processo da balança hidrostática;
- Placas de vidro de tamanho mínimo de 100x100x2mm para agregados miúdos e 250x350x2mm para agregados graúdos;
- Escâner com capacidade mínima de resolução de 1000dpi;
- Máquina fotográfica acoplada à lupa estereoscópica (somente necessário quando for desejada a determinação do coeficiente de forma dos grãos passantes na peneira de malha 0,30mm);

- Escala com precisão milimétrica, sendo aconselhável paquímetro convencional ou papel milimetrado;
- Aparato para iluminação dos grãos e/ou câmara escura.

**b) Seqüência de ensaio:**

1. Peneirar o agregado, segundo as recomendações da NBR NM 248:2003, para separação das frações e determinação das respectivas porcentagens retidas. Cada fração corresponde aos grãos retidos em determinada peneira;
2. Determinar a massa específica de cada fração ( $d_{\text{fração}}$ ) empregando-se o procedimentos sugeridos anteriormente (do picnômetro para frações passantes na peneira 6,3mm e picnômetro ou da balança hidrostática para frações retidas em peneiras acima da malha 6,3mm). Recomenda-se que o valor da massa específica seja proveniente da média de três determinações com diferença máxima de 0,5% entre o maior e o menor valor encontrado;
3. Pesar certo número de grãos de determinada fração anotando-se a massa ( $m_{\text{fração}}$ ). Este número de grãos deve ser maior ou igual a 100 para frações retidas na peneira 4,8mm e 200 grãos para as frações passantes. A massa deste número de grãos deve ser 100 vezes maior que a precisão da balança utilizada, caso contrário, o número mínimo de grãos será determinado em função da precisão da balança;
4. Despejar cuidadosamente os grãos pesados na etapa 3 sobre uma chapa de vidro evitando contato direto entre grãos. Sempre que necessário, separar os grãos para que não fiquem encostados;
5. Colocar a chapa de vidro no escâner e posicionar a escala métrica para posterior calibração no programa de análise;
6. Posicionar o aparato para iluminação dos grãos (vide Figura 8.1a) ou a câmara escura (vide Figura 8.1b) e digitalizar a imagem. Estes aparatos são utilizados para conferir o máximo contraste possível entre o fundo da imagem e os grãos que serão analisados. Sugere-se que as aquisições das imagens sejam feitas com as resoluções mínimas apresentadas na Tabela 8.1 em função do tamanho dos grãos. Vale ressaltar que a resolução mínima de digitalização para cada fração deve ser determinada para cada tipo de escâner<sup>5</sup>, ficando a Tabela 8.1 apenas com caráter de orientação e para casos em que não se possua tal determinação. Esta definição para cada tipo de escâner se faz

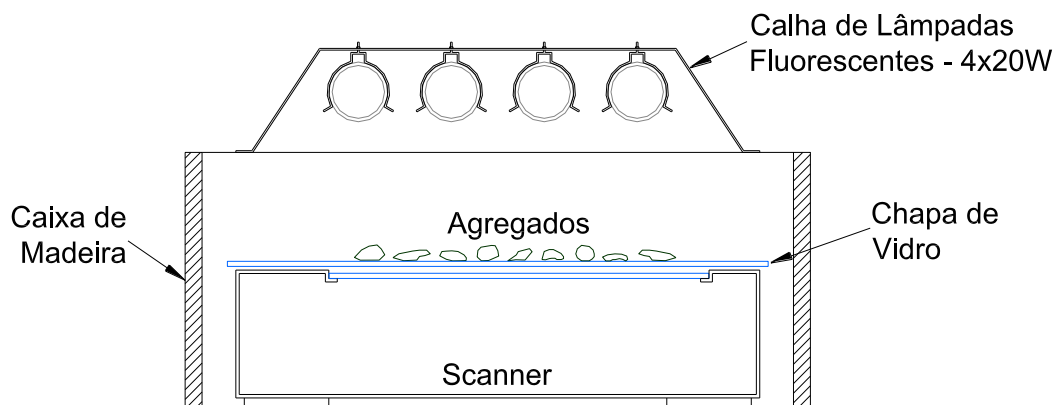
---

<sup>5</sup> Para definição da resolução mínima de aquisição, sugere-se consultar o trabalho de Weidmann (2005).

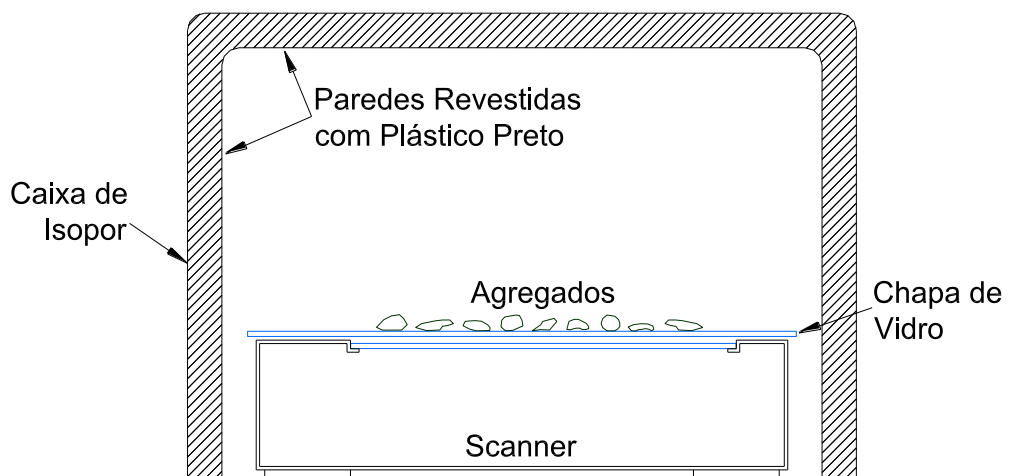
necessária porque cada equipamento pode conferir diferente resolução real para determinada resolução de aquisição;

Tabela 8.1– Resolução mínima de aquisição das imagens em função do tamanho dos grãos.

Fração Retida na Peneira (mm)	Resolução de Aquisição (dpi)
9,5	300
4,8	500
2,4	700
1,2	700
0,6	900
0,3	1000
0,15	1000



a) Caixa com lâmpadas



b) Câmara escura

Figura 8.1 – Aparatos utilizados para auxiliar na aquisição das imagens para análise do coeficiente de forma: a) caixa com lâmpadas; e b) câmara escura.

7. Carregar a imagem no programa de análise de imagens procedendo-se a calibração da mesma com auxílio da escala métrica inserida na etapa 5. Em alguns programas, esta calibração não é salva automaticamente para toda a análise, devendo-se, nestes casos, salvá-la em arquivos isolados para posterior utilização. Nesta dissertação foi utilizado o programa *Image Tool 3.0*, o qual foi desenvolvido pela University of Texas Health Science Center at San Antonio – UTHSCSA e encontra-se disponível gratuitamente na página eletrônica desta instituição;
8. Recortar a imagem retirando-se a escala métrica, de modo que a nova imagem contenha apenas os grãos a serem analisados. Definir o limiar de tons de cinza (*threshold*) observando o ponto mais adequado para a manutenção dos contornos e da forma do grão. Imagens com bastante contraste entre o fundo da imagem e os grãos facilitam enormemente esta operação. Caso necessário, antes da definição do limiar (*threshold*), podem ser utilizados filtros de imagens que auxiliem na eliminação de ruídos da imagem e/ou na definição dos contornos. Nesta dissertação, em algumas imagens foi utilizado um filtro de mediana, de máscara 3x3, para estas correções. Alguns programas possuem também outras ferramentas que auxiliam nesta etapa, como a definição do tamanho, em pixels, do objeto mínimo a ser considerado na imagem, eliminando possíveis ruídos da seleção;
9. Proceder à análise da imagem, obtendo as propriedades geométricas de cada objeto (grão). Em alguns programas, é necessária uma etapa intermediária em que são definidos os objetos na imagem e posteriormente procede a análise das propriedades destes objetos;
10. Exportar os dados de maior dimensão (L) de cada grão (cada objeto identificado na imagem) para uma planilha eletrônica;
11. Calcular o coeficiente de forma de cada fração, com base na AFNOR XP P18-540 (1997), conforme equação abaixo:

$$cf_{\text{fração}} = \frac{m_{\text{fração}}}{\frac{\pi}{6} \cdot \sum L^3}$$

onde:  $m_{\text{fração}}$  = massa de todos os grãos contidos na imagem;

$d_{\text{fração}}$  = massa específica da fração analisada;

L = comprimento de cada grão determinado com auxílio do programa de análise de imagens.

12. Calcular o coeficiente de forma do agregado que é definido pela seguinte expressão:

$$Cf_{\text{agregado}} = \frac{\sum (\text{cf de cada fração} * \text{respectiva \%ret})}{\sum \text{das \%ret}}$$

c) Resultados para os agregados utilizados nesta dissertação:

Na Tabela 8.2 são apresentados os resultados dos parâmetros de forma, apresentados em 2.3.6.1, obtidos para cada fração dos agregados avaliados.

Tabela 8.2 – Parâmetros de forma para cada fração dos agregados avaliados.

Agregado	Equipamento	Fração retida na malha (mm)	Massa total dos grãos (g)	Volume total dos grãos (cm <sup>3</sup> )	Parâmetros médios dos grãos				Volume total das esferas perfeitas (cm <sup>3</sup> )	Coeficiente de forma GTec-UFSC	Índice de alongamento	Índice de lamelaridade	Esféricidade	Fator de forma	Diâmetro de Feret	Compacidade	Arredondamento	
					Área (mm <sup>2</sup> )	Perímetro (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)										
Areia arredondada	L	Fundo	-	0,0000	0,0133	0,402	0,145	0,098	0,0007	-	0,67	-	-	-	0,13	0,90	1,04	
		0,075	-	0,0000	0,0292	0,642	0,231	0,150	0,0006	-	0,65	-	-	-	0,19	0,84	0,90	
		0,15	0,0049	0,0016	0,0981	1,148	0,411	0,285	0,0101	<b>0,163</b>	0,69	0,26	0,50	0,21	0,35	0,86	0,92	
		0,30	0,0365	0,0123	0,3326	2,237	0,805	0,527	0,0804	<b>0,153</b>	0,65	0,29	0,50	0,24	0,64	0,81	0,82	
	E	0,60	0,1760	0,0592	0,8867	4,003	1,310	0,895	0,3181	<b>0,186</b>	0,68	0,34	0,54	0,28	1,04	0,80	0,67	
		1,20	1,5122	0,5090	3,7600	8,040	2,710	1,880	2,9368	<b>0,173</b>	0,69	0,31	0,53	0,26	2,13	0,79	0,70	
		2,40	5,6427	1,8993	10,6200	13,860	4,610	3,360	10,7321	<b>0,177</b>	0,73	0,27	0,52	0,23	3,66	0,80	0,69	
		2,80	10,0789	3,3924	15,1600	16,780	5,600	3,870	20,8042	<b>0,163</b>	0,69	0,28	0,51	0,23	4,37	0,79	0,67	
		3,36	17,6039	5,9252	20,7800	19,610	6,600	4,550	36,9488	<b>0,160</b>	0,69	0,28	0,51	0,23	5,11	0,78	0,67	
		4,00	44,8769	15,1050	40,6000	27,080	8,960	6,580	92,0165	<b>0,164</b>	0,73	0,25	0,51	0,22	7,13	0,80	0,69	
		4,80	28,6408	9,6401	47,0600	29,510	9,770	7,030	58,1402	<b>0,166</b>	0,72	0,26	0,52	0,22	7,67	0,79	0,67	
		Areia lamelar	L	Fundo	-	0,0000	0,0110	0,355	0,128	0,087	0,0009	-	0,68	-	-	-	0,12	0,93
	0,075			-	0,0000	0,0270	0,605	0,219	0,143	0,0019	-	0,65	-	-	-	0,18	0,85	0,92
	0,15			0,0066	0,0022	0,1140	1,272	0,463	0,300	0,0146	<b>0,153</b>	0,65	0,28	0,49	0,22	0,37	0,82	0,87
0,30	0,0307			0,0104	0,3145	2,173	0,776	0,520	0,0732	<b>0,142</b>	0,67	0,26	0,49	0,21	0,62	0,82	0,82	
E	0,60		0,2692	0,0912	1,3271	5,075	1,680	1,081	0,6904	<b>0,132</b>	0,64	0,28	0,49	0,22	1,27	0,77	0,63	
	1,20		1,5259	0,5169	4,4918	9,251	3,112	1,994	4,0802	<b>0,127</b>	0,64	0,26	0,48	0,21	2,35	0,76	0,64	
	2,40		6,4199	2,1748	12,0709	15,547	5,159	3,420	17,4799	<b>0,124</b>	0,66	0,24	0,47	0,20	3,90	0,77	0,63	
	2,80		9,3755	3,1760	16,0000	17,920	6,070	3,830	30,7026	<b>0,103</b>	0,63	0,23	0,45	0,19	4,48	0,75	0,63	
	3,36		15,5268	5,2598	22,2600	20,790	7,090	4,540	46,7735	<b>0,112</b>	0,64	0,23	0,46	0,18	5,29	0,76	0,65	
	4,00		55,015	18,6365	51,0000	31,120	10,590	6,990	163,0483	<b>0,114</b>	0,66	0,23	0,46	0,18	7,97	0,76	0,65	
Areia natural	L	0,075	-	-	0,0285	0,614	0,214	0,158	0,0008	-	0,73	-	-	-	0,19	0,89	0,95	
		0,15	0,0019	0,0007	0,0524	0,803	0,283	0,212	0,0026	<b>0,279</b>	0,75	0,33	0,57	0,29	0,26	0,91	1,01	
		0,30	0,0137	0,0052	0,2145	1,731	0,602	0,442	0,0197	<b>0,261</b>	0,73	0,32	0,56	0,27	0,52	0,87	0,90	

L = lupa

E = escâner

## **8.2 ANEXO B – ESTUDOS PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS PROPOSTOS**

## **Anexo B: Estudos preliminares para definição dos ensaios propostos**

Conforme mencionado no início do Capítulo 3, a maior parte do concreto comercializado pelas centrais dosadoras de concreto envolve especificações de abatimento, resistência característica e condição de transporte (bombeabilidade).

Por este motivo, nestes estudos preliminares buscou-se definir alguns ensaios que auxiliassem na seleção de agregados miúdos para concretos dosados em central, levando em consideração estes três fatores. Para tal, foram desenvolvidos e testados dois ensaios, conforme são apresentados neste item: um em concreto e outro em argamassa.

Devido ao grande volume de testes e de materiais empregados, optou-se em apresentar primeiramente as caracterizações de todos os materiais utilizados nestes estudos preliminares, conforme apresentado no item 8.2.1. Posteriormente, em cada teste ou avaliação de ensaio, são mencionados os materiais utilizados, referindo-se aos apresentados no referido item.

### **8.2.1 Materiais utilizados nos estudos preliminares e piloto**

Nos estudos preliminares, assim como no estudo-piloto (item 8.3), foi utilizado cimento CP IV-RS 32 da Votorantin Cimentos, fábrica de Rio Branco do Sul/PR, o mesmo que foi empregado no estudo definitivo, porém, pertencentes a lotes diferentes. Suas características são apresentadas no estudo definitivo (item 4.3.1), na Tabela 4.1.

O mesmo acontece para o aditivo plastificante polifuncional Tec-Mult 440LF, à base de lignossulfonatos e produzido pela Rheotec. Este aditivo foi empregado tanto nos estudos preliminares e piloto quanto no estudo definitivo e suas características técnicas são apresentadas também no estudo definitivo (item 4.3.2), na Tabela 4.2.

Nesta etapa de testes preliminares e também no estudo-piloto, foram utilizados diversos tipos de agregados de diferentes fornecedores e empregados por diferentes centrais de concreto da grande Florianópolis. Vale ressaltar que todas as centrais das quais foram coletados materiais utilizavam composições de quatro agregados: uma areia natural fina, um agregado miúdo de britagem, uma brita 4,75 / 12,50 (antiga brita 0 ou pedrisco) e uma brita 9,5 / 25,0 (antiga brita 1). Na Tabela 8.3 e na Tabela 8.4 são apresentadas as caracterizações dos agregados miúdos e graúdos, respectivamente, utilizados nos estudos preliminares e piloto.



Tabela 8.3 – Características dos agregados miúdos utilizados nos estudos preliminares e piloto.

Parâmetro			Agregado Miúdo *			
			AB-C	AB-S	AN-R	AN-P
Granulometria % Retida Acumulada	Abertura peneiras (mm)	6,30	0	0	0	0
		4,75	0	1	0	0
		2,36	16	20	0	0
		1,18	47	45	0	0
		0,60	67	58	0	2
		0,30	81	68	4	7
		0,15	91	77	76	74
		0,075	96	84	100	99
		Fundo	100	100	100	100
Dim. Máx. Caract. (mm)			3,36	4,00	0,30	0,60
Módulo de Finura			3,03	2,70	0,80	0,83
Material Pulverulento			4,3%	15,6%	0,3%	1,4%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )			2,682	2,633	2,654	2,638

\* Na nomenclatura de cada agregado, a última letra representa o fornecedor (pedreira, areial, etc) e as duas primeiras letras o tipo de material, conforme abaixo:

- AB: agregado miúdo de britagem;
- AN: areia natural;

Tabela 8.4 – Características dos agregados graúdos utilizados nos estudos preliminares e piloto.

Parâmetro			Agregado Graúdo *			
			B0-C	B0-S	B1-C	B1-S
Granulometria % Retida Acumulada	Abertura peneiras (mm)	25,0	0	0	0	0
		19,0	0	0	10	3
		12,5	0	1	39	37
		9,5	2	6	82	83
		6,30	50	67	93	98
		4,75	85	94	95	98
		0,075	99,0	99,3	98,7	98,9
		Fundo	100	100	100	100
Dim. Máx. Caract. (mm)			9,5	12,5	>19,0	19,0
Módulo de Finura			5,77	5,95	6,71	6,77
Material Pulverulento (%)			1,0%	0,7%	1,3%	1,1%
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )			2,684	2,634	2,686	2,637

\* Na nomenclatura de cada agregado, a última letra representa o fornecedor (pedreira, areial, etc) e as duas primeiras letras o tipo de material, conforme abaixo:

- B0: brita 4,75 / 12,5 (brita 0)
- B1: brita 9,5 / 25,0 (brita 1)

Os traços utilizados também variaram durante o período de avaliação e, por este motivo, estes são apresentados em cada etapa dos estudos preliminares e piloto. Vale ressaltar que, na maioria dos casos, se buscava reproduzir e avaliar os concretos mais comercializados de cada

central, porém a quantidade de água do traço não era respeitada rigorosamente, pois variava em função do tempo transcorrido desde o início da mistura (perda de eficiência do aditivo e reações iniciais de hidratação do cimento) e do abatimento que se desejava avaliar.

### **8.2.2 Ensaio proposto para avaliação da bombeabilidade de concreto**

Procurou-se definir um ensaio simples e prático, que pudesse ser realizado em qualquer laboratório ou em campo e que possibilitasse avaliar diferentes proporções de materiais para uma mesma condição de bombeamento. Em outras palavras, com o ensaio, não se tinha a pretensão de medir o grau de facilidade de bombeamento das misturas (bombeabilidade), mas sim avaliar as diversas misturas testadas sob condições semelhantes de bombeamento.

Diante do exposto resolveu-se testar um ensaio expedito que é utilizado por alguns pesquisadores e consultores do meio técnico em alguns estudos. O ensaio consiste basicamente em avaliar o escoamento de uma massa de concreto pelo cone de Abrams posicionado de cabeça para baixo. Desta forma, o ensaio proposto avalia a capacidade de escoamento das misturas, assim como o ensaio Orimet, que segundo MELO (2005), simula o movimento do concreto durante o bombeamento.

Uma configuração semelhante deste ensaio é normalizada pela ASTM C995-01 e utilizada para avaliar a trabalhabilidade de concretos reforçados com fibras. Neste caso, o cone é posicionado de cabeça para baixo sobre um recipiente e preenchido em 3 camadas. Posteriormente é introduzido um vibrador de imersão e avaliado o tempo necessário para o concreto escoar do cone para o recipiente. Apesar de normalizado, o ensaio na maneira como é executado apresenta restrições de utilização nos concretos reforçados com fibras (KOEHLER e FOWLER, 2003).

No meio técnico, o ensaio proposto é realizado com o próprio cone de Abrams utilizado no ensaio de abatimento, sendo posicionado de cabeça para baixo sobre uma chapa metálica (Figura 8.2a) e içado após preenchimento conforme recomendação da NBR NM67:1998, em três camadas de igual altura, adensadas com 25 golpes de haste metálica em cada uma. No entanto, alguns testes realizados desta maneira, mostraram que a velocidade de içamento do cone (Figura 8.2b) afeta os resultados.



Figura 8.2 – Proposta inicial do ensaio de cone invertido: (a) preenchimento do cone sobre chapa metálica e (b) levantamento do cone.

Por este motivo, resolveu-se modificar o ensaio para que fosse executado sem a influência da velocidade de levantamento do cone (influência do operador) e para que o mesmo permanecesse sempre na mesma altura durante o ensaio. Para tal, foi projetada uma portinhola de acionamento rápido para a menor abertura do cone (Figura 8.3a) que passou a ser posicionado sobre um suporte padrão (Figura 8.3b). Ao acionar o mecanismo de abertura da portinhola, a mesma abre-se rapidamente e permanece aberta durante o escoamento do concreto devida uma mola colocada no seu eixo de rotação. O ensaio na forma como está apresentado, foi denominado neste trabalho de ensaio de cone invertido (ensaio proposto).



(a)



(b)

Figura 8.3 – Configuração final do ensaio de cone invertido: (a) portinhola de abertura rápida e (b) suporte para o conjunto de ensaio.

Após padronizações da portinhola e suporte do conjunto, o ensaio pode ser assim descrito:

- 1) Preenche-se o cone invertido em três camadas de igual altura, sendo cada uma adensada com 25 golpes, de haste metálica padronizada (NBR NM 67:1998), distribuídos uniformemente na área da seção;
- 2) A última camada deve ser preenchida com excesso de concreto e após adensamento, procedendo-se a rasura do excesso de material e o nivelamento do concreto às bordas do cone;
- 3) Abrir a portinhola e avaliar o escoamento do concreto. Como resultado complementar, pode-se determinar o tempo de escoamento do concreto com auxílio de cronômetro ou filmagem do ensaio para posterior análise.

Conforme mencionado anteriormente, este ensaio por si só, não mede quantitativamente o grau de facilidade de bombeamento de um concreto, mas fixa uma condição limite de escoamento, onde a mistura deverá fluir devido única e exclusivamente à força de seu peso próprio e isso pode ser correlacionado com um grau fixo de bombeabilidade. As condições

limitantes ao escoamento são dadas pela restrição da saída do cone (redução de seção), pelo atrito do concreto com as paredes do cone e pelo próprio atrito interno da mistura, sendo que estes dois últimos aspectos são importantes para concretos bombeáveis conforme mencionado no item 3.3. Para concretos de peso normal, a pressão exercida sob o concreto na seção imediatamente acima da menor abertura do cone quando este está cheio é de aproximadamente 16,5kPa (2,34 psi), bastante inferior às pressões observadas em bombeamentos reais. No entanto, o formato do cone, simulando uma redução da seção do pistão da bomba para a seção da tubulação, ou uma redução da seção da própria tubulação, pode ser considerado como um dos pontos críticos na restrição ao bombeamento de concretos, segundo documento da Putzmeister (2004).

Vale ressaltar que foram testadas algumas outras formas de ensaio, como o escoamento por um tubo de PVC semelhante ao ensaio Orimet. No entanto, este ensaio apresentava dificuldade de utilização devido a pequena amplitude de variação dos resultados de misturas distintas (baixa sensibilidade do ensaio) que, pela prática das centrais de concreto da região, eram consagradamente de fácil e de difícil bombeamento.

#### **8.2.2.1 Aferição do ensaio proposto para concreto**

Para aferição do ensaio, foram tomados concretos regionais consagradamente de diferentes facilidades de bombeamento, segundo experiência de algumas centrais de concreto, e avaliados seus escoamentos no ensaio proposto.

Primeiramente foram comparados concretos de mesmo abatimento e diferentes teores de argamassa quanto ao escoamento pelo cone invertido para duas diferentes composições de agregados miúdos. Uma delas corresponde a um concreto produzido exclusivamente com agregado miúdo de britagem que reconhecidamente apresenta maior dificuldade de bombeamento para um mesmo teor de argamassa e abatimento. Com estes testes, procurou-se avaliar a capacidade do ensaio em identificar diferenças de bombeabilidade para distintos teores de argamassa e proporções de agregados miúdos

Posteriormente, foram avaliados três traços de concretos bombeáveis de diferentes consumos de cimento, obtidos de uma central de concreto da Grande Florianópolis, quanto ao escoamento pelo cone invertido para diferentes abatimentos. Com estes testes, procurou-se avaliar diferentes concretos quanto à influência do abatimento nas condições de escoamento pelo cone invertido.

De maneira geral, procurou-se comparar os resultados obtidos com o ensaio de cone invertido com os conhecimentos práticos das centrais de concreto e com o conhecimento disponível na literatura, principalmente as afirmações de Best & Lane (1980), conforme apresentado no item 3.3, sobre a influência do teor de argamassa, abatimento e diferentes composições de agregados na bombeabilidade de concretos.

#### ***8.2.2.1.1 Avaliação da influência do teor de argamassa do concreto***

Para avaliar a capacidade do ensaio proposto em distinguir diferenças de escoamento para distintos teores de argamassa, tomou-se inicialmente um traço de concreto de uma central dosadora da Grande Florianópolis, cuja especificação era de um concreto bombeável de fck 25MPa e abatimento de  $10\pm 2$ cm, e avaliou-se o escoamento no cone invertido para diferentes teores de argamassa, mantendo-se constante o abatimento do concreto. Posteriormente, para complementar a avaliação, foi substituída toda a areia natural do traço original por agregado miúdo de britagem e foram feitas as mesmas avaliações de escoamento pelo cone invertido, mantendo-se constante o abatimento e alterando-se o teor de argamassa.

Na prática, para determinado abatimento e teor de argamassa, o concreto contendo apenas areia de britagem como agregado miúdo proporciona maior dificuldade de bombeamento. Assim, com estes testes procurou-se avaliar a sensibilidade do ensaio proposto em identificar alterações no escoamento pelo cone invertido para diferentes agregados miúdos e teores de argamassa. Além disso, buscou-se avaliar qual o teor de argamassa necessário para cada composição de agregado em estudo para que se obtivesse uma mesma condição de escoamento, mantendo-se constante o abatimento.

Os agregados e o traço empregado originalmente pela central dosadora mencionada estão apresentados na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Materiais e traço de um concreto bombeável de fck 25MPa e abatimento 10±2cm empregado por uma central dosadora da Grande Florianópolis.

Material	Traço	Proporções
Cimento	1,000	-
<b>Areia Natural (AN-P)</b>	<b>1,197</b>	<b>45%</b>
<b>Pó-de-pedra (AB-S)</b>	<b>1,456</b>	<b>55%</b>
Brita 4,75 / 12,5 (B0-S)	0,906	30%
Brita 9,5 / 25,0 (B1-S)	2,117	70%
Água	0,641	-
Aditivo	1,10%	-
<b>H</b>		<b>9,60%</b>
<b>α</b>		<b>54,7%</b>

Os resultados obtidos para a composição original de agregados miúdos (45% de AN-P e 55% de AB-S) quanto ao escoamento pelo cone invertido para determinado abatimento e diferentes teores de argamassa são apresentados na Tabela 8.6. Para o concreto contendo apenas pó-de-pedra como agregado miúdo, os resultados são apresentados na Tabela 8.7.

Vale ressaltar que a composição de agregados graúdos foi mantida fixa para os dois casos e os diferentes teores de argamassa foram obtidos com incremento de agregados miúdos e cimento, conforme sugere o método de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993) para ajuste do teor de argamassa do concreto.

Tabela 8.6 – Ajuste do teor de argamassa em função do escoamento pelo cone invertido para um concreto consagrado e utilizado por uma central dosadora de concreto da Grande Florianópolis.

<b>55% Pó-de-Pedra + 45% AN</b>													
<b>m inicial = 5,677 (p/ H=9,60; a/c=0,641)</b>													
Det	α	a	p	Cimento	Aditivo (g)	Pó (55%)	AN (45%)	Brita 1 (70%)	Brita 0 (30%)	Água Total	H	Abat (cm)	Cone Invertido
Inicial	46%	2,071	3,606	5,00	55,0	5,70	4,66	12,62	5,41	3,12	9,35%	12,5	Não
1	50%	2,339	3,339	5,40	59,4	6,95	5,68	12,62	5,41	3,50	9,71%	12,5	Não
				Adicionado:	0,40	4,40	1,25	1,02	-				
2	52%	2,472	3,205	5,63	61,9	7,65	6,26	12,62	5,41	3,70	9,86%	12,5	Não
				Adicionado:	0,23	2,48	0,70	0,57	-				
3	54%	2,606	3,071	5,87	64,6	8,41	6,88	12,62	5,41	4,04	10,31%	12,0	2,02s
				Adicionado:	0,24	2,69	0,76	0,62	-				

Tabela 8.7 – Ajuste do teor de argamassa em função do escoamento pelo cone invertido para um concreto contendo apenas pó-de-pedra como agregado miúdo.

<b>100% Pó-de-Pedra</b>													
<b>m inicial = 5,677 (p/ H=9,60; a/c=0,641)</b>													
Det	$\alpha$	a	p	Cimento	Aditivo (g)	Pó (100%)	AN (0%)	Brita 1 (70%)	Brita 0 (30%)	Água Total	H	Abat (cm)	Cone Invertido
Inicial	52%	2,472	3,205	5,63	61,9	13,92	0,00	12,63	5,41	3,71	9,87%	13,5	Não
1	54%	2,606	3,071	5,87	64,6	15,31	0,00	12,63	5,41	3,94	10,04%	12,5	Não
Adicionado:				0,24	2,69	1,39	0,00	-	-				
2	56%	2,739	2,938	6,14	67,6	16,82	0,00	12,63	5,41	4,23	10,31%	12,0	3,75s
Adicionado:				0,27	2,94	1,52	0,00	-	-				

Diante dos resultados apresentados na Tabela 8.6 e na Tabela 8.7, pode-se afirmar que o ensaio do cone invertido sofre influência tanto da composição granulométrica dos agregados miúdos e forma média dos grãos quanto do teor de argamassa do concreto. O mesmo é observado na prática, onde a bombeabilidade é influenciada por estes mesmos fatores, conforme sugerem Anderson (1977), Best & Lane (1980) e ACI 304.2R-96 (item 3.3). Desta maneira, dentro dos limites avaliados, o ensaio pode identificar diferentes facilidades de bombeamento das misturas.

Vale ressaltar ainda que, mesmo os concretos que escoaram pelo cone invertido podem ainda apresentar facilidades de bombeamento distintas, tendo em vista as diferenças no tempo de escoamento apresentadas. Outro fator que deve ser destacado é que o teor de água do concreto (H) e a relação água/cimento das misturas que escoaram ficaram aproximadamente iguais.

#### 8.2.2.1.2 Avaliação da influência do abatimento do concreto

Para avaliar a capacidade do ensaio proposto em distinguir diferenças de escoamento para distintos abatimentos, foram tomados três traços de uma central de concreto da grande Florianópolis (SC) que possuíam especificação de fck 25, fck 30 e fck 35, sendo todos de concretos bombeáveis e de mesmo abatimento especificado ( $10 \pm 2$ cm). Para estes concretos, foram realizados os ensaios de escoamento pelo cone invertido para diferentes abatimentos. Os materiais e os traços empregados pela central de concreto são apresentados na Tabela 8.8.



Tabela 8.8 – Materiais e traços de concretos bombeáveis e abatimento  $10\pm 2\text{cm}$  empregados por uma central dosadora da Grande Florianópolis.

Material	fck 25		fck 30		fck 35	
	Traço	%	Traço	%	Traço	%
Cimento	1,000	-	1,000	-	1,000	-
Areia Natural (AN-R)	1,167	40%	0,997	40%	0,849	40%
Areia de britagem (AB-C)	1,759	60%	1,498	60%	1,278	60%
Brita 4,75 / 12,5 (B0-C)	0,976	30%	0,867	30%	0,774	30%
Brita 9,5 / 25,0 (B1-C)	2,279	70%	2,024	70%	1,806	70%
Água	0,629	-	0,559	-	0,499	-
Aditivo	1,10%	-	1,10%	-	1,10%	-
<b>H</b>	<b>8,76%</b>		<b>8,75%</b>		<b>8,74%</b>	
<b><math>\alpha</math></b>	<b>54,7%</b>		<b>54,7%</b>		<b>54,8%</b>	

Como pode ser observado na Tabela 8.8, todos os concretos possuíam a mesma composição entre os agregados miúdos e entre os agregados graúdos. Além disso, era mantido praticamente constante o teor de argamassa ( $\alpha$ ) em todos os traços. Vale ressaltar que as quantidades de água adicionadas aos concretos não foram as mesmas indicadas nos traços da Tabela 8.8, pois estas variaram de acordo com o abatimento desejado e o tempo decorrido desde o início da mistura (perda de eficiência do aditivo e reações iniciais de hidratação do cimento). Na Figura 8.4 são apresentados os tempos de escoamento pelo cone invertido para diferentes abatimentos dos concretos estudados.

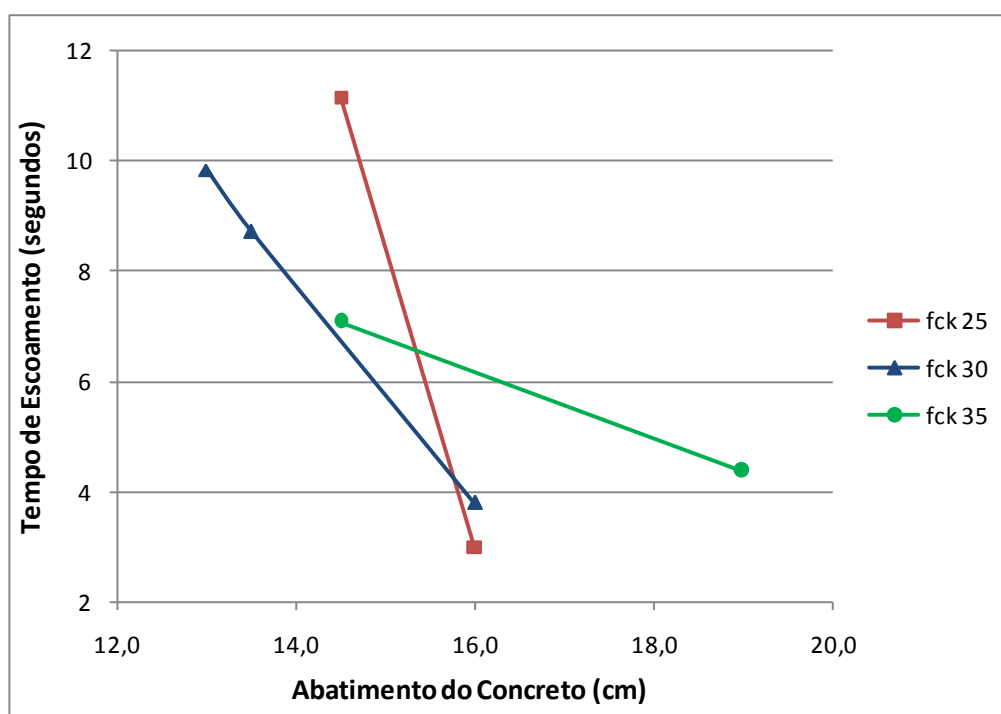


Figura 8.4 – Influência do abatimento no tempo de escoamento de concretos para três diferentes consumos de cimento.

Diante dos resultados apresentados pode-se observar que, independente do consumo de cimento, o ensaio proposto sofre influência do abatimento do concreto, sendo que quanto maior o abatimento, maior é a facilidade de escoamento (menor tempo de escoamento). Na prática e segundo Anderson (1977), Best & Lane (1980) e ACI 304.2R-96 (item 3.3), concretos com maiores abatimentos também possuem maior facilidade de bombeamento, o que indica uma possível correlação da bombeabilidade com o ensaio proposto.

Os diferentes comportamentos de variação do tempo de escoamento com o abatimento do concreto para os diferentes consumos de cimento podem ser justificadas por alguns ajustes realizados no ensaio durante os testes. Por exemplo, para o concreto de fck 25 os abatimentos eram determinados após o ensaio de escoamento. Já para os demais concretos, os ensaios de abatimento e de escoamento pelo cone invertido passaram a ser realizados simultaneamente. Esta alteração foi feita após notar-se que havia diferença no abatimento se determinado antes ou após o ensaio de cone invertido.

Vale ressaltar que o ensaio de escoamento foi realizado para os concretos com abatimentos menores, principalmente para os concretos fck 25 e fck 35, porém estes não escoaram pelo cone invertido. Destaca-se ainda que os materiais utilizados para estes testes, assim como os traços, eram diferentes daqueles utilizados no item 8.2.2.1.1.

### **8.2.2.2 Considerações sobre o ensaio proposto**

O ensaio se mostrou capaz de identificar diferenças no escoamento quando da alteração de composição de agregados, teor de argamassa e abatimento do concreto. Levando em consideração que na prática, e segundo diversos pesquisadores, o concreto bombeado também sofre influência destes parâmetros, pode-se afirmar que, dentro de determinados limites de abatimento, o ensaio pode ser correlacionável com bombeabilidade do concreto.

Algumas observações importantes foram realizadas durante estes ensaios preliminares e são aqui destacadas. Além disso, estas observações foram consideradas na definição da metodologia definitiva de ensaios:

- O ensaio de abatimento deve ser realizado simultaneamente ao de cone invertido, pois há diferença no abatimento se determinado antes ou depois do ensaio de cone invertido. Desta maneira, evita-se a interferência do tempo demorado entre um ensaio e outro;

- Há a necessidade de se deixar um tempo de repouso no início da mistura para estabilização da mesma. Nos primeiros minutos, há uma grande instabilidade da mistura, ficando esta muito suscetível a pequenas modificações. Por exemplo, durante os primeiros minutos após o início da mistura, a adição de 1% da água total do traço pode alterar consideravelmente o abatimento, o que não ocorre quando os materiais já estão misturados a mais de 10min, por exemplo.

### **8.2.3 Ensaio proposto em argamassa para avaliação da qualidade de agregados miúdos para concreto**

Apesar do ensaio de cone invertido se mostrar promissor na avaliação de concretos bombeáveis, a realização de todo este estudo em concreto, avaliando todas as combinações propostas, demandaria elevada quantidade de tempo e principalmente de material, sobretudo dos agregados miúdos de britagem que requerem beneficiamento manual (peneiramento e lavagem) para sua utilização.

Por este motivo, buscou-se desenvolver um ensaio em argamassa que fosse capaz de auxiliar na seleção de algumas combinações de agregados miúdos, com potencialidade de bom desempenho em concreto, para que apenas estas fossem avaliadas posteriormente em concreto. A viabilização de parte do estudo em argamassa possibilitaria o estudo de um número maior de combinações de agregados para um mesmo espaço de tempo e/ou de volume de material disponível. Diante do exposto, buscou-se associar o desempenho dos materiais em concreto com alguns ensaios em argamassa, buscando validar parte do estudo em argamassa.

Segundo trabalho de Martins (2005), há uma boa correlação entre os resultados de espalhamento na mesa de consistência das argamassas e o abatimento de concretos confeccionados com os mesmos materiais. Neste mesmo estudo, também foi observada boa correlação entre os resultados de resistência à compressão de argamassas e concretos de mesma relação água/cimento e confeccionados com os mesmos materiais.

No entanto, alguns trabalhos tecnológicos realizados pelo GTec-UFSC mostraram que algumas areias, apesar de proporcionarem argamassas com elevada fluidez (grande espalhamento na mesa de consistência) apresentavam outros problemas como segregação e exsudação. Estes aspectos observados em argamassa conduziam a concretos antieconômicos e/ou com dificuldade técnica de aplicação. Por exemplo, a utilização de areias demasiadamente grossas em argamassas, proporcionavam elevada fluidez, porém apresentavam segregação e exsudação.

Assim, os concretos confeccionados com estas areias necessitavam de elevado teor de argamassa ou consumo de cimento para apresentar coesão satisfatória. Diante do exposto, tornou-se necessário criar um ensaio em argamassa, complementar ao índice de consistência - NBR 13276:2005 (*flow table test*), para avaliação de agregados miúdos quanto sua qualidade para concreto.

Perante o que foi apresentado no início do Capítulo 3, que a maioria dos concretos dosados em central atualmente são comercializados pela sua condição de transporte (bombeabilidade), resistência à compressão e abatimento, tornou-se necessário desenvolver um ensaio capaz de avaliar alguma propriedade da argamassa que fosse correlacionável com bombeabilidade de concretos confeccionados com aqueles agregados miúdos. Para tal, foram testados alguns ensaios.

Uma das primeiras alternativas testada foi desenvolvida baseando-se nas preposições de Browne & Bamforth (1977) de que a bombeabilidade do concreto está associada à estabilidade da mistura, principalmente com relação à segregação e exsudação. Desta maneira, procurou-se medir a exsudação de algumas argamassas para tentar correlacionar esta propriedade com a facilidade de bombeamento. Para tal, foram moldados corpos-de-prova de argamassa em tubos de PVC de diâmetro de 40mm e altura de 230mm e medida a exsudação de água ao longo do tempo. As argamassas eram inseridas nos tubos que ficavam sobre uma mesa vibratória, onde permaneciam sobre efeito de vibração por um período superior a 40seg. O efeito de vibração por um tempo prolongado foi aplicado com o intuito de auxiliar na migração de água para a superfície das argamassas (exsudação). Após a moldagem os corpos-de-prova permaneciam em repouso em uma sala climatizada e media-se a quantidade de água exsudada ao longo do tempo.

Neste teste, foram avaliadas três argamassas confeccionadas com as mesmas quantidades de cimento, água e aditivo, alterando-se apenas os agregados miúdos em substituições volumétricas. Foram avaliadas as mesmas composições de agregados miúdos empregadas no item 8.2.2.1.1, ou seja: 100% de pó-de-pedra frente a 55% de pó-de-pedra e 45% de areia natural, que era a proporção utilizada por uma central de concreto da região da Grande Florianópolis. A primeira mistura corresponderia a uma situação prática de difícil bombeamento de concreto para um mesmo teor de argamassa e abatimento. Além destas, testou-se uma situação intermediária dos agregados composta de 75% de pó-de-pedra e 25% de areia natural.

Com os resultados observou-se que, para um mesmo consumo de cimento e água, a mistura que continha 100% de pó-de-pedra, apresentou menor exsudação seguida pela

composição de 75% de pó-de-pedra e 25% de areia natural. Desta maneira, a exsudação estaria predominantemente associada à quantidade de microfinos na mistura (ou superfície específica), ou seja, aos diferentes teores de material pulverulento no agregado miúdo total, já que a quantidade de cimento era a mesma. No entanto, o fato de que a mistura contendo apenas pó-de-pedra apresentou a menor exsudação não reflete a condição real de bombeamento, o que torna este ensaio limitado e pouco promissor em prever qualidade de agregados miúdos quanto a bombeabilidade de concretos. Além disso, o ensaio não era prático, sendo descartado dos estudos definitivos.

Após isto, passou-se a avaliar o escoamento das argamassas por dentro de tubos, buscando simular o ensaio Orimet (BARTOS, 1978 apud KOEHLER e FOWLER, 2003). Apesar de, nesse tipo de ensaio, a pressão no material dentro do tubo ser inferior a uma pressão aplicada pelo pistão de uma bomba de concreto, pois se tem apenas a componente do peso-próprio da mistura, acredita-se que o ensaio possa fornecer subsídios para seleção de agregados miúdos quanto sua adequação a concretos bombeáveis.

Objetivando definir o ensaio, foram testados tubos de PVC com diversas configurações, alterando-se principalmente diâmetro, comprimento e a presença de reduções de seção na extremidade de saída da argamassa. De maneira geral, os tubos com diâmetro abaixo de 32mm eram difíceis de preencher e tubos muito largos, aparentemente mitigavam o efeito de atrito entre os grãos da mistura, além de demandarem maior quantidade de material. Estes testes também apontaram para a necessidade de se ter uma redução de seção na extremidade de saída da argamassa, assim como se tem no ensaio Orimet, no viscosímetro de tubo capilar de extrusão (Figura 3.5) e no ensaio proposto por Best & Lane (1980 - Figura 3.4) pois, caso contrário, mesmo as composições de agregados miúdos consagradamente de pior desempenho acabavam escoando pelo tubo e os tempos de escoamento (parâmetro avaliado) eram muito próximos aos das demais misturas, dificultando a avaliação.

Diante de todo o exposto, a configuração final do tubo e a metodologia do ensaio a ser utilizado neste trabalho foram definidas levando em consideração todos estes fatores. A configuração final do tubo definido para o ensaio é apresentado na Figura 4.6.

Nesta etapa dos estudos-piloto, avaliou-se a consistência através da determinação do espalhamento na mesa para determinação do índice de consistência (NBR 13276:2005 – *Flow Table Test*). Para tal, determinavam-se dois diâmetros ortogonais do espalhamento de cada

argamassa após a remoção do molde tronco-cônico (Flow 0) e após a aplicação de 10 quedas da mesa (Flow 10).

Após execução do ensaio de espalhamento na mesa, o material excedente ao ensaio era utilizado para preencher o tubo de escoamento. Após preenchimento e rasadura do material excedente, conforme descrito em 4.4.2.1, acionava-se a filmagem e retirava-se o tampão da extremidade inferior do tubo (CAP), avaliando-se o escoamento. Posteriormente, com auxílio das filmagens determinava-se o tempo de escoamento das argamassas.

Após o ensaio de escoamento, era determinada ainda a massa específica no estado fresco de cada argamassa, segundo procedimento baseado na NBR 13278:2005, para posterior cálculo do teor de ar incorporado.

### **8.2.3.1 Aferição do ensaio proposto**

Para aferição do ensaio proposto, assim como no ensaio do cone invertido em concreto, foram definidos alguns testes comparativos buscando verificar a sensibilidade do ensaio em avaliar argamassas com diferentes teores de pasta e diferentes composições granulométricas de agregados. Para tal, foram preparadas argamassas com duas combinações distintas de agregados miúdos e para três diferentes teores volumétricos de pasta, sendo avaliados os tempos de escoamento das argamassas através do tubo proposto. Além disso, os testes serviram para definir qual a faixa de volume de pasta a ser empregada no estudo definitivo.

Para avaliar a influência da composição granulométrica do agregado miúdo nos resultados obtidos com o ensaio proposto, foram preparadas argamassas com duas composições distintas de dois agregados miúdos. Foi testada a composições de 60% de pó-de-pedra e 40% de areia natural (60x40) frente à composição de 80% de pó-de-pedra e 20% de areia natural (80x20). Vale ressaltar que a composição 60x40 era utilizada por uma central de concreto da grande Florianópolis. Para cada uma dessas duas composições, foram preparadas três argamassas com diferentes teores de pasta na mistura, mantendo-se constante a relação água/cimento. Os traços empregados para a composição 60x40 e para a composição 80x20, assim como os agregados empregados, são apresentados na Tabela 8.9 e Tabela 8.10, respectivamente.

Tabela 8.9 – Traços das argamassas com 60% de pó-de-pedra e 40% de areia natural.

<b>Material</b>	<b>Traço 1</b>	<b>Traço 2</b>	<b>Traço 3</b>
<b>Cimento</b>	1,000	1,000	1,000
<b>Areia Natural (AN-P)</b>	1,318	1,195	1,089
<b>Pó-de-Pedra (AB-S)</b>	1,981	1,797	1,637
<b>Água</b>	0,559	0,559	0,559
<b>Aditivo</b>	1,10%	1,10%	1,10%
<b>H</b>	13,00%	14,00%	15,00%
<b>Volume de Pasta*</b>	42,6%	45,0%	47,3%

\* Volume de cimento, água e aditivo em relação ao volume total.

Tabela 8.10 – Traços das argamassas com 80% de pó-de-pedra e 20% de areia natural.

<b>Material</b>	<b>Traço 1</b>	<b>Traço 2</b>	<b>Traço 3</b>
<b>Cimento</b>	1,000	1,000	1,000
<b>Areia Natural (AN-P)</b>	2,512	2,394	2,284
<b>Pó-de-Pedra (AB-S)</b>	0,628	0,598	0,571
<b>Água</b>	0,559	0,559	0,559
<b>Aditivo</b>	1,10%	1,10%	1,10%
<b>H</b>	13,50%	14,00%	14,50%
<b>Volume de Pasta*</b>	43,8%	45,0%	46,1%

\* Volume de cimento, água e aditivo em relação ao volume total.

Para cada uma das argamassas, foi determinado o espalhamento na mesa de consistência, o teor de ar incorporado e avaliou-se o escoamento pelo equipamento proposto, conforme procedimentos já explicados anteriormente. Os resultados de espalhamento e teor de ar incorporado são apresentados na Figura 8.5. Já os resultados de escoamento são apresentados na Figura 8.6.

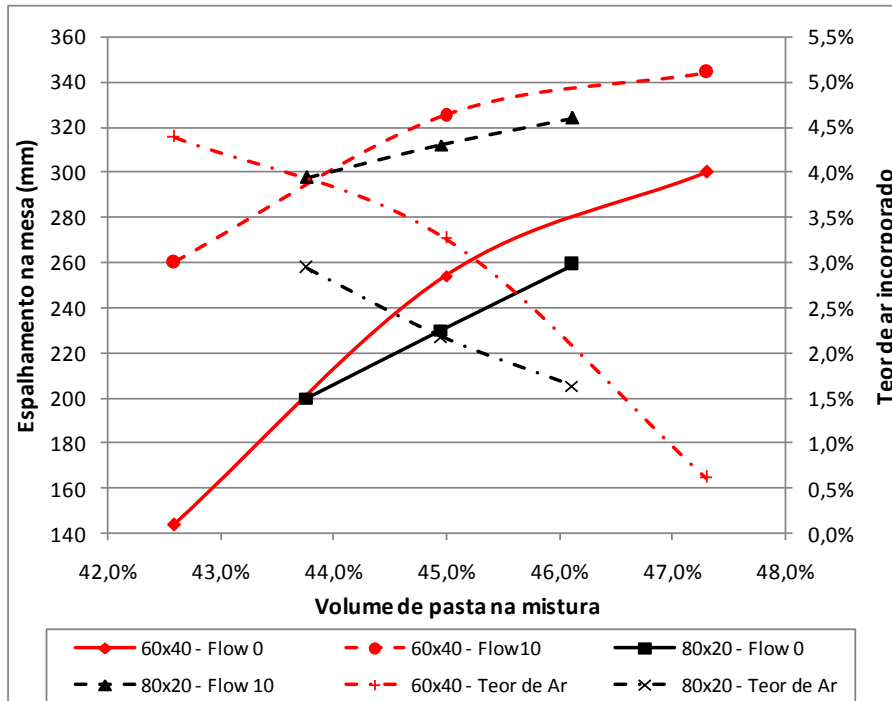


Figura 8.5 – Espalhamento e teor de ar incorporado das composições 60x40 e 80x20 de agregados miúdos para diferentes consumos de cimento e a/c constante.

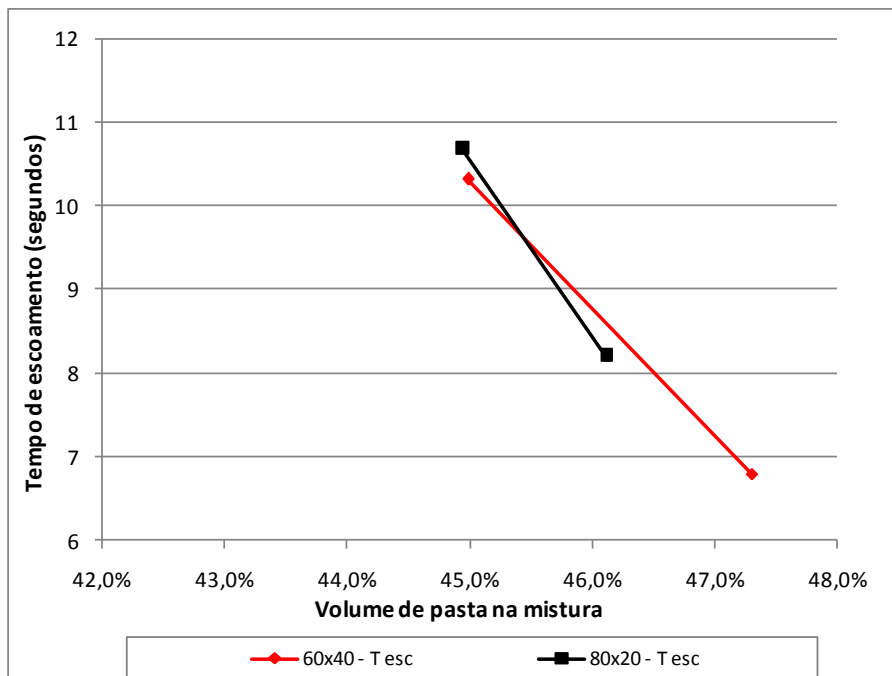


Figura 8.6 – Tempo de escoamento no ensaio proposto das composições 60x40 e 80x20 de agregados miúdos para diferentes consumos de cimento e a/c constante.

Diante dos resultados apresentados, observa-se que, para uma mesma relação água/cimento, houve um aumento do espalhamento conforme aumentou-se o volume de pasta na mistura, sendo que o comportamento foi diferente para cada composição de agregados. Quanto ao ensaio proposto, este se mostrou suscetível à mudanças no teor de pasta, sendo que os tempos



de escoamento diminuíram com o aumento do volume de pasta na mistura. O ensaio também conduziu a comportamentos sensivelmente distintos para as duas composições de agregados avaliadas. Vale ressaltar que, para teores de pasta menores que 45,0% nenhuma das argamassas escoou, independente da composição de agregado, e por isso os pontos não são apresentados no gráfico da Figura 8.6.

Para o único ponto em comum em relação ao teor de pasta (Figura 8.6), os resultados foram condizentes com a realidade de bombeamento de concretos semelhantes confeccionados com as duas composições de agregados. Ou seja, para o mesmo volume de pasta (aproximadamente 45%), a composição 60x40 apresentou tempo de escoamento sensivelmente menor. No entanto, torna-se necessário a análise em conjunto dos dois ensaios, de espalhamento e de escoamento, para se fazer uma análise dos agregados miúdos quanto ao seu desempenho em concreto. Por exemplo, com os resultados obtidos, seria possível fazer uma análise com vistas à economia de cimento em concreto para determinado abatimento, condição de bombeamento e resistência (relação  $a/c$ ). Esta extrapolação certamente é uma aproximação, mas pode ser um indicativo de qualidade da composição dos agregados miúdos. Assim, poder-se-ia afirmar que, para um mesmo tempo de escoamento (p.e.  $t=9,5s$  – Figura 8.6), que representaria possivelmente uma mesma condição de bombeamento para concretos com mesmo teor de argamassa, a composição de agregados 60x40 conduziria a maior economia de água para um mesmo abatimento (maior fluidez para mesmo volume de pasta – Figura 8.5). Em outras palavras, a composição 60x40 seria mais econômica, pois se teria uma redução no consumo de cimento para uma mesma relação  $a/c$ , e possivelmente uma mesma resistência, mantendo-se aproximadamente constante a consistência e a facilidade de bombeamento.

### **8.2.3.2 Considerações sobre o ensaio proposto**

O ensaio se mostrou fácil e prático de executar, principalmente se os tempos de escoamento forem avaliados posteriormente com auxílio de programas de edição de vídeo. Além disso, o ensaio se mostrou sensível a mudanças no teor de pasta das argamassas e a diferentes composições granulométricas de agregados miúdos. Principalmente este último fator justifica a utilização deste ensaio na metodologia definitiva dos ensaios em argamassa, fornecendo subsídios para a seleção de agregados miúdos para utilização em concreto.

**8.3 ANEXO C – ESTUDO-PILOTO**

## Anexo C: Estudo-piloto

Antes de partir-se para o estudo definitivo, foi desenvolvido um estudo-piloto em argamassa e em concreto procurando avaliar o comportamento dos ensaios propostos em situações semelhantes às aquelas que seriam estudadas no programa experimental definitivo e também avaliar a correlação dos resultados de concreto e de argamassa. A intenção deste estudo era avaliar em argamassa algumas composições de agregados miúdos e selecionar um número menor para o estudo em concreto, simulando assim o estudo definitivo.

Nesta etapa foram estudados os materiais de duas centrais de concreto (central FL e central SJ) que utilizavam agregados distintos, com exceção da areia de britagem. Vale ressaltar que os materiais utilizados por estas duas centrais dosadoras representam os agregados utilizados pela maioria das centrais de concreto da grande Florianópolis, equivalendo a cerca de 70% do total de agregados miúdos consumidos pelo setor na região. Para as duas centrais, foi tomado o traço do concreto bombeável fck 30MPa e abatimento  $10\pm 2$ cm conforme apresentado na Tabela 8.11 e Tabela 8.12, de onde foram obtidas a proporção entre os agregados miúdos e entre os agregados graúdos. A caracterização destes materiais é apresentada na Tabela 8.3 e na Tabela 8.4 (item 8.2.1).

Além das proporções entre os agregados miúdos utilizadas em cada central de concreto (Tabela 8.11 e Tabela 8.12), nos estudos em argamassa foram testadas outras duas composições dos agregados miúdos: uma empregando-se 80% de areia de britagem e 20% de areia natural e a outra utilizando 100% de areia de britagem. Estas proporções foram definidas com o intuito de se testar composições de agregados que proporcionassem diferentes dificuldades de bombeamento. Devido aos resultados obtidos nos testes em argamassa, as situações com 100% de areia de britagem não foram testadas em concreto.

Tabela 8.11 – Traço e materiais empregados em concretos bombeáveis de fck 30MPa e abatimento  $10\pm 2$ cm pela central de concreto FL da Grande Florianópolis.

Material	Central FL	
	Traço	%
Cimento	1,000	-
Areia Natural (AN-P)	1,017	45%
Areia de britagem (AB-C)	1,253	55%
Brita 4,75 / 12,5 (B0-S)	0,805	30%
Brita 9,5 / 25,0 (B1-S)	1,879	70%
Água	0,569	-
Aditivo	1,10%	-
<b>H</b>	<b>9,56%</b>	
<b><math>\alpha</math></b>	<b>54,9%</b>	

Tabela 8.12 – Traço e materiais empregados em concretos bombeáveis de fck 30MPa e abatimento  $10\pm 2$ cm pela central de concreto SJ da Grande Florianópolis.

Material	Central SJ	
	Traço	%
Cimento	1,000	-
Areia Natural (AN-R)	0,997	40%
Areia de britagem (AB-C)	1,498	60%
Brita 4,75 / 12,5 (B0-C)	0,867	30%
Brita 9,5 / 25,0 (B1-C)	2,024	70%
Água	0,559	-
Aditivo	1,10%	-
<b>H</b>	<b>8,75%</b>	
<b><math>\alpha</math></b>	<b>54,7%</b>	

As duas centrais, apesar de utilizarem o mesmo teor de argamassa em volume, apresentavam diferentes dificuldades de bombeamento. Este fato foi constatado em entrevista com dois operadores de bomba de concreto, que manipulavam o concreto das duas centrais, que afirmaram que o concreto da central SJ apresentava maior facilidade de bombeamento (menor pressão de trabalho e menos ocorrência de entupimentos). Certamente este fato não se deve apenas a alteração da areia natural, mas também aos diferentes agregados graúdos que possuíam forma dos grãos bastante distinta, conforme pode ser observado na Figura 8.7 e na Figura 8.8.



a)

b)

Figura 8.7 – Britas 4,75 / 12,5 utilizadas pela: a) central FL e b) central SJ.



a)

b)

Figura 8.8 – Britas 9,5 / 25,0 utilizadas pela: a) central FL e b) central SJ.

### 8.3.1 Estudo em argamassa

Conforme mencionado anteriormente, foram avaliadas três composições distintas dos agregados miúdos de cada central de concreto. As composições testadas em argamassa são apresentadas na Tabela 8.13.

Tabela 8.13 – Composições de agregados miúdos testadas para cada central de concreto.

Central de Concreto	Nomenclatura das Argamassas	Proporção em Volume dos Agregados Miúdos		
		AB-C	AN-R	AN-P
Central SJ	SJ 0	100%	0%	-
	SJ 20	80%	20%	-
	SJ 40	60%	40%	-
Central FL	FL 0	100%	-	0%
	FL 20	80%	-	20%
	FL 45	55%	-	45%

Para cada uma das composições de agregados miúdos testadas, foram confeccionadas três argamassas com diferentes volumes de pasta na mistura, sendo avaliado, para cada argamassa, o espalhamento na mesa de consistência, o teor de ar incorporado e o escoamento pelo tubo proposto, conforme metodologias já apresentadas nos estudos preliminares (item 8.2). Na Tabela 8.14 são apresentados os traços empregados para obtenção dos três teores volumétricos de pasta.

Tabela 8.14 – Traços das argamassas para os diferentes volumes de pasta.

Material	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Cimento	1,000	1,000	1,000
Areias*	3,141	2,993	2,855
Água	0,559	0,559	0,559
Aditivo	1,10%	1,10%	1,10%
<b>H</b>	13,50%	14,00%	14,50%
<b>Volume de Pasta**</b>	43,8%	45,0%	46,1%

\* Traço base em relação à areia AN-R, sendo substituída volumetricamente pelas demais areias.

\*\* Volume de cimento, água e aditivo em relação ao volume total.

Na Figura 8.9 são apresentados os resultados de espalhamento na mesa para ensaio de consistência de cada argamassa em função do teor de pasta na mistura. Já na Figura 8.10 são apresentados os resultados de tempo de escoamento de cada argamassa em função do teor de pasta na mistura.

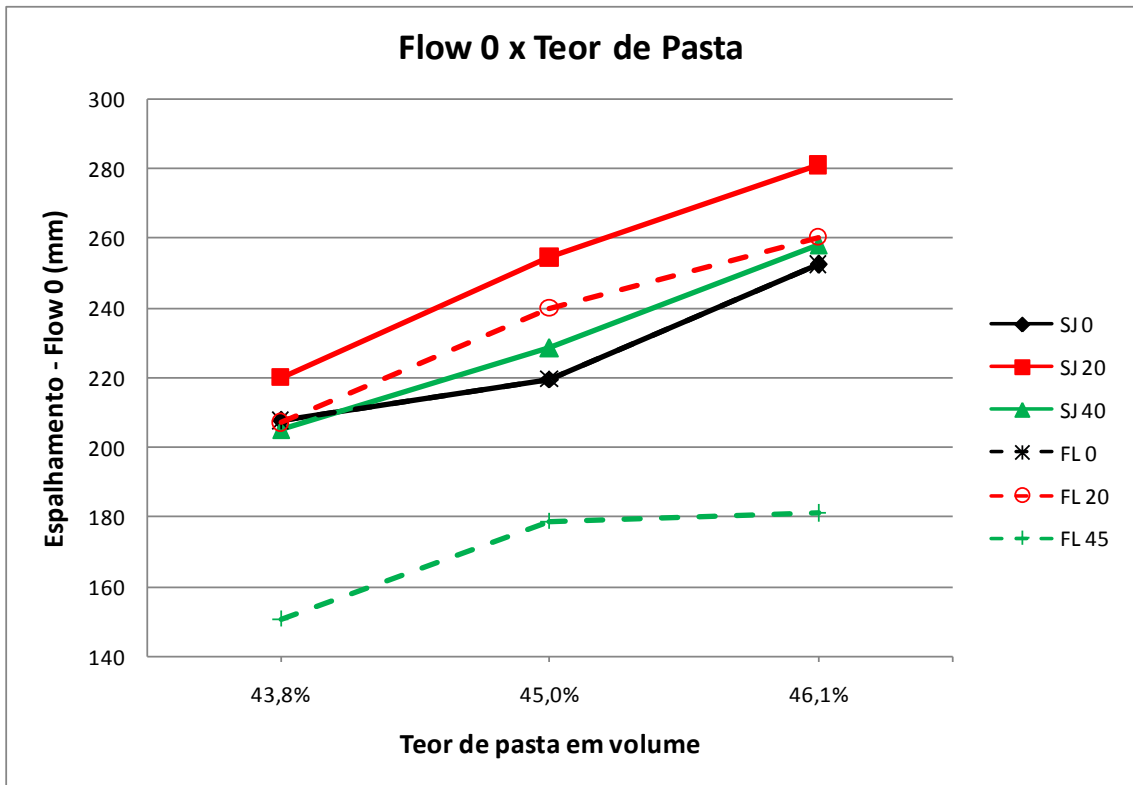


Figura 8.9 – Espalhamento das argamassas em função do teor de pasta na mistura para cada composição de agregado testada.

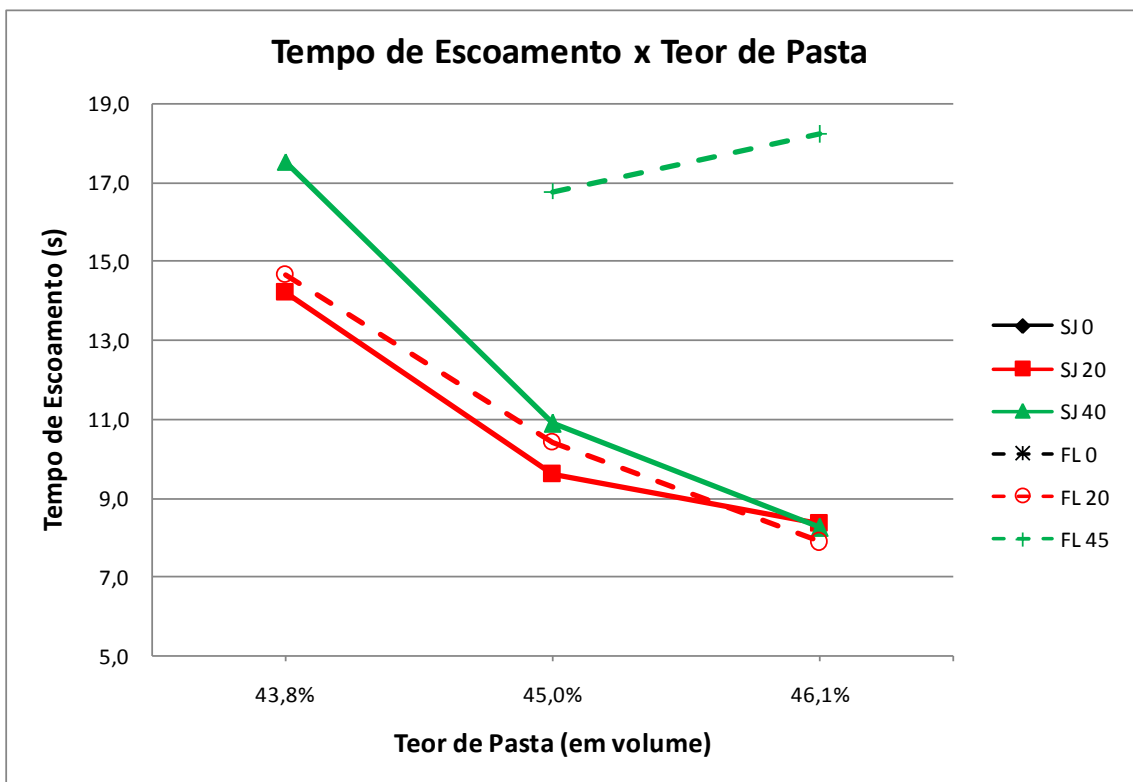


Figura 8.10 – Tempo de escoamento no ensaio proposto em função do teor de pasta na mistura para cada composição de agregado testada.

Na Figura 8.9 observa-se que as argamassas com 100% de areia artificial (FL 0 / SJ 0) apresentaram espalhamento igual (mesmos agregados) e próximo às demais argamassas (semelhante as argamassas FL 20 e SJ 40). No entanto, estas argamassas com 100% de areia artificial não escoaram pelo tubo proposto (Figura 8.10). Este fato mostra que há uma complementação entre os ensaios, sendo que cada um avalia propriedades diferentes. Além disso, os resultados obtidos podem ser correlacionáveis com a situação prática, onde concretos confeccionados com 100% de areia de britagem apresentam maiores dificuldades de bombeamento.

A composição FL 45 apresentou os menores espalhamentos e escoou pelo tubo somente para os dois maiores teores de pasta, mesmo que com tempos bastante elevados. No entanto, cabe destacar que esta composição escoou pelo tubo proposto com espalhamentos menores que as demais composições.

Fazendo-se uma análise de tempo de escoamento por espalhamento na mesa de consistência para cada argamassa, chega-se ao gráfico apresentado na Figura 8.11. Neste gráfico, cada linha representa um teor de pasta e uma central de concreto de onde foram obtidos os agregados, conforme indicado na legenda. Já as identificações sobre os pontos no gráfico representam a composição destes agregados.

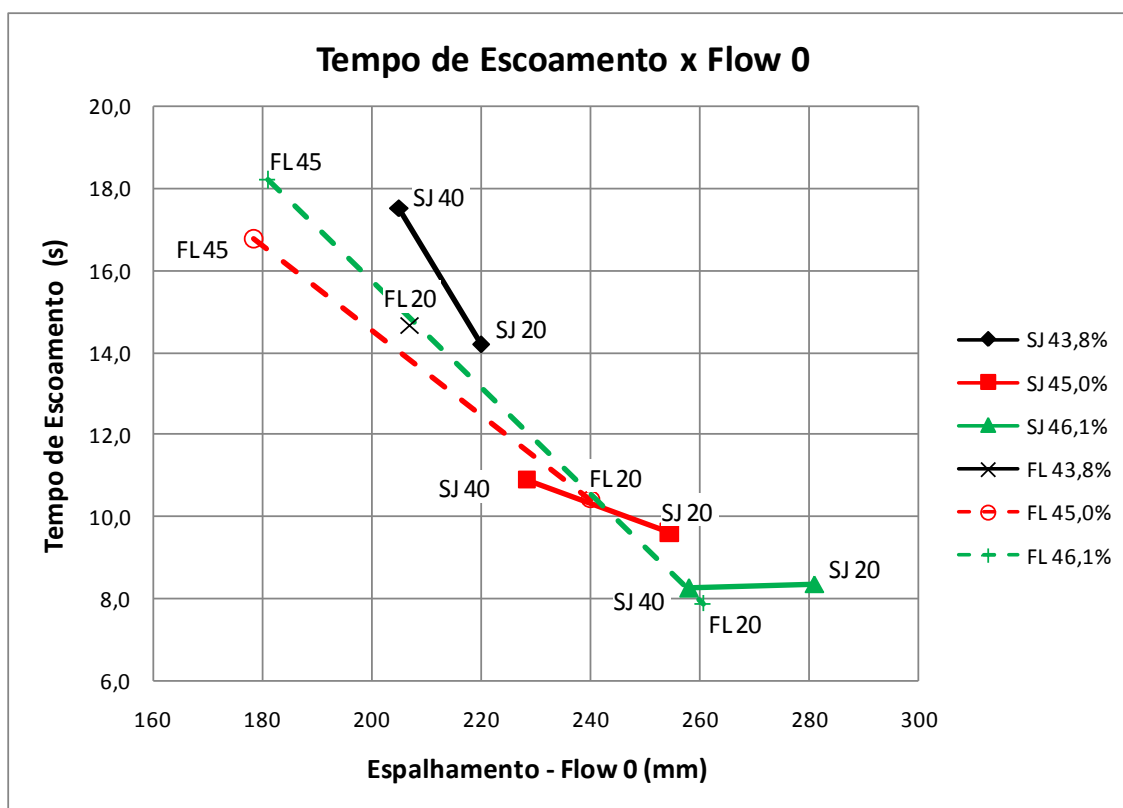


Figura 8.11 – Relação entre tempo de escoamento e espalhamento na mesa de consistência.



Observa-se que as composições SJ 20, FL 20 e SJ 40 apresentaram os maiores espalhamentos e os menores tempos de escoamento para todos os teores de pasta testados, indicando potencialidade de uso em concreto. Já a mistura FL 45 apresentou os maiores tempos e os menores espalhamentos para os dois maiores teores de pasta, não escoando pelo tubo no menor teor. Conforme comentado anteriormente, estas 4 composições de agregados foram testadas em concreto.

### 8.3.2 Estudo em concreto

No estudo em concreto, foram avaliados o abatimento e o escoamento pelo cone invertido de concretos confeccionados com os agregados pré-selecionados na etapa anterior em diferentes teores de argamassa.

Semelhante ao que sugere o método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993) para ajuste do teor de argamassa de concretos, para cada combinação de agregados era confeccionada uma mistura pouco argamassada sendo incorporados cimento e agregados miúdos ao longo das avaliações. No entanto, para uma comparação mais justa, os ajustes do teor de argamassa eram feitos visando alterar o mínimo possível a relação água/cimento, pois alterações significativas poderiam alterar o escoamento das misturas pelo cone invertido. Esta metodologia está melhor explicada na metodologia definitiva (item 4.4.3), mas, basicamente, alterava-se a relação água / materiais secos (H) e mantinha-se constante a relação água / cimento no cálculo dos materiais a serem adicionados em cada ajuste do teor de argamassa ( $\alpha$ ). A forma de cálculo também está apresentada na metodologia definitiva (item 4.4.3).

Em resumo, foi avaliado o escoamento pelo cone invertido (ensaio proposto) de diferentes teores de argamassa, mantendo-se constante o abatimento do concreto, para as 4 composições de agregados mencionadas (SJ 20, SJ 40, FL 20 e FL 45). Após definição do teor de argamassa para o qual os concretos apresentavam escoamento semelhante para um mesmo abatimento, eram confeccionados novos concretos (verificação) com o teor de argamassa definido e dosados para o abatimento especificado sendo avaliados novamente quanto ao escoamento pelo cone invertido. De cada concreto era tomada a demanda total de água, que servia de parâmetro de comparação de desempenho econômico das misturas.

Os testes realizados para os materiais da central FL, nas composições de agregados miúdos FL 20 e FL 45, são apresentados na Tabela 8.15 e na Tabela 8.16, respectivamente. Já na

Tabela 8.17 e Tabela 8.18 são apresentados os resultados das composições SJ 20 e SJ 40, respectivamente.

Tabela 8.15 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados FL 20.

Avaliação	$\alpha$	Abat (cm)	Cone Invertido	H	a/c
Ajuste 1	53,0%	10,5	não	8,38%	0,520
Ajuste 2	54,0%	12,5	não	8,72%	0,541
Ajuste 3	55,0%	11,0	não	8,64%	0,536
Ajuste 4	56,0%	12,0	não	8,93%	0,554
Ajuste 5	57,0%	12,0	não	9,24%	0,561
Ajuste 6	58,0%	12,0	não	9,39%	0,570
Ajuste 7	60,0%	12,0	não	9,64%	0,567
<b>Ajuste 8</b>	<b>62,0%</b>	<b>12,0</b>	<b>quase</b>	<b>9,93%</b>	<b>0,572</b>
Verificação *	62%	15,5	3,92s	8,61%	0,559

\* Abatimento maior do que o desejado.

Tabela 8.16 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados FL 45.

Avaliação	$\alpha$	Abat (cm)	Cone Invertido	H	a/c
Ajuste 1	52,0%	19,5	sim	9,08%	0,534
Ajuste 2	53,0%	14,0	não	9,00%	0,529
Ajuste 3	54,0%	10,0	não	8,94%	0,525
Ajuste 4	54,5%	10,0	não	9,12%	0,536
Ajuste 5	55,0%	9,5	não	9,24%	0,543
Ajuste 6	56,0%	9,5	não	9,46%	0,556
Ajuste 7	57,0%	8,5	não	9,60%	0,564
Ajuste 8	58,0%	9,0	não	9,84%	0,578
Ajuste 9	58,0%	11,0	quase	10,30%	0,605
<b>Ajuste 10</b>	<b>58,0%</b>	<b>11,5</b>	<b>quase</b>	<b>10,53%</b>	<b>0,619</b>
Verificação	58%	12,0	5,88s	8,71%	0,559

Observa-se que o concreto confeccionado com a composição FL 20 demandou maior teor de argamassa para escoar pelo cone invertido que àquele confeccionado com a FL 45. No entanto, na verificação dos desempenhos (concretos com o teor de argamassa definitivo), o concreto com a composição FL 20 demandou menos água que àquele com a FL 45 (H=8,61% e H=8,71%, respectivamente), sendo potencialmente mais econômico. Vale ressaltar que o primeiro apresentou abatimento acima do esperado, o que pode ter facilitado o escoamento no cone invertido.

Tabela 8.17 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados SJ 20.

Avaliação	$\alpha$	Abat (cm)	Cone Invertido	H	a/c
Ajuste 1	52,0%	13,0	nao	8,10%	0,559
Ajuste 2	55,0%	11,5	nao	8,48%	0,571
Ajuste 3	57,0%	12,0	nao	8,82%	0,567
<b>Ajuste 4</b>	<b>59,0%</b>	<b>12,5</b>	<b>4,44s</b>	<b>9,40%</b>	<b>0,604</b>
Verificação *	58%	13,0	17,08s	8,54%	0,589
Verificação	59%	12,0	6,40s	8,56%	0,550

\* Tempo de escoamento muito elevado.

Tabela 8.18 – Resultados de abatimento e escoamento pelo cone invertido para cada teor de argamassa testado para a composição de agregados SJ 40.

Avaliação	$\alpha$	Abat (cm)	Cone Invertido	H	a/c
Ajuste 1	52,0%	16,5	sim	7,92%	0,509
Ajuste 2	53,0%	11,5	nao	8,37%	0,525
Ajuste 3	54,0%	11,5	nao	8,79%	0,552
<b>Ajuste 4</b>	<b>54,7%</b>	<b>12,0</b>	<b>5,64s</b>	<b>9,06%</b>	<b>0,569</b>
Verificação	54,7%	13,0	8,16s	8,13%	0,568

Quanto aos agregados da central SJ, o concreto com 20% de areia natural (SJ 20), se comparado com àquele com 40% de areia natural (SJ 40), demandou maior teor de argamassa e maior quantidade de água (maior H) para apresentar abatimento semelhante e escoar pelo cone invertido.

Após as verificações, o concreto com a composição SJ 40 foi o que demandou menor teor de argamassa e menor quantidade de água para cumprir com o requisito de escoamento pelo cone invertido para um abatimento especificado e dada relação a/c. Este fato possivelmente indica a solução mais econômica para determinada resistência, abatimento e condição de bombeamento.

Comparando-se as composições efetivamente utilizadas pelas centrais avaliadas (SJ 40 e FL 45), observa-se que a central FL demandaria teor de argamassa bem maior para um escoamento semelhante e um determinado abatimento. No entanto, como na prática estas centrais adotam o mesmo teor de argamassa para os concretos, há uma diferença na facilidade de bombeamento conforme foi relatado pelos operadores de bomba e mencionado no início deste item.

### 8.3.3 Resultados e considerações

O ensaio do cone invertido se confirmou útil na avaliação de diferentes agregados para concreto, quando se pretende avaliá-los sob uma mesma condição de bombeamento. Quanto ao ensaio proposto em argamassa, este também foi de grande valia na seleção das composições a serem testadas em concreto, tendo em vista que as argamassas com 100% de areia de britagem apresentavam bom espalhamento, porém não escoavam pelo tubo e por isso foram eliminadas da avaliação em concreto. Além disso, foi observada boa correlação entre os resultados de argamassa e concreto, sendo que a composição FL 45, que havia apresentado o pior desempenho em argamassa dentre as composições pré-selecionadas, também apresentou o pior desempenho em concreto. Esta composição proporciona bom escoamento, pois no estudo em argamassa escoou mesmo com espalhamentos menores e em concreto demandou o segundo menor teor de argamassa para escoar pelo cone invertido. No entanto, esta mistura demanda maior quantidade de água para obter-se a mesma fluidez: baixos espalhamentos em argamassa e elevado H para mesmo abatimento em concreto.

Se comparados aos casos reais, os resultados, tanto em argamassa quanto em concreto, indicam que a composição SJ 40 é mais econômica que a composição FL 45. Isto realmente acontece na prática, tendo em vista as relações água/materiais secos para mesmo fck e abatimento das duas centrais (Tabela 8.11 e Tabela 8.12), apesar de as misturas possuírem dificuldades de bombeamento distintas.

De maneira geral, os testes em concreto foram capazes de definir a composição de melhor desempenho e os estudos em argamassa auxiliaram na triagem, dentro de um universo maior, de algumas soluções para serem testadas em concreto.

**8.4 ANEXO D – TABELAS DE RESULTADOS DO ESTUDO EM  
ARGAMASSA**

Tabela 8.19 – Resultados dos ensaios das argamassa contendo areia de britagem arredondada.

Composição de agregados	Teor de pasta = 43,8%							Teor de pasta = 45,0%							Teor de pasta = 46,1%							
	Flow 0 (mm)	Flow 10 (mm)	T.Esc. (s)	Ar (%)	E	S	C	Flow 0 (mm)	Flow 10 (mm)	T.Esc. (s)	Ar (%)	E	S	C	Flow 0 (mm)	Flow 10 (mm)	T.Esc. (s)	Ar (%)	E	S	C	
A 50% <4,00 P1	182	288	16,7	4,1				239	317	8,9	3,1	1			263	324	7,0	1,3	1	2		
A 50% <4,00 P2	141	256	PD	5,5				219	307	9,8	3,0	1			233	305	8,8	2,0	1	2		
A 50% <4,00 P3	155	264	PD	4,8			3	181	284	13,6	2,9				190	284	13,6	3,2				
A 35% <4,00 P1	172	285	16,5	4,7				251	319	7,8	2,2	2			310	350	PN	##	3	3		
A 35% <4,00 P2	199	290	12,7	2,8				201	299	11,4	2,5	1			245	315	8,1	1,5	2	1		
A 35% <4,00 P3	157	266	23,0	3,5				196	294	13,8	2,3			2	214	296	10,2	1,8	1	1		
A 20% <4,00 P1	248	320	10,0	2,5	1			267	326	7,7	1,3	2			296	343	PN	0,3	3	3		
A 20% <4,00 P2	210	296	12,1	2,7				229	310	8,6	1,2				252	317	8,7	1,3	2	2		
A 20% <4,00 P3	155	256	23,8	2,9				163	276	16,9	1,7				194	282	11,1	1,2	1			
A 0% <4,00 P1	208	294	PN	4,0	1			242	317	N	1,9	3	3		250	311	N	1,7	3	3		
A 0% <4,00 P2	171	269	PN	3,7				187	291	PN	2,3				211	295	PN	2,2	1	2		
A 0% <4,00 P3	136	244	PN	3,6				140	247	PN	2,3				159	259	PN	2,3				
A 50% <3,36 P1	151	265	PD	5,0				244	324	8,4	2,9	2	1		220	307	10,6	3,5				
A 50% <3,36 P2	135	248	P?	5,2				187	291	14,6	2,8	1	2		212	296	9,6	2,6				
A 50% <3,36 P3	131	240	PN	4,8				133	253	PD	4,7			3	187	286	14,5	3,3				3
A 35% <3,36 P1	187	290	14,3	4,8				255	324	7,6	2,3	3	1		284	341	6,0	1,4				
A 35% <3,36 P2	178	274	17,0	3,8				213	299	10,3	2,1				240	307	8,0	2,0	2	2		
A 35% <3,36 P3	136	248	PD	4,1				159	268	20,9	2,6			3	173	272	16,6	2,1				
A 20% <3,36 P1	201	291	PD	3,8				256	321	9,0	2,7	2	2		293	335	10,6	0,4	2	3		
A 20% <3,36 P2	163	264	25,7	4,0				205	293	11,0	1,6		2		220	296	9,7	1,8				
A 20% <3,36 P3	142	244	PD	3,3				154	261	22,2	2,4		1		182	268	14,4	2,1		2		
A 0% <3,36 P1	157	256	N	5,5				192	286	N	3,5		1		237	304	PN	2,5	1	1		
A 0% <3,36 P2	147	253	N	4,5				160	264	PN	3,1				197	280	PN	2,5		1		
A 0% <3,36 P3	125	225	N	3,5				127	233	PN	2,3				144	246	P?	2,9				
A 50% <2,8 P1	125	232	N	6,6				145	268	PD	5,2			2	244	317	9,3	2,5	1			
A 50% <2,8 P2	130	233	PN	5,9				152	276	21,8	4,3			2	195	293	13,6	3,7				
A 50% <2,8 P3	132	237	PN	5,1				143	258	PD	4,8			3	163	269	26,4	3,4				
A 35% <2,8 P1	218	304	15,4	2,9				195	294	14,0	4,6	1	2		261	322	7,6	2,2	1			
A 35% <2,8 P2	176	272	18,0	3,6				177	284	18,0	3,3		1		209	290	11,1	3,2				
A 35% <2,8 P3	134	238	PN	4,2			3	141	255	PD	3,4				152	261	PD	3,1				
A 20% <2,8 P1	205	298	PD	3,9				196	293	15,4	4,5				277	333	9,8	1,1	2	2		
A 20% <2,8 P2	176	277	PD	3,4				165	274	23,4	3,2		1		199	287	11,3	2,6				
A 20% <2,8 P3	135	238	PN	3,6				139	250	27,7	3,2				146	252	PD	3,1				
A 0% <2,8 P1	151	250	N	6,4				178	277	PN	4,6		1	1	195	283	PN	3,7				
A 0% <2,8 P2	144	244	N	4,8				137	243	PN	3,3				153	253	PN	3,3				
A 0% <2,8 P3	125	200	N	3,8				125	222	N	3,3				130	224	PN	3,1				

Observações: 1) E = Exsudação; S = Segregação; C = Coesão. Propriedades avaliadas visualmente durante os ensaios em argamassa, sendo conferido índice de 1 a 3 quanto à intensidade, sendo 3 a maior intensidade. Quando não há observação visual, indica que não houve destaque de nenhuma destas propriedades na argamassa.

2) T.Esc. = Tempo de escoamento no tubo proposto. Para as argamassas que não escoavam diretamente no tubo, procedia-se pequenos golpes de espátula na parede do mesmo, sendo anotadas as seguintes observações: PD - a argamassa iniciou escoamento e parou na metade. Após os golpes de espátula o escoamento era completado; PN - a argamassa iniciou escoamento e parou na metade, não escoando mesmo após os golpes de espátula; N - não havia escoamento inicial nem após os golpes de espátula.

3) Ar = Teor de ar incorporado determinado pelo método gravimétrico.

Tabela 8.20 – Resultados dos ensaios das argamassa contendo areia de britagem lamelar.

Composição de agregados	Teor de pasta = 45,0%						Teor de pasta = 46,1%						Teor de pasta = 47,3%									
	Flow 0 (mm)	Flow 10 (mm)	T.Esc. (s)	Ar (%)	E	S	C	Flow 0 (mm)	Flow 10 (mm)	T.Esc. (s)	Ar (%)	E	S	C	Flow 0 (mm)	Flow 10 (mm)	T.Esc. (s)	Ar (%)	E	S	C	
L 50% <4,00 P1	184	284	PD	3,2		2		257	330	8,1	2,3	2	1		266	329	7,7	1,8	1	1		
L 50% <4,00 P2	162	272	PD	4,0				205	297	12,0	2,0	1	3		228	306	9,2	2,4				
L 50% <4,00 P3	145	250	PD	3,8				165	273	17,4	2,5		3		192	284	13,8	3,4				
L 35% <4,00 P1	220	303	16,5	2,5	1	1		252	322	8,6	1,2	2	1		281	334	6,5	0,5	2	1		
L 35% <4,00 P2	196	289	13,9	2,2	1			200	288	12,1	2,0	1			241	307	8,9	1,1	1			
L 35% <4,00 P3	153	257	PD	2,4	1			161	260	20,0	2,3		2		191	277	12,5	2,1				
L 20% <4,00 P1	226	306	PN	2,0	3	3		237	310	PN	1,2	3			265	326	PN	0,6	1	2		
L 20% <4,00 P2	168	267	PN	2,0	1	2		192	280	PN	1,7	1	1		229	308	10,2	0,9	1	1		
L 20% <4,00 P3	134	241	PN	1,9		2		143	249	PD	1,9	1			163	263	19,4	2,0				
L 0% <4,00 P1	149	254	N	5,2	1			170	276	N	3,1	3	3		196	287	N	2,3	2	2		
L 0% <4,00 P2	132	228	N	3,1				142	242	N	3,4				155	253	N	2,3				
L 0% <4,00 P3	125	195	N	1,5				127	211	N	2,3				132	231	N	2,4				
L 50% <3,36 P1	165	274	PD	4,3	1	2		221	305	11,3	1,8	1			241	315	8,0	2,5				
L 50% <3,36 P2	144	258	PD	4,4				177	277	16,6	3,1				217	301	10,8	1,9				
L 50% <3,36 P3	135	245	PD	3,8				152	271	25,4	3,4		3		172	273	20,8	2,8				3
L 35% <3,36 P1	205	295	15,4	3,2	1	2		224	307	10,7	1,5	2	2		247	316	7,4	2,5	1	1		
L 35% <3,36 P2	172	270	19,9	3,3				172	272	14,9	2,2		1		227	311	10,0	1,7	1			
L 35% <3,36 P3	134	235	PD	3,4			3	144	253	PD	2,8			3	168	274	17,9	2,9				
L 20% <3,36 P1	195	289	PN	3,3				210	296	PN	1,9	2			247	322	12,9	1,1	1	1		
L 20% <3,36 P2	142	248	PN	3,3				173	269	PN	2,2	1			197	285	14,1	1,8				
L 20% <3,36 P3	125	225	N	3,0				130	230	PN	2,6				146	255	PD	2,5				
L 0% <3,36 P1	145	249	N	5,8				154	258	N	4,5	#			185	283	N	4,3	1			
L 0% <3,36 P2	127	219	N	4,2				135	233	N	3,3				147	247	N	3,2				
L 0% <3,36 P3	125	190	N	2,4				125	197	N	2,5				125	206	N	3,1				
L 50% <2,8 P1	134	244	PN	5,1				165	272	PD	4,1				208	296	11,6	3,7		1		
L 50% <2,8 P2	135	244	PN	4,8				143	255	PN	3,8				167	273	21,5	3,6				
L 50% <2,8 P3	128	240	PN	4,6				142	251	PD	4,3				145	255	PD	3,9				
L 35% <2,8 P1	173	275	PN	3,5				233	314	9,8	2,4	1			240	313	9,6	1,6	1			
L 35% <2,8 P2	144	251	PN	4,3				190	282	14,0	2,7		1		165	269	19,0	3,1				
L 35% <2,8 P3	134	235	PN	3,7			3	128	224	PN	4,2			2	130	239	PN	3,1				
L 20% <2,8 P1	162	262	PN	4,0		1		178	271	PN	3,6		1		208	296	15,7	2,9				
L 20% <2,8 P2	130	233	N	4,2				144	256	PN	3,1				163	260	20,2	2,8				
L 20% <2,8 P3	129	222	N	2,9				129	225	N	3,2				134	243	PD	2,8				
L 0% <2,8 P1	133	231	N	6,3				140	246	PN	4,9				163	261	PN	4,2				
L 0% <2,8 P2	125	202	N	4,0				125	218	N	3,8				130	230	PN	3,8				
L 0% <2,8 P3	125	167	N	3,3				125	183	N	3,0				125	210	N	3,3				

Observações: 1) E = Exsudação; S = Segregação; C = Coesão. Propriedades avaliadas visualmente durante os ensaios em argamassa, sendo conferido índice de 1 a 3 quanto à intensidade, sendo 3 a maior intensidade. Quando não há observação visual, indica que não houve destaque de nenhuma destas propriedades na argamassa.

2) T.Esc. = Tempo de escoamento no tubo proposto. Para as argamassas que não escoavam diretamente no tubo, procedia-se pequenos golpes de espátula na parede do mesmo, sendo anotadas as seguintes observações: PD - a argamassa iniciou escoamento e parou na metade. Após os golpes de espátula o escoamento era completado; PN - a argamassa iniciou escoamento e parou na metade, não escoando mesmo após os golpes de espátula; N - não havia escoamento inicial nem após os golpes de espátula.

3) Ar = Teor de ar incorporado determinado pelo método gravimétrico.