

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO NO
ESTADO FRESCO CONTENDO AREIA BRITADA**

Eng^a. PAULA MEDEIROS RODOLPHO

ORIENTADOR: Dr. Ing. ANTONIO ALBERTO NEPOMUCENO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E. DM – 011A/07

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO - 2007

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO NO ESTADO
FRESCO CONTENDO AREIA BRITADA**

PAULA MEDEIROS RODOLPHO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

APROVADA POR:

**Prof. Antonio Alberto Nepomuceno, Dr. Ing (ENC-UnB).
(Orientador)**

**Prof. Elton Bauer, DSc. (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Ivan Ramalho de Almeida, DSc. (UFF)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 26 DE NOVEMBRO DE 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

RODOLPHO, PAULA MEDEIROS.

Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada

[Distrito Federal] 2007.

xiv, 155p. 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2007).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Areia Britada.

2. Comportamento reológico.

3. Concreto.

4. Estado fresco.

I. ENC/FT/UnB.

II. Título (série).

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODOLPHO, P. M. (2007). Comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DM – 011A/07 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paula Medeiros Rodolpho.

TÍTULO: Estudo do comportamento do concreto no estado fresco contendo areia britada.

GRAU: Mestre ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Paula Medeiros Rodolpho

Rua Eusébio de Paula Marcondes, 1008, Jd. D' abril.

05398-020 São Paulo – SP – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Além de um sonho realizado, o mestrado foi o maior desafio que transpus.

Nesse período, a minha vida particular e, conseqüentemente, a profissional se transformaram completamente em função de obstáculos que foram surgindo, ora trazendo alegrias, ora tristezas. É por esse motivo que agradeço, primeiramente, a Deus por me fortalecer.

Agradeço ao Professor Antonio Alberto Nepomuceno, pela paciência, apoio incondicional, confiança e orientação, colocando-me no foco do trabalho.

Também agradeço aos professores do PECC, que nas disciplinas ministradas ampliaram meu conhecimento e, principalmente, aqueles que incitaram em mim mais vontade de concluir o mestrado, mesmo que de forma indireta.

Dispenso sincera gratidão a Carla, pelas discussões sobre o tema, pelo ombro amigo e pelo apoio; e a Pollyana, que me transferiu a sua objetividade nos momentos certos e pela amizade.

Agradeço aos meus amados Rodrigo, pela compreensão, paciência, apoio e retribuição de amor; e Sophia, pelo sorrisinho que desmorona qualquer cansaço ou preocupação. Ainda desculpo-me pela ausência, apesar de muitas vezes estar de corpo presente.

Agradeço aos meus pais, Luis e Lourdes, e irmãs, Patrícia e Thais, por me apoiarem em deixar o convívio deles e o emprego seguro, em São Paulo, em busca de um sonho.

Retribuo com gratidão a oportunidade, através da Professora Rosa Sposto, de contribuir com a Professora Raquel Naves Blumenschein (LACIS), em horário flexível e com foco em resultados. Proporcionou-me parte do subsídio para terminar o mestrado. Além da compreensão e conversas com a Professora Raquel que, em momentos difíceis, até mudaram rumos das minhas decisões.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília, na pessoa do Prof. Dr. Elton Bauer.

Aos laboratoristas Severino e Xavier, ao Laboratório de Geotécnica, aos técnicos do CME e ao Clóvis pelo auxílio, pela montagem e manutenção de equipamentos imprescindíveis ao trabalho e pela presteza.

Agradeço a CAPES, pelo suporte financeiro; a CIPLAN, pelos materiais cedidos e a IMPERCIA, pela doação do aditivo.

Por fim, agradeço a todos que, mesmo não citados, apoiaram ou alegraram essa jornada.

*Dedicado ao meu amado paizinho
(in memória).*

*As histórias têm começo, meio e fim.
Na vida, cada fim é um novo começo.
Siga em frente.*

Walt Disney

RESUMO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO CONTENDO AREIA BRITADA.

Autor: Paula Medeiros Rodolpho

Orientador: Dr. Ing. Antonio Alberto Nepomuceno

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, novembro de 2007.

A areia britada possui características diferentes da natural, principalmente, se considerado o alto teor de materiais finos, distribuição de tamanho de partículas, forma, rugosidade e tipos litológicos. É produzida por cominuição da rocha, podendo sofrer classificação e beneficiamento do formato das partículas. Tais características afetam, em maior escala, as propriedades do concreto no estado fresco.

Nesta pesquisa, realizou-se o estudo do comportamento no estado fresco de concretos com areia britada e com areia natural. Uma das areias britadas sofreu beneficiamento do formato, proporcionando partículas mais equidimensionais e com arestas menos angulosas.

A análise comparativa de três métodos conduziu à dosagem dos concretos pelo Método de Faury. Variou-se o teor de finos da areia, a relação a/c e o uso ou não de aditivo.

Considerados como fluidos de Bingham, os concretos de consistência de 120 ± 10 mm foram caracterizados pelos parâmetros reológicos tensão de escoamento e viscosidade. Para tanto, foi utilizado o ensaio de Abatimento Modificado, proposto por Ferraris & De Larrard (1998). A tensão de escoamento da argamassa do concreto também foi determinada pelo *Vane Test*, fornecendo boa correlação entre os métodos. Além disso, foram avaliadas a massa específica, o teor de ar incorporado, a exsudação e a resistência à compressão dos concretos.

Concluiu-se que a influência do tipo e teor de finos das areias no comportamento reológico do concreto, para dada consistência, é dependente do teor de pasta do traço, limitado por faixas de consumo de cimento. É o teor de pasta que determina a contribuição da partícula grossa ou da partícula fina na resistência ao cisalhamento, seja por atrito, coesão ou efeito de lubrificação. O teor de pasta é determinado pelo empacotamento granular, influenciado pelas características particulares da combinação do tipo de areia e do teor de finos avaliados. Por fim, constatou-se que é possível dosar concreto com até 25% de finos da areia. Dentre as areias analisadas, a britada com tratamento de forma conferiu os melhores resultados ao concreto.

ABSTRACT

STUDY OF FRESH CONCRETE BEHAVIOR CONTAINING CRUSHED SAND.

Author: Paula Medeiros Rodolpho

Supervisor: Dr. Ing. Antonio Alberto Nepomuceno

Master's Program in Structures and Civil Construction

Brasília, November of 2007.

The crushed sand possesses different characteristics from the natural one, mainly due to the high fine materials contents, particle size distribution, shape, roughness and lithological types. It is formed during the process of comminution of rock, and it's able to suffer classification and improvement of the particles shape. Such characteristics affect, in larger scale, the fresh concrete properties.

In this research, it has been studied the behavior of fresh concrete with crushed sand and natural sand. One of the crushed sand shape was improved, providing equidimensional particles with less angular edges.

The comparative analysis of three methods led to the mixture proportioning of the concrete by the Faury's Method. The effects varying fine material content in the sand, water/cement ratio and the use, or not, of additive has been investigated.

Considered as Bingham's fluid, the concrete with consistency of 120 ± 10 mm was characterized by the rheological parameters yield stress and viscosity. For that way, it was used the Modified Slump Test, proposed by Ferraris & De Larrard (1998). The yield stress of the concrete's mortar was also determined by Vane Test, supplying a good correlation between the methods. Moreover, the mass of concrete per unit volume, the incorporated air content, the bleeding and the compressive strength of concrete has been evaluated.

It was concluded that the influence of type and fine material content in sand in the rheological behavior of concrete, for a given consistency, is dependent on the paste content of concrete mixture, limited by a cement concentration. It is the paste content that determines the fine or coarse particle contribution in the shear strength, either for friction, cohesion or lubrication effect. The paste content is determined by density packing of granular mix, influenced by particular characteristics of investigated sand and fine material content combinations. At last, it was verified that it is possible to dose concrete with 25% of fine material in the sand. Amongst analyzed sands, the crushed sand with shape treatment conferred the best results to concrete.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO DA PESQUISA.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. O MEIO-AMBIENTE E ACORDOS INTERNACIONAIS.....	3
3.2. SUSTENTABILIDADE DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	4
3.3. TRABALHABILIDADE DO CONCRETO	6
3.3.1. REOLOGIA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	8
3.3.2. FATORES QUE AFETAM A REOLOGIA DO CONCRETO.....	14
3.3.3. MÉTODOS DE ENSAIOS PARA MEDIR PROPRIEDADES REOLÓGICAS.....	19
3.3.3.1. ENSAIO DE ABATIMENTO.....	20
3.3.3.2. ABATIMENTO MODIFICADO.....	22
3.3.3.3. VANE TEST.....	26
3.3.4. SEGREGAÇÃO.....	29
3.3.4.1. EXSUDAÇÃO.....	31
3.4. BOMBEABILIDADE.....	33
3.5. AREIA BRITADA.....	36
3.5.1. INFLUÊNCIA DA AREIA BRITADA NO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO.....	38
3.5.2. INFLUÊNCIA DA AREIA BRITADA NO CONCRETO EM ESTADO FRESCO	39
3.6. ADITIVO DE AÇÃO PLASTIFICANTE	42
3.7. A DOSAGEM DO CONCRETO.....	46
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	48
4.1. PROJETOS EXPERIMENTAIS.....	49
4.2. VARIÁVEIS DE ESTUDO DOS PROJETOS EXPERIMENTAIS.....	51
4.3. NOMENCLATURA ADOTADA.....	52
4.4. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	53
4.4.1. CIMENTO	53
4.4.2. AGREGADO GRAÚDO	55
4.4.3. AGREGADO MIÚDO – AREIA NATURAL E AREIA BRITADA	57
4.4.4. ADITIVO.....	62
4.5. PROCEDIMENTO DE MISTURA DOS MATERIAIS NA DOSAGEM DO CONCRETO	63

4.6. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO UTILIZADOS	63
4.6.1. ENSAIO DE ABATIMENTO	64
4.6.2. ENSAIO DE ABATIMENTO MODIFICADO	65
4.6.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA.....	66
4.6.4. ENSAIO DE TEOR DE AR INCORPORADO.....	66
4.6.5. ENSAIO DE EXSUDAÇÃO	67
4.6.6. <i>VANE TEST</i> – ARGAMASSA.....	69
4.6.7. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	70
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
5.1. PROJETO EXPERIMENTAL 1	71
5.2. PROJETO EXPERIMENTAL 2	75
5.2.1. TRAÇOS DOS CONCRETOS E PARÂMETROS DE MISTURA.....	75
5.2.2. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	94
5.2.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO	94
5.2.3.1. ENSAIO DE TEOR DE AR INCORPORADO DO CONCRETO	98
5.2.3.2. VISCOSIDADE DO CONCRETO: ENSAIO DE ABATIMENTO MODIFICADO	100
5.2.3.3. TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO: <i>VANE TEST</i> EM ARGAMASSA E ABATIMENTO MODIFICADO EM CONCRETO.....	106
5.2.3.4. ENSAIO DE EXSUDAÇÃO.....	111
5.2.4. ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO.....	113
5.2.4.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	113
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	114
6.1. CONCLUSÕES	115
6.2. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
APÊNDICE A: PROJETO EXPERIMENTAL 1 - MÉTODOS DE DOSAGEM E MEMÓRIA DE CÁLCULO	
APÊNDICE B: PROJETO EXPERIMENTAL 2 - MEMÓRIA DE CÁLCULO DA DOSAGEM POR FAURY	

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Fatores com influência direta no ângulo de atrito das partículas da areia (adaptado Pinto, 2000 apud Souza, 2005).	19
Tabela 3.2 Fundamentação de ensaios de reologia (Koehler & Fowler, 2003).	20
Tabela 4.1 – Caracterização física do cimento CP II F 32 utilizado nos projetos experimentais.	54
Tabela 4.2 – Caracterização química do cimento CP II F 32 utilizado no nos projetos experimentais.	54
Tabela 4.3 Caracterização do agregado graúdo.	56
Tabela 4.4 Caracterização do agregado miúdo: areia natural.	58
Tabela 4.5 Caracterização do agregado miúdo: areia britada.	59
Tabela 4.6 Análise morfoscópica do agregado miúdo.	61
Tabela 4.7 Dados Técnicos do aditivo.	62
Tabela 5.1 Traço em massa e parâmetros de dosagem de concreto.	71
Tabela 5.2 Resultados de consistência medida pelo ensaio de abatimento.	76
Tabela 5.3 Traços em massa obtidos pelo Método de Faury para concreto dosado com areia natural (N). ...	77
Tabela 5.4 Traços obtidos em massa pelo Método de Faury para concreto dosado com areia britada sem tratamento de forma (BS).	77
Tabela 5.5 Traços obtidos em massa pelo Método de Faury para concreto dosado com areia britada com tratamento de forma (BC).	78
Tabela 5.6 Parâmetros de dosagem dos concretos dosados com areia natural (N).	78
Tabela 5.7 Parâmetros de dosagem dos concretos dosados com areia britada sem tratamento de forma (BS).	79
Tabela 5.8 Parâmetros de dosagem dos concretos dosados com areia britada com tratamento de forma (BC). ...	80
Tabela 5.9 Faixa de consumo de cimento e finos totais (kg/m ³) dos concretos SEM aditivo para diferentes relações a/c.	84
Tabela 5.10 Faixa de consumo de cimento e finos totais (kg/m ³) dos concretos COM aditivo para diferentes relações a/c.	86
Tabela 5.11 Áreas de ajuste à curva de referência do Método de Faury.	97
Tabela 1.1 Abatimento recomendado para diferentes tipos de construção (ACI 211.1-77).	133
Tabela 1.2 Consumo de água (l/m ³ de concreto) recomendado para determinado abatimento (mm) e diâmetro máximo do agregado (mm).	133
Tabela 1.3 Volume (m ³) de agregado graúdo por m ³ de concreto para determinado diâmetro máximo do agregado e módulo de finura da areia.	133
Tabela 1.4 Parâmetros de dosagem - Valores de A e B.	135
Tabela 1.5 Parâmetros de dosagem - Valores de K e K'.	136
Tabela 1.6 Volume de vazios (l/m ³) do concreto compactado (ACI).	136
Tabela 2.1 Parâmetros de mistura dos concretos dosados por IPT-ITERS-EPUSP.	139
Tabela 2.2 Parâmetros para definição do traço pelo Método ACI 211.1.	140
Tabela 2.3 Traço teórico e ajustado na betoneira para consistência de 120+10 mm.	140
Tabela 2.4 Método ACI 211.1: Parâmetros de dosagem.	140
Tabela 2.5 Parâmetros para definição do traço pelo Método de Faury.	141
Tabela 2.6 Parâmetros do ajuste geométrico para definição da composição granulométrica.	141
Tabela 2.7 Traço teórico e ajustado na betoneira para consistência de 120+10 mm.	142
Tabela 2.8 Método Faury: Parâmetros de dosagem.	142
Tabela 1.1 Parâmetros para definição do traço pelo Método de Faury.	146
Tabela 1.2 Porcentagem de material de cada composição granulométrica definidas por ajuste geométrico à curva de referência de Faury.	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Área degradada por extração de areia - Reta de Piranema (Almeida, 2005).....	6
Figura 3.2 Relações entre as propriedades do concreto e as características dos constituintes (Rago & Cincotto apud Souza, 2005).....	7
Figura 3.3 Tipos de deformação (Barbosa, 2007).	9
Figura 3.4 Modelos de comportamentos reológicos (Popovics, 1982).....	10
Figura 3.5 Descrição do mecanismo de cisalhamento de camadas adjacentes de um líquido (Barbosa, 2007). ...	12
Figura 3.6 Comportamento reológico de concreto conforme modelo de Herschell-Bulkley.	14
Figura 3.7 Contribuições do empacotamento granular e interação sólido e líquido na resistência ao cisalhamento (adaptado De Larrard, 1999).....	18
Figura 3.8 Caso geral do escoamento de um fluido em um plano inclinado (De Larrard, 1999).	20
Figura 3.9 Correlação entre abatimento e tensão de escoamento para diferentes concretos (Walevik, 2006).....	21
Figura 3.10 Colapso do ensaio de abatimento.	22
Figura 3.11 Reômetro BTRHEOM (De Larrard et al, 1997).....	23
Figura 3.12 Equipamento do ensaio de abatimento modificado e esquema de realização do procedimento (Ferraris & De Larrard, 1998).....	24
Figura 3.13 Correlação entre valores de tensão de escoamento experimentais e teóricos (a) e viscosidade experimental e teórica (b) (adaptado de Ferraris & De Larrard, 1998).....	25
Figura 3.14 Esquema do reômetro de pratos paralelos e de cilindro coaxial (Ferraris, 1999).....	26
Figura 3.15 Esquema gráfico do equipamento e da execução do ensaio (adaptado de Bauer, et al, 2007).	27
Figura 3.16 Típica curva torque – tempo observada no ensaio de <i>Vane</i>	28
Figura 3.17 Comportamento característico da taxa de exsudação de concretos de diferentes consumos de cimentos (Josserand et al., 2006).	31
Figura 3.18 Curvas exsudação-tempo para diferentes tipos de concreto e consumos de cimento (Wainwright & Ait-Aider, 1995).....	32
Figura 3.19 Avaliação do fator de forma de diferentes tipos de areia.	41
Figura 3.20 Comparação entre composição granulométrica com e sem finos (Quiroga & Fowler, 2004).....	41
Figura 3.21 Formação da dupla camada elétrica e do potencial zeta (adaptado Uchikawa et al, 1997 apud Veronez, 2006).....	44
Figura 3.22 Mecanismo de ação por repulsão eletrostática de aditivos a base de naftaleno e melanina (adaptado de Collepari et al., 1999 apud Veronez, 2006).....	45
Figura 3.23 Mecanismo de ação por repulsão estérica de aditivos policarboxilatos (adaptado de Collepari et al., 1999 apud Veronez, 2006).	45
Figura 4.1 Programa experimental.	49
Figura 4.2 Projeto experimental 1.	51
Figura 4.3 Projeto experimental 2.	52
Figura 4.4 Curva granulométrica do cimento utilizado na pesquisa (Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília).....	55
Figura 4.5 Curva granulométrica do agregado graúdo segundo NBR 7211/05.....	57
Figura 4.6 Curva granulométrica do agregado miúdo, areia natural, segundo NBR 7211/05.	58
Figura 4.7 Aspecto das areias BS, BC (proj. 1), BC (proj2) e natural, respectivamente.	59
Figura 4.8 Curva granulométrica do agregado miúdo: areia britada.	60
Figura 4.9 Relação entre grau de esfericidade dos grãos e massa unitária da areia.....	61
Figura 4.10 Caracterização da composição das areias.....	62
Figura 4.11 Tronco-cone e etapa do ensaio de abatimento em concreto.	64
Figura 4.12 Equipamento e etapas do ensaio de abatimento modificado em concreto.....	66
Figura 4.13 Equipamento para determinação do teor de ar do concreto.....	67

Figura 4.14 Equipamento do ensaio de exsudação de água e amostra após 1 hora de vibração intermitente.....	68
Figura 4.15 Etapas do <i>Vane Test</i> e exemplos de coesão e plasticidade.	70
Figura 5.1 Influência do Método de Dosagem no consumo de materiais (%) dos concretos contendo diferentes areias: areia britada com VSI (a), areia natural (b) e areia britada sem VSI (c).....	72
Figura 5.2 Resistência à compressão dos concretos.	74
Figura 5.3 Tendência de comportamento do teor de argamassa seca para concretos dosados com diferentes tipos de areia, com (a, b, c) e sem aditivo (d, e, f) em função da elevação do teor de finos na areia.....	82
Figura 5.4 Influência do aumento do teor de finos da areia e do tipo de areia no consumo de cimento e de finos totais (cimento + finos da areia) de concretos SEM aditivo, para diferentes relações água/cimento.....	83
Figura 5.5 Influência do aumento do teor de finos da areia e do tipo de areia no consumo de cimento e de finos totais (cimento + finos da areia) de concretos COM aditivo, para diferentes relações água/cimento.....	85
Figura 5.6 Relação água/materiais secos dos concretos dosados SEM aditivo (a, b, c) e COM aditivo (d, e, f), para diferentes relações água/cimento.	87
Figura 5.7 Consumo de água (l/m^3) dos concretos dosados SEM aditivo (a, b, c) e COM aditivo (d, e, f), para diferentes relações água/cimento.	88
Figura 5.8 Teor de pasta dos concretos dosados SEM aditivo (a, b, c) e COM aditivo (d, e, f), para diferentes relações água/cimento.	89
Figura 5.9 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia natural (N).	90
Figura 5.10 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada com tratamento de forma (BC).	90
Figura 5.11 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada sem tratamento de forma (BS).....	91
Figura 5.12 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia natural (N) e aditivo de ação plastificante.....	92
Figura 5.13 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada com tratamento de forma (BC) e aditivo de ação plastificante.	92
Figura 5.14 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada sem tratamento de forma (BS) e aditivo de ação plastificante.	93
Figura 5.15 Dosagem do aditivo superplastificante.....	93
Figura 5.16 Influência do teor de finos da areia nos resultados dos ensaios de massa específica dos concretos sem aditivo (a, c, e) e com aditivo (b, d, f).....	95
Figura 5.17 Distribuição das porcentagens retidas de cada areia e teores de finos da areia.	96
Figura 5.18 Influência do teor de finos da areia nos resultados dos ensaios de teor de ar incorporado dos concretos sem aditivo (a, b, c) e com aditivo (d, e, f).	99
Figura 5.19 Influência do teor de finos da areia nos resultados de viscosidade dos ensaios de abatimento modificado, em concreto com e sem aditivo.....	102
Figura 5.20 Influência do teor de finos da areia nos resultados de tensão de escoamento dos ensaios de abatimento modificado, em concreto (a, b, c) e <i>Vane Tester</i> , em argamassa (d, e, f), sem aditivo.....	107
Figura 5.21 Correlação entre Abatimento Modificado e <i>Vane Test</i>	108
Figura 5.22 Influência do teor de finos da areia nos resultados de tensão de escoamento dos ensaios de abatimento modificado, em concreto com aditivo (a, b, c).	110
Figura 5.23 Correlação entre o abatimento e a tensão de escoamento medidos pelo ensaio de abatimento modificado.	111
Figura 5.24 Influência do teor de finos da areia nos resultados de exsudação, em concreto sem aditivo (a, b, c) e com aditivo (d, e, f).....	112
Figura 5.25 Influência do teor de finos da areia nos resultados de resistência à compressão, em concreto sem aditivo (a, b, c) e com aditivo (d, e, f).....	114
Figura 1.1 Procedimento para dosagem de concreto – Método ACI 211.1.	132
Figura 2.1 Diagramas de dosagem dos concretos dosados com areia natural (N), britada com VSI (BC) e britada sem VSI (BS).	139

Figura 2.2 Método Faury: distribuição granulométrica dos agregados e etapas de construção da curva de referência – composição: brita + areia natural.....	142
Figura 2.3 Método Faury: curva de referência e curva granulométrica ajustada para brita e areia natural.....	143
Figura 2.4 Método Faury: distribuição granulométrica dos agregados e etapas de construção da curva de referência – composição: brita + areia BC.....	143
Figura 2.5 Método Faury: curva de referência e curva granulométrica ajustada para brita e areia britada com VSI.....	144
Figura 2.6 Método Faury: distribuição granulométrica dos agregados e etapas de construção da curva de referência – composição: brita + areia britada sem VSI.....	144
Figura 2.7 Método Faury: curva de referência e curva granulométrica ajustada para brita e areia britada sem VSI.....	145
Figura 2.1 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia natural com 0% de finos da areia.....	147
Figura 2.2 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 0% de finos da areia.....	148
Figura 2.3 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 0% de finos da areia.....	148
Figura 2.4 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia N com 10% de finos da areia.....	149
Figura 2.5 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 10% de finos da areia.....	149
Figura 2.6 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 10% de finos da areia.....	150
Figura 2.7 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia N com 18% de finos da areia.....	150
Figura 2.8 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 18% de finos da areia.....	151
Figura 2.9 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 18% de finos da areia.....	151
Figura 2.10 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia N com 25% de finos da areia.....	152
Figura 2.11 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 25% de finos da areia.....	152
Figura 2.12 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 25% de finos da areia.....	153
Figura 3.1 Distribuição granulométrica da composição para 0% de teor de finos das areias N, BS e BC.....	153
Figura 3.2 Distribuição granulométrica da composição para 10% de teor de finos areias N, BS e BC.....	154
Figura 3.3 Distribuição granulométrica da composição para 18% de teor de finos areias N, BS e BC.....	154
Figura 3.4 Distribuição granulométrica da composição para 25% de teor de finos areias N, BS e BC.....	155

1. INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais existe uma grande preocupação com as reservas de materiais naturais e com a preservação do meio ambiente.

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (ano base: 2005) publicado em 2006, pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), órgão do Ministério de Minas e Energia, a Produção Mineral Comercializada de Areia Bruta no território nacional atingiu 141.084.581m³. Desse total, a Indústria da Construção Civil, consumiu cerca de 70% da produção do material bruto, mostrando-se o maior mercado consumidor de areia natural.

Nesse contexto, para a Indústria da Construção Civil a utilização de um material alternativo é de extrema importância quando se consideram as questões ambientais e de custos envolvidos na extração e transporte do material natural.

Dessa forma, a introdução da areia britada (material de dimensão máxima inferior a 6,3 mm) e subproduto beneficiado de pedreiras (Cuchierato et al, 2005) como um dos componentes do concreto, reduz o problema de impacto ambiental causado pela extração de areia natural e de deposição inadequada do material fino nos pátios de produtores de agregados. Além disso, a areia britada é uma alternativa de relação de custo e benefício.

Sabe-se que os grandes obstáculos a vencer na indústria extrativa da areia natural são: (i) o crescente esgotamento das reservas próximas aos grandes centros consumidores, e o (ii) alto custo dos fretes para transporte, que eleva o preço de mercado do m³ da areia.

Segundo cotação realizada em revista especializada (Construção & Mercado, 2007), no Estado de São Paulo, o custo médio do m³ da areia natural é de R\$ 51,97 (U\$25,00) contra R\$ 32,00 (U\$ 15,38) do preço da areia britada. Estes valores representam uma diferença de cerca de 38%. Em Brasília, Distrito Federal, a diferença entre o custo da areia natural e britada atinge 21%.

Tal diferença de preço é justificada, principalmente, pelo alto custo dos fretes para o transporte do material, já que os pontos de extração de areia natural são encontrados a, no mínimo, 70 km da capital paulista.

Para Çelik & Marar (1995) a busca pelo agregado miúdo britado tem sido um fenômeno mundial crescente, em função da acirrada regulamentação e fiscalização ambiental e em função da escassez de agregados naturais.

A areia britada, por sua vez, apesar de ser mais viável economicamente nos grandes centros, ainda encontra resistência ao uso quando utilizada em concreto. É um material com características próprias, como maior rugosidade superficial das partículas, forma mais lamelar que a areia natural e maior teor de finos na sua composição. Em decorrência disso, as propriedades no estado fresco do concreto são alteradas.

Para a viabilização do uso da areia britada, a dosagem experimental, a adequação do teor de finos e, possivelmente, o uso de aditivos, tornam-se fundamentais para o proporcionamento dos materiais na produção de um concreto trabalhável e em condições de bombeamento. Ressalta-se que o bombeamento, segundo Metha & Monteiro (1994) é a capacidade de o material ser transportado através de um duto sob pressão, de forma a manter suas características e homogeneidade para ser adequadamente aplicado. É o método de lançamento para conduzir o concreto diretamente do ponto central de descarga à forma, usualmente praticado para concretos com qualquer composição. De maneira geral, para que o bombeamento seja eficiente é necessário constante fornecimento de concreto fresco, plástico, com consistência adequada e sem qualquer tendência à segregação e exsudação (Neville, 1997). Propriedades do concreto que devem ser analisadas nesta pesquisa.

Considerando o exposto, essa pesquisa surge como uma contribuição ao meio técnico e científico para a caracterização do comportamento do concreto dosado com cimento, areia britada e brita, com foco no estado fresco. Para tanto, são avaliados diferentes formatos de areia britada, métodos de dosagem, relações água/cimento e teores de finos da areia.

Está inserido na linha de pesquisa Sistemas Construtivos e Desempenho de Materiais, do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, onde já foram realizados trabalhos que estão disponíveis no *site* www.unb.br/ft/enc/estruturas, para consulta e *download*.

2. OBJETIVO DA PESQUISA

O presente estudo tem como objetivo geral contribuir para o entendimento do comportamento do concreto fresco, contendo areia britada em substituição à areia natural.

Como objetivos específicos podem ser considerados:

- Avaliar o comportamento do concreto com características específicas, no estado fresco, dosado por diferentes métodos de dosagem;

- Analisar o comportamento do concreto contendo areia britada com tratamento de forma, pelo processo de beneficiamento com o uso do britador de impacto de eixo vertical - VSI;
- Analisar a influência do teor materiais finos da areia britada no comportamento do concreto no estado fresco;
- Avaliar a viabilidade do uso da areia britada sem tratamento de forma, subproduto beneficiado de pedreiras, em concretos de características específicas no estado fresco;
- Otimizar a utilização de areia britada pelo do uso de aditivo de ação plastificante.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O MEIO-AMBIENTE E ACORDOS INTERNACIONAIS

A crescente preocupação do ser humano com a proteção ambiental é fundamental para a sobrevivência das nações. De reconhecida relevância, a *World Meteorological Organization* (WMO) e a *United Nations Environment Programme* (UNEP) estabeleceram o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), que avalia os potenciais problemas ocasionados pelas mudanças climáticas do mundo.

O primeiro relatório da avaliação do IPCC foi realizado em 1990 e foi responsável pelas negociações para o estabelecimento de um comitê intergovernamental. No âmbito desse comitê, são discutidas e negociadas as regras gerais aplicadas pelos países em defesa ao meio ambiente. Toda a estrutura política foi estabelecida e, em 1992, foi adotada a sistemática de elaboração de relatórios sobre as mudanças climáticas, como ferramenta de apoio à tomada de decisões do Comitê.

Em 1995, com a publicação do segundo relatório de avaliação realizado pelo IPCC, iniciou-se a negociação do Protocolo de Kyoto, adotado em 1997. Continuando o trabalho, em 2001, foi realizado o terceiro relatório de avaliação que foi submetido à 7ª Conferência dos Membros da Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento. Por último, o quarto relatório foi elaborado no primeiro trimestre de 2007.

Dentre os resultados apresentados pelo IPCC, foi observado um aumento de 70% na emissão de gases poluentes na atmosfera em um período de 34 anos (1970-2004). As

edificações, a agricultura e a indústria, respectivamente, são os setores mais poluidores do mundo.

Portanto, é dever do ser humano desenvolver ou aprimorar a tecnologia de maneira amigável com o meio-ambiente.

A Indústria da Construção Civil tem papel fundamental nessa tarefa, praticando a sustentabilidade na obtenção da matéria-prima para seus processos e na geração de processos e produtos sustentáveis.

Segundo o IPCC é necessário atacar todos os geradores de poluição e algumas alternativas para a redução da emissão dos gases poluentes foram apresentadas no último relatório. São elas:

- A minimização da geração de resíduos da indústria;
- A utilização de resíduos beneficiados ou materiais reciclados;
- A eficiência energética dos equipamentos.

Essas ações vão ao encontro da Sustentabilidade da Indústria da Construção Civil e, com maior relevância nessa pesquisa, com a aplicação do resíduo beneficiado da Indústria Pedreira – a areia britada.

3.2.SUSTENTABILIDADE DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A palavra sustentabilidade, que engloba questões ambientais, sócio-econômicas e culturais da sociedade, está incorporada ao meio técnico desde 1987, com a elaboração do relatório “Nosso Futuro Comum” ou Relatório Brundtland.

Nesse relatório, sustentabilidade significa "suprir as necessidades da geração presente sem afetar a habilidade das gerações futuras de suprir as suas".

O Relatório “Nosso Futuro Comum”, elaborado pela Comissão das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), faz parte de uma série de iniciativas do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), que afirma uma visão crítica do modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e reproduzido pelas nações em desenvolvimento. Alerta sobre os riscos do uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas. O relatório aponta para

a incompatibilidade entre desenvolvimento sustentável e os padrões de produção e consumo vigentes (www.wikipedia.com em 03-06-07).

O conceito de sustentabilidade foi definitivamente incorporado como um princípio, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Cúpula da Terra de 1992 - Eco-92, no Rio de Janeiro.

O Desenvolvimento Sustentável busca o contraponto entre proteção ambiental e desenvolvimento econômico e serviu como base para a formulação da Agenda 21, um abrangente conjunto de metas para o estabelecimento de um habitat equilibrado.

Diante de diversas iniciativas governamentais em prol do desenvolvimento sustentável da indústria geral, apoiadas pelas políticas mundiais apresentadas, observa-se que a sociedade brasileira também absorveu esses conceitos e tem crescente preocupação com o Desenvolvimento Sustentável.

Portanto, a viabilização do uso da areia britada é uma das ações imprescindíveis para o alcance da tecnologia sustentável de produção de areia, favorecendo dois principais pontos:

- (i) A redução da extração de um recurso natural não renovável (areia natural) e, conseqüente, diminuição da degradação do meio ambiente;
- (ii) Aumento do ciclo de vida da rocha, pelo beneficiamento¹ do resíduo da indústria pedreira e posterior utilização em produtos de menor impacto ambiental.

Como exemplo da degradação causada pela extração da areia, Almeida (2005), cita uma reportagem do jornal “O Globo”, onde é mencionado que “na Reta de Piranema, região que atravessa dois municípios (Itaguaí e Seropédica – Rio de Janeiro), há mais de 40 areais. A extração de areia no leito do Rio Bandeira, por exemplo, vem provocando grande degradação ambiental”. Em outro ponto da reportagem, afirma-se que “a região, conhecida pela exploração dos areais, virou terra arrasada, com várias crateras cheias de água contaminada por bactérias tóxicas, segundo técnicos da Prefeitura de Itaguaí”, o que pode ser verificado na figura 3.1.

¹ ato de submeter um resíduo à operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto (Resolução CONAMA 307/02).



Figura 3.1 Área degradada por extração de areia - Reta de Piranema (Almeida, 2005).

Quanto ao ciclo de vida da rocha, através do beneficiamento do resíduo gerado, além de cumprir a legislação brasileira, a indústria pedreira transforma resíduo em lucro.

“Os geradores deverão ter como objetivo prioritário, a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final”.

(Art. 4º. Resolução CONAMA 307/02)

Para compreender a proposta desta pesquisa, que é estudar o comportamento do concreto no estado fresco dosado com areia britada, favorecendo a sustentabilidade da Indústria da Construção Civil, é necessário fundamentar a trabalhabilidade do concreto usual para, posteriormente, aplicar esses conceitos no objeto de estudo.

3.3. TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

A trabalhabilidade é determinada por um número de propriedades fundamentais da mistura fresca, intrínsecas ao concreto, como: atrito interno, coesão, viscosidade, tensão de escoamento, tixotropia, dilatância, capacidade de deformação plástica e tendência à segregação e exsudação; e extrínsecas, tais como: transporte, lançamento, adensamento e acabamento (Metha & Monteiro, 1994).

Segundo o *ACI Manual of Concrete Practice* (1978) trabalhabilidade é a propriedade do concreto fresco ou da argamassa que determina a facilidade com que se pode misturar, transportar, lançar, compactar e dar acabamento ao concreto.

Popovics (1982) referencia a trabalhabilidade como a combinação de efeitos das propriedades do concreto fresco, que determinam a quantidade de trabalho requerido para o lançamento e compactação, e determinada resistência à segregação.

Enfim, as definições de trabalhabilidade são conceitos convergentes que englobam propriedades do concreto no estado fresco, relacionadas à habilidade do concreto ser transportado e lançado.

Já em campo, a trabalhabilidade tem sido caracterizada por observações visuais, com grande julgamento subjetivo. Nota-se, portanto, que a terminologia para definir a trabalhabilidade do concreto é bastante difusa e por isso, baseados em Koehler e Fowler (2003) e Ferraris apud Souza & Bauer (2002), pode-se classificar essa terminologia em classes:

- Classe I – *qualitativa*: os termos são usados sem qualquer tentativa de quantificação: trabalhabilidade, escoabilidade, compactabilidade, estabilidade, bombeabilidade, consistência.
- Classe II – *qualitativa empírica*: manifestação quantitativa do comportamento para circunstância particular: abatimento, fator de compactação, tempo de Vebê, mesa de consistência;
- Classe III – *fundamental*: baseada em ensaios padronizados: viscosidade e tensão de escoamento.

Rago & Cincotto apud Souza (2005), na figura 3.2, sintetizam claramente a relação entre as características dos constituintes e as propriedades do concreto, para uma dada trabalhabilidade. Pode-se observar que as duas principais propriedades para o controle de uma mistura trabalhável são a tensão de escoamento e a viscosidade.

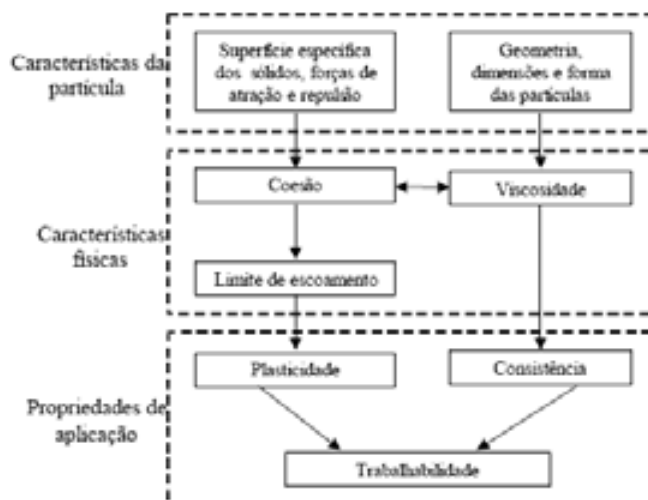


Figura 3.2 Relações entre as propriedades do concreto e as características dos constituintes (Rago & Cincotto apud Souza, 2005).

Para avaliar a trabalhabilidade da mistura, apesar de todo esforço realizado para a caracterização dos concretos pelos parâmetros fundamentais reológicos (tensão de escoamento e a viscosidade), o método mais utilizado em campo é o Cone de Abrams, que mede apenas um parâmetro: o ensaio de consistência².

Por isso, uma das dificuldades de se avaliar a trabalhabilidade do material, até então, foi justamente a inexistência de equipamentos de fácil manuseio, com boa reprodutividade e repetitividade para a determinação de parâmetros reológicos em campo.

Na tentativa de minimizar essa deficiência, Ferraris & De Larrard (1998) desenvolveram o equipamento para a execução do ensaio de abatimento modificado, que será discutido no item 3.3.3.2.

Um fator extrínseco aos componentes do concreto que afeta as propriedades no estado fresco é o tempo necessário para uniformizar uma dispersão de material granular. Segundo D. Chopin et al. (2004), observou-se que independente do uso ou não de aditivo, o tempo de mistura aumenta com o aumento do teor de finos na mistura e com a redução da relação água/aglomerante.

3.3.1. REOLOGIA DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Neste item, serão abordados os fundamentos básicos sobre reologia do concreto, importantes para a compreensão do comportamento das misturas no estado fresco, durante a avaliação da influência da areia britada. Tais fundamentos são necessários para o entendimento da trabalhabilidade do concreto.

A reologia, palavra que vem do grego *rhêo*, o que flui, e *logos*, ciência, induz de forma mais imediata a “ciência do escoamento” (Navarro, 1997). No entanto, a reologia é mais abrangente e, de acordo com Tattersal apud Rago (1999), é a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria sob influência de tensões, considerada adequada a materiais complexos, que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás.

A **deformação** se divide em dois tipos: (i) elástica, aquela que recupera a energia aplicada sob forma de trabalho no corpo, retornando a sua forma original, e (ii) plástica, referente à deformação que converte a energia aplicada em calor, não a recuperando.

² Consistência: capacidade do concreto resistir à deformação.

Os fluidos se deformam continuamente sob ação de tensões de cisalhamento. O conceito de **cisalhamento** é definido pela rotação e alongação relativas de partes do corpo, em diferentes direções e planos (figura 3.3). Na ausência desta tensão, não há deformação.

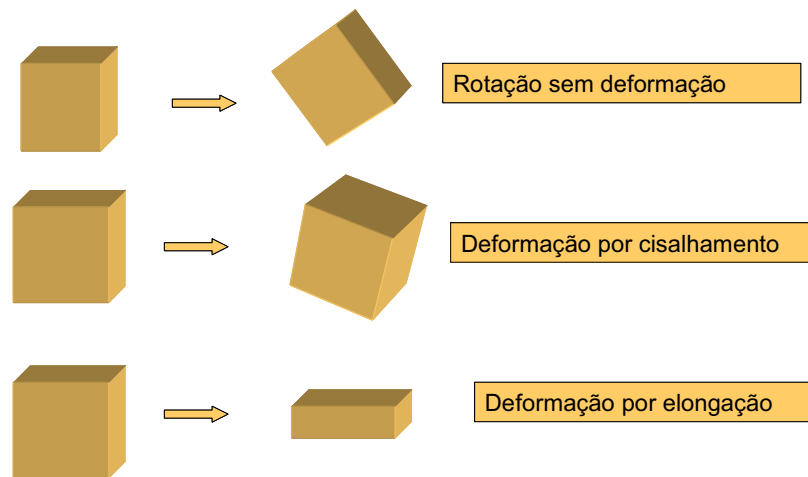


Figura 3.3 Tipos de deformação (Barbosa, 2007).

De acordo com Sobral (1990) e Souza (2005), o comportamento do concreto deve ser descrito como uma suspensão concentrada de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). Por sua vez, sabe-se que a pasta de cimento também não é um fluido homogêneo e sim composto de partículas em um líquido, no caso a água. No entanto, devido à sua continuidade e pelas forças que interagem entre as partículas, as propriedades fundamentais reológicas podem ser aplicadas ao concreto.

O comportamento reológico dos fluidos se divide em dois grandes grupos: **Newtonianos** e **Não-Newtonianos**. O caso mais simples é representado por uma relação linear entre a taxa de fluidez e a força aplicada no corpo, que intercepta o zero, chamado de curva Newtoniana (figura 3.4). Os líquidos newtonianos fluem a uma taxa constante proporcional à força. São chamados de fluidos viscosos ideais, por exemplo, a água. Neste caso, a constante de proporcionalidade entre as duas grandezas é a viscosidade absoluta, que varia apenas com mudanças de temperatura e pressão.

Dentre os **fluidos não-newtonianos**, existem três classificações:

- **Independentes do tempo** - os quais a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é função da tensão naquele ponto: *Pseudoplásticos*, *Dilatantes* e *Binghamianos* ou *Viscoplásticos*;

- **Dependentes do tempo:** são aqueles em que a relação entre a tensão aplicada e a taxa de cisalhamento depende do tempo em que o fluido é agitado ou permanece em repouso: *Tixotrópicos e Reopéticos*;
- **Viscoelásticos:** são os sistemas que apresentam tanto características de sólidos quanto de líquidos e que exibem uma recuperação elástica parcial após a deformação.

Aplicando esses conceitos ao concreto, nem mesmo as pastas de cimento podem ser descritas como um material newtoniano e para descrever o comportamento reológico da pasta, argamassa e concreto, dentre os fluidos não-newtonianos é importante entender os fluidos com comportamentos *Binghamianos ou Viscoplásticos, Dilatantes e Tixotrópicos*.

Analisando a figura 3.4, os trechos de 1 a 4 refletem o comportamento do fluxo de um **fluido não-newtoniano** em um trecho linear, neste caso, com comportamento **Binghamiano**, em um cilindro. Quando a força é aplicada e excede a uma determinada tensão limite de escoamento, ocorre a fluidificação do corpo somente nas regiões periféricas, fenômeno chamado de *plug flow*.

Com o incremento da tensão de cisalhamento, o diâmetro do *plug* diminui conforme o comprimento do fluxo aumenta. Quando a velocidade torna-se suficientemente grande, o material toma forma parabólica, representada no trecho 3 a 4 da curva (Popovics, 1982).

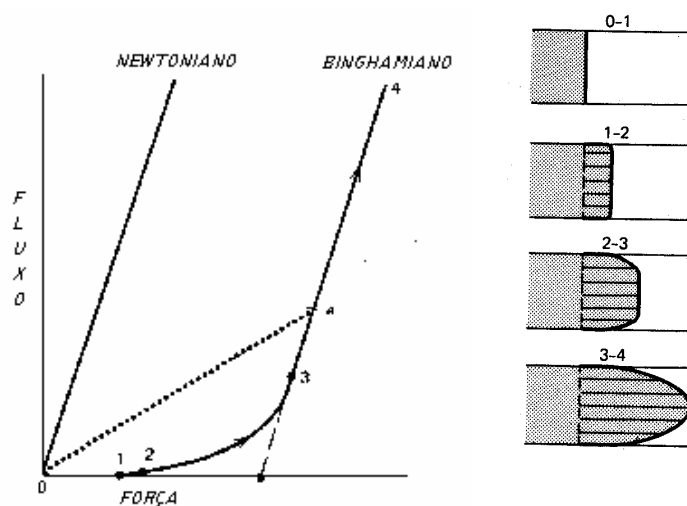


Figura 3.4 Modelos de comportamentos reológicos (Popovics, 1982).

Essa teoria pode se restringir aos trechos lineares do mangote, pois nas curvas, é possível que o fluxo ocorra de maneira diferenciada.

Nos corpos com comportamento Binghamiano, partículas parcialmente envoltas por um material plástico se mantêm em suspensão, mas unidas pelas forças interpartículas existentes. Resistem ao seu peso próprio até determinada tensão de cisalhamento, que segundo Ferraris et al (2001), é a diferença entre um sólido plástico e um fluido ideal.

Portanto, a máxima tensão necessária para resistir ao fluxo é uma característica própria do material, chamada **tensão limite de escoamento**. Popovics (1982) e Taylor (1997) afirmam que quando uma força tangencial de cisalhamento é aplicada a um corpo, primeiramente, o material deforma elasticamente, mas não flui até que essa tensão exceda o seu limite elástico. Materiais com esse tipo de comportamento são expressos pela equação 3.1

$$\tau = \tau_0 + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde: τ = tensão de cisalhamento (kPa);

τ_0 = tensão limite de escoamento (kPa);

η = viscosidade (kPa.s);

dv/dy = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

A característica equivalente à viscosidade absoluta de materiais newtonianos em um material não newtoniano é a viscosidade aparente, demonstrada na linha de θ a α , da figura 3.4. É aplicada às curvas de “tensão de cisalhamento X taxa de cisalhamento” não-lineares, obtida a partir da inclinação de uma reta ligando um ponto particular da curva com a origem.

Nos fluidos não-newtonianos, a viscosidade é influenciada pelo cisalhamento aplicado (taxa de deformação) ou pelo tempo de sua aplicação, passando a ser uma propriedade que depende das condições nas quais o fluido se encontra (Navarro, 1997).

Matematicamente, a **viscosidade** (equação 3.3) é a relação entre a **tensão de cisalhamento** e a **taxa de cisalhamento** (equação 3.2), que por sua vez é o diferencial da velocidade em relação à distância da camada mais externa em fluxo à camada estacionária, detalhadas na figura 3.5.

$$\text{Taxa de cisalhamento} = \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

$$\text{Viscosidade} = \text{tensão de cisalhamento} / \text{taxa de cisalhamento} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde: (dv/dy) é a taxa de cisalhamento (s^{-1});

τ = tensão de cisalhamento (kPa);

τ_0 = tensão limite de escoamento (kPa);

η = viscosidade (kPa.s);

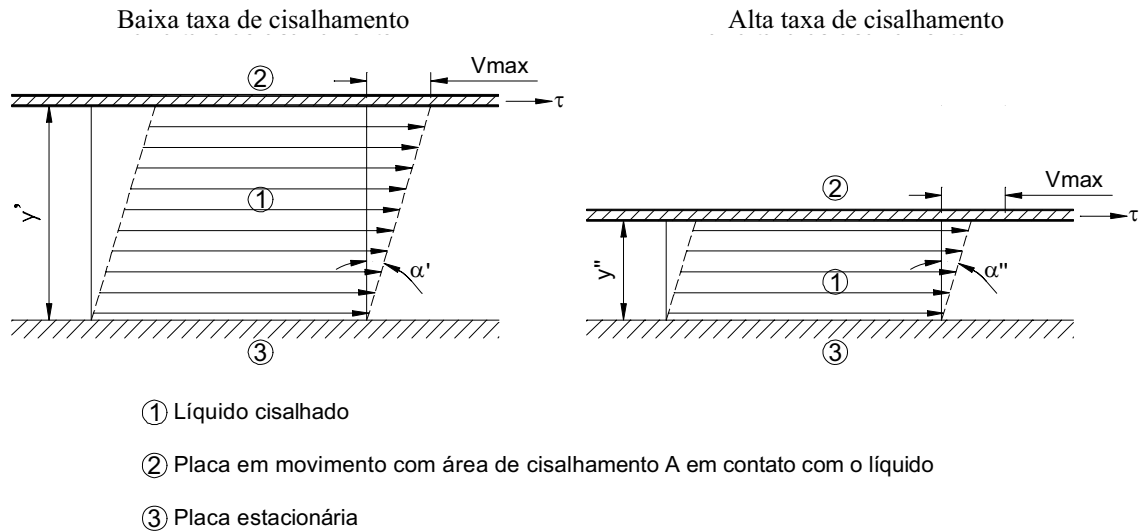


Figura 3.5 Descrição do mecanismo de cisalhamento de camadas adjacentes de um líquido (Barbosa, 2007).

A figura 3.5 mostra que a velocidade máxima ocorre na placa em movimento, de área A em contato com o líquido e vai diminuindo até zero na placa estacionária. Para líquidos de menor espessura, para a mesma velocidade, a taxa de cisalhamento é mais alta.

Fisicamente, a viscosidade é relativa à velocidade de escoamento de um corpo, podendo indicar a facilidade ou não de fluxo devido às forças internas resultantes do movimento relativo de uma camada em relação à outra adjacente (Barnes et al., 1989 apud Souza, 2005).

Complementarmente, dois comportamentos são importantes para a compreensão do comportamento reológico de pastas, argamassas e concretos: os tixotrópicos e os dilatantes.

A tixotropia e a dilatância são fenômenos que ocorrem quando uma estrutura aleatória muda de forma gradual frente a um campo de cisalhamento (Navarro, 1997), caracterizados por sistemas de escoamento heterogêneos, ou seja, que possuem duas ou mais fases que interagem entre si.

A tixotropia é o resultado da quebra temporária da estrutura interna da pasta, causada pela redução da atração interpartículas e do atrito interno. É quando a viscosidade decresce com o aumento da taxa de cisalhamento. A argamassa ou o concreto torna-se mais fluído com o aumento do tempo de cisalhamento sob condições de estado estacionário, sendo reversível, ou seja, volta a ficar mais viscoso quando a sollicitação cessa (Barbosa, 2007).

Segundo Silva (2003), esse comportamento depende das características físicas das partículas, área superficial, forma e dimensão dos grãos e, principalmente, das forças de atração e repulsão entre as partículas.

A dilatância é a interferência entre as partículas por maior atrito interno. É caracterizado pelo aumento da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento e, conforme Silva (2003), típico de fluidos com alta concentração de sólidos. O mecanismo desse comportamento pode ser explicado da seguinte forma: à medida que se aumenta a tensão de cisalhamento, o líquido intersticial que lubrifica o atrito entre as partículas é incapaz de preencher os espaços devido a um aumento de volume que, freqüentemente, acompanha o fenômeno. Então, ocorre o contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente.

Conhecidos os fundamentos de reologia, pode-se deduzir que o comportamento da pasta de cimento, da argamassa e do concreto podem ser caracterizados medindo-se duas propriedades: a tensão de escoamento e a viscosidade.

Segundo Ferraris et al (2001), o comportamento do concreto fresco pode ser idealizado como um corpo de Bingham, em uma primeira aproximação.

No entanto, em estudo realizado por Ferraris & De Larrard, (1998), observou-se que o modelo de Herschell-Bulkley, expresso pela equação 3.4., não linear, é mais adequado para a descrição do comportamento reológico do concreto muito fluído, por exemplo, concreto auto-adensável.

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde: τ : tensão de cisalhamento (kPa);

$\dot{\gamma}$: taxa de cisalhamento (s^{-1});

τ_0 : tensão de escoamento (kPa)

a e b: parâmetros característicos.

Na referida pesquisa, quando obtidos os resultados de tensão de escoamento e viscosidade das misturas estudadas segundo o modelo de Bingham, através da regressão linear dos valores experimentais de torque versus taxa de cisalhamento, a tensão de escoamento apresentou-se negativa, demonstrando que a regressão linear não é o modelo mais recomendado.

Na figura 3.6, observa-se os resultados obtidos por Ferraris & De Larrard (1998), segundo o modelo de Herschell-Bulkley, para misturas de diferentes relações água/cimento. As curvas do gráfico mostram que o torque decresce com o aumento da relação a/c. O equipamento utilizado foi o reômetro BTRHEOM³.

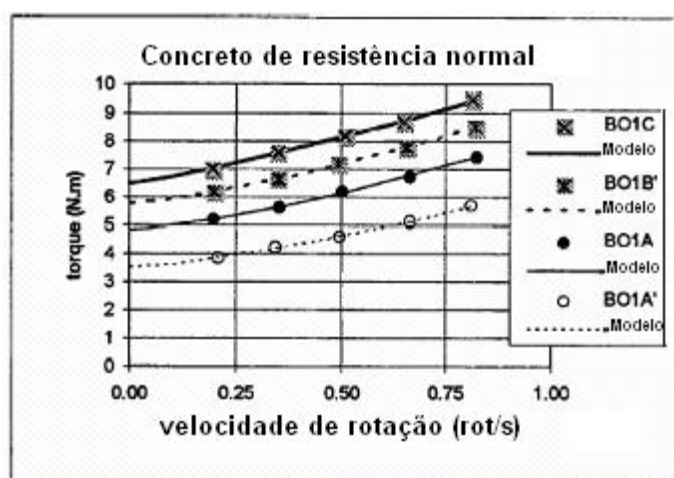


Figura 3.6 Comportamento reológico de concreto conforme modelo de Herschell-Bulkley. (Ferraris & De Larrard, 1998).

3.3.2. FATORES QUE AFETAM A REOLOGIA DO CONCRETO.

O conhecimento do comportamento da pasta que compõe o concreto fresco é importante, pois a contribuição das partículas finas nas propriedades reológicas desse material pode se manifestar tanto pela concentração volumétrica, quanto pela distribuição granulométrica. Segundo De Larrard e Sedran (2002) a quantidade de partículas finas influencia diretamente a fluidez do concreto gerando comportamentos distintos. Ressalta-se que não se deve minimizar o efeito massa provocado pelas partículas maiores que atribuem atrito interno ao sistema e mesmo o atrito atribuído pelas partículas de agregado miúdo, dificultando o fluxo. Coerentemente, deve existir um equilíbrio entre pasta e composição granulométrica (gráudo + miúdo). No entanto, a composição e a quantidade de pasta no

³ O BTRHEOM será detalhado no item que se explica o ensaio de abatimento modificado.

concreto fresco podem afetá-lo da seguinte maneira (Ferraris & Gaidis, 1992 e Souza, 2005):

- Teores reduzidos de pasta levam ao predomínio dos contatos de alto atrito entre os agregados, resultando na diminuição da propriedade consistência;
- À medida que se eleva o teor de pasta, a suspensão escoar com maior facilidade, pois diminuem os contatos entre os agregados e a propriedade consistência passa a ser governada pela viscosidade da pasta;
- A presença em excesso de pasta pode até diminuir a propriedade consistência, pois a quantidade de água disponível para o afastamento das partículas no sistema (água livre) se reduz com o aumento da área superficial volumétrica da composição.

Portanto, conclui-se que a capacidade da pasta de cimento em contribuir para a definição da consistência, e/ou de conferir deformação plástica ao concreto, é influenciada diretamente pela quantidade de água, de aditivo de ação plastificante ou modificador de viscosidade. Tais fatores interferem nas fases da pasta que interagem entre si e produzem perturbações locais na linha de fluxo, pelas forças interfaciais, pontes de hidrogênio e outras interações moleculares.

Conceitualmente, a deformação plástica é a capacidade de o material ser moldado sem perder continuidade e de reter a forma. Segundo Popovics (1982), a plasticidade da pasta ocorre na ausência de excesso de finos, especificamente, devido à coexistência de forças de atração e repulsão entre as partículas. A atração ocorre devido às forças de Van der Waals e as forças de repulsão são decorrentes do mecanismo de carregamento eletrostático, causado por íons, alojados próximos à superfície de cada partícula de cimento, atraídos por íons adsorvidos da água. As partículas se mantêm a certa distância, com um mínimo de energia potencial, mantendo o equilíbrio entre a mobilidade das moléculas e a coesão.

Entretanto, para Taylor (1997), somente a teoria de que a pasta tem o comportamento de um fluido com aglomerado em imersão não explica a quebra da estrutura causada na pasta cisalhada. Conforme Tattersal & Banfill apud Taylor (1997), durante as reações iniciais, os flocos de partículas estão revestidos por uma membrana contínua de gel que, se destruídos

por cisalhamento, são substituídos por cada partícula revestida separadamente, mais ou menos eficazes em se ligar.

Em argamassa e concreto, a estrutura formada pelas forças interpartículas, pelos carregamentos eletrostáticos e pela tensão superficial do gel formado durante as reações iniciais entre o cimento e a água, são (parcial ou inteiramente) quebradas durante a mistura (Banfill, 2003). Assim, o comportamento reológico dos materiais, em especial do concreto fresco, como o objeto de estudo da pesquisa, é resultado da interação entre os efeitos de superfície das partículas finas e da água (incluindo ar) e os efeitos de massa das partículas de agregado graúdo (Bomble, 1967 apud Popovics, 1982 e Kreijger, 1968 apud Popovics, 1982).

As propriedades do concreto fresco dependem, dentre outras, do teor e composição de pasta na composição do concreto. Uma vez ocorrido o decréscimo da quantidade, se reduz o grau de dispersão das partículas, incrementando a interferência entre os grãos diminuindo a fluidez. Por outro lado, deve-se atender a um limite com o intuito de evitar que o concreto fresco exsude e segregue (concreto com muita água) ou torne-se muito coeso (concreto com alto consumo de cimento e/ou outros finos) (Popovics, 1982 e De Larrard, 1999).

Quanto ao consumo de cimento na mistura, segundo Popovics (1982) e Metha e Monteiro (1994) o comportamento da consistência do concreto é alterado em função dos seguintes fatores: (i) a maior quantidade de cimento é mais efetiva que o tipo de cimento; (ii) para concretos com consumo de cimento médio (240 a 360 kg/m³), mudanças no conteúdo de cimento afetam fortemente a quantidade de água requerida para determinada consistência, medida pelo ensaio de abatimento; (iii) o consumo de cimento elevado minimiza a influência do agregado e da água requerida do concreto.

Quando se trata dos agregados, a granulometria e o diâmetro máximo são especificados porque afetam tanto a quantidade de agregado a ser utilizado, como o consumo de cimento, de água, a trabalhabilidade, a bombeabilidade e a durabilidade do concreto. Em geral, para determinada resistência, se a relação água/cimento é adequada, uma maior variabilidade de distribuições granulométricas pode ser utilizada.

Quando se trata da composição granulométrica entre graúdo e miúdo, deve-se considerar o grau de empacotamento dos grãos, que é dependente do formato das partículas, das

porcentagens de cada tamanho de partícula na composição e da fração dominante de tamanho das partículas.

Segundo De Larrard (1999), o comportamento do volume de vazios da composição em função da relação entre as partículas finas e o total de partículas (finas e grossas) desencadeia o comportamento demonstrado na figura 3.7b. À medida que aumenta a porcentagem de finos na composição, em um primeiro estágio, o volume de vazios diminui. Os finos preenchem os vazios dos grãos mais grossos. No entanto, atingido certo limite, os finos começam a interferir na acomodação dos grãos mais grossos e o efeito de afastamento é preponderante, elevando o índice de vazios (figura 3.7a). Quanto mais vazios na composição granulométrica, menor é o empacotamento dos grãos.

Ressalta-se que De Larrard (1999), através da referenciada publicação, recuperou para os tempos atuais, o conhecimento sobre pastas, argamassas e concretos que vem sendo desenvolvido desde o início do século XIX (Coutinho apud Helene & Terzian, 1992) por autores precursores como Vicat, Ferét, Abrams, Lê Chatelier, Préaudeau, Paul Alexandre, Fuller, Thompson, Bolomey, Talbot e Richard, Lyse, Dreux, Faury, Joisel, Leclerc du Sablon, Vallete, Murdock e outros⁴. Juntamente com uma equipe do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LPCC) programou um *software* que realiza a dosagem de concreto.

Os autores citados, dentre eles, os que De Larrard (1999) se baseia, contribuíram de forma decisiva para o desenvolvimento da tecnologia do concreto, ora estudando a contribuição da água e do aglomerante, ora a contribuição do agregado e suas particularidades na composição das misturas para o atendimento de resistência e trabalhabilidade adequadas.

⁴ Um detalhado histórico sobre a Evolução dos Métodos de Dosagem é apresentada em Helene & Terzian (1992).

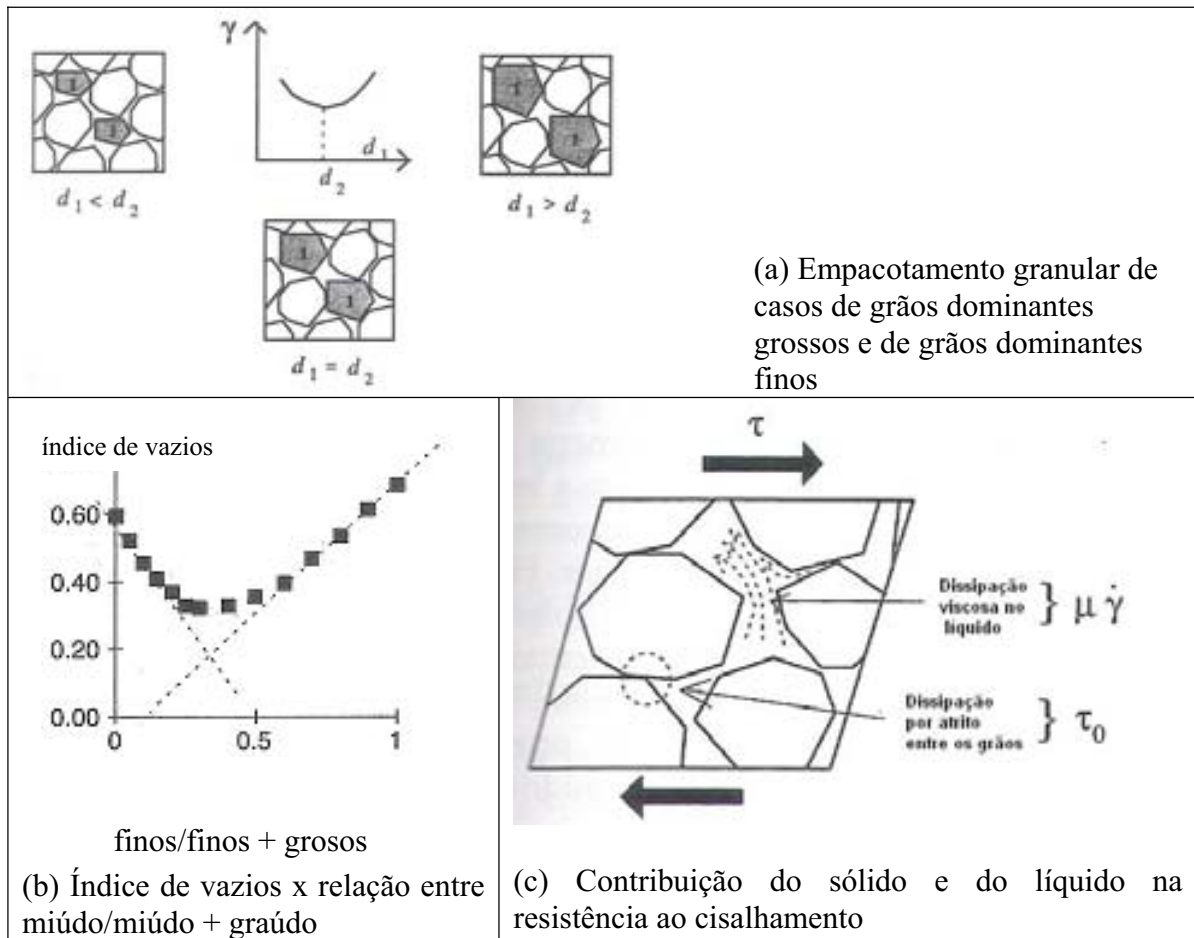
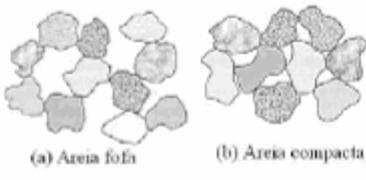
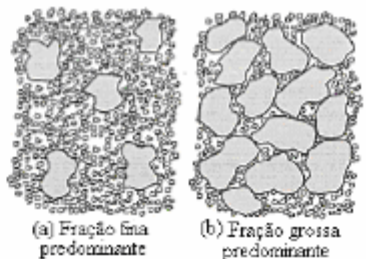
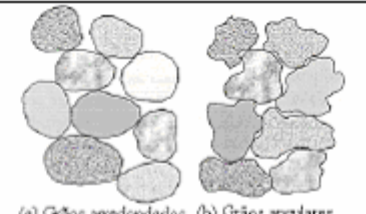


Figura 3.7 Contribuições do empacotamento granular e interação sólido e líquido na resistência ao cisalhamento (adaptado De Larrard, 1999).

O empacotamento granular aliado às interações das partículas sólidas e líquidas contribui na resistência ao cisalhamento do concreto (figura 3.7c).

A interação física entre as partículas confere maior ou menor atrito ao sistema, dependendo da compacidade, distribuição granulométrica e formato dos grãos, conforme demonstrado por Pinto (2000) apud Souza (2005) para areias, teoria que, tomadas as devidas proporções pode ser estendida à composição granulométrica graúdo/miúdo (tabela 3.1).

Tabela 3.1 Fatores com influência direta no ângulo de atrito das partículas da areia (adaptado Pinto, 2000 apud Souza, 2005).

Parâmetro	Justificativa	Representação
Grau de compactidade	A compactidade da areia governa o entrosamento entre as partículas. Como as areias têm intervalos de índices de vazios bem distintos, os ângulos de atrito são geralmente referidos à compactidade relativa das areias. Resultados experimentais mostram que o ângulo de atrito de uma areia, no seu estado mais compacto, é da ordem de 7 a 10 graus, maior do que o ângulo de atrito no seu estado mais fofo.	 <p>(a) Areia fofa (b) Areia compacta</p>
Distribuição granulométrica	Quanto mais bem distribuída granulometricamente é uma areia, melhor o entrosamento entre as partículas e, conseqüentemente, maior o ângulo de atrito. É interessante notar que o papel dos grãos grossos é diferente do desempenhado pelos finos. Em areias onde se predomina a fração fina em relação à fração grossa, as mesmas ficam envolvidas pela massa de partículas finas, identificando pouca colaboração no entrosamento. Do contrário, areias onde predomina a fração grossa em relação à fração fina, identifica-se maior grau de entrosamento, uma vez que a fração fina é suficiente para preencher os vazios localizados entre as partículas maiores, tendo como conseqüência o aumento do ângulo de atrito.	 <p>(a) Fração fina predominante (b) Fração grossa predominante</p>
Forma dos grãos	Areias constituídas de partículas esféricas e arredondadas têm ângulo de atrito sensivelmente menor do que as areias constituídas de grãos angulares. Este fato se justifica pelo maior grau de entrosamento identificado entre as partículas quando elas são irregulares	 <p>(a) Grãos arredondados (b) Grãos angulares</p>

A relação entre esses mecanismos, de forma simplificada, irá definir o consumo de pasta necessário para preencher os vazios dos grãos, minimizar o atrito entre as partículas e garantir a consistência e a capacidade do concreto se deformar plasticamente.

Além de todos os intervenientes apresentados que afetam a reologia do concreto, se não forem observados fatores como o tipo de betoneira, a incorporação de ar; a seqüência e a duração da mistura e a temperatura ambiente média, podem ocorrer variações não previstas nos resultados dos ensaios pretendidos (Ferraris & De Larrard, 1998).

3.3.3. MÉTODOS DE ENSAIOS PARA MEDIR PROPRIEDADES REOLÓGICAS.

Neste item serão discutidos alguns métodos de ensaios utilizados para a avaliação das propriedades reológicas de argamassas e concretos.

Hackley & Ferraris (2001) sugerem a classificação dos métodos reológicos em ensaios de fluxo confinado, fluxo livre, com vibração e reômetros rotacionais. A tabela 3.2 mostra a

fundamentação de cada um desses ensaios. No entanto, observa-se que o *Vane Test*⁵ não se encaixa em nenhuma das classificações.

Tabela 3.2 Fundamentação de ensaios de reologia (Koehler & Fowler, 2003).

Categoria	Definição
Fluxo Confinado	O material flui sob ação do peso próprio ou de uma pressão aplicada por um orifício.
Fluxo Livre	O material flui sob ação do peso próprio sem qualquer confinamento ou um objeto penetra no material por gravidade.
Com Vibração	O material flui sob a influência de uma vibração aplicada.
Reômetro Rotacional	O material é cisalhado entre duas superfícies paralelas, onde uma ou ambas são rotacionadas.

3.3.3.1. ENSAIO DE ABATIMENTO.

Segundo Petrucci (1987), o ensaio de abatimento significa medir a diferença entre a altura do molde tronco-cônico e o concreto após a remoção do molde. Esta diferença, chamada abatimento, é uma medida da propriedade consistência do concreto.

Navarro (1997) e De Larrard (1999) abordam o problema como um balanço de forças, no estado estacionário, sobre um elemento diferencial de volume no qual atuam forças de cisalhamento e gravitacional. Esta última é a principal responsável pelo escoamento do fluido. No equilíbrio, a força gravitacional deve ser igual à força de cisalhamento ou, de forma simplificada, a tensão de escoamento do material deve ser igual à tensão atuante devido à força gravitacional (figura 3.8).

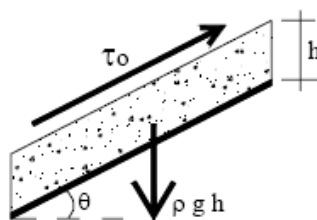


Figura 3.8 Caso geral do escoamento de um fluido em um plano inclinado (De Larrard, 1999).

Onde τ_0 : tensão de escoamento do fluido (KPa);

θ : ângulo de inclinação da base (°);

⁵ *Vane Test* ensaio detalhado no item 3.3.3.3.

ρ : massa específica do fluido (kg/dm^3);

h : espessura da camada (m);

g : aceleração da gravidade (m/s^2).

Autores como Tanigawa et al (1991) e Kurokawa et al (1994) realizaram a modelagem por elementos finitos do ensaio de abatimento, considerando o concreto como um corpo Binghamiano. Os autores concluíram que a mistura é controlada pela relação w/gM , onde w é a tensão de escoamento (kPa), M é a massa específica do concreto (kg/dm^3) e g é a aceleração da gravidade (m/s^2). Sendo assim, os autores citados convergem nas constatações.

Para o concreto convencional, é esperada forte correlação entre a medida de abatimento e a tensão de escoamento, o que foi avaliado em estudo realizado por De Larrard (1999) e confirmado por Walevik (2006), conforme as figuras 3.9.

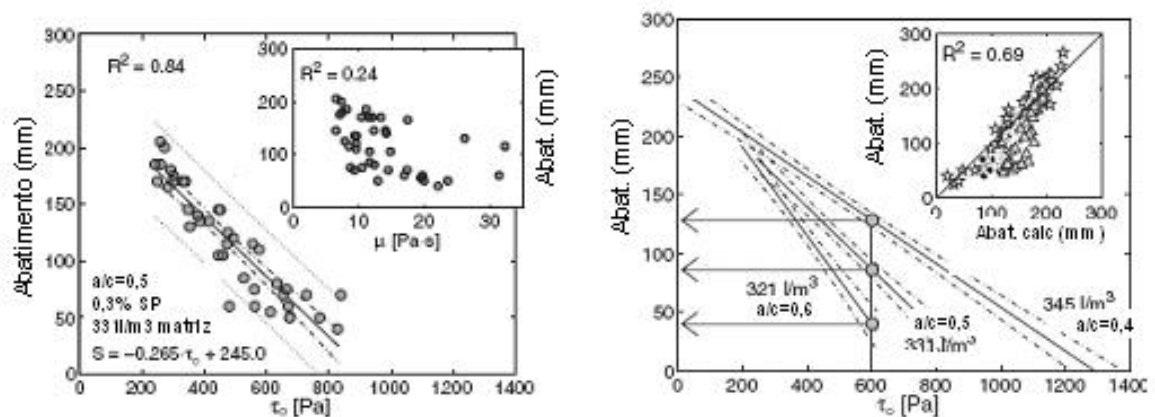


Figura 3.9 Correlação entre abatimento e tensão de escoamento para diferentes concretos (Walevik, 2006).

O colapso ou não da massa de concreto durante o ensaio de abatimento indica, qualitativamente, a coesão da mistura. Se o colapso ocorre (figura 3.10c), indica que há baixa coesão e pouca capacidade de deformações plásticas na mistura. Por isso, o concreto tem tendência à segregação.

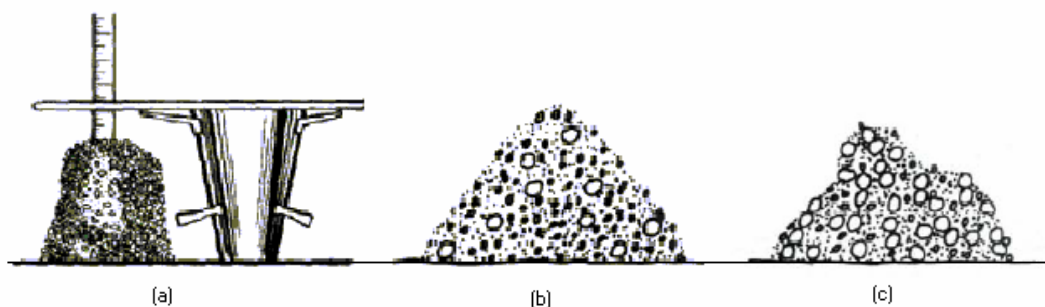


Figura 3.10 Colapso do ensaio de abatimento.

De uso extremamente difundido em campo, o equipamento para medida do abatimento pelo cone de Abrams é de fácil transporte e uso em campo, oferecendo apenas um valor físico simples para caracterizar a mistura de concreto. Recebe diversas críticas por um mesmo valor de abatimento representar diferentes consistências de concreto (Wallevik, 2006), além de possuir alta variabilidade.

Quanto à variabilidade, os testes de variância mostram resultados equivalentes aos ensaios de resistência à compressão, ar incorporado ou massa unitária do concreto. Segundo Popovics (1982), essa variabilidade é minimizada quando se faz o controle adequado durante a mistura do concreto, o mesmo operador realiza o ensaio e controla-se a qualidade e uniformidade dos materiais.

Em suma, Koehler e Fowler (2003) apresentam as desvantagens em utilizar o ensaio de abatimento:

- O abatimento não fornece uma indicação de viscosidade plástica;
- É um ensaio estático, então, os resultados são influenciados pela tixotropia (aumento aparente da viscosidade) do concreto;
- O ensaio não indica a facilidade com que o concreto pode ser transportado nas condições de lançamento, bem como na vibração;
- É mais indicado para o concreto convencional.

3.3.3.2. ABATIMENTO MODIFICADO

Os equipamentos para a medição da viscosidade e a tensão de escoamento, com exceção dos reômetros que são aplicáveis ao concreto e possuem custo mais elevado, são mais aplicáveis às pastas de cimento e argamassas. Isto ocorre justamente pela presença das

partículas maiores do agregado graúdo no concreto, o que aumenta demasiadamente as dimensões dos equipamentos (Popovics, 1982).

Por exemplo, um viscosímetro para concreto com diâmetro de partícula máxima de 25 mm requer dimensões de 10 a 20 vezes maiores que os tradicionais. Mesmo assim, o efeito de separação das partículas da mistura ainda teria que ser minimizado. Por isso, o esforço em desenvolver um ensaio que concilie a prática aos parâmetros fundamentais de reologia é tão importante.

O ensaio de abatimento modificado foi proposto por Ferraris & De Larrard (1998) como uma alternativa para a avaliação das propriedades do concreto no estado fresco em campo, baseado nos parâmetros de Bingham – viscosidade e tensão de escoamento – com a finalidade de caracterizar o concreto.

Para o desenvolvimento do método de ensaio, os resultados obtidos para a tensão de escoamento e viscosidade foram correlacionados com os obtidos pelo reômetro BTRHEOM (De Larrard et al, 1997) desenvolvido no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LPCC).

O BTRHEOM (figura 3.11) é um equipamento que mede a tensão de escoamento e a viscosidade do concreto. Consiste de um recipiente com fundo dentado e um disco que se apóia na amostra, aplicando a tensão de cisalhamento, com o princípio similar a um viscosímetro de pratos paralelos. É aplicável a concretos com abatimento maior que 80 mm e taxa de cisalhamento entre 5 e $8s^{-1}$.

Dentre os fatores que podem afetar os resultados do ensaio no reômetro estão: tamanho máximo do agregado graúdo, segregação e taxa de cisalhamento.

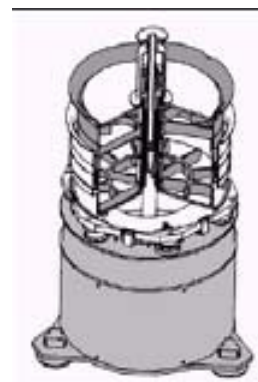


Figura 3.11 Reômetro BTRHEOM (De Larrard et al, 1997).

O equipamento para a realização do ensaio de abatimento modificado (figura 3.12) é simples e requer pequenas modificações na base padronizada do ensaio de abatimento e a confecção do prato, pelo qual é possível a verificação do momento em que o concreto sofre deformação e atinge a marca de 100 mm.

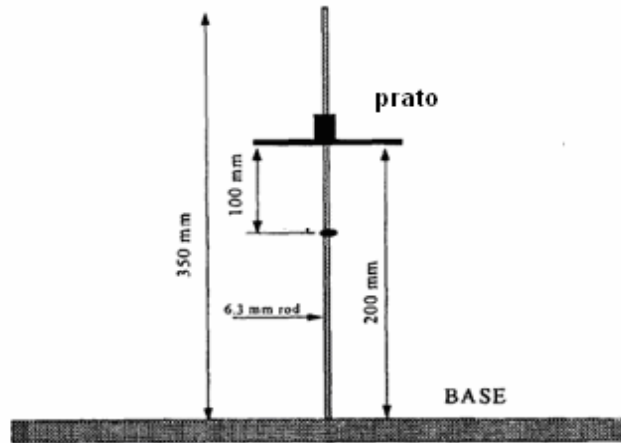


Figura 3.12 Equipamento do ensaio de abatimento modificado e esquema de realização do procedimento (Ferraris & De Larrard, 1998).

Os parâmetros de reologia obtidos por este ensaio são os seguintes:

- **a tensão de escoamento** - relacionada ao abatimento, segundo a equação 3.5 proposta por Hu (De Larrard, 1994), para concretos com viscosidade plástica entre 0 e 300Pa ou, a equação 3.6, modificada por Ferraris & De Larrard (1998), para 0 a 2000Pa:

$$\tau_0 = \frac{\rho}{270}(300 - s) \quad \text{Equação 3.5}$$

$$\tau_0 = \frac{\rho}{347}(300 - s) + 212 \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde: τ_0 : tensão de escoamento (Pa);

ρ : massa específica do concreto (g/dm^3);

s : abatimento modificado (mm).

- **a viscosidade plástica** - controlada pelo intervalo de tempo para a deformação completa da massa da mistura, para concretos com abatimento entre 120 e 260 mm, é regida pelas equações 3.7 e 3.8.

$$\eta = \rho T 1,08 \cdot 10^{-3} (s - 175) \quad \text{para } 200 < s < 260 \text{ mm} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$\eta = 25 \cdot 10^{-3} \rho T \quad \text{para } s < 200 \text{ mm} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde: η : viscosidade (Pa.s);

ρ : massa específica do concreto (g/dm³);

T : tempo de deslocamento da massa de concreto em uma altura de 100 mm (s);

s : abatimento modificado (mm).

Os resultados obtidos no desenvolvimento do abatimento modificado mostraram boa correlação entre os resultados teóricos (equações 3.5 a 3.8) e os medidos experimentalmente, como se verifica na figura 3.13. Foram baseados em concretos dosados com agregado graúdo de diâmetro máximo de 10,0 mm, areia arredondada bem graduada e Cimento Portland Tipo I/II.

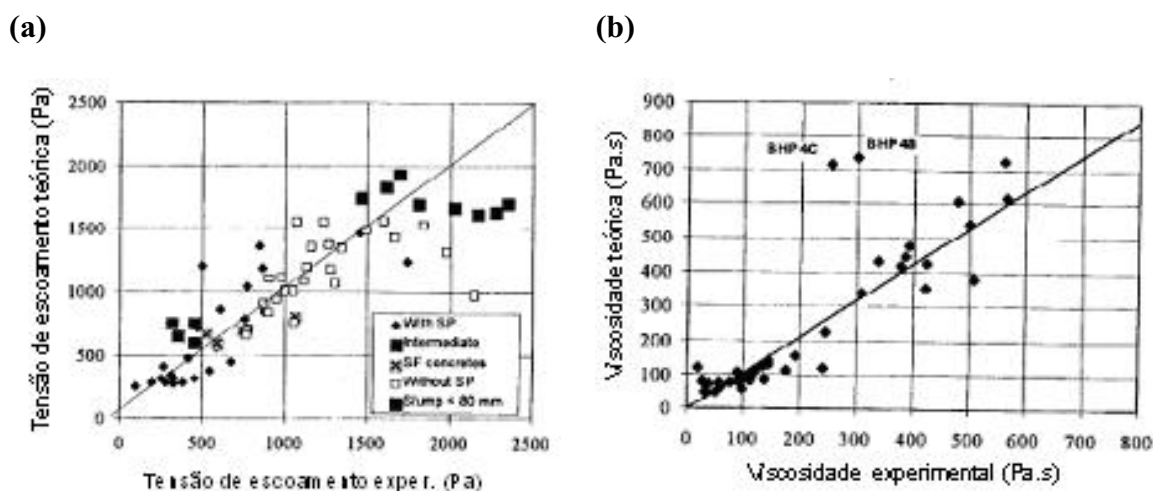


Figura 3.13 Correlação entre valores de tensão de escoamento experimentais e teóricos (a) e viscosidade experimental e teórica (b) (adaptado de Ferraris & De Larrard, 1998).

Uma das críticas a esse ensaio é a precisão da medida de tempo, em função da reação do operador. Ferraris & De Larrard (1998) verificaram que, em queda livre, o prato percorre a distância de 100 mm em 0,14s. As medidas realizadas por diferentes técnicos se mantêm entre 0,16 e 0,15s. Além disso, o atrito entre o concreto e a haste fixa e o peso do prato poderiam influenciar o tempo de abatimento do concreto. No entanto, provou-se em estudo realizado pelos mesmos autores que esses efeitos são desprezíveis.

Segundo Koehler e Fowler (2003), as desvantagens em utilizar o ensaio de abatimento modificado são:

- É um ensaio estático e por isso os resultados não levam em conta a tixotropia do concreto ou a capacidade do concreto sob vibração;
- O ensaio ainda requer validação para outros materiais.

3.3.3.3.VANE TEST

Os reômetros rotacionais medem os parâmetros fundamentais de reologia: a tensão de escoamento e a viscosidade. São equipamentos que podem ser aplicados a concreto de baixa trabalhabilidade a concretos auto-adensáveis. No entanto, as limitações quanto ao tamanho necessário para a construção de um reômetro para medir os parâmetros fundamentais do concreto são responsáveis pelo não uso tradicional desse ensaio em laboratório, como já discutido anteriormente no item 3.3.3.2.

Segundo Ferraris (1999), em um reômetro com cilindros coaxiais, a diferença entre o raio do cilindro interno e externo deve ser de cinco vezes o diâmetro máximo da partícula do concreto medido.

Um reômetro pode ser composto por pratos paralelos ou por um cilindro circunscrito em outro, como mostra a figura 3.14. No entanto, com o intuito de minimizar a turbulência na concentração causada pela introdução do cilindro interno pode-se substituir o cilindro por uma palheta.

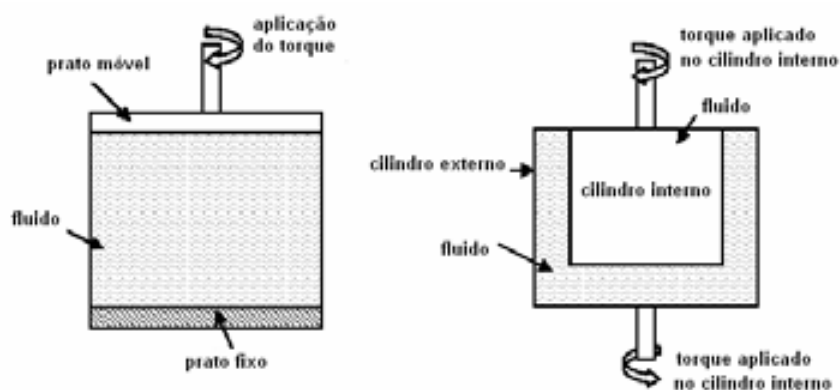


Figura 3.14 Esquema do reômetro de pratos paralelos e de cilindro coaxial (Ferraris, 1999).

Com o mesmo princípio de um reômetro de base fixa, mas em menor escala, o *Vane Tester* é um equipamento bastante utilizado em mecânica dos solos para a avaliação dos

parâmetros reológicos de suspensões concentradas. Têm alto potencial de uso para concentrações que apresentam significativa tixotropia (Boger & Dzuy, 1983 apud Souza, 2005).

Algumas adaptações no tamanho do recipiente e da palheta, realizadas por pesquisadores da Universidade de Brasília, no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) viabilizaram a aplicação deste método de ensaio para a mensuração da tensão de escoamento de pastas e argamassas.

Considerado que a tensão de escoamento é uma propriedade intrínseca ao material, fato comprovado por estudo realizado por Turian, et al (1997), é uma propriedade independente da geometria e do tipo de equipamento ou do modelo reológico adotado, o *Vane Tester* tem sido bastante utilizado para a caracterização de argamassas, de diferentes composições e finalidades, no Laboratório Ensaio de Materiais (LEM) da UnB. Tem gerado diversos trabalhos científicos, como os realizados por Alves et al (2002), Santos (2003), Bauer et al (2004), Paes (2004), Souza (2005) e Bauer et al (2007) na determinação da tensão limite de escoamento de argamassas. Para microconcretos tem-se o trabalho de Austin et al (1999) apud Souza (2005). O aparato é descrito na figura 3.15.

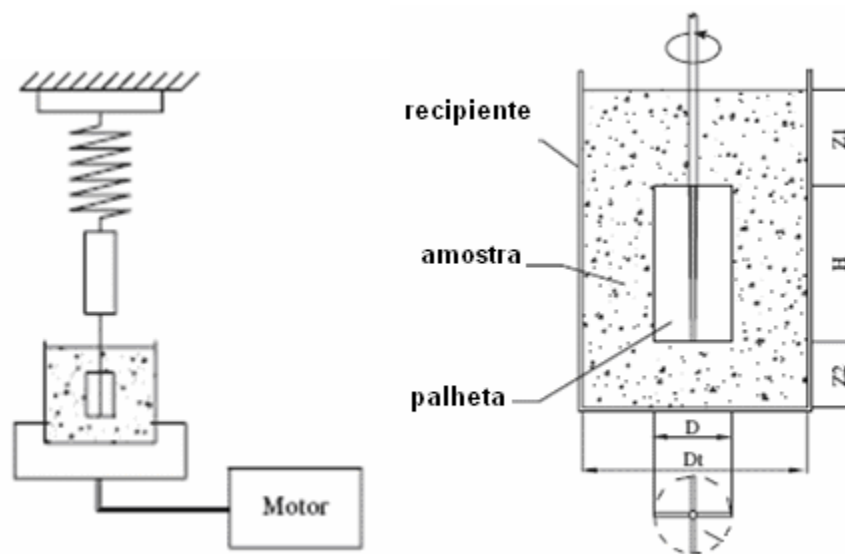


Figura 3.15 Esquema gráfico do equipamento e da execução do ensaio (adaptado de Bauer, et al, 2007).

A profundidade da suspensão e o diâmetro do recipiente devem ser duas vezes maiores que o comprimento e o diâmetro da palheta - limitação importante para minimizar os efeitos causados por qualquer rigidez na mistura (Dzuy & Boger, 1983 apud Souza, 2005). Outro

parâmetro a ser observado é a dimensão da palheta, que deve ter, no mínimo, 20 vezes a dimensão máxima das partículas presentes na suspensão (Palmeira, 2001 e Bauer et al, 2007).

A palheta é imersa em um recipiente preenchido com a mistura. Então, é rotacionada a uma velocidade constante e o momento torçor requerido para manter o movimento constante é medido em função do tempo.

Em um primeiro momento, a amostra ao redor das abas da palheta deforma-se elasticamente, com um comportamento linear, enquanto o material entre as abas move-se juntamente com a palheta. O comportamento linear do material é justificado pelo “estiramento” da rede de ligações em três dimensões, formada pelas interações interpartículas até a sua quebra (Popovics, 1982). Finalmente, com a quebra total da rede de ligações, ocorre o colapso e o material pode ser considerado escoado. No entanto, o material reformula a rede de ligações entre as partículas de forma que se tem um pico no gráfico do torque versus tempo, responsável por descrever o comportamento da suspensão durante o ensaio. Na figura 3.16 é apresentada uma típica curva do ensaio de *Vane*.

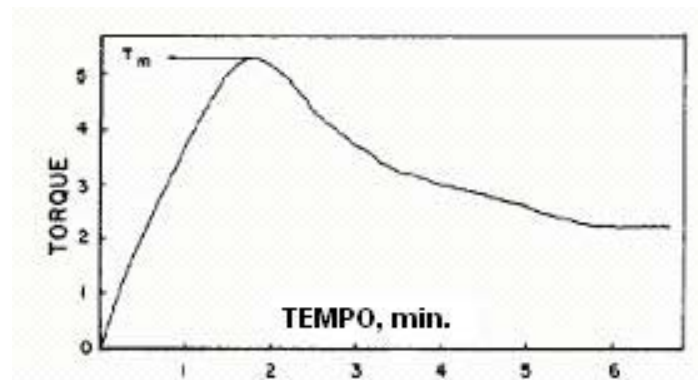


Figura 3.16 Típica curva torque – tempo observada no ensaio de *Vane* (adaptado Dzuy & Boger, 1983 apud Souza, 2005).

A figura 3.16 demonstra o comportamento da pasta ou da argamassa em cisalhamento, ao longo do tempo, durante o ensaio de *Vane*. Do trecho 0 a T_m , verifica-se o comportamento linear. Atingido o pico, no torque máximo (T_m), ocorre a ruptura e o torque decresce.

O *Vane Test* toma como hipótese que o efeito parede da mistura não afeta os resultados, podendo ser negligenciado. Tal comportamento foi confirmado por Saak et al (2000), em estudo em pastas de cimento.

O torque é calculado como se a palheta tivesse as dimensões de um cilindro e a tensão gerada devido ao cisalhamento é distribuída uniformemente ao longo dessa superfície. Além disso, como a tensão de cisalhamento na parte superior da palheta é desconhecida, adota-se a aproximação, que é razoável para palhetas de pequenos diâmetros, que a tensão de cisalhamento é uniformemente distribuída em ambas as superfícies, e que as tensões nas superfícies superior e inferior são iguais à tensão na lateral da palheta. Assim, a equação que traduz o torque máximo é a 3.9.

$$T_m = \frac{\pi D^3 \tau_c}{2} \left(\frac{H}{D} + \frac{2}{3} \right) \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde T_m : torque (kgf.cm) que é igual a $T_m = k \cdot \hat{\alpha}$;

K: constante da mola (kgf.cm/°)

$\hat{\alpha}$: ângulo (°);

D: diâmetro da palheta (cm);

H: comprimento da palheta (cm);

τ_c : tensão de cisalhamento (Pa).

O torque máximo também pode ser obtido experimentalmente como a soma algébrica das contribuições do cisalhamento exercido pela superfície lateral (T_s) e das duas superfícies superior e inferior da palheta (T_e), conforme a equação 3.10.

$$T = T_s + 2T_e \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde T : torque máximo (kgf.cm);

T_s : torque na superfície lateral (kgf.cm);

T_e : torque das superfícies superior e inferior (kgf.cm).

A tensão de escoamento é fortemente influenciada pela quantidade de água da mistura, dosagem de finos e pela distribuição granulométrica dos agregados e aglomerantes, dentre outros fatores menos expressivos.

3.3.4. SEGREGAÇÃO

A segregação acontece quando grandes porções de agregado graúdo se acumulam, causando a deficiência em outras partes da massa de concreto.

Segundo Aitcin (2000), a segregação pode ser induzida por erros como dosagem inadequada de plastificante, presença de certa quantidade de água de lavagem deixada no tambor do caminhão-betoneira ou aumento no teor de umidade de areia, ocorrências observadas na dosagem do concreto em central. Ainda, o mesmo autor afirma que, para minimizar a segregação, de forma geral é importante aumentar a viscosidade da mistura melhorando a estabilidade da mistura. Isto pode ser conseguido através da redução de água ou de plastificante, pelo incremento da quantidade de finos ou pela utilização de aditivos coloidais contra a separação da água de mistura.

Segundo Popovics (1982) e Metha & Monteiro (1994) existem dois tipos de segregação: (i) a interna ocorre durante o adensamento e as partículas mais grossas e pesadas se acumulam no fundo da peça concretada, e (ii) a externa ocorre no lançamento, resultado da movimentação imprópria do material e/ou da dosagem inadequada. Nesse caso, as partículas rolam separadamente do restante da argamassa na periferia da mangueira, quando bombeado. Isto também resulta no acúmulo de material rico em partículas finas em outras regiões.

Os fatores que mais influenciam na segregação interna estão relacionados à ligação e atrito entre pasta e partículas de agregado, a coesão e a capacidade de deformação plástica da pasta de cimento e da argamassa, respectivamente, e a interferência entre as partículas no concreto fresco. No caso da segregação externa, os fatores que mais contribuem para o fenômeno são a coesão e a capacidade de deformação plástica ineficiente (Popovics, 1982).

São pontos importantes a considerar, que podem causar o aumento da tendência à segregação:

- Incremento no diâmetro máximo da partícula acima de 25 mm;
- Utilização de granulometria de agregados descontínua;
- Decréscimo na quantidade da fração fina da areia;
- Forma desfavorável das partículas;
- Decréscimo no consumo de cimento;
- Consistência muito seca ou muito fluída.

Safawi et al. (2005), estudando a vibração de concretos auto-adensáveis, utilizou o tempo Vebê para avaliar a tendência à segregação da mistura e observou que são parâmetros diretamente relacionados. Em concordância com Aitcin (2000), o autor diz que,

simplificadamente, é possível dizer que misturas com baixa viscosidade segregam mais facilmente que misturas com alta viscosidade.

3.3.4.1. EXSUDAÇÃO

Segundo Wainwright & Ait-Aider (1995), a exsudação é o movimento de água para a superfície do concreto lançado e compactado, sendo um tipo específico de segregação. É o fenômeno que força a água a subir pelo assentamento dos sólidos da mistura, somente observado se a taxa de exsudação é superior à taxa de evaporação da água na superfície do concreto. Ocorre intensamente nos momentos iniciais após o lançamento do concreto e, após o início de pega, mantêm-se a uma taxa uniforme. A exsudação cessa quando o movimento da água é bloqueado pelos grãos dos produtos de hidratação, pela efetividade das ligações entre as partículas sólidas ou por ambos. A figura 3.17 mostra o comportamento característico da taxa de exsudação de concretos de diferentes consumos de cimentos.

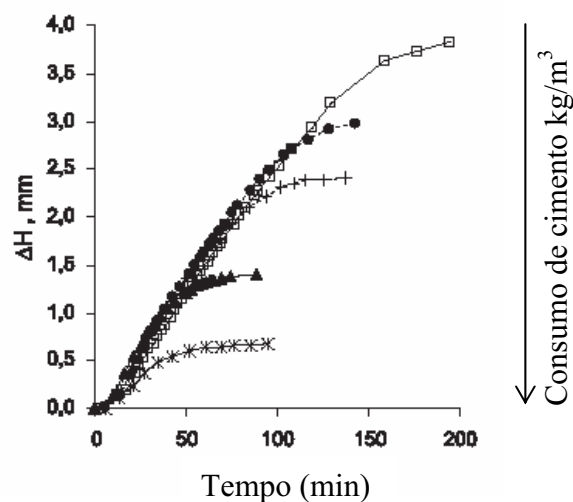


Figura 3.17 Comportamento característico da taxa de exsudação de concretos de diferentes consumos de cimentos (Josserand et al., 2006).

A figura 3.17 demonstra que quanto maior o consumo de cimento por metro cúbico de concreto, menor é a capacidade de exsudação ao longo do tempo.

Geralmente, o mecanismo da exsudação é explicado pela teoria da consolidação pelo peso próprio, utilizado também em mecânica dos solos. Essa teoria preconiza que as partículas se acomodam, expulsando a água pelos poros capilares até a superfície. Partículas com

maior densidade tendem a acomodar-se mais rapidamente ao longo do tempo (Caputo, 1988) – modelo de consolidação pelo peso próprio.

No entanto, Tan et al. (1987) apud Josserand et al. (2006), alia o modelo de consolidação pelo peso próprio, mas adiciona a hipótese da compressibilidade do esqueleto granular, decorrente da cinética da hidratação. Explica que a inclusão dos parâmetros de tempo no mecanismo permite a captação de vários efeitos, especialmente, da quantidade de cimento e da temperatura. Constatou-se que os produtos da hidratação também são responsáveis pelo bloqueio físico do movimento da água para a superfície e conseqüente diminuição na taxa de exsudação (Josserand et al., 2006).

Reafirmado por Josserand et al. (2006), Popovics (1982) Wainwright & Ait-Aider, (1995) e Topçu & Elgün (2003) afirmam que o tipo de cimento, especialmente os que possuem maior quantidade de C_3A e C_4AF , o maior consumo de cimento e a diminuição na relação água/cimento provocam a diminuição da exsudação. Cimentos com maior quantidade de C_3A e C_4AF têm a formação dos produtos de hidratação em menor tempo, quando considerada a cinética de hidratação. Sendo assim, o fechamento dos poros capilares acontece de forma mais rápida, diminuindo a tendência de exsudação.

Os resultados de Wainwright & Ait-Aider (1995) mostraram que o incremento no consumo de cimento em 100 kg/m^3 define uma redução de 60% na taxa de exsudação e 50% na capacidade de exsudação. Essa redução é explicada pelo aumento da área superficial e na maior reatividade associada ao maior consumo de cimento (figura 3.18).

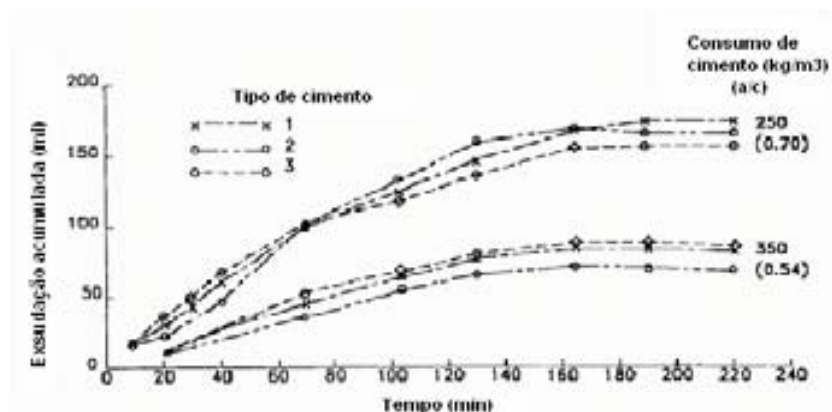


Figura 3.18 Curvas exsudação-tempo para diferentes tipos de concreto e consumos de cimento (Wainwright & Ait-Aider, 1995).

A figura 3.18 demonstra que o maior consumo de cimento tem maior relevância na diminuição da tendência da capacidade de exsudação ao longo do tempo do que o tipo de cimento.

Segundo Topçu & Elgün (2003), concretos que apresentam menor exsudação são os que possuem forças de superfície entre a água e as partículas de agregado mais expressivas.

Atualmente, não são muito comuns estudos que relacionam a investigação dos agregados à exsudação. No entanto, Popovics (1982) e Mehta & Monteiro (1994), afirmam que a granulometria e o tipo de agregado afetam a exsudação. Agregado contendo alta quantidade de finos aumenta a estabilidade da mistura, mas é preciso preocupar-se com o aumento na demanda de água para a obtenção de determinada trabalhabilidade. Dependendo da magnitude do aumento da quantidade de água, incrementa-se a exsudação.

Svermova et al. (2003), pesquisaram a influência da dosagem de filler calcário, de superplastificante e de modificadores de viscosidade na exsudação e concluíram que, dentre os três, a quantidade de filler calcário é o fator de maior significância.

Portanto, o que se observa é que o aumento da quantidade de finos, o tipo de agregado e a sua distribuição granulométrica e o consumo de cimento são os fatores que mais influenciam na tendência à exsudação.

Dentre as conseqüências da exsudação e, principalmente, da taxa de ocorrência desse fenômeno no concreto, tem-se a retração plástica, as fissuras de assentamento plástico quando lançado, maior porosidade do concreto ocasionando problemas de durabilidade, dificuldades de acabamento e, durante o transporte, o entupimento da mangueira quando o concreto é bombeado.

3.4.BOMBEABILIDADE

A bombeabilidade é a capacidade de o material ser transportado através de um duto sob pressão, de forma a manter suas características e homogeneidade para ser adequadamente aplicado (Popovics, 2003).

Introduzido nos Estados Unidos em 1933, é o método construtivo mais usado no mundo para lançar o concreto. É indicado quando o *layout* da obra possui limitações de espaço e acesso.

De maneira específica, o concreto trabalhável para bombeamento necessita, no mínimo, de três qualidades da mistura fresca:

1. ter suficiente capacidade de se deformar plasticamente ao ponto de suportar a sucção da bomba;
2. ser coeso o bastante para não exsudar ou segreggar excessivamente durante o bombeamento;
3. limitar ao máximo o atrito ao longo da parede da mangueira e internamente no concreto.

Segundo as recomendações do ACI 304.2 / 71, o concreto para bombeamento deve ter consistência e coesão adequadas. Especial atenção deve ser dada para a argamassa e para a quantidade e tamanho do agregado graúdo. Quanto ao formato dos grãos, afirma que existe influência na definição do traço. No entanto, tanto as partículas arredondadas quanto as achatadas podem ser bombeadas.

Segundo Popovics (1982), considerando que o concreto fresco é um corpo Binghamiano, a capacidade de bombeamento pode ser medida através da equação 3.11 que depende das características físicas do equipamento e das propriedades reológicas do concreto.

$$\Delta p = \frac{\left(\frac{8\mu\bar{v}}{D_p} + 1,33\tau_0 \right) 4l}{D} \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde: Δp : pressão no final da mangueira (kPa);

τ_0 : tensão de escoamento (kPa);

μ : viscosidade do concreto fresco (kPa.s);

D_p : diâmetro da mangueira (m);

\bar{v} : velocidade média do concreto na tubulação (m/s);

l : comprimento da mangueira (m);

D : diâmetro máximo do agregado (m).

Esta equação possui limitações devido ao comportamento dilatante do concreto, sendo que ainda não é possível medir a tensão de escoamento e a viscosidade durante o processo de bombeamento, tornando a equação 3.11 qualitativa. Nesse caso, observações de pressão de

bombeamento realizadas na betoneira e na parede da mangueira, junto com observações do concreto no final da linha são mais realistas (Popovics, 1982).

O transporte do concreto fresco dentro da mangueira é submetido ao *plug flow*, comportamento no qual se verifica o transporte da mistura como um sólido central fluindo com alta tensão através de uma fina camada lubrificante (Santos, 2003). Por isso, o fluxo de concreto fresco é a combinação da viscosidade da camada de lubrificação e do atrito das partículas sólidas com a parede da mangueira. Portanto, a existência de uma boa camada de lubrificação é essencial para que se mantenham as características do concreto homogêneas na saída da mangueira.

Ao longo da mangueira, as diferentes fases do concreto assumem velocidades relativas diferentes, tanto na seção transversal do material quanto nas suas mudanças de direção. Aliada ao comportamento dilatante do concreto fresco, gera-se certa resistência ao fluxo. Esse comportamento, por vezes, ocasiona o entupimento da mangueira.

A resistência por atrito, causada primariamente pelas partículas de agregado graúdo no concreto, tem grande dependência da quantidade relativa e qualidade da argamassa do concreto (Popovics, 1982). Isto porque, quando a argamassa é suficiente, ela preenche os vazios dos agregados e os separa. Além disso, existe água suficiente para produzir uma boa capacidade de lubrificação. Nesta condição, o concreto é dito saturado. Do contrário, o concreto é classificado como insaturado. O limite entre as duas condições se aproxima da relação a/c 0,45, segundo o mesmo autor.

Quando o concreto está na condição saturada, a pressão axial, provocada pela bomba, e radial, ao longo das paredes da mangueira, são praticamente iguais. Assim, a resistência por atrito independe da pressão aplicada e pode ser negligenciada quando comparada ao valor encontrado para concretos na condição insaturada.

O fator que mais influencia a resistência ao fluxo do concreto é a quantidade de água no concreto, que afeta tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade do concreto.

Uma diferença de relação água/cimento de 0,6 para 0,3 pode levar ao incremento da resistência ao fluxo de 20 para 300. 10^3 kg/cm^2 . Outros fatores que influenciam a saturação são: conteúdo de cimento, total de partículas finas no concreto (incluindo cimento), tamanho máximo da partícula, forma da partícula e consistência do concreto (Popovics, 1982).

Os aditivos redutores de água diminuem a resistência ao fluxo quando usados sem mudança no conteúdo de água, ou seja, para produzir concretos mais fluidos. Em contraponto, incrementam a resistência ao fluxo quando usados na redução do conteúdo de água. Isto ocorre devido a maior dilatância (interferência das partículas) no concreto.

Pode-se utilizar o princípio de perda de carga para entender o fenômeno. Na condição saturada, a maior distância de bombeamento é alcançada quando a pressão na mangueira é igual à zero. Neste caso, a distância é diretamente proporcional a pressão aplicada pela bomba e pelo diâmetro da mangueira e inversamente proporcional à resistência por atrito.

Quando o concreto está na condição insaturada, a máxima distância é regida por uma equação logarítmica, justificada basicamente pelo alto atrito entre as partículas e a parede da mangueira e pelo fato da pressão radial ser consideravelmente menor que a pressão axial.

Dessa forma, na condição insaturada, a pressão requerida para transportar o concreto é muito maior que a pressão de bombeamento, causando o entupimento (Popovics, 1982).

Em concreto com baixa retenção de água⁶, a pressão de bombeamento força o movimento da água mais rapidamente que o conjunto, provocando o aparecimento de uma porção de concreto seco. Isto também pode ocasionar o bloqueio da mangueira. Esse fenômeno é conhecido como filtragem.

Concretos com boa capacidade de retenção de água devem ter quantidade suficiente de partículas finas no concreto (cimento + finos do agregado). Por outro lado, o maior consumo de cimento e de partículas finas aumenta a resistência ao fluxo do concreto.

3.5. AREIA BRITADA

Segundo Ahn (2000), Quiroga & Fowler (2001), Almeida (2005) e Santos (2006), a areia britada possui características diferentes da areia natural, principalmente, se forem levados em consideração o elevado teor de materiais finos (limitado a 12% segundo NBR 7211/2005), distribuição de tamanho de partículas, características de forma e rugosidade das partículas e tipos litológicos.

⁶ Capacidade de retenção de água é capacidade do concreto manter a consistência ou a trabalhabilidade, quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, seja por evaporação ou pela absorção por algum componente.

Esse tipo de agregado é obtido através da britagem de rochas. Segundo Isaia et al (2005), a britagem é realizada por meio de três estágios (na grande maioria das pedreiras), partindo do bloco de rocha que passa por cominuição, até atingir dimensão menor que 0,075 mm. Pode sofrer classificação para aumentar o potencial granulométrico e, como última etapa do processo é, modernamente, submetida ao britador de eixo vertical - VSI, que proporciona partículas de forma mais equidimensionais e textura superficial menos áspera.

A areia britada é um material com produção controlada. Por isso, Ishikawa & Camarini (2005) apresentam a variação controlada da distribuição granulométrica como uma característica positiva. Com isso existe um favorecimento da constância da trabalhabilidade e das demais propriedades do concreto ou argamassa produzido com este material.

Observa-se, nas pedreiras, a montanha de pó-de-pedra, material sem nenhum tratamento de granulometria ou forma, que se acumula como resíduo do peneiramento da rocha na produção de agregado graúdo. Este material é considerado pela indústria extrativista como um material de difícil colocação no mercado da construção civil, utilizado em grande parte na pavimentação. Tem baixo valor agregado, além de ser considerado como rejeito (Pinheiro, 2003 e Gonçalves, 2005). No processo de produção de brita, algumas pedreiras têm aproveitado os finos do pó-de-pedra, que em média representam 18% do peso do material, na produção de argamassa. Exemplos dessa aplicação podem ser vistos em São Paulo, Distrito Federal e em Minas Gerais, além de outros Estados não citados aqui.

As características da areia britada justificam a possível elevação da demanda de água decorrente da presença de material fino em grande proporção na granulometria, agravada pela elevação do atrito interno das partículas sólidas, angulosas e rugosas, que culminam na elevação do consumo de cimento dos concretos, para uma determinada resistência à compressão (Cremonini, et al, 2005).

No entanto, é possível que esses inconvenientes sejam revertidos com o tratamento da forma das partículas, adequação da granulometria da areia britada e o uso de aditivos químicos.

3.5.1. INFLUÊNCIA DA AREIA BRITADA NO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO

Diversos estudos foram realizados para a viabilização do uso da areia britada. No entanto, em sua maioria, na ausência de aditivos químicos, prioriza-se a composição de uma parcela de areia natural e outra de areia britada, como em Costa et al (2005); Silva et al. (2005) e Costa & Bastos (2005). Tais autores concluíram que a utilização da areia britada é viável desde que sejam realizados os devidos ajustes na dosagem do concreto, para minimizar os efeitos negativos que este material pode ocasionar.

Resultados diferenciados têm sido obtidos por métodos de dosagem distintos, o que se comprova ao analisar, Sbrigh (1975) que utiliza o método de Faury, Montegro Filho & Machado (2005) que contemplam o Método ITERS-IPT-EPUSP descrito por Helene & Terzian (1992) e Silva et al (2005), pelo método de empacotamento compressível.

Bastos (2005) demonstrou que a adição de areia britada do tipo litológico basáltico, em substituição parcial à areia natural, provocou menor relação a/c na dosagem do concreto. Conseqüentemente, a utilização da areia britada proporcionou maior resistência à compressão para a mesma condição de trabalhabilidade. A autora justifica a menor relação água/cimento devido a menor absorção de água pela areia britada.

Na mesma direção, estudo realizado por Gonçalves (2005), em estudo do concreto de baixo impacto ambiental, verificou após análise estatística dos resultados, que o tipo de areia, natural ou britada, influencia significativamente no desenvolvimento da resistência, sendo que a mistura com areia britada obteve maior resistência à compressão, considerando como variáveis independentes a relação água/cimento e o tipo de areia.

Diante do exposto, verifica-se que o efeito positivo da areia britada nas propriedades do estado endurecido está comprovado (Batista, 2004; Bastos, 2005 e Gonçalves, 2005), sendo necessário demonstrar estudos que demonstram as propriedades do concreto com areia britada no estado fresco.

3.5.2. INFLUÊNCIA DA AREIA BRITADA NO CONCRETO EM ESTADO FRESCO

É claro que, em termos reológicos, o comportamento do concreto dosado com areia britada pode ser influenciado pelas suas características.

Concretos dosados com areia britada podem ter o valor da tensão limite de escoamento, comandada principalmente pelo atrito interno dos grãos maiores da areia, mais elevado em decorrência do atrito interno gerado. Acredita-se que o atrito interno é tanto maior quanto mais angulosos e com menor grau de esfericidade forem os grãos dos agregados (Santos, 2006).

Uma maior coesão da mistura pode elevar também a tensão de escoamento da mesma. A coesão do concreto é conferida, principalmente, pelo teor de partículas finas presentes na massa fresca. Geralmente, como o teor de partículas finas das areias britadas é excessivamente alto, esta propriedade pode ser incrementada.

O alto teor de partículas finas e a alta coesão podem conferir um comportamento tixotrópico ao concreto no estado fresco, e uma significativa perda de abatimento com o tempo, dificultando o transporte, lançamento e adensamento do concreto.

Ishikawa & Camarini (2005), na produção de argamassas mistas para assentamento, constataram que, apesar da areia britada apresentar teor de material passante da peneira 200 de 8 a 16 vezes maior que a areia de rio, os grãos finos britados auxiliaram na plasticidade da argamassa, não absorvendo água a mais para envolver as partículas.

De maneira equivalente, Angelim (2000), em trabalho que estudou a influência da adição de finos na consistência de argamassas, constatou a diminuição da propriedade com a adição de finos calcários e pressupõe que o fenômeno ocorre devido à ação plastificante dos mesmos.

Campiteli et al (2005), no estudo da argamassa de revestimento, acreditam que o teor de finos do agregado miúdo e/ou cimento, conjugado à dosagem adequada de água, seja necessário para a superação do atrito interno gerado pelas partículas. Assim, se houver falta de finos, o concreto se apresentará pouco coesivo, com tendência à segregação. Por outro lado, com a dosagem elevada da fração fina, a exigência de água será majorada, aumentando o consumo de cimento, para uma mesma relação água/cimento. Essa

discussão culmina na suposição de que exista uma relação de compromisso entre o teor de finos do agregado e do cimento com o consumo de água, para uma dada consistência.

Todos os conceitos reológicos apresentados no item 3.2.2 – Fatores que influenciam o comportamento reológico do concreto – principalmente baseados no estudo da argamassa de revestimento podem ser extrapolados ao comportamento do concreto no estado fresco, resguardados os efeitos de massa do material.

Em especial, podem ser consideradas as constatações de Ferraris E De Larrard (1998), Oliveira et al (2000) e De Larrard & Sedran, (2002) sobre a influência do teor de pasta de cimento, responsável em grande proporção pelo comportamento reológico do concreto (realizadas as devidas ressalvas quanto ao efeito massa) e de Popovics (1982) e Cabrera & Donza (1997) sobre a neutralização do atrito entre os grãos de agregado em concretos com elevado consumo de cimento ou pasta, prevalecendo o efeito lubrificante do cimento e da água.

No sentido de minimizar a influência das características negativas da areia britada no concreto em estado fresco, algumas pesquisas têm sido realizadas. Alguns exemplos são apresentados a seguir.

Almeida & Silva (2005) pesquisaram as conseqüências do tratamento de forma das partículas de areia britada pelo britados do tipo VSI. Utilizaram a razão de aspecto (adimensional) e o fator de forma, também chamado de grau de esfericidade (adimensional), por meio das equações 3.12 e 3.13:

$$esfericidade = \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{Área}}{\text{perímetro}^2} \quad \text{Equação 3.12}$$

$$razão.aspecto = \frac{\text{largura}}{\text{comprimento}} \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde: Área (m²);

Perímetro (m);

Largura (m);

Comprimento (m).

Os autores concluíram que a utilização do britador do tipo VSI favoreceu, claramente, o formato das partículas. Foram consideradas variáveis independentes deste estudo o tipo de areia: britada, padronizada IPT e pó-de-pedra. No gráfico da figura 3.19, observa-se que,

para os ensaios de forma e razão de aspecto, os valores da areia britada, denominada Barmac, apresentam-se muito próximos da areia padronizada IPT, tornando as partículas mais equidimensionais, o que minimiza os efeitos nas propriedades no estado fresco do concreto.

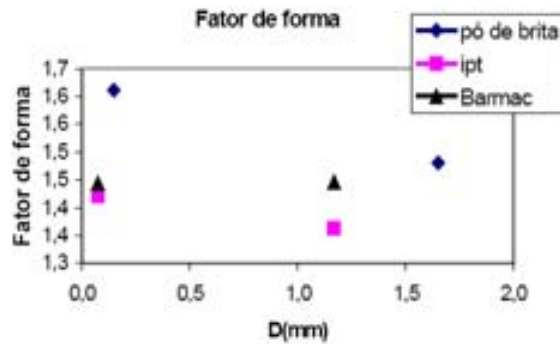


Figura 3.19 Avaliação do fator de forma de diferentes tipos de areia.
(Almeida & Silva, 2005)

Quanto à granulometria dos agregados, Quiroga & Fowler (2004), afirmam que a otimização da distribuição granulométrica da composição brita e areia britada com ou sem elevado teor de finos – até 20% de partículas menores que 0,150 mm (MF) - requer cerca de 17% a 8% de material retido entre as peneiras de abertura 4,8 mm (N4) a 1,2 mm (N16), respectivamente, como pode ser observado na figura 3.20.



Figura 3.20 Comparação entre composição granulométrica com e sem finos (Quiroga & Fowler, 2004).

Na figura 3.20, a curva 0,45 é considerada a distribuição granulométrica ótima pelos autores. Para distribuições granulométricas com ausência de microfinos (partículas menores de 0,150 mm), é recomendada a manutenção da porcentagem retida nas peneiras de abertura 0,3 mm (N50), 0,150 mm (N100) e 0,075 mm (N200) aproximadamente em 7%. Quando a composição granulométrica apresentar até 20% de microfinos, os autores

indicam a diminuição gradual das partículas retidas nas peneiras de abertura 0,3 mm (N50) de 7% até 0% na peneira de abertura 0,075 mm (N200).

Quanto ao excesso de material fino na composição granulométrica, apesar das recomendações das normas brasileira (NBR 7211/05) e americana (ASTM C33) limitarem a 12 e 7% o teor de finos, artigos técnicos realizados pelo *Centro Internacional para Pesquisas sobre Agregados* comprovam a possibilidade de utilização de até 20% de teor de finos em concreto (Research Report ICAR 104-1F) realizando dosagem do concreto adequada, otimização da composição granulométrica e uso de aditivos de ação plastificante.

Portanto, Quiroga & Fowler (2004), Almeida & Silva (2005) e diversos artigos publicados pelo *Centro Internacional para Pesquisas sobre Agregados* (ICAR) demonstram que as propriedades do concreto contendo areia britada podem ser melhoradas, com as devidas adequações, sejam elas a melhoria da composição granulométrica, a dosagem adequada, o uso de aditivos ou o beneficiamento do formato das partículas.

3.6. ADITIVO DE AÇÃO PLASTIFICANTE

O estudo dos aditivos de ação plastificante na pesquisa é de fundamental importância porque, apesar de serem conseguidos concretos com areia britada (com alto teor de finos) com adequada resistência e trabalhabilidade, os aditivos possibilitam a minimização do consumo de cimento e/ou a melhora da trabalhabilidade dessas misturas.

Os aditivos de ação plastificante podem ser compostos por ingredientes a base de melanina sulfonada formaldeído (SMF), naftaleno formaldeído condensado (SNF) ou por polímeros acrílicos (AP), sendo os dois primeiros chamados de aditivos de 2ª geração e o último, de 3ª geração. Nesta pesquisa foi usado um aditivo de 2ª geração. Portanto, a ênfase da revisão bibliográfica neste item será dada aos aditivos a base de naftaleno formaldeído condensado (SNF).

Podem ser utilizados para os seguintes propósitos:

- aumento da trabalhabilidade, sem mudança da composição da mistura para favorecer as características que influenciam o lançamento do concreto;
- redução da água de mistura e da relação a/c para aumentar a resistência e a durabilidade, para uma dada consistência;

- redução da água e do cimento para uma dada trabalhabilidade, diminuindo o consumo de cimento e reduzindo fissuração, retração e esforços térmicos causados pelo calor de hidratação do cimento.

A principal diferença entre um aditivo plastificante e um superplastificante está na efetividade de seu desempenho. Por exemplo, o acréscimo de abatimento é de, aproximadamente, 150 a 200 mm para o superplastificante, enquanto atinge cerca de 70 mm para os plastificantes. Outro exemplo de maior desempenho dos superplastificantes está na redução da água requerida para determinado abatimento: até 30% para o superplastificante contra 12% para o plastificante (Aitcin, 2000 e Taylor, 1997).

Os aditivos plastificantes podem até atingir o desempenho dos aditivos superplastificantes através de altas dosagens, mas resultam efeitos negativos na incorporação de ar, queda na resistência do concreto e retardo no tempo de pega. Por outro lado, aditivos superplastificantes têm expressiva perda de abatimento em 30 a 40 minutos após a sua aplicação no concreto (Aitcin, 2000).

O mecanismo de ação do sistema água-cimento-aditivo pode ser explicado por **interações físicas e químicas**, sendo as primeiras mais relevantes na dispersão das partículas de cimento (Veronez, 2006).

As **interações físicas** são explicadas pela **adsorção das moléculas** de aditivo ao redor das partículas de cimento, devido às forças de Van der Waals. Segundo Taylor (1997), Collepardi (1998) e Rixom & Mailvaganam (1999), tal mecanismo de ação, principalmente dos aditivos a base de SNF e SMF, é explicado pelo desenvolvimento de forças de atração entre as partículas de cimento que causam a aglomeração e são neutralizadas pela adsorção dos polímeros aniônicos. Na presença de sulfatos, ocorre a inibição da adsorção das moléculas de aditivo nas fases aluminatos (C_3A e C_4AF) – que reconhecidamente ocorre em maior quantidade - permitindo o aumento da adsorção nos silicatos (C_3S e C_2S). Assim, as partículas de água ficam livres para facilitar a movimentação das partículas de cimento.

O mecanismo de ação dos aditivos também pode gerar **forças repulsivas** entre as partículas de cimento, sejam de **repulsão eletrostática ou de repulsão estérica**. Os dois tipos de repulsão incrementam o potencial zeta das partículas, que é o potencial elétrico no plano de cisalhamento caracterizado como o limite entre a camada compacta e a camada

difusa ao redor de uma partícula em movimento⁷ (Papini et al, 2002 apud Santos, 2006). A figura 3.21 apresenta a configuração que se forma em partículas em solução, como a partícula de cimento em meio aquoso.

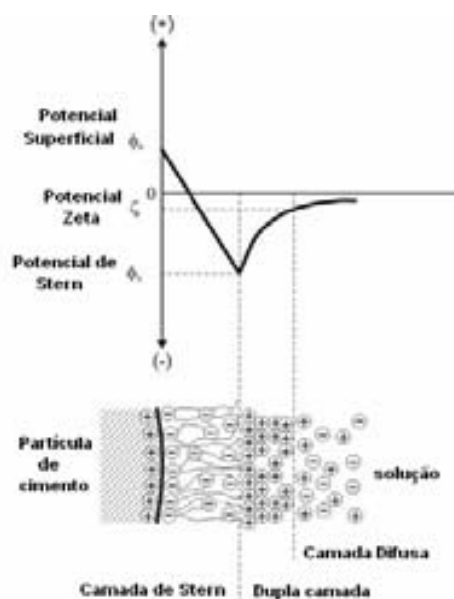


Figura 3.21 Formação da dupla camada elétrica e do potencial zeta (adaptado Uchikawa et al, 1997 apud Veronez, 2006).

Como se observa na figura 3.21, na camada de Stern o potencial elétrico decresce linearmente, seguido de uma curva exponencial e o limite entre a camada compacta (dupla) e a camada difusa aponta o potencial zeta. Quanto mais negativo o potencial zeta, maior a dispersão entre partículas de mesmo carregamento. (Papini et al, 2002 apud Santos, 2006). Portanto, o seu incremento facilita a manutenção da repulsão eletrostática (em menor escala) ou estérica provocada pelo aditivo.

Comprovando o incremento do potencial zeta no mecanismo de atuação dos aditivos, Daimon & Roy apud Taylor (1997), estudando a sua influência através do incremento de aditivo a base de lignosulfonados, verificaram valores entre -30 e -40 mV das partículas de cimento. O potencial zeta e a adsorção de lignosulfonados, com conseqüente dispersão dos grãos, têm ótima correlação com o aumento da fluidez. Dentre os dois fatores, o potencial zeta mostrou-se de influência mais significativa.

Na **repulsão eletrostática**, as moléculas de aditivos são atraídas e adsorvidas pela superfície carregada das partículas de cimento, conferindo-lhes a mesma carga e

⁷ As partículas em meio aquoso tendem a se tornar carregadas ionicamente. Somado ao movimento oscilatório chamado Browniano, devido à existência de um campo elétrico, formam a dupla camada elétrica.

provocando repulsão e dispersão da mistura (figura 3.22). Com o decorrer da hidratação do cimento, ainda no estado fresco, os polímeros precipitam junto com os produtos hidratados e perdem efeito (Rixom & Mailvaganam, 1999).

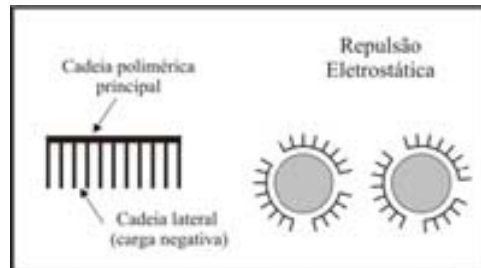


Figura 3.22 Mecanismo de ação por repulsão eletrostática de aditivos a base de naftaleno e melanina (adaptado de Collepari et al., 1999 apud Veronez, 2006).

Juntamente com o mecanismo de repulsão eletrostática, os aditivos de 3ª geração têm como mecanismo principal de ação a **repulsão estérica**, uma barreira produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero, impedindo a aproximação das partículas, como pode ser observado na figura 3.23. Tal barreira prolonga o efeito do aditivo (Uchikawa et al, 1997). Esses aditivos incrementam o potencial zeta das partículas.

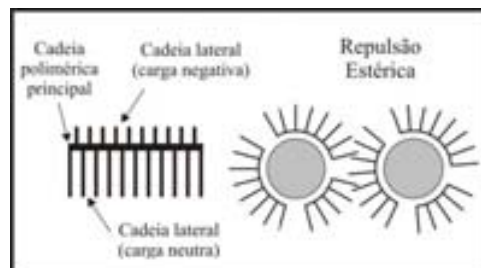


Figura 3.23 Mecanismo de ação por repulsão estérica de aditivos policarboxilatos (adaptado de Collepari et al., 1999 apud Veronez, 2006).

Quando se trata das **interações químicas** entre partículas de cimento e aditivo, estas ocorrem pela **químisorção** entre as partículas de cimento e as moléculas de aditivo: a formação de íons complexos entre o aditivo e o Ca^{++} . A formação dos íons reduz a concentração de Ca^{++} e contribui para o retardo da pega (Jolicouer & Simard, 1998 apud Veronez, 2006).

Portanto os aditivos, no caso de 2ª e 3ª geração, podem diminuir a floculação das partículas de cimento através de três formas (Taylor, 1997, Rixom & Mailvaganam, 1999 e Uchikawa et al., 1997): adsorção física, repulsão por cargas elétricas ou químisorção.

O uso de aditivos pode minimizar os efeitos negativos da incorporação de areia britada no concreto. A inclusão de areia britada no concreto foi analisada por Quiroga & Fowler (2001). Segundo os resultados obtidos na pesquisa, a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes são eficientes na dosagem de concretos com areia britada para uma mesma consistência. Notaram que o tipo litológico, a forma e a textura dos grãos da fração fina do agregado influenciam a dosagem de aditivo, sendo que a litologia granítica é a que exige maior consumo de aditivo e a calcária é a que exige menor consumo de cimento.

Além disso, os autores concluíram que i) a dosagem dos aditivos de ação plastificante é maior quando se compõe areia natural e britada, ii) a eficiência do aditivo depende do tipo de finos no concreto, e iii) a dosagem requerida do aditivo, quando utilizada areia britada calcária, não atingiu o limite da recomendação do fabricante.

3.7. A DOSAGEM DO CONCRETO

Historicamente, os métodos de dosagem têm sido incrementados em função das necessidades impostas pela crescente inovação tecnológica e pelo surgimento de novos materiais para a composição do concreto. Como exemplo, pode-se citar o aparecimento de muitos métodos ou a adaptação de outros que contemplam as baixas relações água-cimento e a incorporação das adições e aditivos para a mistura de concreto de alto desempenho (Cremonini et al, 2001).

A dosagem de concreto é uma atividade que requer o balanço entre razoável economia e adequação ao uso da mistura no estado fresco e no estado endurecido. Portanto, independente do método de dosagem a ser adotado, para a definição dos traços adequados, deve-se prever, no mínimo, os parâmetros e/ou propriedades que afetam a relação a/c, o consumo de cimento, a consistência, a resistência e a durabilidade do concreto. Para tanto, a seleção de componentes do concreto é fundamental e deve privilegiar a qualidade dos materiais.

Concluída a etapa de seleção dos materiais, a próxima tarefa é a escolha de um método de dosagem, que de maneira geral, baseia-se em especificações de trabalho para a definição dos traços. Alguns consideram dados experimentais e outros são empíricos. Geralmente, contemplam os seguintes passos:

- seleção do diâmetro máximo do agregado;
- seleção do teor de ar incorporado;

- definição do conteúdo da água de mistura;
- escolha da relação a/c, por critérios de durabilidade e de resistência;
- cálculo do consumo de cimento por m³ de concreto;
- quantidade de agregado miúdo e graúdo;
- escolha do tamanho da betoneira;
- ajuste à umidade do agregado;
- realização da mistura de ajuste.

A definição da quantidade de agregado nas dosagens pode ser definida segundo dois princípios de cálculo que, apesar de terem focos diferentes, devem resultar em concretos adequados, a saber: princípio baseado no Módulo de Finura e princípio Geométrico (Popovics, 1982). Independente da escolha, o objetivo é a obtenção de um concreto com trabalhabilidade adequada e suficientemente denso.

Segundo Popovics (1982), a seleção dos agregados segundo o princípio baseado no Módulo de Finura é a favor da obtenção da resistência à compressão especificada com o menor custo. Considera-se que, para atender as propriedades reológicas do concreto, é necessário o uso da maior quantidade de agregado graúdo e o mínimo de agregado miúdo. Critica-se esse princípio pelo fato de que, em alguns casos, pode-se fazer a seleção de uma granulometria ideal e contínua, mas com alta taxa de material fino. Dessa forma, o consumo de água seria maior e, conseqüentemente, para atender a resistência especificada, o consumo de cimento também sofreria aumento, elevando o custo da mistura.

Em contrapartida, o princípio Geométrico considera que o volume absoluto do agregado é obtido da subtração do volume do cimento, água e ar do volume unitário de concreto, ou seja, o volume restante é o volume absoluto de agregado a ser utilizado. Este princípio assume que a pasta irá preencher os vazios do agregado miúdo, a argamassa irá preencher os vazios do agregado graúdo e a composição granulométrica do concreto terá maior empacotamento possível.

Exemplos de métodos de dosagem que utilizam os princípios do módulo de finura e geométrico são o ACI 211.1 e o Faury, respectivamente.

O que se observa com recorrência, é que, quando o agregado grosso e o agregado fino são avaliados separadamente, como pelo método de seleção do agregado baseado no módulo de finura, nem sempre se alcança um concreto trabalhável. Em contrapartida, a prática geométrica pode, em alguns casos, elevar o custo da mistura pela correção do traço ser realizada com a adição de pasta de cimento.

Outras práticas podem ser verificadas, como o Eurocode, que define curvas limites para a combinação de agregado graúdo e miúdo, que é detalhado em Quiroga & Fowler (2004).

Surge, então, como uma alternativa, a seleção direta do teor de argamassa para adequar a mistura às propriedades reológicas requeridas, aplicada no Método ITERS-IPT-EPUSP, que tem como ponto favorável principal a definição do teor de argamassa especificamente para aqueles materiais e condição de manuseio e lançamento do concreto, apresentando baixo a médio consumo de cimento (Sales, et al, 2005):

Modernamente, De Larrard (1999) aperfeiçoou métodos de dosagem, baseando-se no empacotamento compressível granular (MEC), que aplicado por Silva, et al (2005), para o concreto de desempenho normal ($f_{ck} = 30\text{MPa}$ e abatimento previsto = 85 mm), na primeira betonada com traço determinado pelo programa de dosagem BETONLAB, foi obtida resistência abaixo do previsto e abatimento adequado. Os resultados mostram que, para concreto convencional com areia britada, o MEC é confiável, ressaltando que também são necessários ajustes em betoneira para se alcançar os resultados desejados.

Ressalta-se que os métodos de dosagens utilizados nesta pesquisa (ACI, Faury e IPT-ITERS-EPUSP) e a memória de cálculo do projeto experimental 1 estão detalhados no Anexo A. Os gráficos para o cálculo dos traços obtidos no projeto experimental 2 são apresentados no Anexo B.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi elaborado visando estudar o comportamento do concreto com areia britada, analisando parâmetros capazes de interferir nas propriedades da mistura no estado fresco. Portanto, as variáveis independentes foram selecionadas levando em consideração que, fundamentalmente, seriam intervenientes na trabalhabilidade: forma das partículas do agregado miúdo e composição granulométrica do agregado miúdo, relação água/cimento e utilização ou não de aditivo de ação plastificante.

Cabe salientar que este estudo é de caráter exploratório, buscando identificar tendências no comportamento e nas propriedades do concreto, no estado fresco, dosado com areia britada.

Os ensaios que compõe o programa experimental foram executados no Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília.

4.1. PROJETOS EXPERIMENTAIS

O programa experimental foi dividido em dois projetos experimentais, apresentados na figura 4.1 e descritos nos itens a seguir:

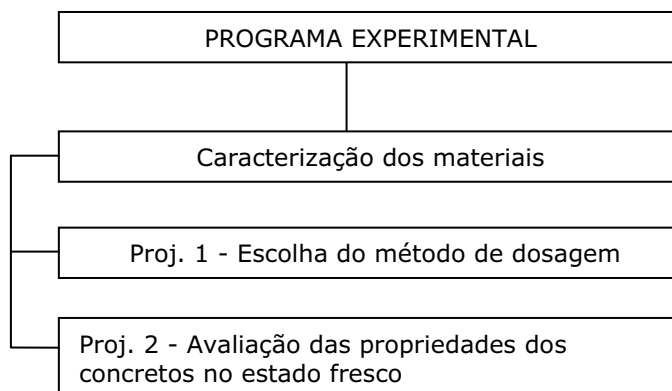


Figura 4.1 Programa experimental.

- *Caracterização dos materiais* - os materiais utilizados para a composição do concreto foram caracterizados através dos ensaios pertinentes, recomendados pelas Normas Brasileiras e adequados para cumprir os objetivos da pesquisa. Ressalta-se a importância desta etapa uma vez que a dosagem experimental baseia-se nos resultados de ensaios, ou seja, é etapa preliminar à fase de mistura do concreto em laboratório.

- *Projeto experimental 1: escolha do método de dosagem* – foram avaliados 3 (três) métodos de dosagem, comumente utilizados no mercado e no meio científico em âmbito internacional. O objetivo do projeto experimental 2 foi escolher o método de dosagem, verificando a influência da forma dos grãos nos parâmetros de dosagem definidos segundo os diferentes métodos, para determinada consistência, medida pelo ensaio de abatimento e para o atendimento de resistência à compressão de, no mínimo, 20 MPa. Portanto, para minimizar a influência do teor de material ultrafino (partículas menores que 0,075 mm) em relação à composição granulométrica das areias, esse teor foi fixado em 3,9% da massa total – resultado obtido na caracterização da areia natural através do ensaio NBR NM 45/03 - Determinação do material passante na peneira 200 por lavagem. A escolha do método de dosagem foi baseada, no mínimo, nas seguintes avaliações: menor consumo de cimento obtido para dada condição de abatimento; atendimento da resistência à

compressão mínima de 20 MPa do concreto; avaliação do preenchimento dos vazios dos agregados e envolvimento das partículas graúdas pelo teor de argamassa e análise visual do concreto durante a dosagem experimental quanto à exsudação e segregação.

- *Projeto experimental 2: Avaliação das propriedades dos concretos no estado fresco:* definido o método de dosagem, as variações da forma do grão da areia britada, do teor de material fino na composição granulométrica da areia, da relação água/cimento e do uso ou não de aditivo de ação plastificante foram avaliadas no estado fresco, para determinada consistência medida pelo ensaio de abatimento (120 mm), adequada à condição de bombeamento.

Neste projeto experimental 2, investigou-se a influência do teor de finos da areia britada nas propriedades do concreto no estado fresco, comparando-a com concretos dosados com areia natural.

Os teores de material fino da areia, definido segundo a NBR 7211/05 como partículas inferiores a 0,150 mm, foram variados em 0%, 10%, 18% e 25% em relação ao consumo de agregado miúdo, definido no traço do concreto.

O limite máximo da faixa de variação do material fino foi definido em função do estudo da distribuição granulométrica dos diferentes tipos de areia britada fornecidas pelo fabricante. Confrontou-se, assim, o teor de finos comercial às limitações recomendadas por normas técnicas como a NBR 7211/05 e com a NP EM 933/02 que prevêem o teor de finos totais de 12% e 15% em massa de agregado miúdo (Cuchierato et al, 2005), respectivamente. Em contrapartida, o limite mínimo de 0% tem a finalidade de demonstrar as conseqüências da dosagem de concretos trabalháveis sem adição de finos.

As relações água/cimento variaram entre 0,45 e 0,65, em massa. O valor superior limitou-se a atender a recomendação da NBR 12655/05, que define a relação a/c 0,65 como máxima recomendada, considerando a classe do cimento C30, ambiente urbano, de classe de agressividade moderada (II) e microclima de ambientes secos.

Além disso, devido à alta porcentagem de material fino na dosagem do concreto - somadas as parcelas referentes ao cimento e ao agregado miúdo - com a finalidade de diminuir o consumo de cimento, foi avaliado o comportamento do concreto com aditivo de ação plastificante.

As seguintes propriedades do concreto foram avaliadas no estado fresco:

- Consistência pelo abatimento do tronco de cone;
- Tensão de escoamento e viscosidade pelo método de Abatimento modificado, proposto por Ferraris & De Larrard (1998);
- Teor de ar incorporado em concreto fresco;
- Massa específica do concreto;
- Exsudação;
- Tensão de escoamento da argamassa do concreto sem aditivo.

No estado endurecido, foi avaliada a resistência à compressão com a finalidade de verificar o atendimento da resistência mínima de 20 MPa e a influência do aumento do teor de finos da areia nesta propriedade.

4.2. VARIÁVEIS DE ESTUDO DOS PROJETOS EXPERIMENTAIS

As variáveis de estudo são apresentadas nos fluxogramas das figuras 4.2 e 4.3.

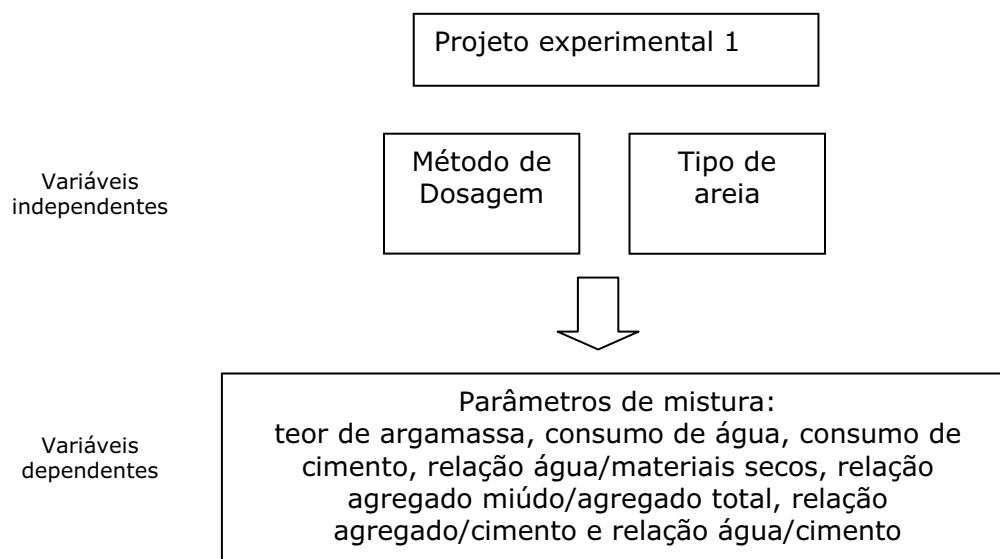


Figura 4.2 Projeto experimental 1.

Com os resultados obtidos no projeto experimental 1, realizou-se a definição dos traços dos concretos estudados no projeto experimental 2.

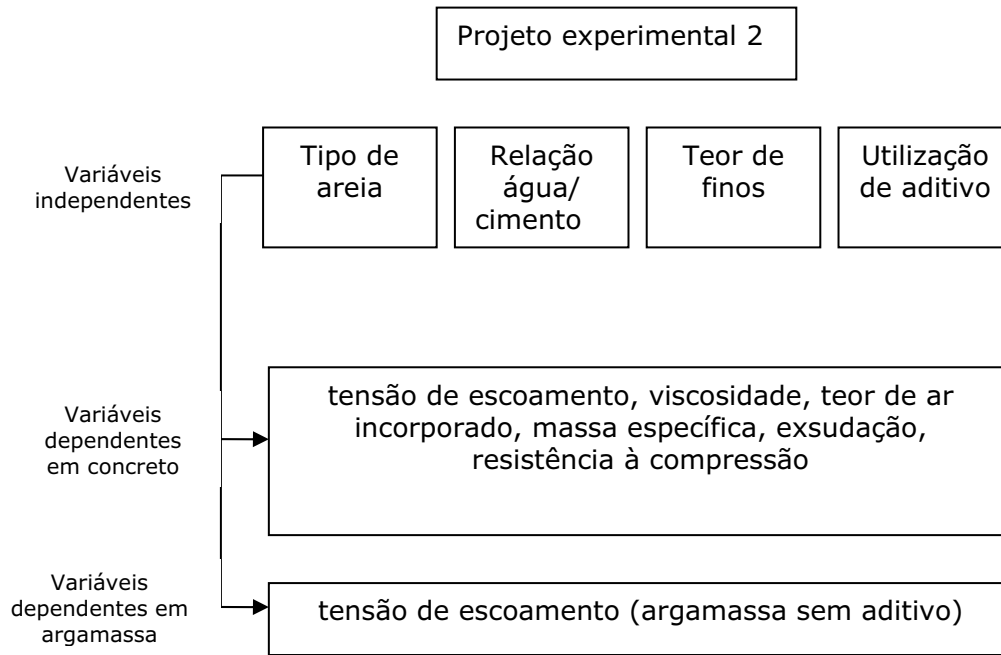
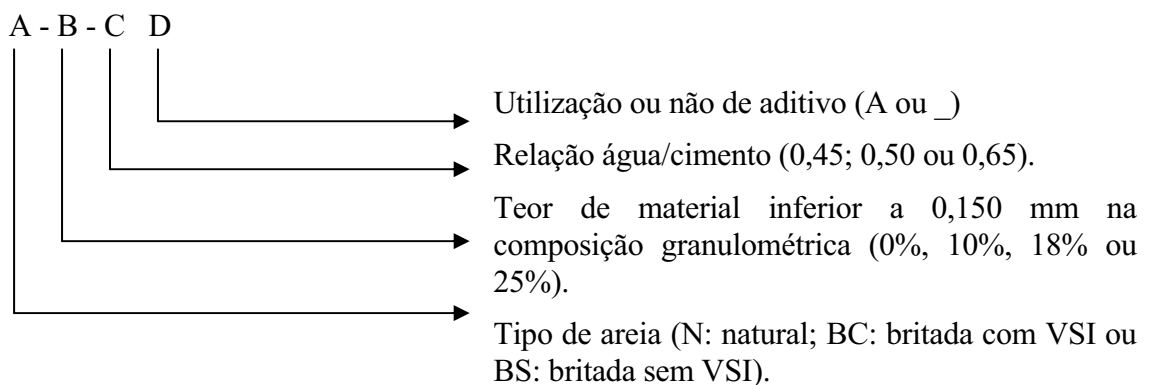


Figura 4.3 Projeto experimental 2.

4.3. NOMENCLATURA ADOTADA.

A nomenclatura adotada é importante para que as principais características dos concretos sejam identificadas. Os concretos são nomeados pelo tipo de areia, teor de material fino na composição granulométrica (material inferior a 0,150 mm, segundo classificação da NBR 7211/05), pela relação água/cimento da mistura e pelo uso ou não de aditivo de ação plastificante, como descrito na seqüência:



Exemplo

N-0-0,5: concreto dosado com areia natural, 0% de material inferior a 0,150 mm na composição granulométrica, relação água/cimento igual a 0,5 e sem aditivo de ação superplastificante.

BC-10-0,65A: concreto dosado com areia britada com VSI, 10% de material inferior a 0,150 mm na composição granulométrica, relação água/cimento igual a 0,65 e com aditivo de ação plastificante.

4.4. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Os concretos foram dosados com cimento, agregado graúdo – brita de litologia calcária; agregado miúdo de dois tipos: natural de rio quartzosa e britada de litologia calcária; água potável da rede pública e aditivo de ação plastificante.

Salienta-se que o agregado graúdo foi recebido em dois lotes, sendo o primeiro lote utilizado no Projeto experimental 1e o segundo lote no Projeto experimental 2. No entanto, eventuais diferenças entre os materiais não afetaram os resultados, pois os projetos experimentais são independentes.

Todos os materiais são comercializados na região do Distrito Federal e a caracterização está apresentada a seguir.

4.4.1. CIMENTO

Para a dosagem dos concretos, foi utilizado o cimento do tipo CP II F-32, tipo no qual, segundo a NBR 11578/91 deve ter adição de 6 a 10% de filler calcário, de lote fabricado pela empresa CIPLAN (Cimento Planalto S.A.), localizada no Distrito Federal. Esse tipo de cimento é indicado para aplicações gerais. Pode ser usado, dentre outras aplicações, para o preparo de concreto simples, armado, projetado, rolado, magro, concreto-massa, elementos pré-moldados e artefatos de concreto, dentre outros. Logo, tal cimento é adequado para a utilização na pesquisa.

Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física e química do material, respectivamente. Os resultados foram fornecidos pelo fabricante.

Tabela 4.1 – Caracterização física do cimento CP II F 32 utilizado nos projetos experimentais.

Característica		Resultados	Limites (NBR 11578/91)	Método de ensaio
Massa unitária		1,12 g/cm ³	--	NBR NM 23/03
Massa específica		3,10 g/cm ³	--	NBR NM 23/03
Blaine		4733 cm ² /g	--	NBR NM 76/98
Finura (#200)		5,8 %	≤ 12,0 %	NBR 11579/91
Água de consistência normal		29,2	--	NBR NM 43/03
Tempos de pega	Início	210 min	≥ 60 min	NBR NM 65/03
	Fim	280 min	≤ 600 min	
Resistência à compressão	3 dias	25,2MPa	≥ 10 MPa	NBR 7215/96
	7 dias	27,6 MPa	≥ 20 MPa	
	28 dias	32,2 MPa	≥ 32 MPa	

Tabela 4.2 – Caracterização química do cimento CP II F 32 utilizado no nos projetos experimentais.

Ensaio Físico Químicos		NBR - NM ENSAIOS QUÍMICOS	Resultados	Limites da NBR 1578/ 91	Un.
Dióxido de silício	SiO ₂	NBR NM14	29,53	-	%
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	NBR NM14	6,58	-	%
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	NBR NM14	3,62	-	%
Óxido de cálcio	CaO	NBR NM14	47,63	-	%
Óxido de magnésio	MgO	NBR NM14	4,55	≤ 6,5	%
Anidrido Sulfúrico	SO ₃	NBR NM16	1,94	≤ 4,0	%
Óxido de sódio	Na ₂ O	NBR NM17	0,27	-	%
Óxido de potássio	K ₂ O	NBR NM17	0,65	-	%
Perda ao fogo	PF	NBR NM18	5,19	≤ 6,5	%
Óxido de cálcio livre	CaOL	NBR NM13	1,48	-	%
Equivalente alcalino	-	CÁLCULO	0,7	-	%

A figura 4.4 mostra a distribuição granulométrica do cimento realizada a laser no Laboratório de Geotécnica da Universidade de Brasília.

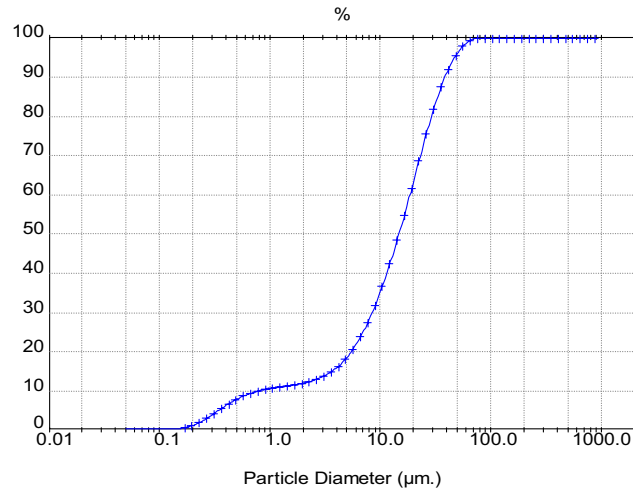


Figura 4.4 Curva granulométrica do cimento utilizado na pesquisa (Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília).

Dos resultados dos ensaios físicos do cimento, pode-se afirmar que atendem às recomendações das normas técnicas pertinentes. Verifica-se que o tempo de início de pega é bastante superior ao limite mínimo previsto na NBR NM 65/03. No entanto, o valor de 210 minutos não incorre em limitações ou prejuízos para a aplicação proposta, nem mesmo no transporte e lançamento, se fosse o caso.

Quanto ao ensaio de perda ao fogo do cimento, verifica-se o valor de 5,19 %, adequado à recomendação da NBR NM 18/03, apesar de muito próximo do limite recomendado.

4.4.2. AGREGADO GRAÚDO

Para a composição da mistura de concreto, o agregado utilizado tem o tipo litológico calcário e a caracterização do material foi realizada através dos ensaios de análise granulométrica, massa unitária, massa específica, teor de material pulverulento e absorção de água.

Através das análises granulométricas, os agregados graúdos utilizados nos projetos experimentais 1 e 2 foram classificados na como $d/D = 9,5/25,0$ e $19/31,5$, respectivamente, sendo d a menor e D a maior dimensão do agregado, segundo a NBR 7211/05.

No agregado graúdo do projeto experimental 1, observou-se elevado teor de material passante na peneira 200, então toda a brita foi lavada, impedindo a influência desse material no comportamento do concreto no estado fresco.

Já o agregado graúdo utilizado no projeto experimental 2 apresentou 1,5% de material pulverulento. Esse valor foi desconsiderado na dosagem.

A tabela 4.3 apresenta a caracterização dos dois agregados graúdos e a figura 4.5 apresenta a distribuição granulométrica.

Tabela 4.3 Caracterização do agregado graúdo.

Análise granulométrica do agregado graúdo - NBR NM 248/03				
Peneiras (mm)	Projeto experimental 1		Projeto experimental 2	
	% Retida	% Ret. Acum.	% Retida	% Ret. Acum.
25	0,0	0	0,1	0
19	3,7	4	6,2	6
12,5	37,1	41	53,5	60
9,5	31,1	72	31,3	91
6,3	15,2	87	7,1	98
4,8	5,8	93	1,0	99
2,4	0,0	100	0,0	100
1,2	0,0	100	0,0	100
0,6	0,0	100	0,0	100
0,3	0,0	100	0,0	100
0,15	0,0	100	0,0	100
0,075	0,0	100	0,0	100
Fundo	7,9		0,8	
Total	100,0		100,0	
Caracterização				
Projeto experimental	1	2	Norma	
MF (%)	6,69	6,97	NBR NM 248/03	
D máx. (mm)	19,0	25,0	NBR NM 248/03	
Massa Específica (g/cm ³)	2,70	2,70	NBR NM 53/03	
Massa Unitária (g/cm ³)	1,71	1,70	NBR NM 45/06	
Absorção (%)	0,4	0,3	NBR NM 53/03	
Material passante na peneira 200 por lavagem	8,0%	1,5%	NBR NM 46/03	

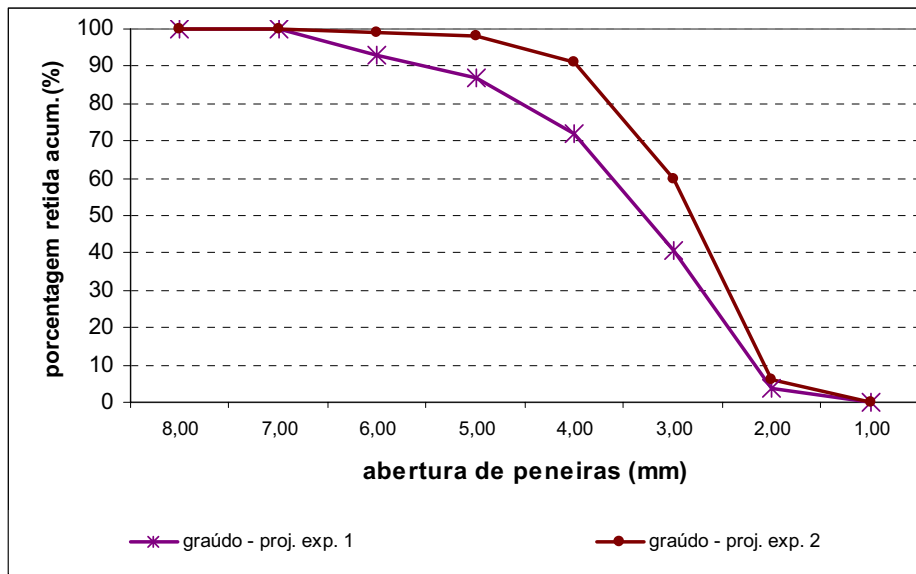


Figura 4.5 Curva granulométrica do agregado graúdo segundo NBR 7211/05.

Os resultados a serem observados com maior atenção na caracterização do agregado graúdo são a dimensão máxima característica, a massa específica e a massa unitária, que foram utilizados como dados de entrada na dosagem do concreto.

4.4.3. AGREGADO MIÚDO – AREIA NATURAL E AREIA BRITADA

Dois tipos de areia foram utilizados como agregado miúdo: areia natural e a areia britada.

A areia natural foi proveniente de rio, do tipo quartzosa, fornecida em único lote pela empresa LEMOS CONSTRUÇÃO E TRANSPORTE DE AREIA E CASCALHO LTDA. A distribuição granulométrica apresentada na figura 4.6 e os resultados dos ensaios de caracterização na tabela 4.4.

Dentre os resultados da areia natural, ressalta-se o teor de material pulverulento de 3,9%, a massa específica ($2,52 \text{ g/cm}^3$) e a massa unitária ($1,64 \text{ g/cm}^3$).

Tabela 4.4 Caracterização do agregado miúdo: areia natural.

AREIA NATURAL: Análise granulométrica do agregado miúdo - NBR NM 248/03		
Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	0	0
6,3	2,6	3
4,8	4,6	7
2,4	13,2	20
1,2	24,3	45
0,6	19,9	65
0,3	15,0	80
0,15	12,8	92
0,075	5,3	98
Fundo	2,4	100
Total	100,0	

Projeto experimental 1 e 2

Classificação	Zona utilizável superior	NBR 7211/05
Módulo de Finura (%)	3,09	NBR NM 248/03
D máx. (mm)	4,80	NBR NM 248/03
Massa Específica (g/cm ³)	2,52	NBR NM 52/03
Massa Unitária (g/cm ³)	1,67	NBR 7251/82
Material passante na peneira 200 por lavagem (%)	3,9	NBR NM 46/03
Absorção (%)	3,3	NBR NM 53/03

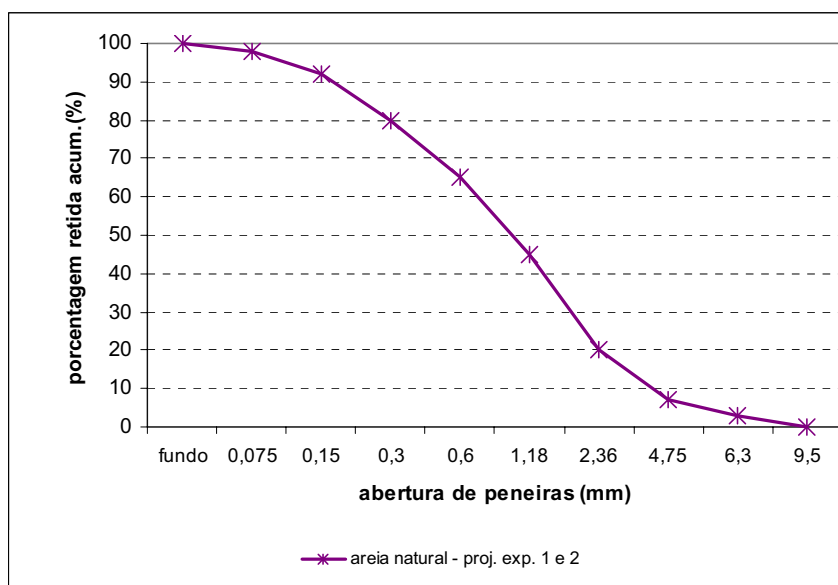


Figura 4.6 Curva granulométrica do agregado miúdo, areia natural, segundo NBR 7211/05.

A areia britada utilizada na pesquisa tem o tipo litológico calcário e foi fornecida pela empresa CIPLAN (Cimento Planalto S.A.), localizada no Distrito Federal.

A areia britada tem três tipos diferentes, sendo duas delas com tratamento de forma (BC), ou seja, submetidas ao processo de produção com o britador do tipo VSI - britador de eixo vertical, com conseqüente melhoria no formato das partículas - e uma sem o tratamento de forma (BS) (figura 4.7).

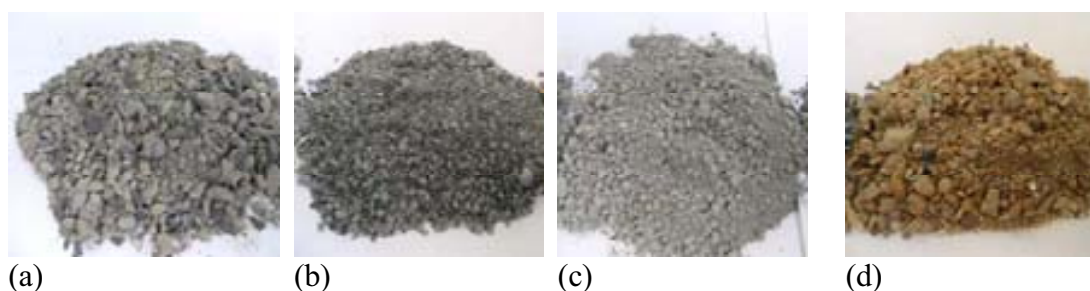


Figura 4.7 Aspecto das areias BS, BC (proj. 1), BC (proj.2) e natural, respectivamente.

A tabela 4.5 e a figura 4.8 apresentam os resultados obtidos na caracterização das britadas.

Tabela 4.5 Caracterização do agregado miúdo: areia britada.

AREIA BRITADA: Análise granulométrica do agregado miúdo - NBR NM 248/03						
Tipo de areia	Britada com VSI (BC) Projeto experimental 1		Britada com VSI (BC) – Projeto experimental 2		Britada sem VSI (BS) Projeto experimental 1 e 2	
Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
6,3	0,3	0	0,4	0	0,0	0
4,8	0,1	0	0,1	0	2,2	2
2,4	14,0	14	1,0	1	26,2	29
1,2	50,2	65	24,3	25	38,4	67
0,6	13,0	78	22,1	48	17,5	85
0,3	10,3	88	12,2	60	7,4	92
0,15	6,0	94	13,3	73	3,4	95
0,075	2,4	96	7,8	81	2,0	97
Fundo	3,7	100	18,8	100	2,8	100
Total	100,0		100,0		100,0	
Caracterização						
Areia	BC - Projeto experimental 1	BC – Projeto experimental 2	BS- Projeto experimental 1 e 2	Norma		
Módulo de Finura (%)	3,38	2,07	3,70	NBR NM 248/03		
D máx. (mm)	4,80	2,40	4,80	NBR NM 248/03		
Massa Específica (g/cm ³)	2,59	2,60	2,64	NBR NM 52/03		
Massa Unitária (g/cm ³)	1,78	1,70	1,66	NBR NM 45/03		
Material passante na peneira 200 por lavagem (%)	7,2	17,9	13,1	NBR NM 46/03		
Absorção (%)	0,04	0,04	0,05	NBR NM 53/03		

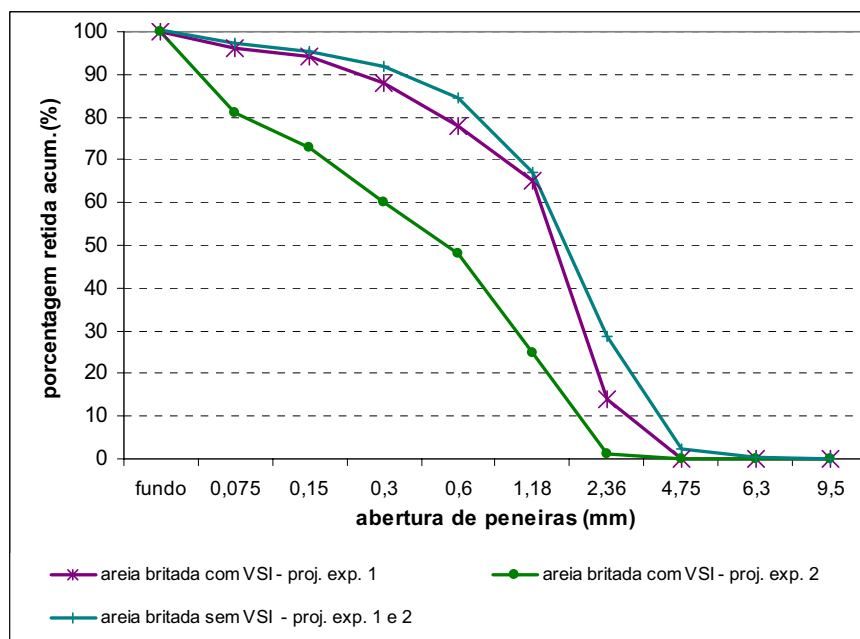


Figura 4.8 Curva granulométrica do agregado miúdo: areia britada.

Ressalta-se a verificação da influência da cominuição do agregado no britador do tipo VSI quando se avalia a massa unitária do material. Quando sofre tratamento de forma, a areia britada BC tem massa unitária 7,8% superior quando comparada à areia BS (sem tratamento) no projeto experimental 1.

A areia britada BC utilizada no projeto experimental 2, com maior porcentagem de finos, apresenta massa unitária superior que a areia BS sem tratamento de forma em 2,4%.

Para a melhor caracterização da forma e textura superficial das partículas dos dois tipos de agregado miúdo, são apresentados os resultados da análise morfoscópica das areias, realizada por Santos (2007), segundo a NBR 7389/92 – Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto (tabela 4.6) realizado no Laboratório de Geologia da Universidade de Brasília. Neste estudo, é avaliada a amostra de areia e os resultados representam a predominância de grãos com determinada classificação.

A classe de arredondamento é vinculada à análise do grau de angulosidade dos cantos e arestas das partículas, classificadas em muito anguloso, anguloso, sub-anguloso, sub-arredondado, arredondado e bem arredondado.

O grau de esfericidade representa a aproximação do formato da partícula a um grão cúbico, tendo a classificação dividida em alta e baixa esfericidade.

A classificação da textura superficial das partículas se divide em alta rugosidade, rugosa, baixa rugosidade, lisa ou rugosidade mista.

A tabela 4.6 apresenta a análise morfoscóptica das areias.

Tabela 4.6 Análise morfoscóptica do agregado miúdo.

	Natural (N)	Britada com VSI (BC)– projeto experimental 2	Britada sem VSI (BS)– projeto experimental 1 e 2
classe de arredondamento	sub-arredondado e sub-anguloso	anguloso e sub-anguloso	muito anguloso, anguloso e sub-anguloso
grau de esfericidade	baixo	Alta	baixo
textura superficial	baixa rugosidade	alta rugosidade e rugoso	alta rugosidade e rugoso

O processo de britagem no equipamento VSI é baseado na utilização do princípio autógeno de rocha contra rocha durante a cominuição do agregado. Segundo Almeida & Silva (2005) este método produz um material de formato mais cúbico, ou seja, com maior grau de esfericidade, proporcionando melhor acomodação das partículas e, conseqüentemente, reduzindo os espaços vazios entre o material. Isto foi confirmado pelos ensaios de massa unitária e grau de esfericidade das areias natural e britada, conforme pode ser visto na figura 4.9.

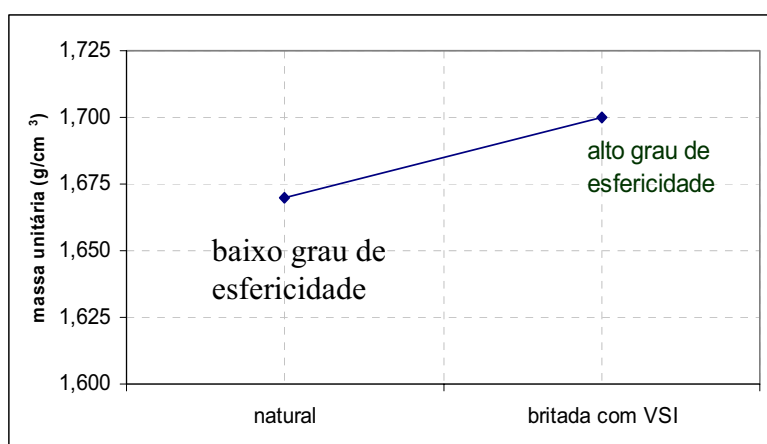


Figura 4.9 Relação entre grau de esfericidade dos grãos e massa unitária da areia.

Através da análise morfoscóptica das areias é possível classificá-las com o formato e rugosidade mais ou menos favorável para a trabalhabilidade do concreto. Da menos favorável a mais favorável, essa classificação é BS, N e BC.

Para a realização do projeto experimental 2, as areias foram compostas de forma que obtivessem maior porcentagem de finos na composição granulométrica. A figura 4.10 demonstra a massa unitária, a massa específica e o índice de vazios de cada tipo de areia.

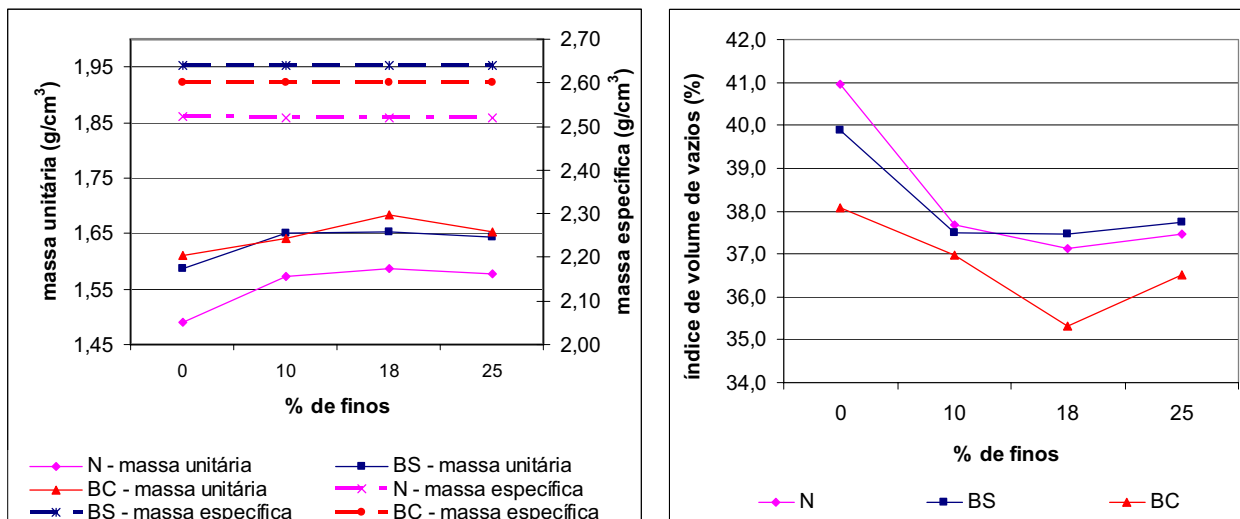


Figura 4.10 Caracterização da composição das areias.

Os resultados de índices de vazios confirmam que o maior grau de esfericidade das partículas reduz o índice de vazios das misturas secas, de acordo com as constatações de Almeida & Silva (2005).

4.4.4. ADITIVO

O aditivo RHEOBUILD 1000 foi fornecido pela Empresa IMPERCIA BRASÍLIA ATACADISTA LTDA, localizada em Brasília. É isento de cloretos e atende as prescrições e requisitos de desempenho da norma EB 1763 (tipo p), e, segundo o fabricante, é compatível com todos os tipos de cimento.

Dentre os benefícios esperados com a utilização deste aditivo, destaca-se a redução de até 25% da água e melhora da trabalhabilidade do concreto. É recomendado para a dosagem de concretos com alta coesão e fluidez.

Segundo o fabricante, a faixa de teor de adição do RHEOBUILD 1000 encontra-se entre 0,8 e 1,5 litros para cada 100 kg de Cimento Portland, devendo ser dosado após a adição de 70% da água de amassamento.

Os dados técnicos do aditivo estão apresentados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 Dados Técnicos do aditivo.

Função	Superplastificante
Base química	Naftaleno sulfonados
Aspecto	Líquido Castanho
Densidade	1,185 a 1,225 g/cm ³
pH	9 a 11
Sólidos	38 a 42 %

4.5. PROCEDIMENTO DE MISTURA DOS MATERIAIS NA DOSAGEM DO CONCRETO

Com a finalidade de minimizar as interferências ocasionadas pelo processo de produção dos concretos, o procedimento de mistura e a quantidade, em massa, dos materiais na betoneira foram mantidos constantes. Os materiais foram utilizados secos e armazenados em ambiente de laboratório.

Os traços teóricos foram ajustados em uma betoneira, até que fosse atingido o abatimento de 120 ± 10 mm. Nessa primeira betonada foram moldados os corpos de prova para a avaliação no estado endurecido. Em uma segunda betonada, foram realizados os ensaios em estado fresco, no período máximo de 40 minutos, sendo o abatimento modificado o primeiro ensaio a ser realizado.

A betoneira foi imprimada com argamassa de traço 1:2 e relação a/c 0,5, sendo descartado o excesso de material do equipamento.

A seqüência de introdução e mistura do material na betoneira, com capacidade de 210 l, seguiu a ordem:

1. massa total do agregado graúdo;
2. 50% da massa de água;
3. mistura até a molhagem total dos grãos de agregado graúdo;
4. massa total de areia;
5. massa total de cimento;
6. mistura por 1,5 minutos e parada para limpeza das pás;
7. adição do restante da água e aditivo, se utilizado;
8. mistura por mais 1,5 minutos;
9. avaliação visual do teor de argamassa (coesão e envolvimento dos grãos) para posterior execução dos ensaios.

4.6. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO UTILIZADOS

Os procedimentos dos ensaios realizados nas amostras de concreto e em argamassa, no caso do ensaio da palheta, são descritos nos itens a seguir.

4.6.1. ENSAIO DE ABATIMENTO

O ensaio de abatimento é um método para determinar a consistência do concreto, prescrito pela NBR NM 67/98 e aplicável a concretos de abatimento superior a 10 mm, cujo agregado graúdo apresente diâmetro máximo inferior ou igual a 37,5 mm.

A aparelhagem necessária para a realização do ensaio foram as seguintes:

- Molde tronco cônico com diâmetro da base de 200 mm, diâmetro superior de 100 mm e altura de 300 ± 2 mm;
- Haste de compactação com diâmetro de 16 mm e comprimento de 600 mm;
- Placa de base, plana, quadrada, de no mínimo 500 x 500 mm.

O procedimento para a realização do ensaio consiste em umedecer o molde e preenchê-lo com o concreto fresco em três camadas de, aproximadamente, um terço da altura do cone. Compactar cada camada com 25 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície de cada camada. A compactação deve garantir que a haste atravesse apenas a camada em questão e atinja a camada inferior. Rasar a superfície do cone.

Limpar a placa de base e retirar o molde, levantando-o na direção vertical em um tempo de 5s a 10s. Inverter o cone e medir a diferença de altura entre a altura do molde e a altura do corpo-de-prova desmoldado.

Caso ocorra o desmoronamento da massa de concreto em dois ensaios consecutivos, o concreto não é plástico ou coeso o bastante para a aplicação do ensaio.

O equipamento do ensaio é apresentado na figura 4.11.



Figura 4.11 Tronco-cone e etapa do ensaio de abatimento em concreto.

4.6.2. ENSAIO DE ABATIMENTO MODIFICADO

O ensaio de abatimento modificado mede a tensão de escoamento e a viscosidade plástica do concreto, baseado no abatimento final e tempo necessário para que o concreto percorra a distância de 100 mm. O procedimento utilizado foi descrito no artigo de Ferraris & De Larrard (1998) que discorre sobre as etapas para a execução do ensaio e as necessárias modificações no cone de abatimento.

Os seguintes componentes são necessários para a execução do ensaio:

- Base horizontal de metal com haste vertical fixa;
- Tronco cone padrão, recomendado pela NBR NM 67/98;
- Prato cilíndrico com orifício para encaixe na haste;
- Anel de vedação;
- Haste para a compactação do concreto;
- Régua graduada em mm;
- Cronômetro com precisão de 0,01s.

A rotina de ensaio consiste em lançar o concreto no cone, segundo as recomendações da NBR NM 67/98, ou seja, em três camadas de alturas aproximadas, consolidadas por 25 golpes em cada uma. Na seqüência, realizam-se os seguintes passos:

- Limpar cuidadosamente a parte superior da haste fixa, retirando qualquer resíduo e untá-la com graxa;
- Umedecer o cone e a base do equipamento;
- Localizar o cone centralizado na base;
- Preencher o molde com o concreto em 3 camadas de 25 golpes e rasar a superfície do cone;
- Limpar a parte superior da haste fixa acima do concreto e passar uma pequena quantidade de graxa (garantir a inexistência de partículas de areia na haste);
- Localizar o prato na superfície do molde – garantir o contato com o concreto;
- Levantar verticalmente o cone, ao mesmo tempo em que se inicia a contagem do tempo;
- Parar o tempo quando o prato pára de se mover;
- Medir a diferença de altura entre o cone invertido e a massa de concreto com uma régua.

Com o tempo medido, em segundos, é calculada a viscosidade plástica do concreto, através da equação 3.8 e a medida final de abatimento fornece a tensão de escoamento do concreto através da equação 3.5. O equipamento e as etapas do ensaio são apresentados na figura 4.12.



Figura 4.12 Equipamento e etapas do ensaio de abatimento modificado em concreto.

4.6.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA

A determinação da massa específica, massa que ocupa uma unidade de volume do concreto fresco, adensado e considerando o volume de ar incorporado do concreto segue a NBR 9833/87.

A aparelhagem necessária para a realização do ensaio é formada por balança com precisão de $\pm 0,5\%$ da massa a determinar, haste de adensamento de 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento; régua metálica e recipiente metálico com capacidade nominal de 15dm^3 , aplicável à amostra de concreto contendo o agregado graúdo com a dimensão máxima de 37,5 mm.

O adensamento da amostra de concreto é realizado manualmente, em três camadas de alturas aproximadamente iguais, aplicando 25 golpes de socamento. Os golpes de cada camada devem ser distribuídos uniformemente. Após o rasamento da superfície do concreto e da limpeza externa do recipiente, a massa do conjunto recipiente + amostra é pesada.

O resultado do ensaio de massa específica (kg/dm^3) no estado fresco é obtido dividindo a massa de concreto (kg) do recipiente pelo volume (dm^3).

4.6.4. ENSAIO DE TEOR DE AR INCORPORADO

A determinação do teor de ar incorporado em concreto fresco pelo método pressométrico é prescrito pela NBR NM 47/02.

A aparelhagem e a preparação da amostra para a realização do ensaio são as mesmas que para o ensaio de massa específica, incluindo o recipiente do tipo B com manômetro acoplado.

Após a execução do ensaio de massa específica, o recipiente com o concreto fresco é vedado com a tampa (figura 4.13) e a válvula de ar do manômetro é fechada. Insere-se água limpa em uma das chaves apropriadas até que todo o ar existente entre a tampa e a superfície da amostra de concreto seja expelido. As duas chaves são fechadas. A bomba de ar do manômetro é acionada até que o ponteiro do mesmo esteja na posição inicial de leitura. Abre-se a válvula de pressão e realiza-se a leitura do teor de ar.



Figura 4.13 Equipamento para determinação do teor de ar do concreto.

4.6.5. ENSAIO DE EXSUDAÇÃO

A NBR NM 102/96 especifica dois métodos de ensaio para a determinação da quantidade de água exsudada do concreto fresco contendo agregado graúdo de dimensão máxima de 37,5 mm. O método A é aplicado a uma amostra consolidada apenas por compactação manual, não sujeita a vibração intermitente. No método B, a amostra é consolidada por vibração e sujeita a vibração intermitente.

A escolha pelo método B se justifica por apresentar maior solitação do concreto fresco, representando a condição menos favorável.

A aparelhagem necessária para a execução do ensaio consiste em uma mesa vibratória provida de dispositivo acoplado a um temporizador para ajuste do período de vibração conforme prescrição da norma; recipiente metálico com tampa de 292 ± 2 mm de diâmetro e 282 ± 2 mm de altura (figura 4.14); balança com resolução de 0,5% da massa de concreto ensaiada; pipeta, vibrador de imersão e bécker.

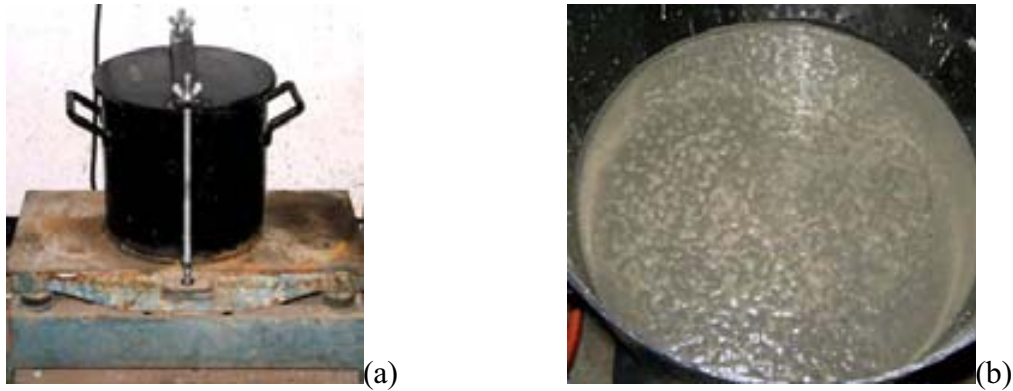


Figura 4.14 Equipamento do ensaio de exsudação de água e amostra após 1 hora de vibração intermitente.

Durante a preparação da amostra, determina-se a massa total de concreto da betonada (m_1), em gramas, e a massa de água de amassamento (m_{am}), em gramas. A amostra de concreto é colocada no recipiente a, aproximadamente, metade da altura e adensada por meio de vibração, até que a superfície do concreto fique relativamente plana, cessada ao primeiro sinal de água livre exsudando da amostra.

A amostra é tampada e submetida ao ciclo de vibração intermitente por uma hora. A mesa permanece ligada por 3s e desligada por 30s. O tempo para a parada perceptível da mesa vibratória é de aproximadamente 7s.

Ao final do período de ensaio, é coletada a água livre exsudada do concreto com o auxílio de uma pipeta e transferida para um bécker. A massa de água mais resíduos (m_p) é pesada e, após a evaporação da água em estufa, a massa final (m_q) é medida.

O resultado do ensaio é obtido pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$V = \frac{V_1}{A} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde V : volume de água exsudada por área unitária (ml/cm^2);

V_1 : volume de água exsudada em um determinado intervalo de tempo (ml);

A : área (cm^2).

$$m_{ar} = \frac{m_{am}}{m_t} \cdot m_e \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde m_{ar} é a massa de água do concreto do recipiente (g);

m_{am} é a água de mistura do traço (g);

m_t é a massa total do traço (g);

m_e é a massa da amostra ensaiada (g).

$$E = \frac{m_{ae}}{m_{ar}} \cdot 100$$

Equação 4.3

Onde E é a quantidade de água exsudada (%);
 m_{ae} é a massa de água exsudada (g).

4.6.6. VANE TEST – ARGAMASSA

O ensaio da palheta (*Vane Test*) mede a tensão de escoamento da argamassa do concreto. Para solos, a Norma que rege este ensaio é a *Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clay soil* - ASTM D 4648/00. Adaptado para argamassas, o método de ensaio é baseado no artigo de BAUER et al, 2007.

A aparelhagem utilizada para a execução do ensaio é o equipamento *Vane Tester*, com mola de torção de constante igual a 0,0231 kg.cm/grau, a palheta de dimensão nominal de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, recipiente de 150 mm de diâmetro e 250 mm de altura; espátula de 15 a 20 mm de espessura, argamassadeira com 2 velocidades e balança com resolução de 0,1g.

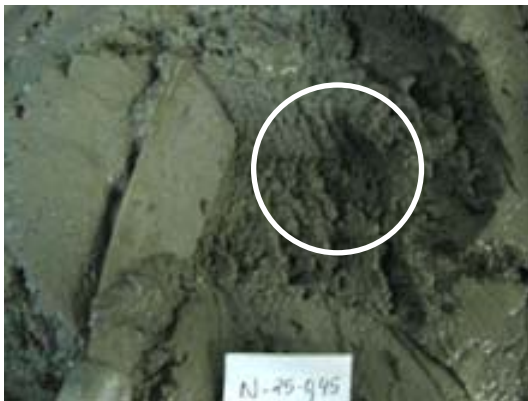
A amostra é misturada por 1,5min, tempo considerado suficiente para a homogeneização da argamassa. Logo após, o recipiente cilíndrico é preenchido, em três camadas de alturas aproximadamente iguais, consolidadas com 20 golpes da espátula, distribuídos uniformemente na superfície de argamassa. Em seguida, o recipiente é centrado abaixo da palheta e esta é introduzida na amostra, verticalmente, devagar e sem choques, até uma altura de, no mínimo, 50 mm do topo da amostra. A medida do torque máximo necessário para romper a amostra é registrada e com esse resultado, calcula-se a tensão de escoamento através da equação 3.9. O equipamento de ensaio, palheta e recipiente são apresentados na Figura 4.15.



(a) etapa de mistura



(b) execução do ensaio



(c) exemplo de argamassa muito coesa:
Resistência à deformação



(d) exemplo de argamassa plástica:
Retenção da forma sem ruptura

Figura 4.15 Etapas do *Vane Test* e exemplos de coesão e plasticidade.

4.6.7. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos, mantidos até a idade de ruptura em cura úmida, foi realizado conforme a NBR 5739/94. As faces do corpo-de-prova foram capeados com enxofre, proporcionando a distribuição uniforme da carga na amostra.

O procedimento de ensaio recomenda que o corpo-de-prova seja cuidadosamente centralizado no prato inferior da máquina de ensaio e a carga foi aplicada de forma contínua e sem choques, a velocidade prescrita na norma.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. PROJETO EXPERIMENTAL 1

O projeto experimental 1, como explicado no item 4.1, consiste da avaliação do traço e dos parâmetros de mistura obtidos para os concretos dosados por diferentes métodos, variando o tipo de areia (natural - N, britada com VSI - BC e britada sem VSI- BS), para a escolha do método de dosagem a ser adotado no projeto experimental 2.

Para tanto, foram avaliados três métodos de dosagem: IPT-ITERS-EPUSP, ACI 211.1 e Método de Faury. A dosagem seguiu os passos dos métodos descritos no ANEXO A. Os concretos foram dosados para o atendimento da consistência medida através do ensaio de abatimento para valores de 120 ± 10 mm e resistência mínima de 20 MPa. O teor de material inferior a 0,075 mm foi mantido constante (3,9%) na composição granulométrica da areia. Ressalta-se que a brita foi lavada evitando a incorporação de material pulverulento à mistura.

Os traços obtidos e seus respectivos parâmetros de dosagem estão apresentados na tabela 5.1, para cada tipo de areia.

Tabela 5.1 Traço em massa e parâmetros de dosagem de concreto.

método	traço				abat mm	α %	H (%)	C kg/m ³	Teor de pasta (%)	m	a (%)	p (%)	f _{c,28} (MPa)	
	c	a	p	a/c										
BC	FAURY	1	2,00	3,13	0,55	125	49	8,9	362	23,2	5,1	39	61	20,4
	ACI	1	2,48	2,34	0,55	130	60	9,5	377	24,3	4,8	44	56	22,3
	IPT-ITERS-EPUSP	1	1,96	2,84	0,55	120	51	9,5	379	24,4	4,8	41	59	22,0
BS	FAURY	1	1,57	2,26	0,57	125	53	11,9	433	29,1	3,8	41	59	22,8
	ACI	1	1,86	2,04	0,66	110	58	13,4	413	29,9	3,9	44	56	20,1
	IPT-ITERS-EPUSP	1	1,55	2,45	0,58	110	51	11,5	422	28,3	4,0	39	61	22,3
N	FAURY	1	2,29	2,93	0,59	120	53	9,5	352	23,3	5,2	44	56	20,5
	ACI	1	2,08	2,65	0,55	120	54	9,6	382	24,7	4,7	44	56	23,6
	IPT-ITERS-EPUSP	1	2,11	2,99	0,55	120	51	9,0	360	23,3	5,1	41	59	20,9

A análise dos resultados obtidos durante a execução do Projeto experimental 1 - Escolha do método de dosagem - está apresentada a seguir.

A influência do método de dosagem para a obtenção do traço em massa no consumo de material (%) para as diferentes areias está apresentada na figura 5.1.

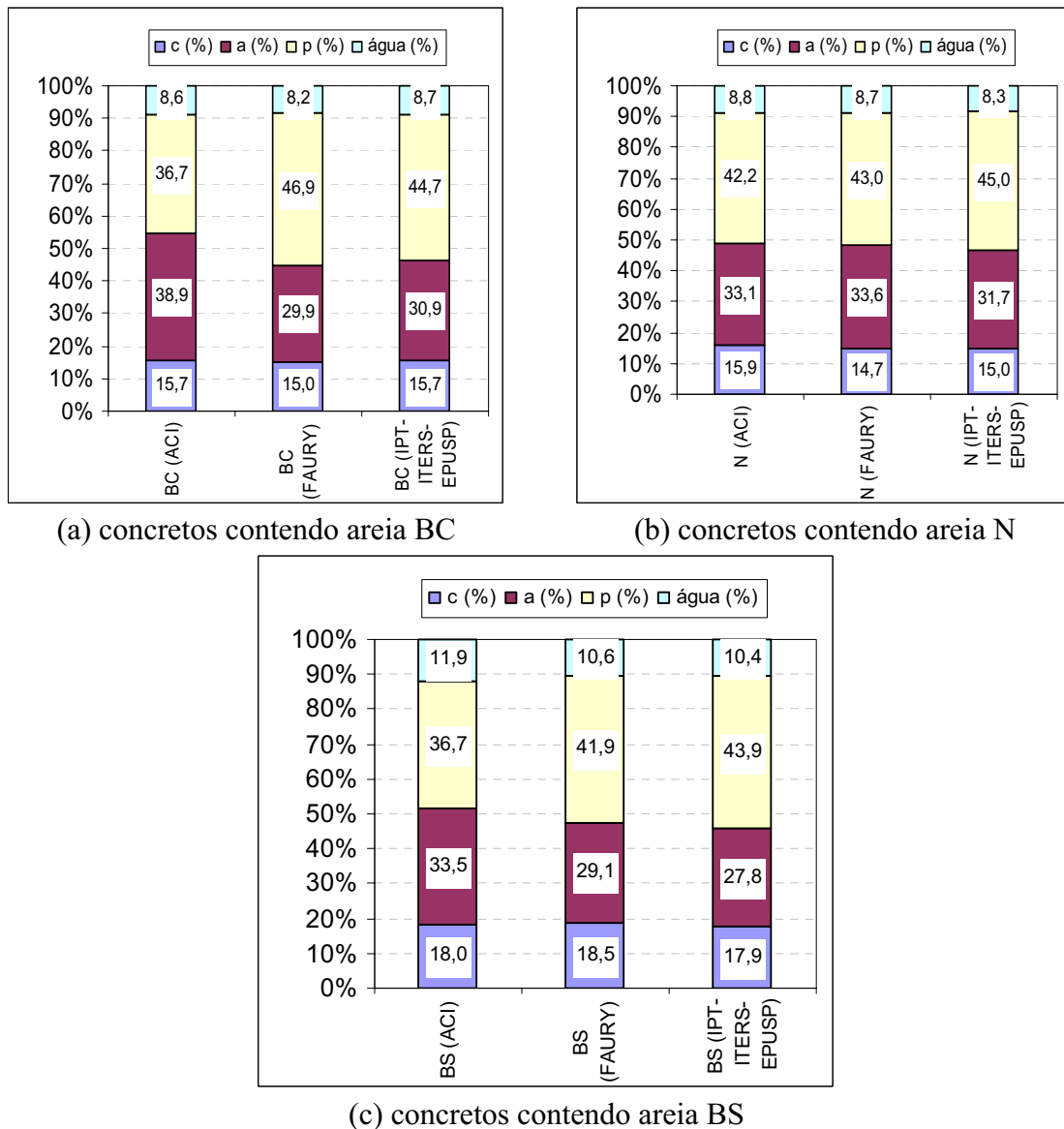


Figura 5.1 Influência do Método de Dosagem no consumo de materiais (%) dos concretos contendo diferentes areias: areia britada com VSI (a), areia natural (b) e areia britada sem VSI (c).

A relação água/materiais secos, para a mesma condição de consistência, tem valores muito próximos quando comparadas para o mesmo tipo de areia, confirmando a Lei de Lyse (figura 5.1).

Através da análise dos resultados da tabela 5.1 e da figura 5.1, quanto ao consumo de cimento pode-se inferir que:

- Quando analisados os **concretos dosados com areia BC** (tabela 5.1 e a figura 5.1a) verifica-se que o método de Faury proporcionou o menor consumo de cimento (%) e de água (%). Os métodos ACI e IPT-ITERS-EPUSP tiveram teores de pasta equivalentes. No entanto, a menor porcentagem de brita no traço do método do ACI pode elevar o custo da mistura⁸.
- Quando analisados os **concretos dosados com areia N**: para os três diferentes métodos, os valores apresentados na **tabela 5.1** e a **figura 5.1b** mostram que o Método ACI 211.1 é o que resultou em maior consumo de cimento. Este valor atingiu cerca de 8,5% e 6,0% a mais que os consumos de cimento resultantes dos Métodos de Faury e ITERS-IPT-EPUSP, respectivamente.
- Quando analisados os **concretos dosados com areia BS** (tabela 5.1 e figura 5.1c) apesar do Método ACI 211.1 ter o consumo de cimento equivalente ao do Método IPT-ITERS-EPUSP, o ajuste na betoneira foi o mais difícil. Foi necessário elevar o consumo de água. Somente assim foi possível atingir o teor de pasta adequado para o preenchimento dos vazios, o envolvimento das partículas e a minimização do atrito entre os grãos da areia BS, atendendo a consistência requerida. A elevação do consumo de água se reflete no H (%). A razão da dificuldade de ajuste do traço na betoneira foi a maior porcentagem de areia na composição granulométrica, em relação aos outros métodos de dosagem (figura 5.1c). Isto intensificou os efeitos negativos do formato das partículas da areia BS - arestas mais angulosas e baixo grau de esfericidade.

Os consumos de cimento médios obtidos pelos concretos dosados pelos métodos IPT-ITERS-EPUSP e Faury, independente do tipo de areia, são muito próximos. Em média, o consumo atingiu os valores de 400kg/m³ e 387 kg/m³, respectivamente. A diferença entre os dois métodos representa 3,5%.

No entanto, apesar dos dois métodos conduzirem aos menores consumos médios para uma dada consistência, o Faury é mais direto – só é necessária uma betonada para a definição do traço. O Método do IPT-ITERS-EPUSP necessita de, no mínimo, 4 betonadas para fazer o diagrama de dosagem, sendo mais vantajoso quando se deseja a variação de resistência para um conjunto de materiais.

⁸ O custo do m³ da brita 1 é 23% menor que o m³ da areia britada classificada (Fonte: SINAPI-Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, data base: out/07, local: Brasília –DF)

Quando se trata da composição de agregados, pode-se observar:

- para a areia natural (N), independente do método de dosagem, as porcentagens de agregado miúdo e graúdo na composição da mistura se mantêm muito próximas (figura 5.1). Isto demonstra que o princípio dos três métodos de dosagem, apesar de diferentes, não resultam em diferença significativa quando se trata de uma areia considerada de arestas arredondadas e formato mais cúbico.
- para o concreto dosado com areia britada (BC e BS), observa-se que os métodos de Faury e IPT-ITERS-EPUSP resultam valores de porcentagem de areia muito parecidos e inferiores à porcentagem de brita, como apresentado na figura 5.1. Portanto, para os dois métodos de dosagem, é possível inferir que o empacotamento dos grãos é convergente.

Quanto à influência do tipo de areia nos parâmetros de dosagem e no consumo de material (%) para os diferentes métodos de dosagem, verifica-se:

- independente do método de dosagem, os valores da relação água/materiais secos dos concretos dosados com BS se mantêm, em média, 30% maiores comparado aos concretos com as outras areias. Esta observação mostra a interferência do formato dos grãos de areia no comportamento do concreto no estado fresco, pois a areia BS possui baixo grau de esfericidade e maior angulosidade das arestas.
- Comparando o consumo médio de concreto de cada tipo de areia, independente do método de dosagem, a areia BS é a que atinge o maior valor – cerca de 13,4% e 16,2% superior ao consumo de cimento dos concretos dosados com areia BC e areia N, respectivamente.

Todos os traços, independente do tipo de areia e do método de dosagem, atingiram a resistência à compressão mínima requerida (20 MPa), conforme demonstrado na figura 5.2.

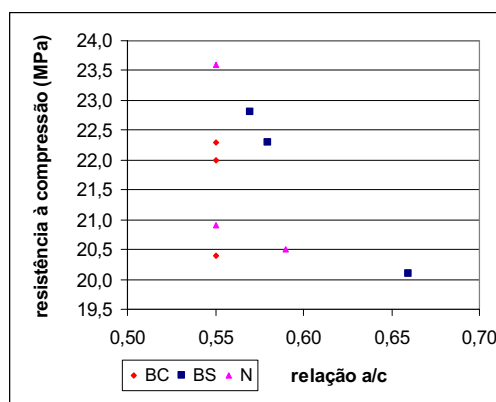


Figura 5.2 Resistência à compressão dos concretos.

Com os resultados e a análise apresentados, o Método de Dosagem escolhido para a execução do Projeto experimental 2 foi o Método de Faury, considerando os seguintes pontos:

- apresentou o menor consumo de cimento (%) para o concreto dosado com areia natural (N) e britada com VSI (BC);
- resultou no menor consumo médio (kg/m^3) dentre os três métodos avaliados;
- a relação agregado graúdo/miúdo proposta pelo método de dosagem ACI favorece a influência do formato menos favorecido da areia BS na trabalhabilidade;
- apresenta consumo de materiais (%) e parâmetros de mistura muito próximos do Método IPT-ITERS-EPUSP;
- requereu menor tempo em laboratório para a obtenção de bom resultado – resistência à compressão e consistência especificada, com coesão adequada (sem segregação e sem exsudação aparentes)⁹.

5.2. PROJETO EXPERIMENTAL 2

O projeto experimental 2 parte do Método de Dosagem de Faury para a definição dos traços com as características descritas no item 4.1. A memória de cálculo da definição dos traços dos concretos está apresentada no ANEXO B, bem como as curvas granulométricas das composições. Os traços dos concretos, os parâmetros de dosagem das misturas e os resultados dos ensaios são apresentados e analisados nos itens seguintes.

5.2.1. TRAÇOS DOS CONCRETOS E PARÂMETROS DE MISTURA.

Os traços e parâmetros de mistura dos concretos, apresentados nas tabelas 5.3 a 5.5, obedeceram à dosagem do Método de Faury. As variáveis fixas para os concretos dosados com diferentes teores de aglomerante, para cada tipo de areia foram a porcentagem de areia e a porcentagem de brita da composição granulométrica, de acordo com o teor de finos da areia. Com o ajuste granulométrico proposto pelo método, o objetivo é atingir o menor consumo de cimento possível, para o atendimento da consistência requerida medida pelo tronco de cone de 120 ± 10 mm. Os valores de abatimento estão apresentados na tabela 5.2.

⁹ Critério importante a ser considerado em função da extensão do Projeto Experimental 2.

Vale ressaltar que a variável **tipo de areia** inclui diferenças na litologia, no formato e rugosidade e na granulometria do agregado miúdo.

A tabela 5.2 mostra os resultados do ensaio de abatimento de todos os concretos analisados nesta pesquisa.

Tabela 5.2 Resultados de consistência medida pelo ensaio de abatimento.

areia natural (N)		areia britada sem VSI (BS)		areia britada com VSI (BC)	
traço	s (mm)	traço	s (mm)	traço	s (mm)
N-0-0,4	125	BS-0-0,4	120	BC-0-0,4	110
N-0-0,5	110	BS-0-0,5	120	BC-0-0,5	110
N-0-0,65	110	BS-0-0,65	120	BC-0-0,65	120
N-10-0,4	120	BS-10-0,4	110	BC-10-0,4	120
N-10-0,5	120	BS-10-0,5	110	BC-10-0,5	120
N-10-0,65	110	BS-10-0,65	120	BC-10-0,65	125
N-18-0,4	115	BS-18-0,4	110	BC-18-0,4	120
N-18-0,5	120	BS-18-0,5	125	BC-18-0,5	125
N-18-0,65	120	BS-18-0,65	110	BC-18-0,65	120
N-25-0,4	110	BS-25-0,4	110	BC-25-0,4	110
N-25-0,5	110	BS-25-0,5	130	BC-25-0,5	110
N-25-0,65	120	BS-25-0,65	110	BC-25-0,65	110

areia natural (N)		areia britada sem VSI (BS)		areia britada com VSI (BC)	
traço	s (mm)	traço	s (mm)	traço	s (mm)
N-0-0,4A	110	BS-0-0,4A	120	BC-0-0,4A	130
N-0-0,5A	120	BS-0-0,5A	120	BC-0-0,5A	120
N-0-0,65A	130	BS-0-0,65A	120	BC-0-0,65A	125
N-10-0,4A	120	BS-10-0,4A	120	BC-10-0,4A	120
N-10-0,5A	125	BS-10-0,5A	110	BC-10-0,5A	120
N-10-0,65A	130	BS-10-0,65A	120	BC-10-0,65A	120
N-18-0,4A	110	BS-18-0,4A	110	BC-18-0,4A	130
N-18-0,5A	120	BS-18-0,5A	120	BC-18-0,5A	120
N-18-0,65A	120	BS-18-0,65A	110	BC-18-0,65A	120
N-25-0,4A	130	BS-25-0,4A	115	BC-25-0,4A	120
N-25-0,5A	120	BS-25-0,5A	120	BC-25-0,5A	115
N-25-0,65A	115	BS-25-0,65A	110	BC-25-0,65A	130

O ajuste na betoneira foi realizado partindo de consumo de cimento e água mínimos, propostos pelo método de dosagem, e corrigiu-se a quantidade de cimento e água do concreto até a consistência desejada, para as relações a/c 0,45, 0,50 e 0,65. Todos os outros parâmetros de mistura foram considerados variáveis respostas.

Tabela 5.3 Traços em massa obtidos pelo Método de Faury para concreto dosado com areia natural (N).

Identificação	Traço			
	cim	areia	brita	a/c
N-0-0,4	1	1,28	1,14	0,45
N-0-0,5	1	1,83	1,63	0,50
N-0-0,65	1	2,63	2,34	0,65
N-10-0,4	1	1,38	1,46	0,45
N-10-0,5	1	1,84	1,93	0,56
N-10-0,65	1	2,19	2,29	0,65
N-18-0,4	1	1,28	1,42	0,45
N-18-0,5	1	1,58	1,82	0,50
N-18-0,65	1	2,22	2,46	0,65
N-25-0,4	1	1,05	1,41	0,45
N-25-0,5	1	1,43	1,93	0,50
N-25-0,65	1	2,07	2,79	0,65

Identificação	Traço			
	cim	areia	brita	a/c
N-0-0,4A	1	1,80	1,61	0,38
N-0-0,5A	1	2,19	1,95	0,50
N-0-0,65A	1	2,90	2,57	0,65
N-10-0,4A	1	1,80	1,91	0,45
N-10-0,5A	1	2,36	2,51	0,50
N-10-0,65A	1	2,81	2,94	0,65
N-18-0,4A	1	1,68	1,87	0,45
N-18-0,5A	1	2,07	2,33	0,50
N-18-0,65A	1	2,87	3,18	0,65
N-25-0,4A	1	1,39	1,87	0,45
N-25-0,5A	1	1,84	2,49	0,50
N-25-0,65A	1	2,64	3,56	0,65

Tabela 5.4 Traços obtidos em massa pelo Método de Faury para concreto dosado com areia britada sem tratamento de forma (BS).

Identificação	Traço			
	cim	areia	brita	a/c
BS-0-0,4	1	1,28	1,26	0,45
BS-0-0,5	1	1,52	1,51	0,50
BS-0-0,65	1	2,14	2,12	0,65
BS-10-0,4	1	1,29	1,45	0,45
BS-10-0,5	1	1,73	1,99	0,50
BS-10-0,65	1	2,03	2,29	0,65
BS-18-0,4	1	1,28	1,48	0,45
BS-18-0,5	1	1,35	1,56	0,50
BS-18-0,65	1	2,01	2,33	0,65
BS-25-0,4	1	1,13	1,58	0,45
BS-25-0,5	1	1,05	1,46	0,50
BS-25-0,65	1	2,06	2,87	0,65

Identificação	Traço			
	cim	areia	brita	a/c
BS-0-0,4A	1	1,69	1,67	0,45
BS-0-0,5A	1	1,97	1,95	0,50
BS-0-0,65A	1	2,66	2,63	0,60
BS-10-0,4A	1	1,69	1,90	0,45
BS-10-0,5A	1	2,13	2,40	0,50
BS-10-0,65A	1	2,49	2,81	0,65
BS-18-0,4A	1	1,67	1,94	0,45
BS-18-0,5A	1	1,64	1,89	0,50
BS-18-0,65A	1	2,55	2,95	0,65
BS-25-0,4A	1	1,49	2,08	0,45
BS-25-0,5A	1	1,39	1,95	0,50
BS-25-0,65A	1	2,60	3,62	0,65

Tabela 5.5 Traços obtidos em massa pelo Método de Faury para concreto dosado com areia britada com tratamento de forma (BC).

Identificação	Traço			
	cim	areia	brita	a/c
BC-0-0,4	1	1,26	1,42	0,45
BC-0-0,5	1	1,74	1,96	0,50
BC-0-0,65	1	2,49	2,80	0,65
BC-10-0,4	1	1,05	1,21	0,45
BC-10-0,5	1	1,50	1,91	0,50
BC-10-0,65	1	2,15	2,73	0,65
BC-18-0,4	1	0,97	1,36	0,45
BC-18-0,5	1	1,20	1,68	0,50
BC-18-0,65	1	2,03	2,85	0,65
BC-25-0,4	1	1,03	1,56	0,45
BC-25-0,5	1	1,24	1,88	0,50
BC-25-0,65	1	1,91	2,89	0,65

Identificação	Traço			
	cim	areia	brita	a/c
BC-0-0,4A	1	2,16	2,42	0,45
BC-0-0,5A	1	2,23	2,50	0,50
BC-0-0,65A	1	2,86	3,21	0,65
BC-10-0,4A	1	1,41	1,79	0,45
BC-10-0,5A	1	1,82	2,31	0,52
BC-10-0,65A	1	2,73	3,47	0,65
BC-18-0,4A	1	1,46	2,06	0,45
BC-18-0,5A	1	1,55	2,17	0,50
BC-18-0,65A	1	2,58	3,62	0,65
BC-25-0,4A	1	1,80	2,72	0,45
BC-25-0,5A	1	1,65	2,49	0,50
BC-25-0,65A	1	2,49	3,76	0,65

Os parâmetros de dosagem obtidos para cada traço estão apresentados nas tabelas 5.6 a 5.8 e serão discutidos a seguir.

Tabela 5.6 Parâmetros de dosagem dos concretos dosados com areia natural (N)

<i>Areia natural - Sem Aditivo</i>									
identificação	α (%)	Teor de pasta (%)	H (%)	Consumo de finos totais (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	m	a (%)	p (%)
N-0-0,4	66,7	29,3	13,3	586	586	266	2,4	53	47
N-0-0,5	63,4	22,4	11,2	464	464	232	3,5	53	47
N-0-0,65	60,8	16,8	10,9	347	347	225	5,0	53	47
N-10-0,4	61,9	29,6	11,7	611	537	242	2,8	49	51
N-10-0,5	59,6	24,8	11,7	509	430	240	3,8	49	51
N-10-0,65	58,2	22,2	11,8	452	371	241	4,5	49	51
N-18-0,4	61,7	33,3	12,2	681	553	249	2,7	47	53
N-18-0,5	58,7	29,2	11,3	604	470	235	3,4	47	53
N-18-0,65	56,7	24,6	11,4	506	361	235	4,7	47	53
N-25-0,4	59,2	36,5	13,1	736	583	264	2,5	43	57
N-25-0,5	55,8	31,2	11,5	644	475	237	3,4	43	57
N-25-0,65	52,4	25,9	11,1	535	353	230	4,9	43	57

<i>Areia natural Com aditivo</i>									
identificação	α (%)	Teor de pasta (%)	H (%)	Consumo de finos totais (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	m	a (%)	p (%)
N-0-0,4A	63,5	22,6	8,6	500	500	190	3,4	53	47
N-0-0,5A	62,0	19,4	9,8	413	413	208	4,1	53	47
N-0-0,65A	60,3	15,5	10,0	328	328	213	5,5	53	47
N-10-0,4A	59,4	25,1	9,6	542	459	207	3,7	49	51
N-10-0,5A	57,2	21,1	8,6	458	371	187	4,9	48	52
N-10-0,65A	56,4	19,0	9,6	407	317	206	5,7	49	51
N-18-0,4A	59,0	28,6	9,9	616	472	213	3,6	47	53
N-18-0,5A	56,8	25,4	9,3	552	402	201	4,4	47	53
N-18-0,65A	54,9	21,5	9,2	465	306	199	6,1	47	53
N-25-0,4A	56,1	31,6	10,6	671	498	226	3,3	43	57
N-25-0,5A	53,4	27,4	9,4	594	407	203	4,3	43	57
N-25-0,65A	50,6	23,1	9,0	501	302	196	6,2	43	57

Tabela 5.7 Parâmetros de dosagem dos concretos dosados com areia britada sem tratamento de forma (BS).

<i>Areia BS - Sem Aditivo</i>									
identificação	α (%)	Teor de pasta (%)	H (%)	Consumo de finos totais (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	m	a (%)	p (%)
BS-0-0,4	64,3	28,3	12,7	580	580	261	2,54	50	50
BS-0-0,5	62,6	24,8	12,4	510	510	255	3,03	50	50
BS-0-0,65	59,7	19,0	12,4	389	389	253	4,26	50	50
BS-10-0,4	61,2	30,2	12,0	629	557	249	2,73	47	53
BS-10-0,5	57,9	24,9	10,6	529	451	225	3,72	47	53
BS-10-0,65	57,0	22,6	12,2	464	386	251	4,32	47	53
BS-18-0,4	60,6	32,7	12,0	681	554	249	2,76	46	54
BS-18-0,5	60,1	31,8	12,8	649	522	261	2,91	46	54
BS-18-0,65	56,4	25,5	12,2	524	384	250	4,34	46	54
BS-25-0,4	57,4	34,5	12,1	717	559	251	2,72	42	58
BS-25-0,5	58,4	36,0	14,2	718	569	283	2,51	42	58
BS-25-0,65	51,6	25,5	11,0	537	355	230	4,93	42	58

<i>Areia BS - Com Aditivo</i>									
identificação	α (%)	Teor de pasta (%)	H (%)	Consumo de finos totais (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	m	a (%)	p (%)
BS-0-0,4A	61,7	22,9	10,3	489	489	220	3,36	50	50
BS-0-0,5A	60,3	20,3	10,2	433	433	217	3,92	50	50
BS-0-0,65A	58,1	15,9	9,6	341	341	205	5,29	50	50
BS-10-0,4A	58,6	25,5	9,7	550	470	209	3,59	47	53
BS-10-0,5A	56,6	21,9	9,1	477	394	197	4,54	47	53
BS-10-0,65A	55,4	19,8	10,3	419	336	218	5,30	47	53
BS-18-0,4A	58,0	28,2	9,8	608	468	210	3,61	46	54
BS-18-0,5A	58,2	28,6	11,1	598	462	233	3,53	46	54
BS-18-0,65A	54,6	22,4	10,0	478	327	213	5,50	46	54
BS-25-0,4A	54,5	30,0	9,8	647	471	212	3,57	42	58
BS-25-0,5A	55,2	31,1	11,4	648	481	239	3,34	42	58
BS-25-0,65A	49,8	22,8	9,0	496	301	196	6,22	42	58

Tabela 5.8 Parâmetros de dosagem dos concretos dosados com areia britada com tratamento de forma (BC).

<i>Areia BC - Sem Aditivo</i>									
identificação	α (%)	Teor de pasta (%)	H (%)	Consumo de finos totais (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	m	a (%)	p (%)
BC-0-0,4	61,4	27,2	12,1	561	561	250	2,68	47	53
BC-0-0,5	58,3	21,3	10,7	450	450	225	3,7	47	53
BC-0-0,65	55,5	15,9	10,3	336	336	219	5,3	47	53
BC-10-0,4	62,9	33,9	13,9	678	614	278	2,26	47	53
BC-10-0,5	56,7	26,1	11,3	545	474	237	3,4	44	56
BC-10-0,65	53,6	20,6	11,0	431	355	231	4,9	44	56
BC-18-0,4	59,1	35,3	13,4	713	607	270	2,33	42	58
BC-18-0,5	56,7	31,3	13,0	636	523	263	2,9	42	58
BC-18-0,65	51,5	23,2	11,0	485	355	231	4,9	42	58
BC-25-0,4	56,6	35,0	12,5	719	572	257	2,59	40	60
BC-25-0,5	54,4	31,8	12,1	655	500	250	3,1	40	60
BC-25-0,65	50,2	25,5	11,3	530	359	235	4,8	40	60

<i>Areia BC - Com Aditivo</i>									
identificação	α (%)	Teor de pasta (%)	H (%)	Consumo de finos totais (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Consumo de água (kg/m ³)	m	a (%)	p (%)
BC-0-0,4A	56,6	17,9	8,1	399	399	180	4,58	47	53
BC-0-0,5A	56,3	17,5	8,8	382	382	193	4,73	47	53
BC-0-0,65A	54,6	14,1	9,2	306	306	199	6,07	47	53
BC-10-0,4A	57,4	27,2	10,8	574	503	229	3,20	44	56
BC-10-0,5A	55,0	23,1	10,1	492	416	216	4,13	44	56
BC-10-0,65A	51,8	17,7	9,0	384	302	196	6,20	44	56
BC-18-0,4A	54,5	28,0	10,0	601	476	214	3,52	42	58
BC-18-0,5A	54,0	27,1	10,6	574	449	224	3,72	42	58
BC-18-0,65A	49,7	20,3	9,0	442	302	196	6,20	42	58
BC-25-0,4A	50,7	26,3	8,2	585	403	182	4,52	40	60
BC-25-0,5A	51,5	27,5	9,8	591	419	211	4,14	40	60
BC-25-0,65A	48,1	22,4	9,0	487	300	195	6,25	40	60

O que se observa dos parâmetros de dosagem é que para todos os tipos de areia, à medida que o teor de finos do agregado miúdo aumenta, a porcentagem de brita da composição granulométrica aumenta. Isso se deve, especificamente, ao ajuste da curva granulométrica do concreto à curva de referência proposta pelo Método de Faury (ANEXO B), tal comportamento confirma o empacotamento citado por De Larrard (1999).

Segundo o autor, à medida que aumenta a porcentagem de finos na composição, em um primeiro estágio, o volume de vazios diminui. Os finos preenchem os vazios dos grãos mais grossos. No entanto, atingido certo limite, os finos começam a interferir na acomodação dos grãos mais grossos e o efeito de afastamento é preponderante, elevando o índice de vazios. Portanto, o comportamento apresentado pela composição granulométrica proposta por Faury minimiza o efeito de afastamento entre os grãos.

Na ausência de finos, como é o caso dos concretos dosados com 0% de finos da areia, existe predominância das partículas grossas sobre as finas, conferindo maior atrito entre os grãos em decorrência do maior contato entre as partículas maiores (Pinto, 2000 apud Souza, 2005), apesar de se apresentar mais contínua.

Como reflexo desse ajuste, para todos os concretos, o teor argamassa seca (α) diminui conforme o teor de finos da areia aumenta. Outra tendência marcante é a relação entre o teor de argamassa seca e os tipos de areias. Em ordem crescente, os teores de argamassa seca se

apresentam maiores para a areia BC, BS e N. Os dois comportamentos do teor de argamassa seca citados são coerentes com os valores do índice de vazios das areias, conforme demonstrado na figura 4.11, embora haja variação no comportamento do concreto (fig. 5.3).

Além disso, o teor de argamassa seca também diminui conforme aumenta a relação água/cimento, para concretos com e sem aditivo. Essa tendência tem relação direta com a diminuição do consumo de cimento.

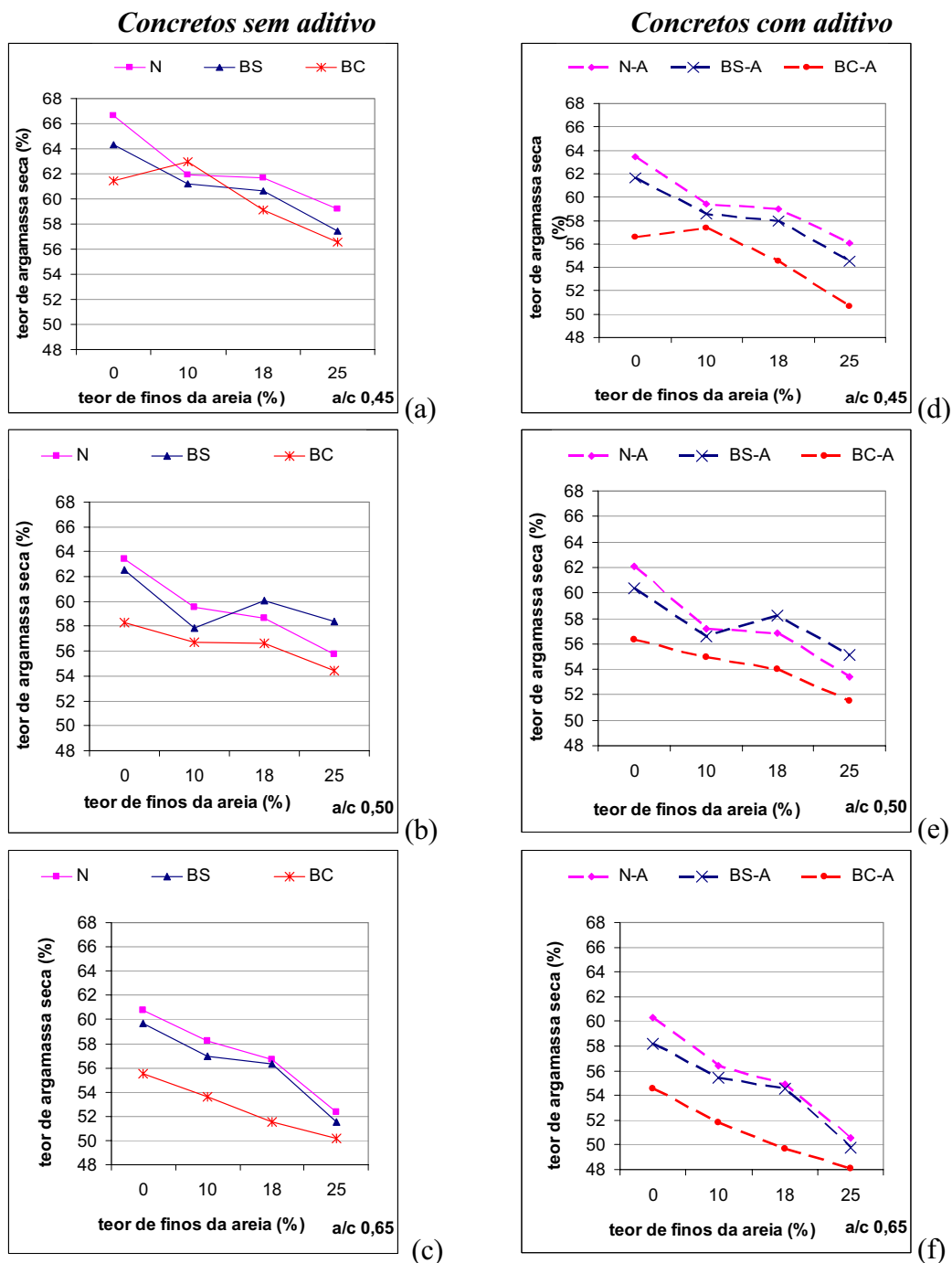


Figura 5.3 Tendência de comportamento do teor de argamassa seca para concretos dosados com diferentes tipos de areia, com (a, b, c) e sem aditivo (d, e, f) em função da elevação do teor de finos na areia.

O consumo de cimento diminui com o aumento da relação água/cimento. No entanto, sofre influência diferenciada com a alteração do tipo e teor de finos da areia, são alteradas, como observado na figura 5.4.

Concreto sem aditivo

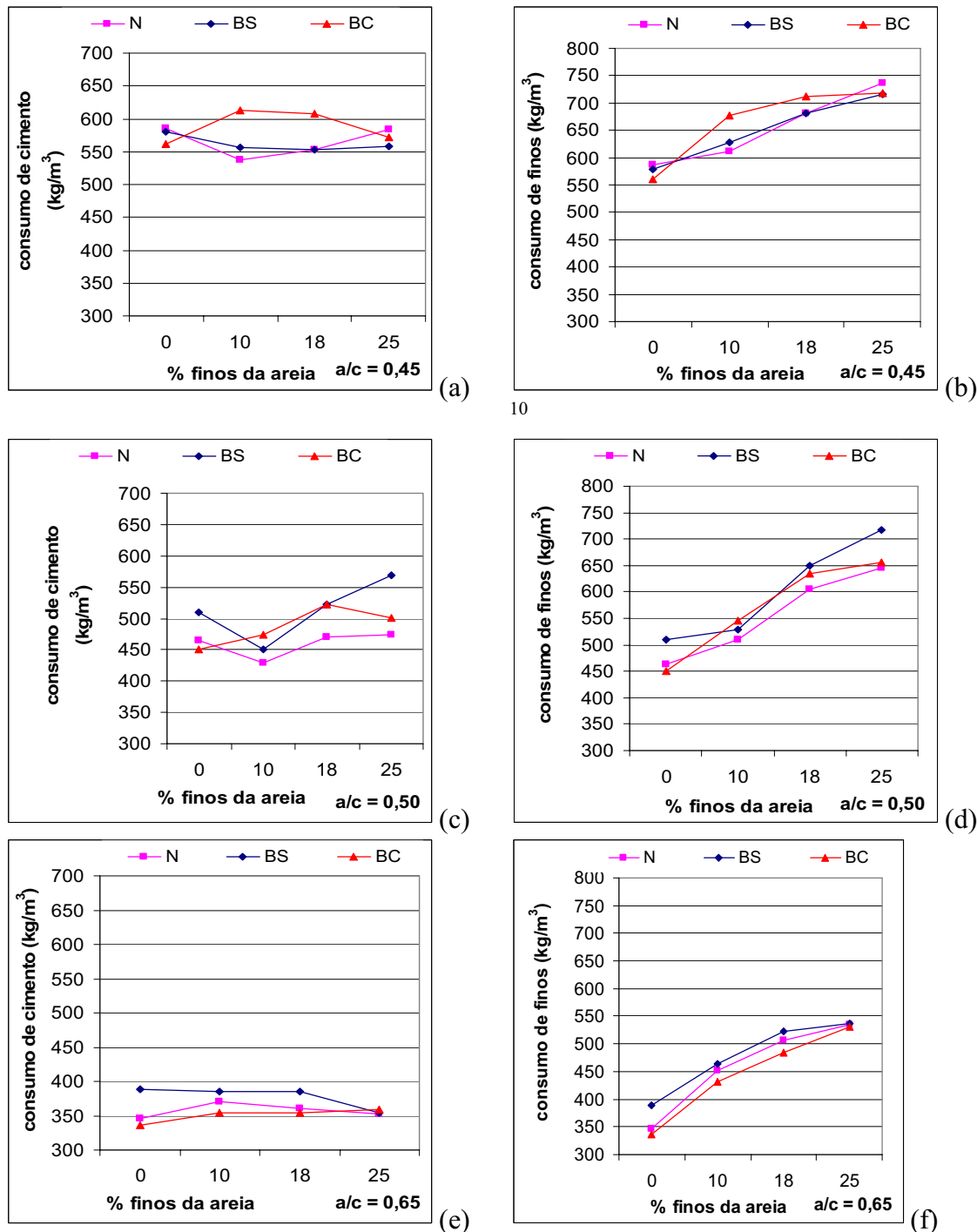


Figura 5.4 Influência do aumento do teor de finos da areia e do tipo de areia no consumo de cimento e de finos totais (cimento + finos da areia) de concretos SEM aditivo, para diferentes relações água/cimento.

¹⁰ O consumo de finos nos gráficos (d, e, f) é a soma do consumo de cimento (kg/m³) e dos finos da areia (kg/m³).

Os resultados de consumo de cimento para os concretos demonstram menor amplitude entre os resultados dos concretos com relação a/c 0,45 e 0,65. Já o concreto com relação a/c 0,50 apresenta maior variação.

Para o concreto com relação água/cimento 0,45, a areia BC apresentou comportamento contrário às outras areias (N e BS). Justifica-se essa alteração devido ao maior consumo de água exigido para o atendimento da consistência.

A faixa de consumo de cimento é apresentada na tabela 5.9, para as diferentes relações água/cimento.

Tabela 5.9 Faixa de consumo de cimento e finos totais (kg/m³) dos concretos SEM aditivo para diferentes relações a/c.

Relação a/c	Mínimo - Máximo: consumo de cimento (kg/m³)	Amplitude consumo de cimento (kg/m³)	Mínimo - Máximo: consumo de finos totais (kg/m³)	Amplitude consumo de finos (kg/m³)
0,45	537-614	77	561-736	175
0,50	430-523	139	450-718	268
0,65	336-389	55	336-537	201

O concreto BS-25-0,5 extrapola a faixa de consumo de cimento do concreto de relação a/c 0,50, atingindo a faixa do concreto de relação 0,45.

Quanto ao consumo de finos totais, cimento mais os finos do agregado miúdo, verifica-se que o comportamento é sempre ascendente, como esperado.

Com o objetivo de diminuir o consumo de cimento para a obtenção da mesma consistência, foi utilizado o aditivo de ação plastificante. Então, a quantidade de cimento e de água foram diminuídas, na mesma proporção, dos traços anteriormente ajustados sem aditivo. A redefinição do consumo de água e de cimento foi seguida do aumento da relação agregados/cimento (m), a fim de evitar o aumento da segregação e/ou exsudação do concreto.

Os consumos de cimento e de finos totais, em kg/m³ de concreto com aditivo estão apresentados na figura 5.5.

Concreto com aditivo

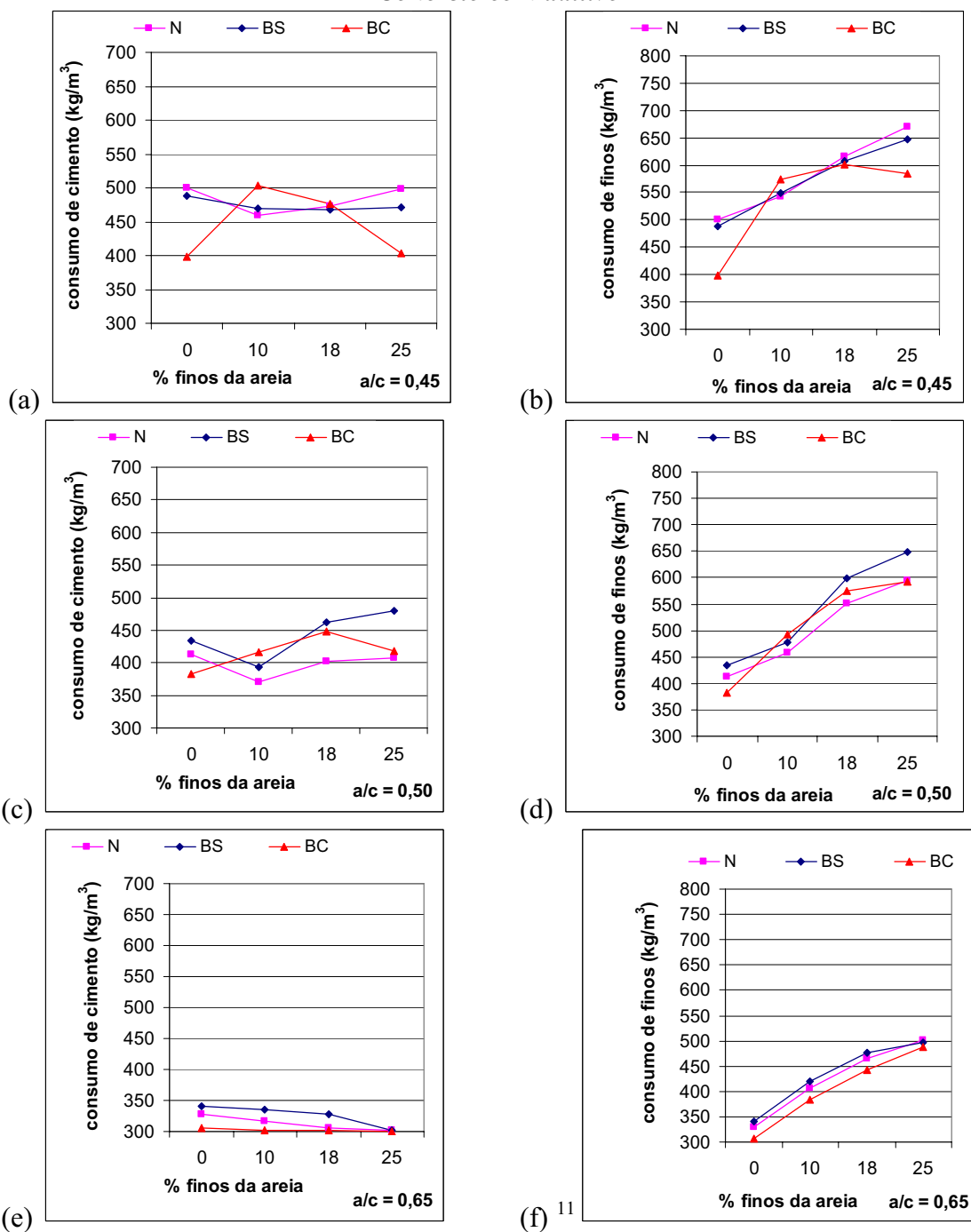


Figura 5.5 Influência do aumento do teor de finos da areia e do tipo de areia no consumo de cimento e de finos totais (cimento + finos da areia) de concretos COM aditivo, para diferentes relações água/cimento.

¹¹ Assim como para o concreto sem aditivo, o consumo de finos nos gráficos (d, e, f) é a soma do consumo de cimento (kg/m³) e dos finos da areia (kg/m³).

Como observado nos gráficos da figura 5.5, para os concretos dosados com aditivo de ação plastificante, o consumo de cimento e, conseqüentemente, de finos totais diminui, devido à ação redutora de água, apresentando a mesma tendência de comportamento dos concretos sem aditivo.

As faixas de consumo de cimento e finos totais para os concretos dosados com aditivo estão apresentadas na tabela 5.10.

Tabela 5.10 Faixa de consumo de cimento e finos totais (kg/m³) dos concretos COM aditivo para diferentes relações a/c.

Relação a/c	Mínimo - Máximo: consumo de cimento (kg/m³)	Amplitude consumo de cimento (kg/m³)	Redução no consumo de cimento (%)	Mínimo - Máximo: consumo de finos totais (kg/m³)	Amplitude consumo de finos (kg/m³)
0,45	399-503	104	22,3	399-671	272
0,50	371-481	110	16,1	382-648	266
0,65	300-341	41	15,4	306-501	195

A redução no consumo médio de cimento, em porcentagem, de todos os concretos dosados com a areia natural (N), britada sem VSI (BS) e britada com VSI (BC), em relação aos concretos sem aditivo, foi de 15,6%, 16,2% e 21,7%, respectivamente.

A variação da relação água/materiais secos, para os concretos com e sem aditivo, é coerente com o comportamento do consumo de cimento. A figura 5.6 apresenta o comportamento de H% para todos os concretos analisados.

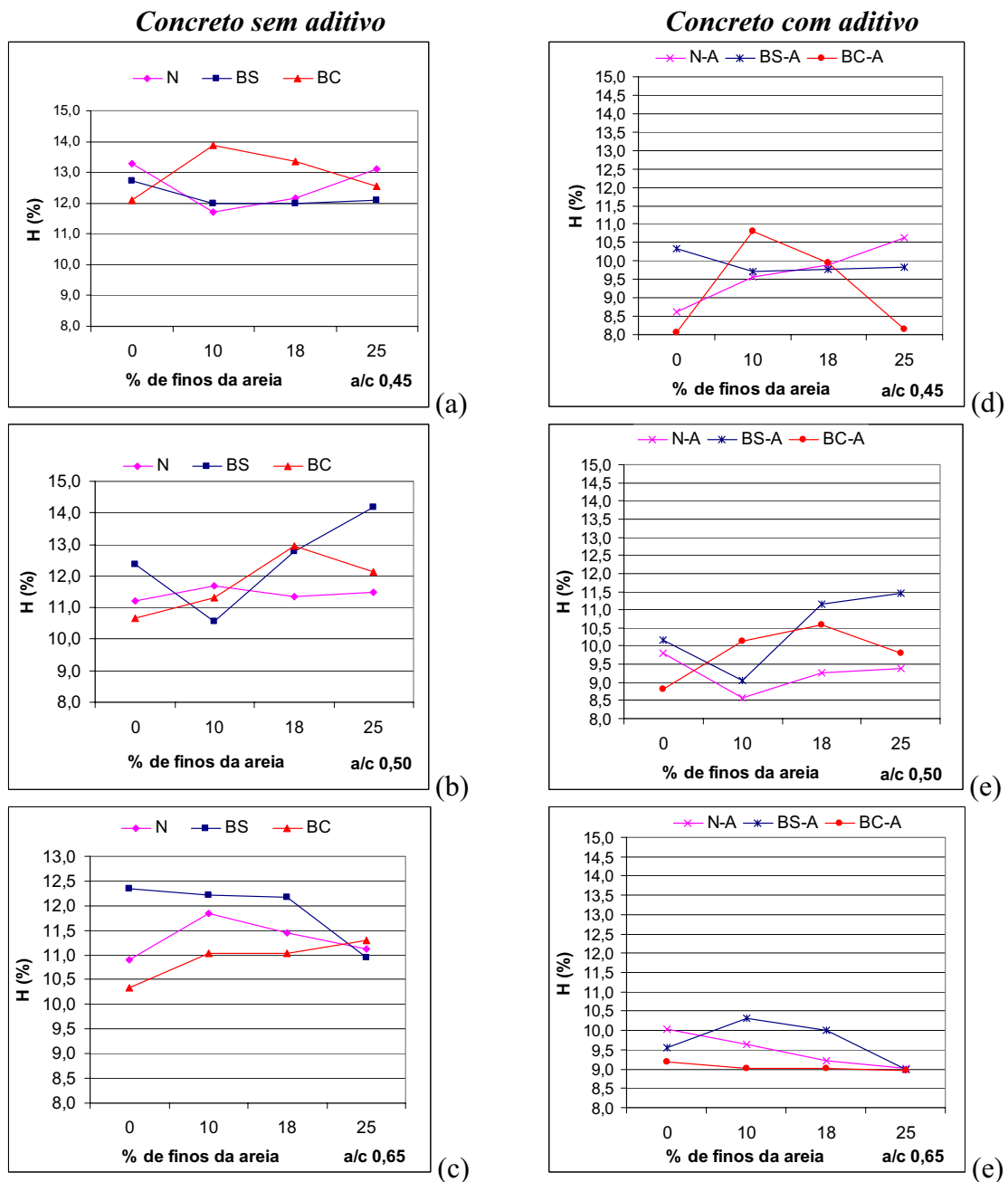


Figura 5.6 Relação água/materiais secos dos concretos dosados SEM aditivo (a, b, c) e COM aditivo (d, e, f), para diferentes relações água/cimento.

Observa-se que, para que fosse atingido o abatimento requerido, o H% demonstra amplitude de até 2%, em valor absoluto, para concretos com a mesma composição granulométrica e variação da relação a/c (0,45, 0,50 e 0,65). Apresenta maior variação em concretos com maior consumo de cimento e esse comportamento se repetiu para 70% dos concretos sem aditivo, mostrando que a Lei de Lyse possui variação pouco mais elevada quando a área superficial da mistura aumenta.

A introdução do aditivo reduziu o consumo de água e cimento, mantendo a mesma trabalhabilidade. Por isso, os concretos com e sem aditivo apresentam o mesmo comportamento para a relação água/materiais secos. Altera-se apenas o valor.

Quanto ao consumo de água (l/m^3) no concreto, que está refletido também na relação água/materiais secos, o comportamento mostra as mesmas tendências que os consumos de cimento e relação H (%) em função do aumento do teor de finos da areia. Os resultados estão apresentados na figura 5.7.

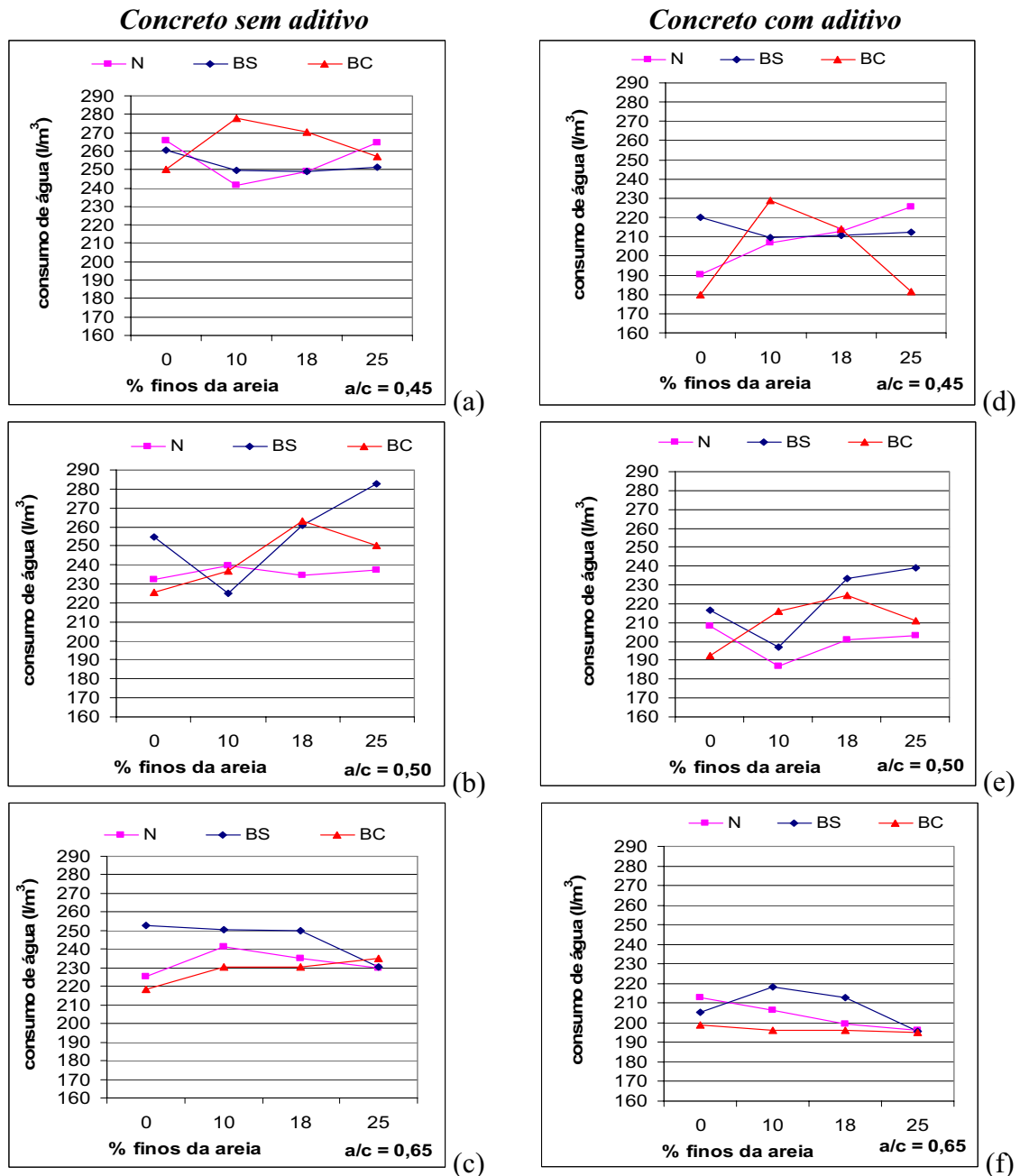


Figura 5.7 Consumo de água (l/m^3) dos concretos dosados SEM aditivo (a, b, c) e COM aditivo (d, e, f), para diferentes relações água/cimento.

Apresentados os consumos de cimento e de água das misturas, é importante caracterizar o comportamento do teor de pasta de cimento (%), responsável em grande proporção pelo comportamento reológico do concreto, realizadas as devidas ressalvas quanto ao efeito massa, provocado pelas maiores partículas do concreto (Ferraris & De Larrard, 1998; Oliveira et al., 2000; De Larrard & Sedran, 2002). A figura 5.8 mostra os resultados do teor de pasta (%)

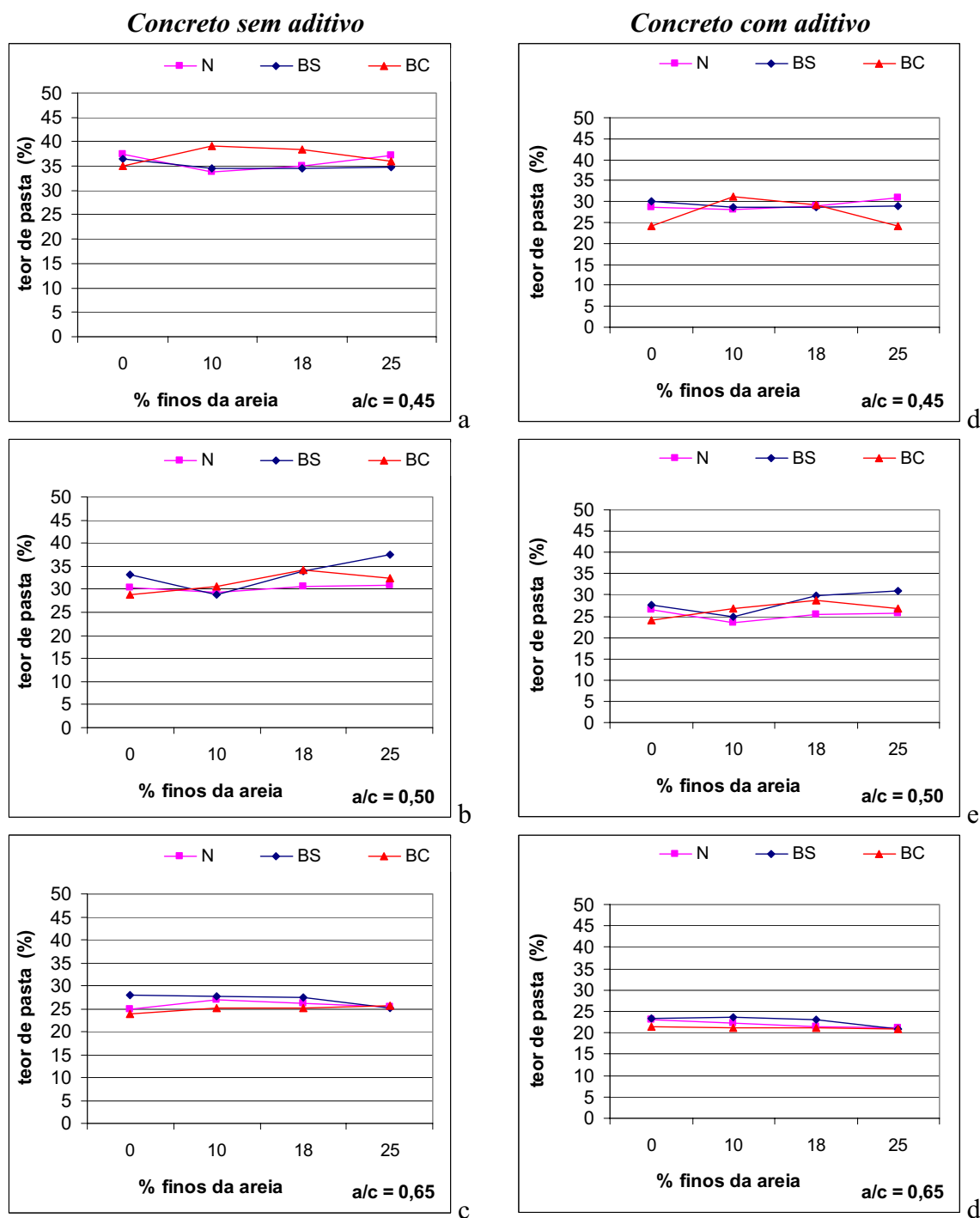


Figura 5.8 Teor de pasta dos concretos dosados SEM aditivo (a, b, c) e COM aditivo (d, e, f), para diferentes relações água/cimento.

Observando a figura 5.8, verifica-se que a introdução de aditivo proporciona uma redução no teor de pasta. Pode-se, inclusive, afirmar que a faixa de teor de pasta é reduzida cerca de 5%, em número absoluto, para os concretos com e sem aditivo de mesma relação a/c. Exemplo: a faixa de teor de pasta do concreto sem aditivo de relação a/c 0,65 (figura 5.8c) encontra-se entre 25% e 30%, aproximadamente. O concreto com aditivo de relação a/c 0,65 (figura 5.8d) tem a faixa de teor de pasta reduzida para valores entre 20 e 25%. Esse comportamento se repete para todos os pares de gráficos. Ressalta-se que o teor de pasta para uma determinada consistência, segundo Ferraris & Gaidis (1992) e confirmado por Souza (2005), em estudo da argamassa de revestimento, pode afetar o comportamento reológico do concreto de maneiras diferenciadas em função do seu maior ou menor teor.

Para melhor comparação entre os parâmetros de mistura dos traços, os consumos de materiais em porcentagem dos concretos sem aditivo estão apresentados nas figuras 5.9 a 5.11.

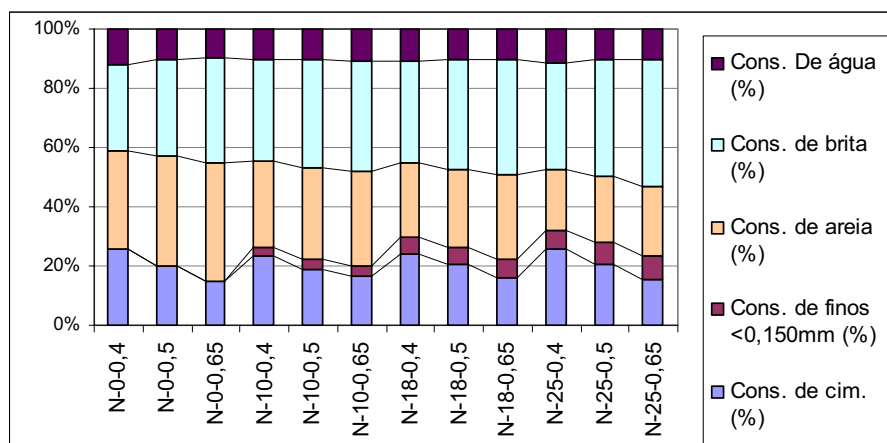


Figura 5.9 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia natural (N).

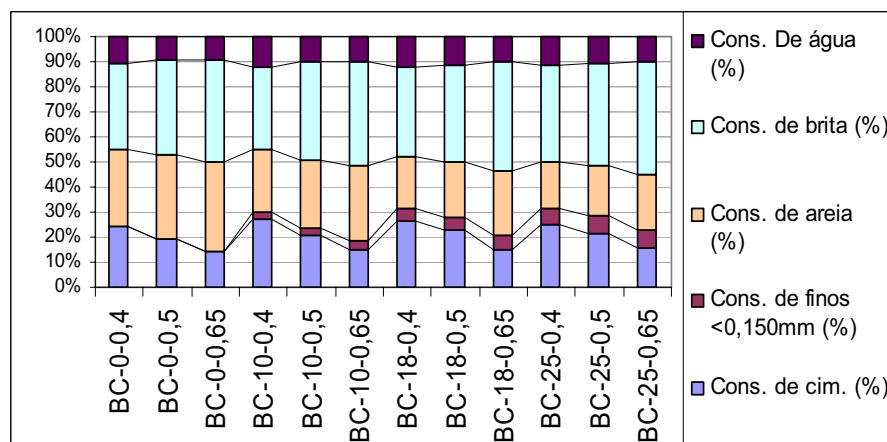


Figura 5.10 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada com tratamento de forma (BC).

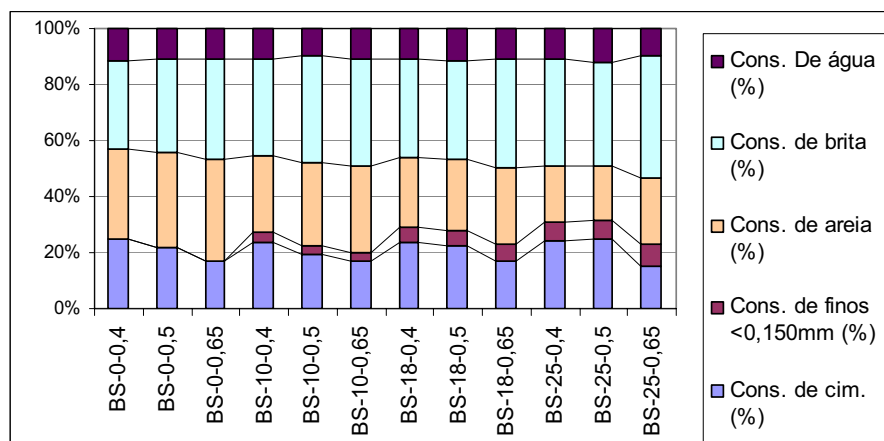


Figura 5.11 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada sem tratamento de forma (BS).

Analisando os consumos de material em percentagem, infere-se que apesar de em números absolutos existir diferença entre o consumo de água, a composição dos traços em percentagem mostra que o consumo de água para uma dada trabalhabilidade (no caso, medida pelo cone de Abrams) não apresenta diferença significativa. Isto demonstra que, para uma dada consistência medida pelo abatimento, existe um equilíbrio entre os outros componentes do concreto que interagindo com a água, ora são capazes de lubrificar, ora garantem coesão e/ou capacidade de deformar-se plásticamente, ora atribuem atrito ao sistema, comprovando a Lei de Lyse.

Esses gráficos (5.9 a 5.11) também confirmam a elevação da % de brita à medida que se eleva o teor de finos do agregado miúdo, usando o Método de Dosagem de Faury.

Além disso, é possível verificar que, para os diferentes tipos de areia, a percentagem de cimento é muito próxima para os concretos de características iguais - teor de finos da areia e relação a/c.

Quanto à percentagem de areia dos traços, analisando os critérios que definem a composição granulométrica no Método de Faury (ANEXO A), verifica-se que são divididos em dois tipos de areia: areia rolada e areia britada.

Seguindo os critérios, verifica-se o aumento da percentagem de areia no traço para aquela que, teoricamente, teria o maior grau de esfericidade e menor angulosidade das arestas, denominadas “roladas” - areia natural. Para as areias britadas, a percentagem de areia é menor, com a finalidade de minimizar a interferência na trabalhabilidade causada pelo

agregado miúdo com formato menos favorável. No entanto, como já demonstrado no item 4.4.3, a areia britada com VSI (BC) tem alto grau de esfericidade e menor angulosidade de suas arestas, inclusive comparada à areia natural. Portanto os critérios do Método de Faury necessitam ser revisados para considerar areias britadas com alto grau de esfericidade na definição dos índices (i) A e B que definem o ponto de inflexão da curva de referência, dividindo a porcentagem de agregado graúdo e a porcentagem de agregado miúdo na composição granulométrica; e (ii) K e K', que caracterizam o consumo mínimo de água para o atendimento de uma condição de trabalhabilidade.

As figuras 5.12 a 5.14 apresentam o comportamento do consumo de materiais (%) dos traços dosados com aditivo, mostrando as mesmas tendências anteriormente discutidas para os concretos sem aditivo.

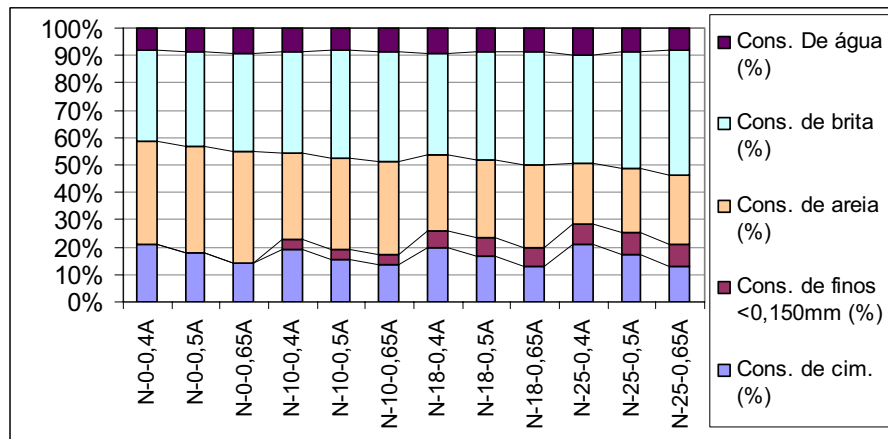


Figura 5.12 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia natural (N) e aditivo de ação plastificante.

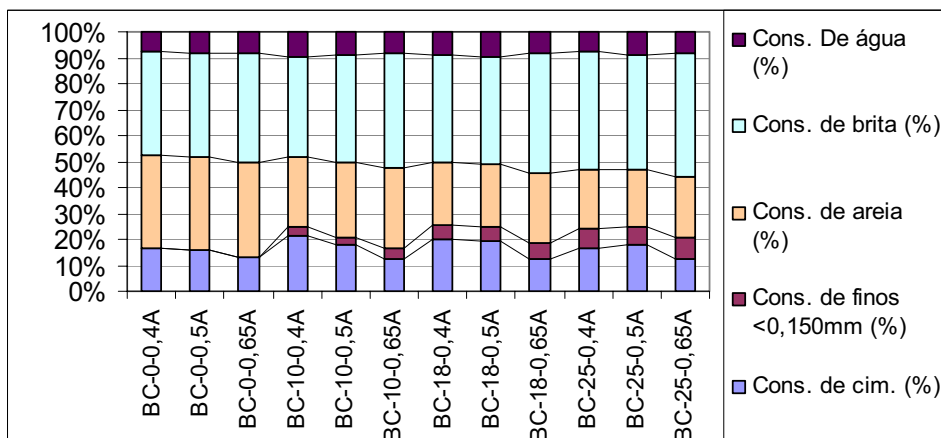


Figura 5.13 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada com tratamento de forma (BC) e aditivo de ação plastificante.

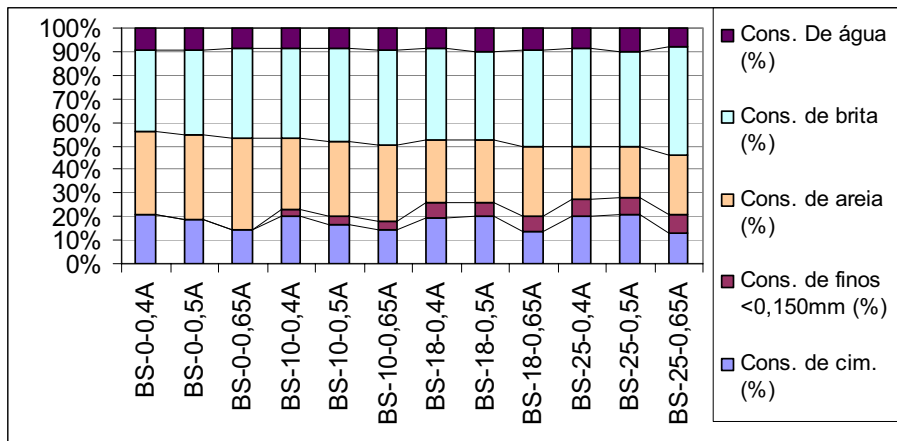


Figura 5.14 Consumo em % dos materiais constituintes dos concretos dosados com areia britada sem tratamento de forma (BS) e aditivo de ação plastificante.

O ajuste da dosagem de aditivo foi realizado em pequenas quantidades, diluído em partes da segunda metade da água de amassamento até o atendimento do abatimento requerido, atingindo as dosagens apresentadas na figura 5.15.

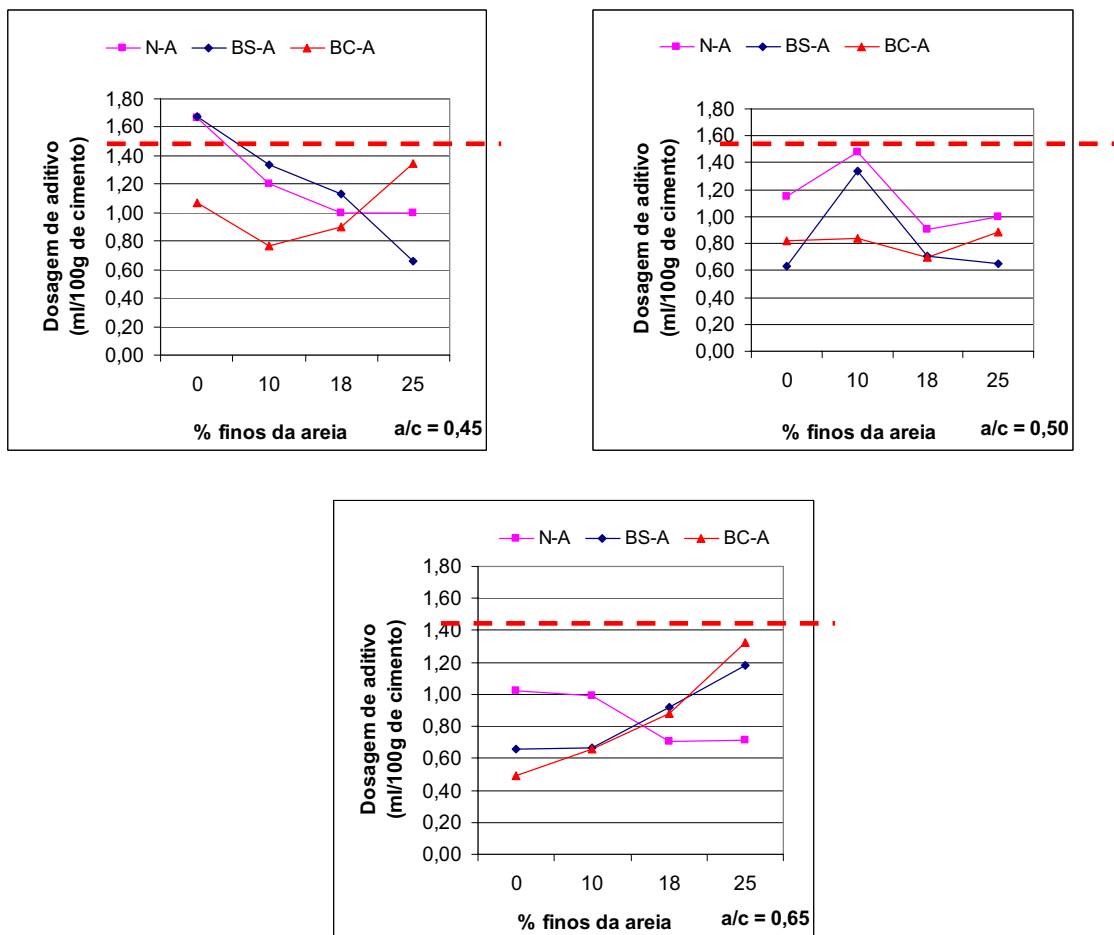


Figura 5.15 Dosagem do aditivo superplastificante.

Observa-se pelos gráficos da figura 5.15 que apenas os traços NA-0-0,45A e BS-0-0,45A ultrapassaram o limite máximo da dosagem recomendado pelo fabricante e N-10-0,50A atingiu o valor de 1,5 ml por 100g de cimento. Esse comportamento coincide com os resultados apresentados por Quiroga & Fowler (2001) - a litologia calcária do agregado miúdo conduz à dosagem de superplastificante inferior à recomendada pelo fabricante.

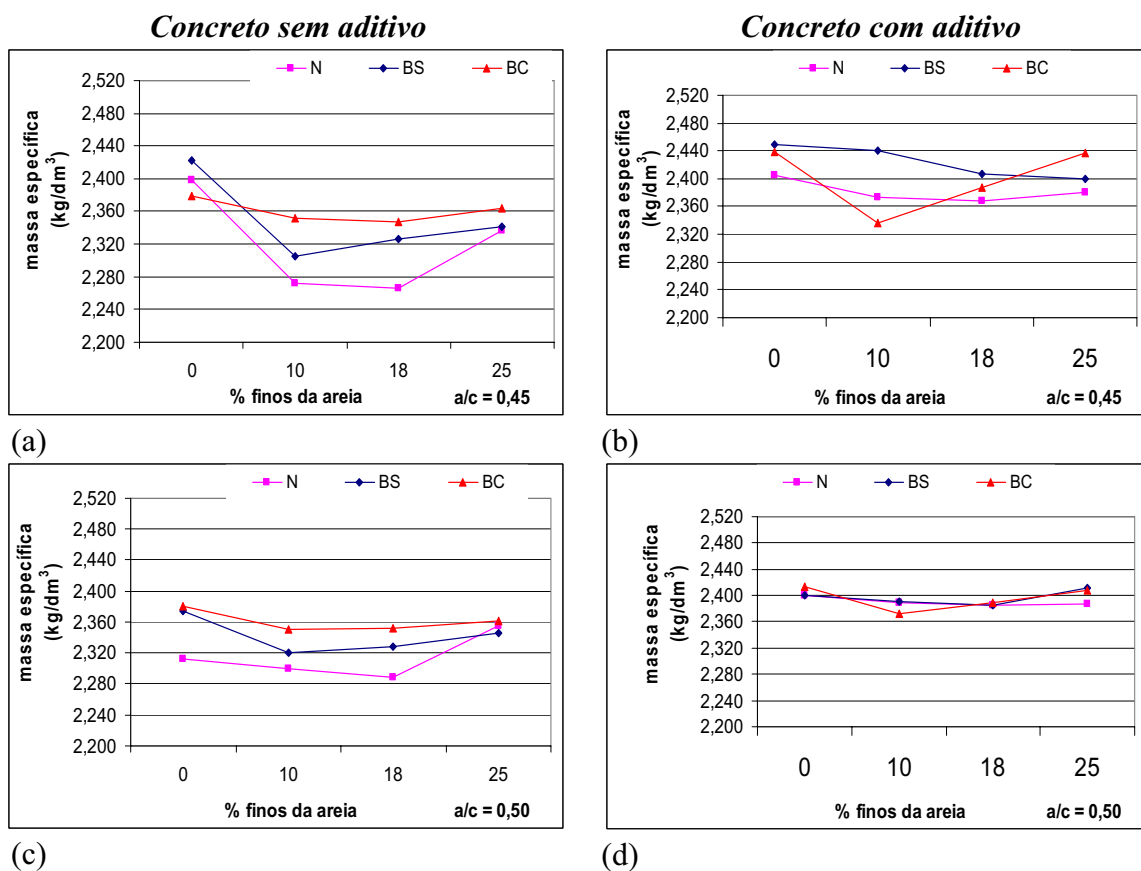
O desempenho do aditivo e a variação da dosagem serão discutidos em conjunto com a análise dos resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido.

5.2.2. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.

Neste item, os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido dos concretos apresentados no item 5.2.1 serão apresentados e discutidos.

5.2.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO

Os resultados dos ensaios de massa específica do concreto estão apresentados na figura 5.16.



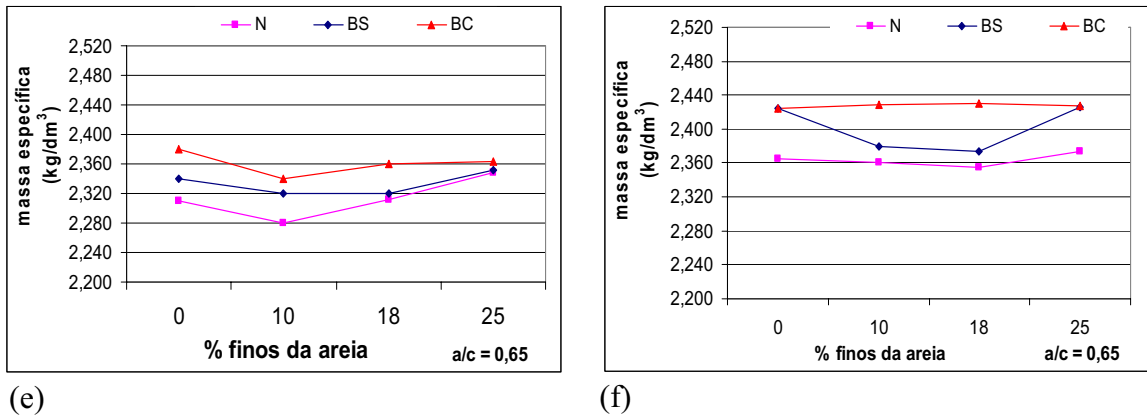


Figura 5.16 Influência do teor de finos da areia nos resultados dos ensaios de massa específica dos concretos sem aditivo (a, c, e) e com aditivo (b, d, f).

Através da análise dos resultados de massa específica do concreto sem aditivo, o que se observa é que, independente da relação a/c, os valores das massas específicas são, em ordem decrescente, dos concretos dosados com as areias BC, BS e N. Para cada curva, os concretos com teor de finos da areia extremos (0% e 25%) têm os maiores valores de massa específica, indicando a tendência de maior empacotamento dos grãos. Este comportamento confirma os estudos realizados por De Larrard (1999) que indicam o empacotamento do esqueleto granular em função da predominância de determinado tamanho de partícula.

Segundo De Larrard (1999), em estudo baseado na comparação entre diferentes métodos de dosagem, confirmou-se que quanto maior a diferença entre os diâmetros d_1 e d_2 (figura 3.7a), e menor o efeito de afastamento provocado por partículas de diâmetro intermediário (d_i) que causaria maior índice de vazios (figura 3.7b), maior será o empacotamento das partículas.

Aplicando esse conceito também traduzido na figura 3.7b, pode-se analisar a figura 5.17.

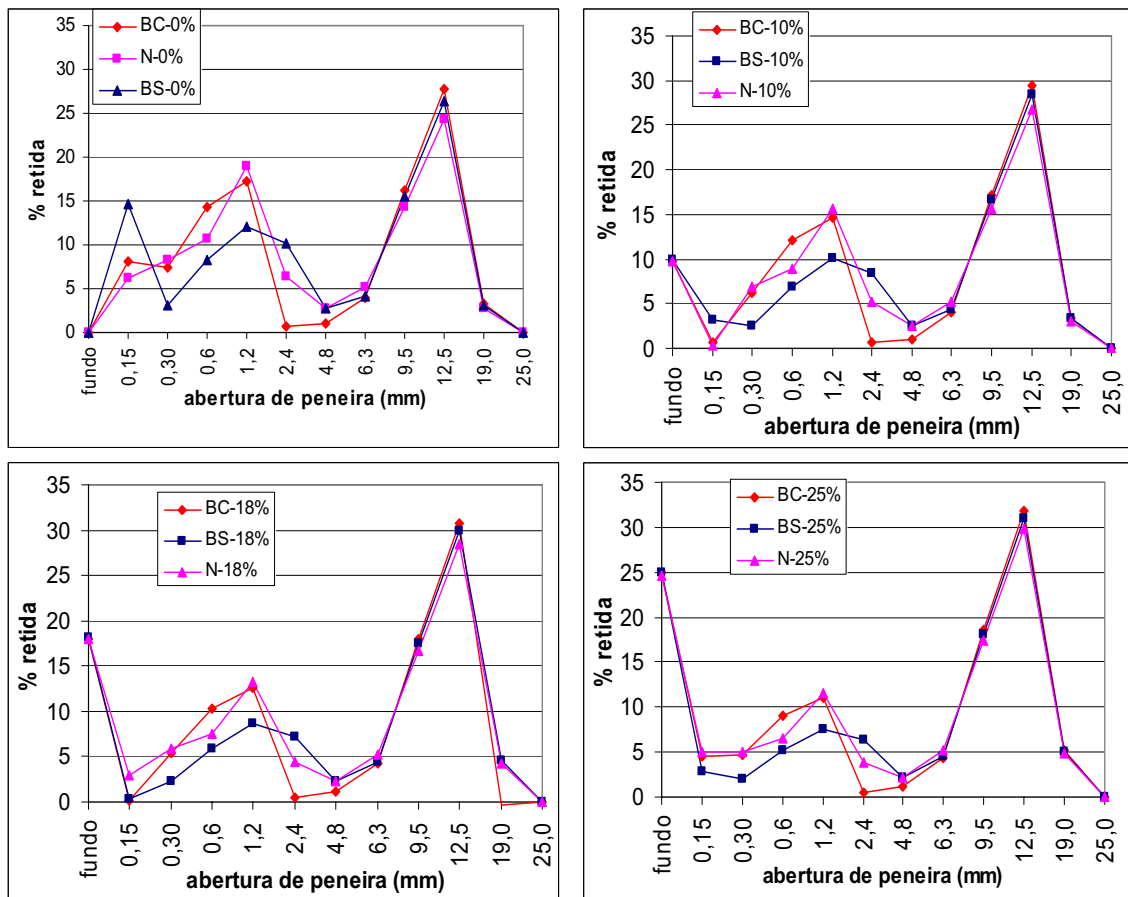


Figura 5.17 Distribuição das porcentagens retidas de cada areia e teores de finos da areia.

Através da análise das curvas mostradas na figura 5.17, pode-se verificar que para todas as composições o diâmetro de partícula dominante é 12,5 mm (d_1). Para 0% e 10% de finos, o segundo diâmetro dominante (d_2) é 1,2 mm. Para 18 e 25%, d_2 são as partículas menores que 0,150 mm.

Considerando também o efeito de afastamento provocado pela partícula de diâmetro intermediário (d_i) que é igual a 1,2 mm para os teores de finos de areia 10%, 18% e 25%, observa-se que a quantidade média de d_i é decrescente com o aumento do teor de finos da areia.

Portanto, o empacotamento é maior para os concretos dosados com 0% e 25%. Com 0% de finos de areia, o efeito de afastamento pode ser desconsiderado, pois não existe d_i predominante. Para os concretos com 25% de finos de areia, existe grande diferença entre d_1 e d_2 e o efeito de afastamento é o menor, comparado às outras composições.

Nos concretos com 18% de finos de areia, o ajuste granulométrico se aproxima daquele para 25% de finos. No entanto, o efeito de afastamento entre os grãos é um pouco mais elevado, representando decréscimo no empacotamento.

A composição de agregados para 10% de finos é a menos favorável, pois apresenta a menor diferença entre d_1 e d_2 e o maior efeito de afastamento decorrente da maior porcentagem de partículas d_i , no caso retida na peneira 1,2 mm.

Ressalta-se que os efeitos do empacotamento granular têm menor influência à medida que o teor de pasta aumenta.

Dentre os métodos de dosagem estudados por De Larrard (1999), o método proposto por Faury já indicava que o melhor ajuste da curva granulométrica da composição de areia e brita (ANEXO B) ocorre em duas situações traduzidas na relação A_s/A_i (%): (i) a área superior (A_s) à curva de referência é o mais próxima possível da área inferior (A_i) ou (ii) quando o valor é o mais afastado de 100%. Essas duas situações culminam na maior compactidade do concreto. O cálculo das áreas dos ajustes das curvas granulométricas compostas com os materiais desta pesquisa à curva de referência é apresentado na tabela 5.11¹².

Tabela 5.11 Áreas de ajuste à curva de referência do Método de Faury.

Tipo de areia	Área Superior - A_s (unidade de área)	Área Inferior - A_i (unidade de área)	$(A_s/A_i)*100$
N-0	243,5	257,1	95%
N-10	163,5	154,8	106%
N-18	164,8	103,7	159%
N-25	149,8	75,0	200%
BS-0	185,8	222,2	84%
BS-10	185,8	155,9	119%
BS-18	147,7	107,1	138%
BS-25	175,4	91,74	191%
BS-0	187,6	213,2	88%
BS-10	135,2	109,1	124%
BS-18	110,3	71,6	154%
BS-25	135,0	72,6	186%

¹² As áreas foram calculadas através da transferência dos gráficos de ajuste da composição granulométrica para o programa AutoCad.

Como se pode observar, os resultados apresentados nas figuras 5.16 e 5.17 são convergentes à tabela 5.11 proposta por Faury, validadas também pelos estudos de De Larrard (1999).

Para os concretos dosados com aditivo, a tendência mais marcante é que a massa específica do concreto aumenta em relação aos concretos sem aditivo. Essa tendência ocorre para os 3 (três) tipos de areia e para todas as relações água/cimento avaliadas.

No concreto com relação a/c igual a 0,50, apesar do consumo total de finos atingir o valor de 648 kg/m^3 , o empacotamento dos grãos mantém o valor da massa específica constante, provavelmente porque a ação do aditivo acontece também nas partículas menores que 0,075 mm das areias natural e calcárias, que segundo Santos (2006), tem potencial zeta bastante negativos. Em contato com o cimento atacado pelo aditivo, o sistema teria maior eficiência na repulsão entre as partículas, provocando a melhor dispersão dos grãos e mantendo a massa específica do concreto constante para os diferentes teores de finos. Isto sugere que deve ser feito um estudo mais detalhado das partículas finas, levando-se em consideração a energia superficial das mesmas.

No caso do concreto de relação a/c igual a 0,65, o desempenho do aditivo é mais efetivo para os concretos dosados com as areias de maior grau de esfericidade, confirmando o comportamento do concreto com a/c 0,50. No entanto, provavelmente pelo formato da areia BS ser menos favorável¹³, as forças de repulsão criadas pela interação entre o cimento e o aditivo não tenham magnitude suficiente para dispersar as partículas a ponto de superar o maior atrito provocado pela angulosidade das arestas dos grãos. Dessa forma, a curva BS-0,65A apresenta o comportamento do concreto sem aditivo, BS-0,65 (figura 5.4)

5.2.3.1. ENSAIO DE TEOR DE AR INCORPORADO DO CONCRETO

Os resultados dos ensaios de teor de ar incorporado do concreto estão apresentados na figura 5.18.

¹³ Grãos com baixo grau de esfericidade, arestas muito angulosas/angulosas e rugosidade superficial.

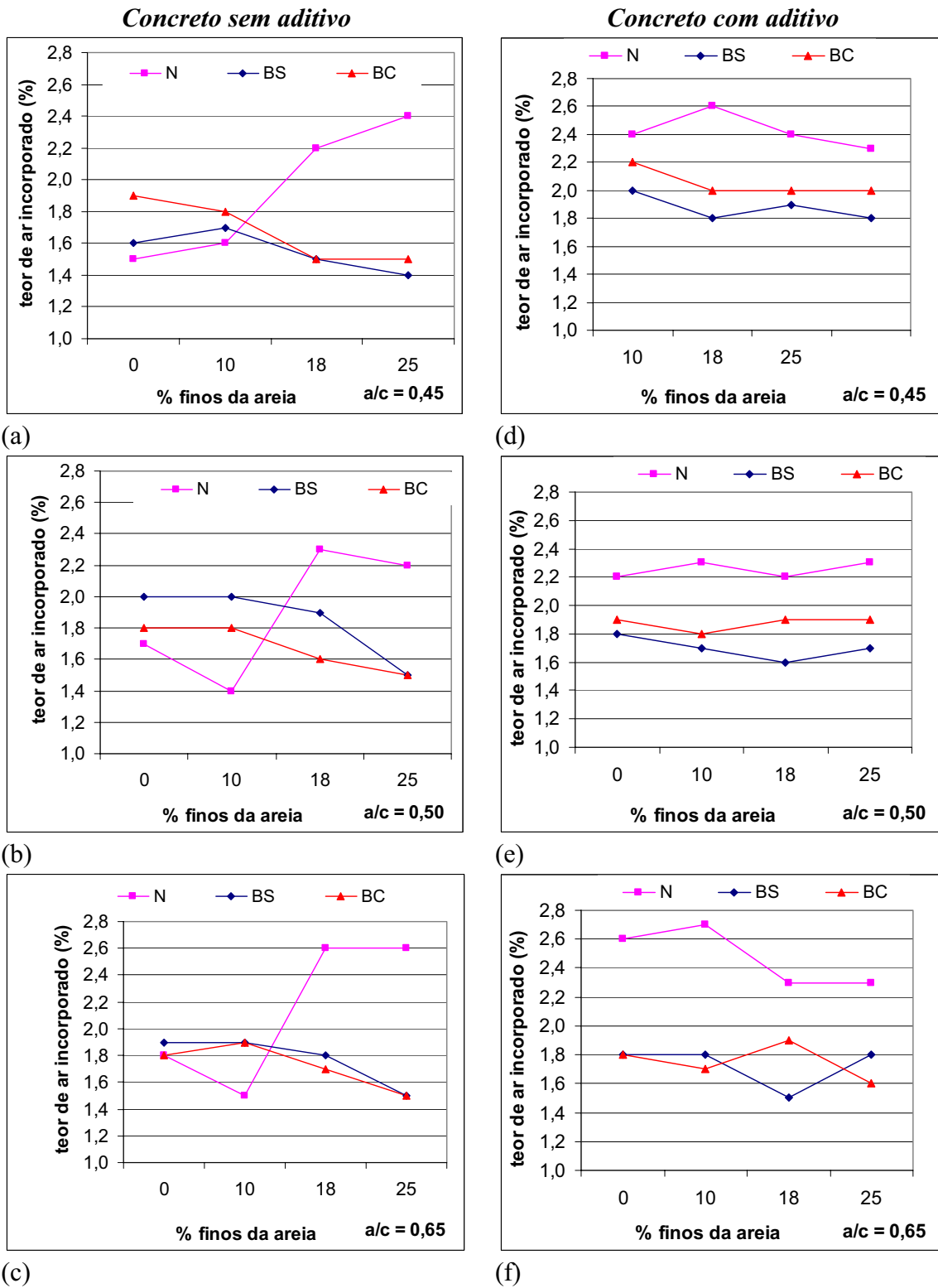


Figura 5.18 Influência do teor de finos da areia nos resultados dos ensaios de teor de ar incorporado dos concretos sem aditivo (a, b, c) e com aditivo (d, e, f).

Para os concretos sem aditivo, a influência do aumento do teor de finos da areia no comportamento da incorporação de ar para as areias britadas (BC e BS) é coerente com o maior empacotamento dos grãos, demonstrado pelo ensaio de massa específica do concreto. Esse comportamento se repete para as três relações a/c avaliadas. Isto mostra estreita relação entre dois fatores: a incorporação de ar e o empacotamento dos grãos aliado ao preenchimento dos vazios do esqueleto granular pela pasta.

Quando colocado o aditivo à mistura, para os concretos com relação a/c igual a 0,50 e 0,65 não se observa maior incorporação de ar para as areias britadas. Já para a relação a/c 0,45, existe uma pequena elevação nos valores comparados aos concretos sem aditivo. A tendência do comportamento dessas misturas é de manter ou diminuir a incorporação de ar à medida que se eleva o teor de finos da areia no concreto.

Para os concretos dosados com areia natural, o comportamento da incorporação de ar apresenta-se diferenciado dos concretos com areia britada. Como visto na figura 5.18, a tendência dos concretos com areia natural é de incorporar mais ar com o aumento do teor de finos. Possivelmente, essa é uma característica do material, pois se repete para as três relações a/c. Com a utilização de aditivo, essa tendência do concreto com areia natural é minimizada. Isto pode ser um fenômeno causado pela diminuição da tensão superficial da água ou pela natureza dos finos, que em alguns processos de produção da areia natural podem incorporar material argiloso à areia britada.

5.2.3.2. VISCOSIDADE DO CONCRETO: ENSAIO DE ABATIMENTO MODIFICADO

Vale ressaltar que a viscosidade do concreto é a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, que nada mais é do que o gradiente de velocidade de uma parte do corpo em escoamento em relação a uma base estacionária. Portanto é um indicativo da coesão.

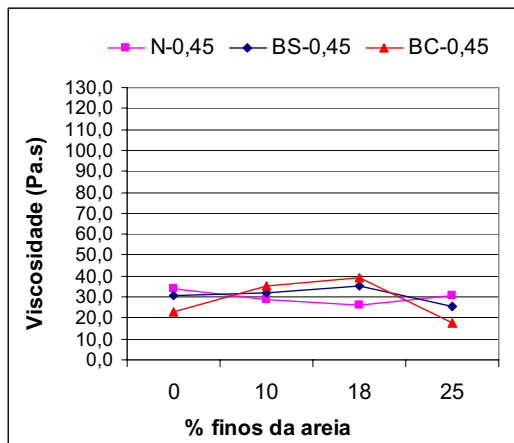
A viscosidade pode ser afetada pelo teor de água, mineralogia, dimensão e forma dos agregados e pelo efeito lubrificante das partículas finas (Santos, 2003 e Barbosa, 2007). Popovics (1982) e Banfill (2003) afirmam que o comportamento reológico do concreto fresco é resultado da interação entre os efeitos de superfície das partículas finas e da água (incluindo ar) e os efeitos de massa das partículas de agregado graúdo. Por isso, acredita-se

em um teor ideal de matriz dependente das características dos agregados para uma dada consistência e viscosidade.

Dessa forma, para realizar a análise da viscosidade dos concretos, de acordo com o objetivo dessa pesquisa, é necessário correlacioná-la ao teor de finos das areias e verificar, principalmente, como as variáveis consumo de cimento e consumo de água, representadas pelo teor de pasta a afetam.

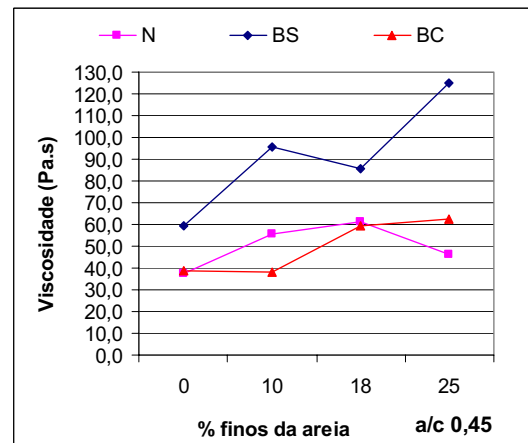
A observação mais perceptível é que a viscosidade (figura 5.19) decresce com o favorecimento do formato das partículas da areia, para os menores teores de pasta.

Concreto sem aditivo

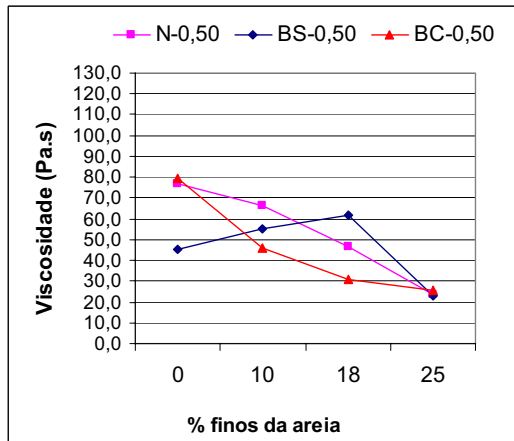


(a)

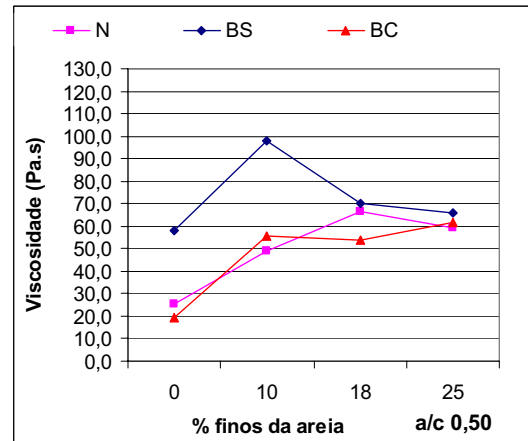
Concreto com aditivo



(d)



(b)



(e)

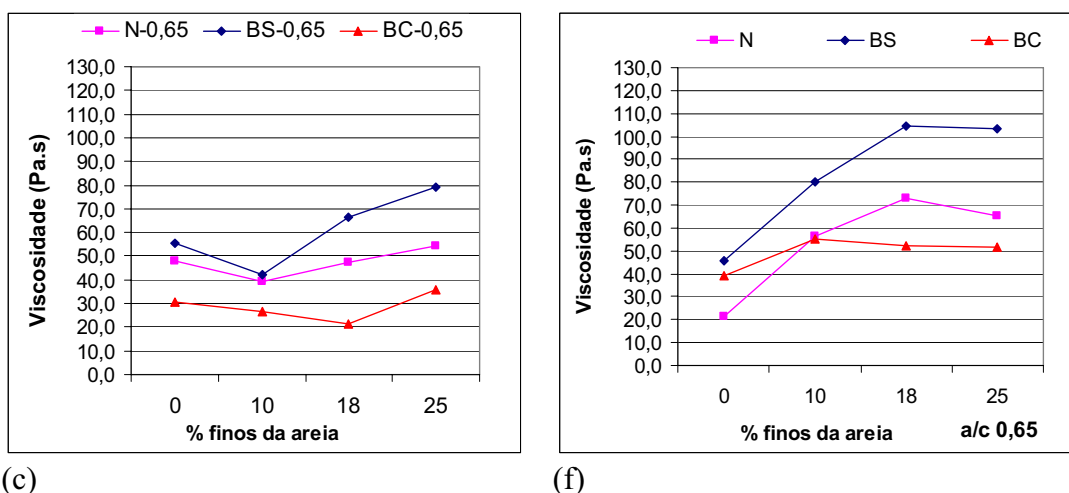


Figura 5.19 Influência do teor de finos da areia nos resultados de viscosidade dos ensaios de abatimento modificado, em concreto com e sem aditivo.

Para os concretos sem aditivo, podemos verificar três comportamentos distintos para consistência de 120 ± 10 mm nas figuras 5.19a, 5.19b e 5.19c. Essas tendências de comportamentos podem ser classificadas por faixas de consumo de cimento e teor de pasta e para facilitar a leitura e entendimento do conteúdo a seguir, serão nomeados como comportamento 1, 2 e 3.

Comportamento 1 - gráfico 5.19a (faixa de consumo de cimento entre 540 kg/m^3 a 615 kg/m^3 de concreto e teor de pasta entre 34 e 40%): para os resultados apresentados pelos concretos dosados com relação água/cimento 0,45, a variação entre os valores apresentados pelos três tipos de areia em função da elevação do teor de finos da areia é menos expressiva.

No entanto, observa-se que apresentam o mesmo comportamento do consumo de cimento (figura 5.4a) e do consumo de água, traduzido em teor de pasta (inclusive na curvatura). Esse comportamento reflete o efeito lubrificante das partículas de cimento e água.

Neste caso, a diferença entre os formatos das partículas foi anulada, notadamente pelo elevado consumo de cimento na faixa de, aproximadamente, 540 a 615 kg/m^3 (Popovics, 1982 e CABRERA & DONZA, 1997).

Comportamento 2 - gráfico 5.19b: *(faixa de consumo de cimento entre 390kg/m³ a 540kg/m³ de concreto e teor de pasta entre 29 e 35%):* para os concretos dosados com a/c 0,50, as areias N e BC, de formatos mais favorecidos que BS (tabela 4.5), apresentam valores de viscosidade, decrescentes em função da elevação do teor de finos da areia.

Esse comportamento não tem correspondência com o consumo de água que, para a areia N é praticamente constante, e para a areia BC tem pequena variação. Além disso, como se pode verificar nas figuras 5.4b e 5.7b, o consumo de cimento tem o mesmo comportamento que o consumo de água.

Portanto, em decorrência do maior empacotamento granular dos concretos com 18% e 25% de finos das areias N e BC, essa faixa de teor de pasta é suficiente para o preenchimento dos vazios, culminando em uma determinada quantidade de água livre. Então, prevalece o efeito lubrificante das partículas, aumentando a taxa de cisalhamento. O resultado é a diminuição da viscosidade do concreto. Este tipo de comportamento já foi observado por ANGELIM (2000) em trabalho que estudou a influência da adição de finos na consistência de argamassas.

A maior viscosidade para os pontos 0% e 10% de finos está ligada ao fato do teor de pasta não ser suficiente para preencher os vazios e vencer o atrito entre as partículas, com conseqüente diminuição da taxa de cisalhamento.

Para a areia BS, o comportamento não se repete. Inclusive, existe clara tendência de aumento da viscosidade ao elevar o teor de finos da areia. Provavelmente isto ocorra porque a areia BS tem grãos, predominantemente, com formato da classe de arredondamento muito anguloso/anguloso e baixo grau de esfericidade, favorecendo o atrito entre as partículas e o aumento da viscosidade.

O concreto BS-25-0,50 tem viscosidade menor porque apresenta o comportamento 1, ou seja, alto consumo de cimento (569 kg/m³ e H=14%) que lubrifica as partículas e diminui a

viscosidade para, aproximadamente, 30 Pa.s - mesmo patamar que o apresentado pelo concreto BS-25-0,45.

Comportamento 3 - gráfico 5.19c: (faixa de consumo de cimento entre 330kg/m^3 a 390kg/m^3 de concreto e teor de pasta entre 24 e 29%): para os concretos dosados com a/c 0,65, nessa faixa de consumo, a interferência do formato do agregado se faz mais efetiva, justificada por Ferraris e De Larrard (1998), Oliveira et al (2000) e De Larrard e Sedran (2002), pelo maior atrito existente entre os grãos.

Para a análise dos concretos com aditivo, preliminarmente, deve-se ressaltar:

- uma terceira variável, fundamental para a avaliação desses concretos, também deve ser analisada – a dosagem de aditivo (figura 5.15);
- os concretos dosados com aditivo também apresentaram tendências de resultados de viscosidade classificados apenas conforme os **comportamentos 2 e 3**, anteriormente apresentados;
- invariavelmente, a viscosidade apresenta o menor valor para os concretos com 0% de finos de areia. Isto se justifica pela ação do aditivo, que dispersa as partículas de cimento, tornando o efeito de envolvimento e lubrificação das maiores partículas dos agregados mais eficiente. Isto minimiza o atrito e conseqüentemente aumenta a taxa de cisalhamento.

A partir dessas ressalvas, é possível analisar o comportamento da viscosidade em função da elevação do teor de finos da areia para os concretos dosados com aditivo.

Comportamento 2 - gráficos 5.19d e 5.19e: (faixa de consumo de cimento entre 390kg/m^3 a 540kg/m^3 de concreto e teor de pasta entre 24 a 30%): os concretos N-0-0,45A, N-10-,45A, BS-10-0,50A e BC-25-0,65A tiveram a dosagem de aditivo excessiva, devendo ser desconsiderados dessa análise¹⁴.

¹⁴ Essa discussão será realizada no item 1.2.3.4. com foco na tensão de escoamento das misturas.

Para os concretos com a/c 0,45 e aditivo (gráfico 5.19d): para a areia britada BS, o consumo de aditivo diminuiu com o aumento dos finos da areia. O consumo de cimento e de água manteve-se praticamente constante, ou seja, a lubrificação entre as partículas diminuiu, sendo insuficiente para vencer o atrito entre as partículas com baixo grau de esfericidade e arestas mais angulosas. A consequência desse conjunto de fatores culminou na diminuição da taxa de cisalhamento, elevando a viscosidade dos concretos. Tal comportamento já havia sido observado no concreto sem aditivo, com a/c 0,50, que apresenta a mesma faixa de consumo de cimento.

Para os concretos com aditivo, areia natural e 18 e 25% de finos, a dosagem de aditivo manteve-se constante. Confirmando o efeito de lubrificação dos grãos finos da areia, decorrente do teor de pasta adequado favorecido pela ação do superplastificante, a viscosidade diminuiu.

No caso dos concretos com aditivo e areia BC, a dosagem de aditivo foi ascendente devido ao consumo de cimento e de água dos concretos com 0% e 25% de areia ser menores. Portanto, dentro dessa faixa de teor de pasta, a ação plastificante do aditivo manteve a viscosidade constante.

Para os concretos dosados com a/c 0,50 e aditivo (gráfico 5.20e), a dosagem de aditivo apresenta a tendência de se manter constante com o aumento do teor de finos da areia. O consumo de cimento e H% apresentam a mesma tendência do concreto sem aditivo. O reflexo dessas três variáveis na viscosidade foi a manutenção dos valores entre, aproximadamente 55 e 70Pa.s, para as três areias.

Comportamento 3 - gráfico 5.19f: *(faixa de consumo de cimento entre 330kg/m³ a 390kg/m³ e teor de pasta entre 20 e 24%):* para os concretos com relação a/c 0,65 e aditivo, observa-se que para as areias britadas, a dosagem de aditivo foi crescente à medida que se elevou o consumo de finos. Em valores, a dosagem de aditivo é praticamente igual para BC e BS, inclusive com a sobreposição das curvas nos pontos 10 e 18%. Quanto ao

consumo de cimento (entre 300 e 341kg/m³) e H%, o comportamento dos concretos sem aditivo segue as mesmas tendências que para os concretos sem aditivo.

Considerando essas três variáveis, verifica-se que, para a areia BC, a viscosidade apresenta-se constante nos pontos 10, 18 e 25% de finos da areia. Já o concreto dosado com a areia BS, para os mesmos pontos, revela leve variação de 80 a 100Pa.s. Através desses dados, infere-se que foi preciso elevar a dosagem de aditivo para manter a viscosidade praticamente constante. Portanto, a influência do formato das partículas é predominante no comportamento da viscosidade com a elevação dos finos da areia. O aditivo, neste caso, minimiza os efeitos do formato das partículas da elevação do teor de finos da areia.

Por fim, é importante relacionar os valores encontrados nessa pesquisa aos propostos por Ferraris & De Larrard (1998) (figura 3.13) para concretos de massa específica média de 2400kg/m³. Para esses autores, para concretos com abatimento de 120 mm e 130 mm, a viscosidade varia de 0 a, aproximadamente, 120Pa.s para tempos de 0 a 2s. Nesta pesquisa, os resultados variaram de 18 a 125Pa.s para tempos de 0,30 a 2,08s, mostrando-os válidos dentro da previsão realizada através de resultados de concretos avaliados pelo reômetro BTRHEOM, desenvolvido no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*.

5.2.3.3. TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO: *VANE TEST* EM ARGAMASSA E ABATIMENTO MODIFICADO EM CONCRETO

O ensaio de *Vane* foi realizado com o objetivo de avaliar se o maior teor de finos na composição da areia influencia o comportamento da tensão limite de escoamento das argamassas de maneira equivalente ao comportamento da tensão limite de escoamento do concreto, avaliada nessa pesquisa pelo ensaio do abatimento modificado.

Para tanto, o traço da argamassa foi definido pela exclusão da fração brita (p) do traço do concreto, ou seja, o traço de concreto 1:a:p:a/c tornou-se 1:a:a/c.

Vale ressaltar que, em valores absolutos, não deve existir correspondência entre os dois ensaios devido ao efeito massa provocado pela brita no processo de mistura e no ensaio realizado em concreto.

Os resultados dos ensaios dos concretos sem aditivo estão apresentados na figura 5.20.

Concreto sem aditivo – Abatimento Modificado

Concreto sem aditivo – Vane Test

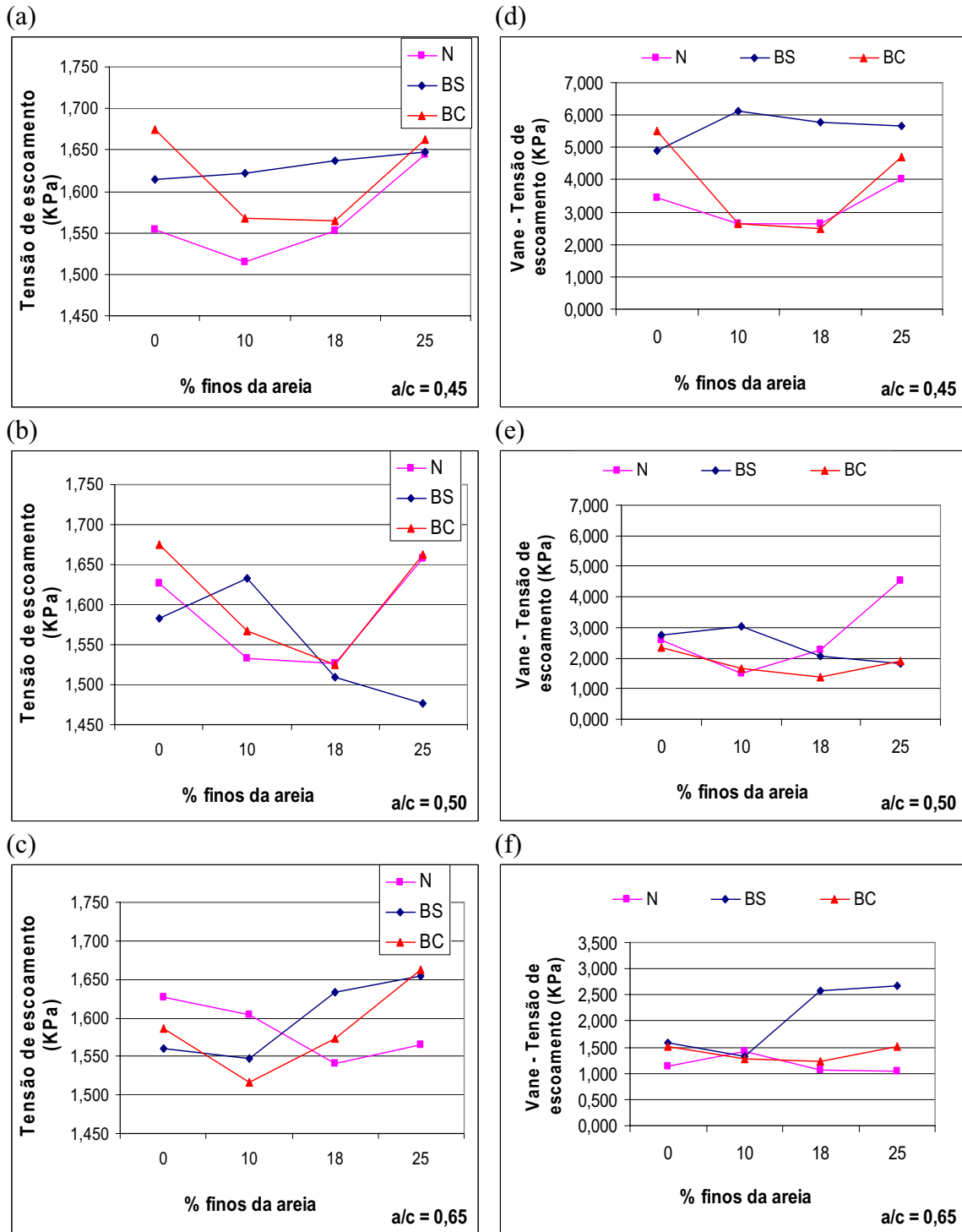


Figura 5.20 Influência do teor de finos da areia nos resultados de tensão de escoamento dos ensaios de abatimento modificado, em concreto (a, b, c) e *Vane Tester*, em argamassa (d, e, f), sem aditivo.

Os resultados dos dois ensaios mostram comportamentos similares entre o concreto sem aditivo e a argamassa correspondente ao seu traço. Isso confirma a afirmação de Popovics (1982) que afirma que o comportamento reológico do concreto depende das características da argamassa e da pasta e também de Turian, et al (1997) que comprovou que a tensão de escoamento é uma propriedade intrínseca ao material, independente da geometria e do tipo de equipamento ou modelo reológico adotado. Neste caso, é possível que a realização de ensaios em argamassa facilite a previsão do comportamento da tensão de escoamento do concreto.

A correlação entre os resultados da tensão de escoamento obtidos pelo ensaio de abatimento modificado e o *Vane Test* pode ser verificada na figura 5.21.

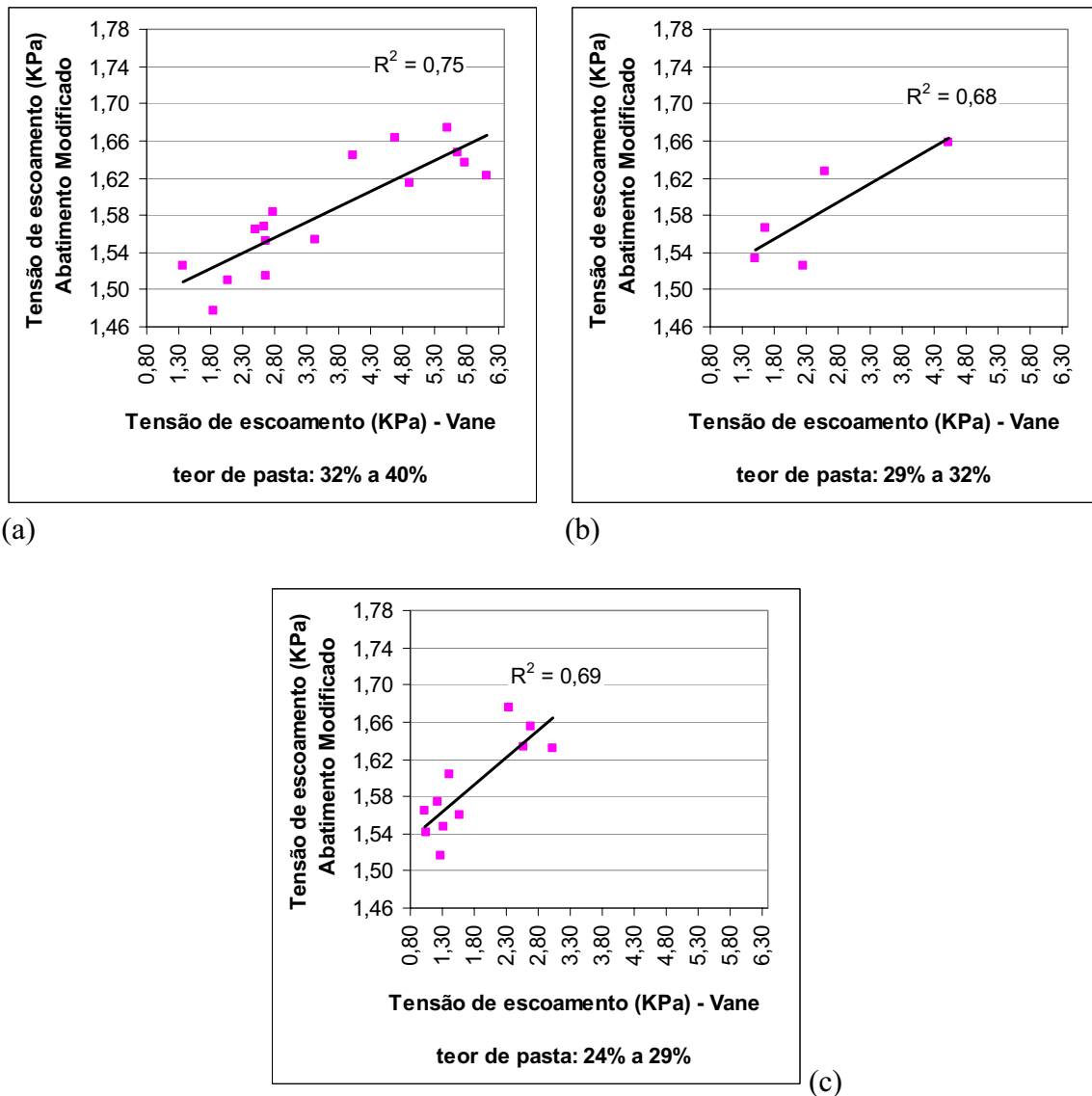


Figura 5.21 Correlação entre Abatimento Modificado e *Vane Test*.

Observa-se que os valores de correlação estão vinculados ao teor de pasta da argamassa, que afeta em maior proporção a tensão de escoamento medida pelo *Vane*, devido à sua maior precisão e desconsideração do efeito massa. Essa variação na correlação é justificada porque o teor de pasta influencia o comportamento reológico de diferentes maneiras em função do seu teor em argamassas e concretos. Esse comportamento foi constatado por Ferraris & Gaidis (1992), em concreto, e reafirmado por Souza (2005), em argamassa, conforme detalhado no item 3.3.2. da Revisão Bibliográfica.

Embora não realizada, no caso da investigação da argamassa de concreto com aditivo, pelo *Vane Test*, seriam necessários cuidados com a dosagem de aditivo, preferencialmente expressa em porcentagem de sólidos, e a realização do desconto do líquido do aditivo da água de amassamento. Essa preocupação é justificada pela maior precisão conferida pelo equipamento. Este assunto pode ser mais explorado em Aitcin (2000).

Analisando agora os resultados de tensão de escoamento do concreto, medida pelo abatimento modificado, infere-se que o comportamento das curvas reflete as contribuições dos sólidos e dos líquidos na resistência de cisalhamento, conforme citado por De Larrard (1999), figura 3.7c.

As constatações de Ferraris & Gaidis (1992) também são aplicáveis ao comportamento apresentado pela tensão de escoamento do concreto. As autoras afirmam que, à medida que se eleva o teor de pasta, a suspensão escoar com maior facilidade, pois diminuem os contatos entre os agregados e a consistência passa a ser governada pela viscosidade da pasta.

Dentre os concretos dosados sem aditivo, pode-se verificar que 7 entre 9 das curvas apresentadas na figura 5.20 tendem a apresentar maiores tensões de escoamento nos pontos 0% e/ou 25% de finos de areia, com variável ponto de inflexão, entre 10% ou 18% de finos de areia.

Os resultados dos ensaios dos concretos com aditivo estão apresentados na figura 5.22.

Concreto com aditivo – Abatimento Modificado

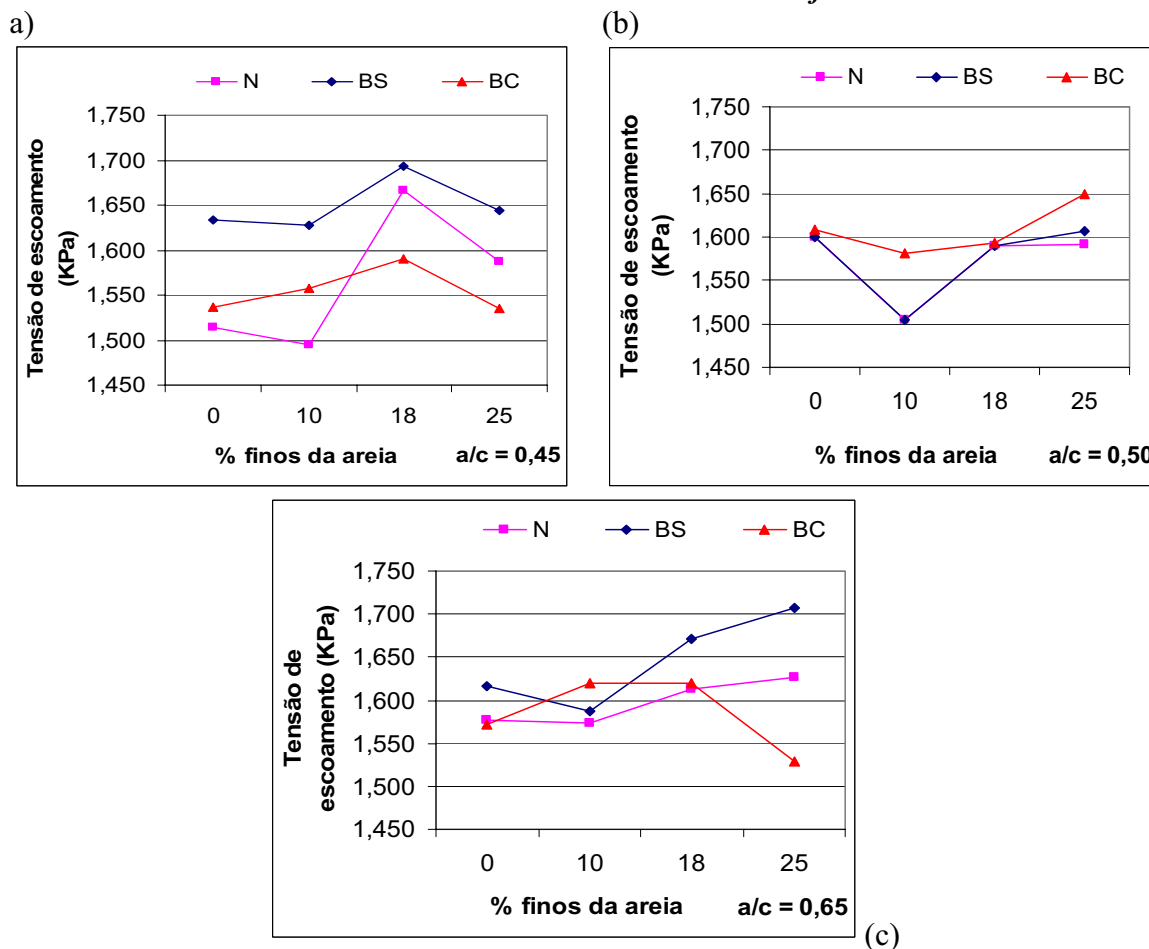


Figura 5.22 Influência do teor de finos da areia nos resultados de tensão de escoamento dos ensaios de abatimento modificado, em concreto com aditivo (a, b, c).

Observa-se que para os concretos dosados com aditivo, a amplitude entre os valores de tensão de escoamento de cada tipo de areia, para as diferentes relações a/c, é menor que para os concretos sem aditivo.

Dentre os 36 traços avaliados, 4 deles apresentaram tendência à segregação durante o ensaio de abatimento modificado (desmoronamento do cone) apesar dos teores de argamassa serem superiores a 55%. São eles: N-0-0,45A; N-10-0,45A; BS-10-0,50A e BC-25-0,65A, os quais apresentam os menores valores de tensão de escoamento. Este fato ocorreu devido à dosagem excessiva de aditivo, comprovada pela comparação entre os teores mostrados na figura 5.15. Tal efeito confirma as palavras de Aitcin (2000): “a segregação pode ser induzida por erros como dosagem inadequada de plastificante”.

A correlação entre os resultados de abatimento e a tensão de escoamento é mostrada na figura 5.23.

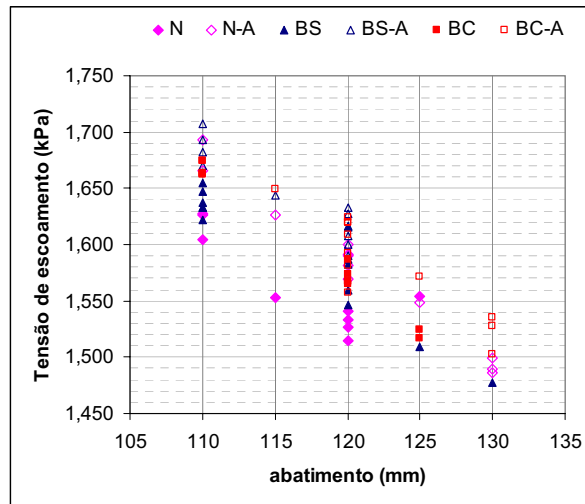


Figura 5.23 Correlação entre o abatimento e a tensão de escoamento medidos pelo ensaio de abatimento modificado.

Segundo o gráfico da figura 3.13, proposto por Ferraris e De Larrard (1998), para concretos de massa específica média de 2400kg/m^3 , de abatimento modificado entre 100 mm e 130 mm apresentam tensão de escoamento entre 1600Pa e 1400Pa. Os valores de referência foram baseados em concretos dosados com agregado graúdo de dimensão máxima de 10,0 mm.

Os concretos avaliados nessa pesquisa apresentaram valores de tensão de escoamento entre 1700Pa e 1500Pa, para abatimento entre 110 e 130 mm, dosados com agregado graúdo de dimensão máxima de 25 mm. A variação entre os valores de referência e os obtidos na pesquisa, provavelmente, é decorrente da diferença entre a dimensão máxima do agregado graúdo.

5.2.3.4. ENSAIO DE EXSUDAÇÃO

O parâmetro E (%) representa a porcentagem de água exsudada em relação à água total de amassamento dos traços. Os resultados do ensaio de exsudação são apresentados na figura 5.24.

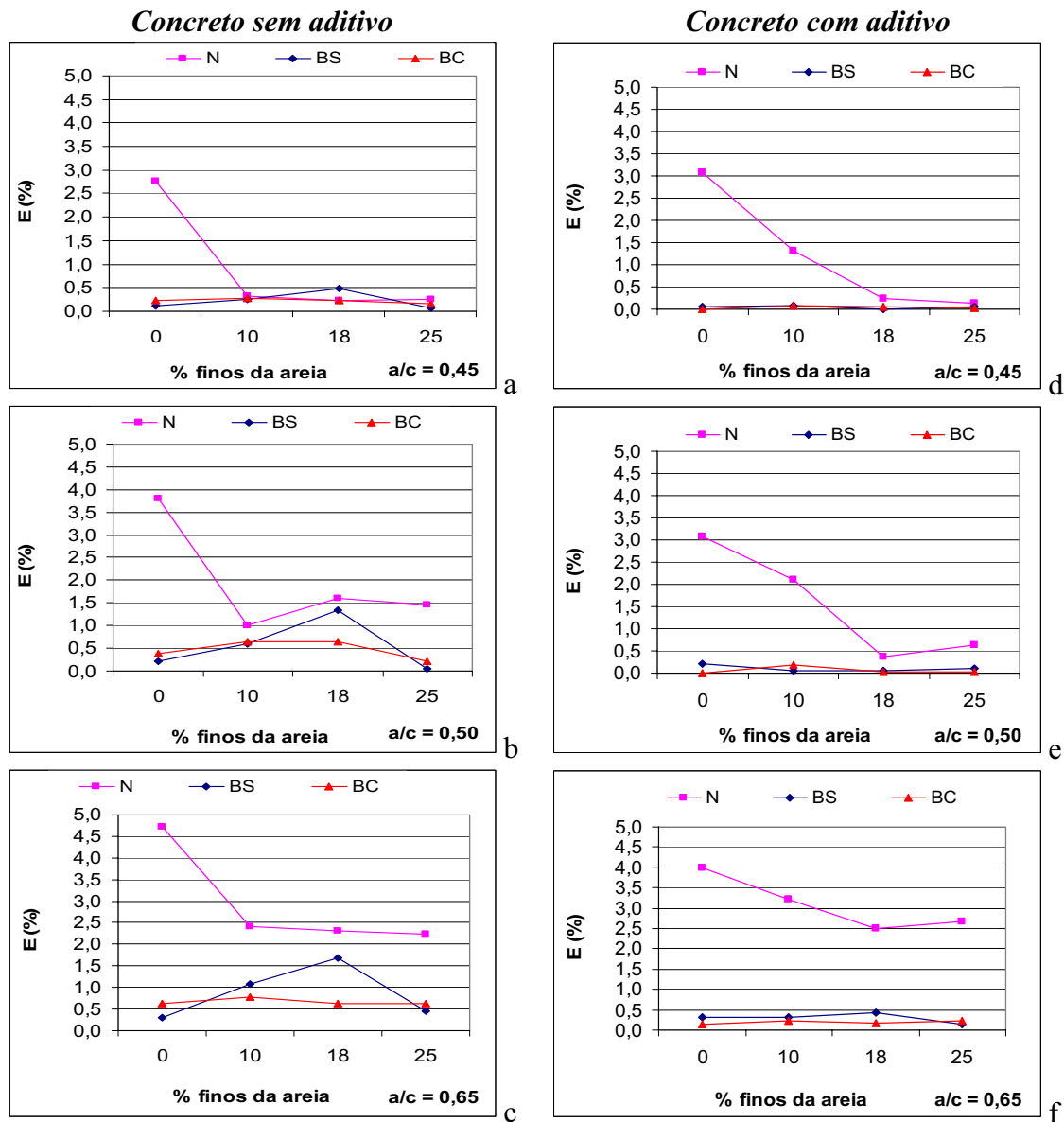


Figura 5.24 Influência do teor de finos da areia nos resultados de exsudação, em concreto sem aditivo (a, b, c) e com aditivo (d, e, f)

De maneira geral, a diminuição na relação água/cimento provoca a diminuição da exsudação, resultado coerente com as afirmações de Popovics (1982), Wainwright & Ait-Aider (1995), Topçu & Elgün (2003) e Josserand (2004).

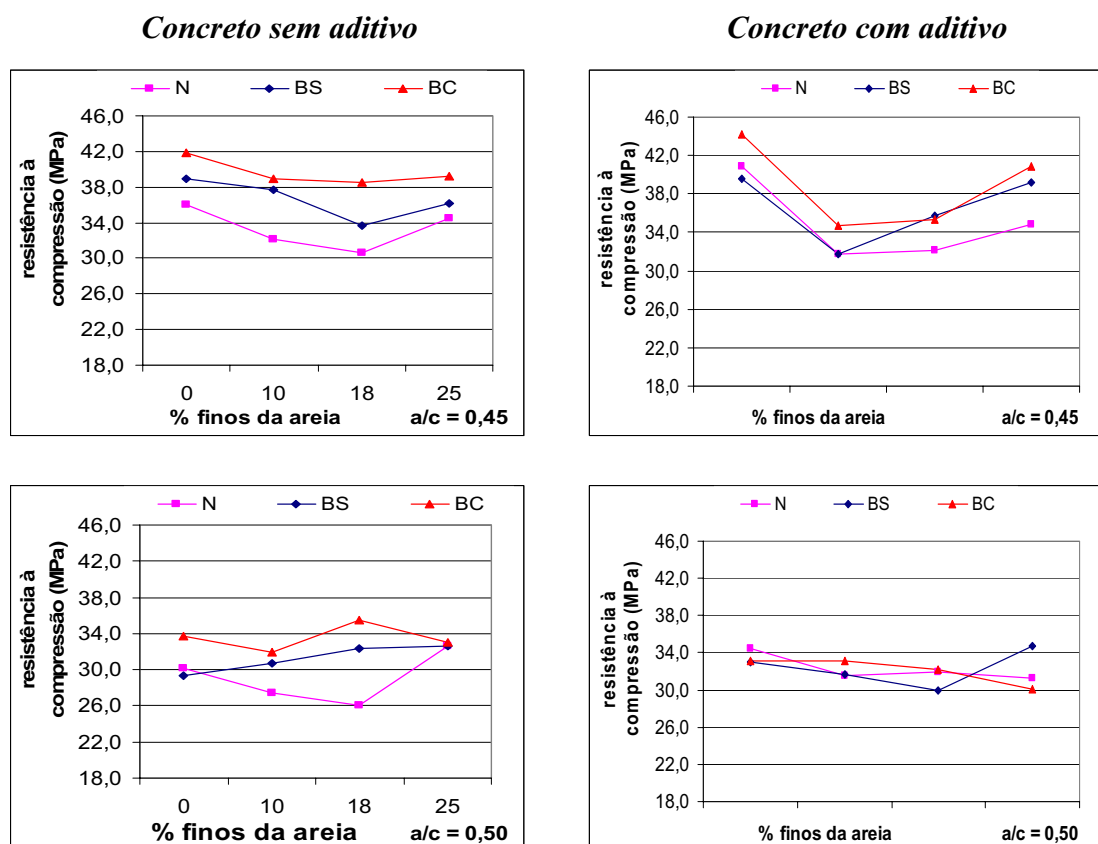
Comparando os concretos dosados com e sem aditivo, verifica-se a minimização da exsudação, atingindo, em alguns casos, ausência do fenômeno, para os concretos com aditivo. Isto comprova Mehta & Monteiro (1994) e Svermova et al (2003) que afirmam que, em dosagem adequada, os valores de exsudação podem ser minorados com o uso de aditivos, possivelmente justificado pela melhor dispersão dos grãos finos na massa, favorecendo a retenção de moléculas de água.

Analisando os resultados, observa-se que o concreto dosado com a areia natural apresenta maior exsudação do que as areias britadas. Dentre os concretos com areia britada, a areia BC tem menor exsudação. Esta constatação pode se relacionar ao empacotamento granular, discutido em 5.2.2.1. Além disso, Svermova et al (2003) comprovou que a adição de partículas menores que 0,075 mm de litologia calcárea é o fator de maior significância na diminuição da exsudação, comparado com a adição de aditivo superplastificante. Os resultados dessa pesquisa concordam com a constatação dos autores.

5.2.4. ENSAIO NO ESTADO ENDURECIDO

5.2.4.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados para a verificação do atendimento da resistência mínima de 20 MPa. Os resultados estão apresentados na figura 5.25.



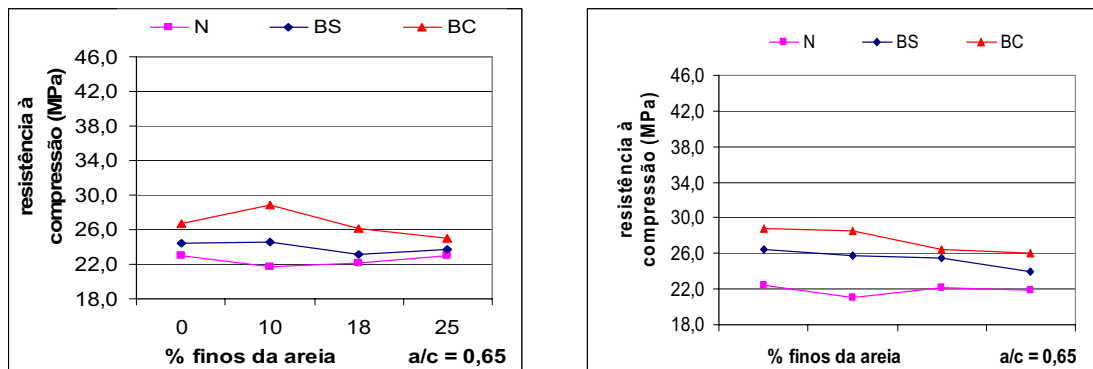


Figura 5.25 Influência do teor de finos da areia nos resultados de resistência à compressão, em concreto sem aditivo (a, b, c) e com aditivo (d, e, f)

Através da análise dos resultados de resistência à compressão pode-se inferir que:

- Dentre as três areias avaliadas, os concretos dosados com a areia BC apresentaram maior resistência, confirmando o maior empacotamento dos seus grãos, influenciado pelo formato com alto grau de esfericidade e classe de arredondamento menos anguloso que a areia BS, comprovado pela massa específica dos concretos;
- Entre as areias britada e natural, as primeiras atingiram maiores resistências à compressão confirmando os resultados obtidos por Bastos (2005), Gonçalves (2005) e Batista (2004);
- Quanto maior a relação a/c, menor a amplitude entre os resultados de uma mesma areia. Isto reflete o comportamento do consumo de cimento e do consumo de água, que possuem a mesma tendência;
- O objetivo da utilização do aditivo de ação plastificante foi atingido: minimização do consumo de cimento, melhorando a trabalhabilidade. Por isso, os resultados da resistência à compressão dos concretos com aditivo se mantêm no mesmo patamar dos valores obtidos pelos concretos sem aditivo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos durante a realização do programa experimental foram observadas tendências de comportamento do concreto que decorrem nas constatações apresentadas a seguir. Ao final do capítulo são apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

6.1. CONCLUSÕES

Considerando os materiais utilizados, como conclusão geral verificou-se que a influência do tipo e teor de finos das areias no comportamento reológico do concreto, para dada consistência, é dependente do teor de pasta do traço, limitado por faixas de consumo de cimento. É o teor de pasta que determina a contribuição da partícula grossa ou da partícula fina na resistência ao cisalhamento, seja por atrito, coesão ou efeito de lubrificação. O teor de pasta é determinado pelo empacotamento granular, influenciado pelas características particulares da combinação do tipo de areia e do teor de finos avaliados. Por fim, constatou-se que é possível dosar concreto com até 25% de finos da areia. Dentre as areias analisadas, a britada com tratamento de forma conferiu os melhores resultados ao concreto. Além disso, verificou-se a viabilidade da utilização da areia britada sem tratamento de forma, realizadas adequações na dosagem do concreto.

Considerando os métodos de dosagem de maneira particular pode-se concluir:

- Todos os métodos atingem o objetivo final quando se trata do atendimento de determinada consistência, medida pelo ensaio de abatimento, e resistência requerida. No entanto, os parâmetros de mistura definidos pelo ACI 211.1 sofrem maior influência do formato e rugosidade de areias menos favorecidas, conduzindo ao maior consumo de cimento.
- Os métodos de dosagem IPT-ITERS-EPUSP e Faury resultam concretos com parâmetros de mistura equivalentes;
- O grau de esfericidade seguido da classe de arredondamento dos grãos de areia são os fatores, relacionados ao formato das partículas de areia, que mais influenciam nos parâmetros de mistura definidos segundo os métodos avaliados, para concretos de mesma consistência, medida pelo ensaio de abatimento;

O projeto experimental 2, em primeira instância, possibilitou o estudo aprofundado do método de dosagem de Faury. Constatou-se o seguinte:

- Há a necessidade da adequação dos parâmetros A, B, K e K' para o atendimento de areias do tipo BC - britada com beneficiamento de formato.
- O ajuste à curva de referência de Faury compõe agregado graúdo e miúdo, tornando as curvas granulométricas das composições muito parecidas, para os mesmos teores de finos da areia. Os valores de módulos de finura das composições de brita e cada tipo de

areia são idênticos para os diferentes teores de finos da areia, comprovando que o parâmetro não indica o maior teor de finos de composições granulométricas.

A análise dos resultados obtidos no estado fresco forneceu as seguintes considerações:

- Quanto ao formato das partículas da areia, o grau de esfericidade e a classe de arredondamento são os parâmetros que, possivelmente, mais influenciam as propriedades no estado fresco do concreto.
- O ensaio de massa específica do concreto sem aditivo mostra que o maior preenchimento dos vazios, decorrente do empacotamento dos grãos, foi em ordem decrescente: concretos com areia BC, BS e N. Para cada curva, os pontos extremos (0% e 25% de finos da areia) têm os maiores valores de massa específica, indicando a tendência de maior empacotamento dos grãos.
- Para os concretos dosados com aditivo, os ensaios de massa específica mostram que é possível que o aditivo de ação plastificante tenha efeito também sobre os grãos de areia passantes da peneira de abertura 0,075 mm.
- Os teores de ar incorporado dos concretos contendo areia britada comportam-se inversamente aos resultados de massa específica. Os valores médios apresentados do teor de ar incorporado, em ordem decrescente são: concreto com areia N, concreto com areia BS e concreto com areia BC.
- Observou-se que o teor de aglomerante influencia significativamente as propriedades reológicas fundamentais dos concretos.

A principal constatação obtida por esse estudo foi verificar que, para uma dada condição de trabalhabilidade do concreto, medida pelo ensaio de abatimento, é possível quantificar parâmetros fundamentais de reologia através do ensaio de abatimento modificado, que refletem as variações no comportamento das propriedades no estado fresco, medidas nesta pesquisa.

- Quanto à viscosidade, os resultados obtidos pelo ensaio de abatimento modificado apresentaram três comportamentos típicos, para consistência de 120 ± 10 mm, que podem ser classificados por faixas de consumo de cimento e teor de pasta:

Comportamento 1: *faixa de consumo de cimento entre 540kg/m³ a 615kg/m³ de concreto (teor de pasta entre 34 e 40%):* A viscosidade é afetada diretamente pelo efeito lubrificante das partículas de cimento no sistema, que anula qualquer influência dos finos da areia.

Comportamento 2: *faixa de consumo de cimento entre 390kg/m³ a 540kg/m³ de concreto*
Para concreto sem aditivo (teor de pasta entre 29 e 35%) contendo areia N e BC, o comportamento é caracterizado por viscosidade decrescente, decorrente da lubrificação das partículas ao elevar o teor de finos da areia (maior empacotamento dos grãos). No concreto contendo areia de formato menos favorecido (BS), prevalece a influência do formato das partículas com aumento da viscosidade.

Para os concretos com aditivo (teor de pasta entre 24 a 30%): Contendo areia N e BC, a ação plastificante do aditivo, em dosagem adequada, alia-se à maior lubrificação das partículas em função do aumento do teor de finos da areia. Para concretos com areia BS, prevalece a influência do formato das partículas com o aumento da viscosidade.

Comportamento 3: *faixa de consumo de cimento entre 330kg/m³ a 390kg/m³ de concreto*

Para concretos sem aditivo (teor de pasta entre 24 e 29%): o comportamento da viscosidade é caracterizado pela influência do formato das partículas e do teor de finos da areia. Para menores teores de finos da areia, a viscosidade é mais alta pelo maior atrito entre as partículas e decresce até determinado teor (entre 10% e 18%). À medida que o teor de finos da areia aumenta, prevalece o efeito de maior atrito entre as partículas, com aumento da viscosidade.

Para os concretos com aditivo (teor de pasta entre 20 e 24%): caracterizado pela minimização da influência do formato e do teor de finos da areia pela ação do aditivo de ação plastificante. Em dosagem adequada de aditivo, a viscosidade se mantém no mesmo patamar com o aumento do teor de finos da areia.

- O ensaio de *Vane Tester* mostrou-se adequado para a medição da tensão de escoamento da argamassa do concreto, existindo a possibilidade da previsão do comportamento da tensão de escoamento do concreto. Os ensaios de Vane e Abatimento Modificado mostraram boa correlação.
- Os valores de tensão de escoamento dos concretos avaliados têm variação entre 1500 Pa e 1700 Pa, pelo ensaio de Abatimento Modificado, para a consistência de 120_±10 mm medida pelo abatimento. A tensão de escoamento e o abatimento têm

comportamento inversamente proporcional. Esses valores podem ser utilizados como referência para estudos de dosagem.

- As constatações quanto aos parâmetros reológicos apontam para a existência de um equilíbrio entre o teor de pasta e de finos da areia, que minimiza o atrito provocado pelos grãos maiores e garante a coesão atribuída às partículas menores, e a capacidade de deformação plástica do concreto, para determinada condição de consistência.
- A exsudação é minimizada com a utilização de aditivo superplastificante para concretos dosados com os três tipos de areia e com o aumento do teor de finos no concreto contendo areia natural, sendo menor para os concretos com areia britada calcária.

Da análise da resistência à compressão dos concretos, infere-se:

- Dentre as três areias avaliadas, o concreto dosado com a areia BC apresentou maior resistência, confirmando o maior empacotamento dos seus grãos, apresentado nos resultados de massa específica.
- Os concretos dosados com areia britada apresentam maior resistência à compressão que aqueles contendo areia natural.

6.2. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As sugestões de trabalhos futuros propostos são as seguintes:

- Avaliar a argamassa de concreto dosado com aditivo superplastificante, adotando a dosagem de aditivo expressa em volume de sólidos, para verificar a correspondência de comportamento da tensão de escoamento da argamassa e do concreto.
- Caracterizar, através dos parâmetros fundamentais reológicos, concretos dosados com outros materiais para a validação das faixas de teores de pasta que caracterizam os comportamentos 1, 2 e 3 de viscosidade.
- Investigar a existência e o mecanismo de atuação dos aditivos de ação plastificantes sobre partículas passantes na peneira de abertura de 0,075 mm de agregados miúdos.

- Analisar a cinética de hidratação do cimento na presença de agregado miúdo calcário para determinar a quantidade e qualidade dos produtos de hidratação com o objetivo de avaliar sua correspondência com a exsudação do concreto.
- Avaliar a capacidade de bombeamento dos concretos desta pesquisa.
- Investigar os fatores intervenientes na correlação entre os resultados de tensão de escoamento do concreto, pelo ensaio de abatimento modificado, e da argamassa correspondente, obtidos pelo *Vane Tester*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahn, B.A.E. **Na experimental study on the guidelnes for using higher contents of aggregate micro finos in portland cement concrete.** Dissertation, The University of Texas at Austin, 2000, 200p.
- Aïtcin, P. C. **Concreto de Alto Desempenho.** PINI, São Paulo, 2000.
- Almeida, I.R. Concretos dosados em central, com 100% de areia artificial. **Anais do II SUFIBB - O uso da fração fina da britagem.** São Paulo-SP, 2005.
- Almeida, S.L.M.de; Silva, V. da S. Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados. **Anais do II SUFIBB.** São Paulo-SP, 2005.
- Alves, N.J.D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento.** Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília, Brasília, DF, 175p.
- American Concrete Institute. **Manual of Concrete Practice.** Detroit 1978. 3 v.
- American Concrete Institute. Placing Concrete by Pumping Methods. **ACI 304.2R.** USA. 1996. 19p.
- American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. **ACI 211.1.** USA 1977. 23p.
- American Society For Testing And Materials **C33** Standard Specification for Concrete Aggregates. USA. 1999. 8p.
- American Society For Testing And Materials **D4648** Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clay soil. USA. 2000.
- Angelim, R. R. **Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento das argamassas de revestimento.** Dissertação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2000. 146p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 5p.

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991. 3p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992. 4p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006. 18p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 5p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982. 3p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7389**: Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro, 1992. 7p
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987. 3p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2005. 4p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 9**: Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração, 2003. 6p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 102**: Concreto - Determinação da exsudação. Rio de Janeiro, 1996. 12p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 13**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2004. 4p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 14**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004. 9p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004. 3p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 17**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 2004. 7p.

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004. 4p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004. 4p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 23:** Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 23:** Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001. 5p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 27:** Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 43:** Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006. 8p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6p
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 47:** Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002. 23p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003. 6p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003. 8p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 65:** Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 65:** Cimento portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998. 12p.

- Banfill, P. F. G.; et al. The rheology of fresh cement and concrete – A review. **11th International Cement Chemistry Congress**, Durban, maio, 2003. 13 p.
- Barbosa, M. P. Fundamentos Teóricos e Práticos em Reologia de Materiais. **Nota de aula**. UNESP, Ilha Solteira, 2007.
- Bastos, S.R.B. Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção de concretos convencionais. **Anais do II SUFIBB - O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.
- Batista, J. R. De; Neves, L. Finos de britagem como agregado substituto às areias naturais: um estudo de caso. In: **XCIII Congresso Brasileiro do Concreto**, Foz do Iguaçu, 2004.
- Bauer, E.; Souza, J. G. G.; Guimarães, E. A. **Estudo da tensão de escoamento de argamassas, no estado fresco, utilizando o equipamento vane tester de laboratório**. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, 31., 2004
- Bauer, E.; Souza, J.G.G; Guimarães, E.A.; Silva, F.G.S. Study of the laboratory Vane test on mortars **Building and Environment** V.42 2007, pp 86–92.
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 307. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, Brasília, **Diário Oficial da União**. 2002.
- Cabrera, O; Donza, H. High-strength concrete with crushed fine aggregate. **XXVIII Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**, São Carlos, Brasil, v. 5, 1997, p.2099-2107.
- Campiteli, V. C.; Silva, N. G Da; Buest, G. T. A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. In: **II SUFIBB - Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem**, 2005, São Paulo.
- Caputo, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 234p.
- Cascudo, O.; Carasek, H.; Carvalho, A. Controle de argamassas industrializadas em obras por meio do método de penetração do cone. In: **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, 6., 2005.
- Çelic, T.; Marar, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and Concrete research**, vol. 26, no. 7, 1996, pág. 1121-1130.
- Chopin, D. **Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçant** Rapport final de thèse, Université de Nantes, 2004.
- Colleparidi M Admixtures Used to Enhance Placing Characteristics of Concrete **Cement and Concrete Composites**, Volume 20, Number 2, April 1998 , pp. 103-112
- Costa, D.W.da; Caranjo, D.; Bastos, S.R.B.; Souza, W.A. de. Influência da granulometria do agregado miúdo na produção de concretos convencionais. **Anais do II SUFIBB - O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.

- Cremonini, R. A et al. Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento. **Congresso Brasileiro do Concreto**, v. 2, 2005.
- Cuchierato, G.; Sbrighi Neto, C.; Quitete, E.B. A Revisão das normas de agregados: NBR 7211 e NBR 9935 – Quais as alterações nas terminologias e especificações para os finos de pedra. **Anais do II SUFIBB** O uso da fração fina da britagem. São Paulo-SP, 2005.
- De Larrard et al **Design of a Rheometer for fluid concrete** RILEM Workshop on Special Concretos, 1994 pp.201-208
- De Larrard, F. & Sedran, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 2118, 2002, pag. 1-6.
- De Larrard, F. **Concrete mixture proportioning – a scientific approach**. E & FN SPON, New York, 1999. 421p.
- De Larrard, F.; Hu, C.; Sedran, T.; et al. A new rheometer for soft-to-fluid fresh concrete. **ACI Materials Journal**, n. 94-M27, p. 234-243, May/June. 1997.
- Dreux, G. **Nouveau guide du béton**, Paris, Eyrolles, 1986, 312p.
- Equipe De Furnas, **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: Pini, 1997.
- Ferraris, C. F.; Gaidis, J. M. Connection between the rheology of concrete and rheology of cement past. **ACI Materials Journal**, July/August, 1992, pág. 388-393.
- Ferraris, C. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**. Vol. 104, no. 5, September-October, 1999, pág. 461-478.
- Ferraris, C.; De Larrard, F. Modified slump test to measure rheological parameters of fresh concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, vol. 20, nº 2, dezembro, 1998. p. 241-247.
- Ferraris, C.; De Larrard, F. Testing and modelling of fresh concrete rheology. **NISTIR 6094**, U.S. Dept. of Commerce, February, 1998. 71p.
- Ferraris, C; De Larrard, F.; Martys, N. Fresh Concrete Rheology: Recents Developments. **NIST, reimpresso de Materials science of concrete VI**, 2001. pág.2 15-241.
- Gonçalves, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2005, 273p.
- Gonçalves, L.M.M. ; Israel, M.C. **Inovações e Modificações nos Sistemas de Revestimento** de Fachada. Projeto final de curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

- Gonçalves, J. P. et al. Comparison of natural and manufactured fine aggregates em cement mortars. **Cement and Concrete Research**, 2007 doi.10.1016/j.cemconres.2007.03.09.
- Hackley, V. A.; Ferraris, C. F. **Guide to rheological nomenclature: measurements in ceramic particulate systems** - NIST 946. Washington: National Institute of Standards and Technology, 2001. 31p.
- Helene, P.& Terzian, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349p.
- Hu, C. & De Larrard, F. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete research**, vol. 26, no. 2, 1995, pág. 283 -294.
- Isaia, G. C. et al. **Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações**, São Paulo, IBRACON, 2005, 2v. 792p.
- Ishikawa, P. H; Camarini, G. Comportamento da areia artificial de origem granítica na argamassa para assentamento de bloco de concreto simples para alvenaria. In: **II SUFFIB** - Seminário: o uso da fração fina da britagem, 2005, São Paulo.
- Josserand, L; Coussy, O; De Larrard, F. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process **Cement and Concrete Research** V. 36, 2006 pp1603– 1608.
- Koehler, E P.; Fowler, D. W.; Ferraris, C. F. **Summary of concrete workability test methods** ICAR 105, Austin: International Center for Aggregates Research, 2003. 83p.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, 1a Edição, São Paulo, Ed. Pini, 1994. 573p.
- Montenegro Filho, F.S.L.de; Machado, T.S. **Avaliação da influência da composição granulométrica e do tipo litológico da areia artificial em algumas propriedades do concreto**. Projeto final de curso, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2005, 89p.
- Navarro, R. F. **Fundamentos de reologia de polimeros**. Editora EDUCS, 1º ed., Caxias do Sul, 1997.
- Neville,A.M. **Propriedades do Concreto**,São Paulo: Pini,1997,738p.
- Nguyen, N. Q.; Boger, D. V. Yield stress measurement for concentrated suspensions. **Journal of Rheology**, v. 27, n. 4, p. 321-349. 1983.
- Oliveira, I. R.; Studart, A. R. Pileggi, R. G; Pandolfelli, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195p.
- Paes, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2004. 237p
- Palmeira, E. M. Curso de resistência ao cisalhamento de solos, **Notas de aula** Universidade de Brasília, 2o sem. 2001. 515p

- Petrucci, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 307 p.
- Pinheiro, W. M. G. **Utilização de resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto**. Dissertação (Mestrado), Unicamp, Campinas, 2003.
- Popovics, S. **Fundamentals of Portland Cement Concrete: A Quantitative Approach**. Vol 1 Fresh Concrete. Jhon Wiley & Sons, New York, 1982. 477p.
- Quiroga P.; Fowler, D. **Chemical admixtures and supplementary cementing materials in concrete with high microfines**. International Center for Aggregates Research, Austin, Texas, 2001, 10p.
- Quiroga, P.N.; Fowler, D.W. **The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete**. Artigo de pesquisa 104-1F ICAR-International Center for Aggregate Research, Austin-Texas, 2004. 382p.
- Rixon, R.; Mailvaganam, N. **Chemical admixtures for concrete**, London: E & FN SPON, 1999. 437p.
- Saak, A. W.; Jennings, H. M.; Shah, S. P. The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. **Cement and Concrete Research**, n.31, p. 205-212. 2001.
- Safawi, M. I. Iwaki, I., Miura, T. A study on the applicability of Vibration in fresh high fluidity concrete **Cement and Concrete Research** V. 35, 2005 pp1834– 1845.
- Salles, F. M.; Carvalho, P. A. De; Pereira, P. N. Características e desempenho de concretos confeccionados com areia artificial para as obras do complexo Canoas. **Congresso Brasileiro do Concreto**, 2005, Rio de Janeiro.
- Santos, C. C. N. **Análise da influência das características da areia artificialmente britada nas propriedades do estado fresco do concreto**. Seminário de Doutorado, Universidade de Brasília, DF, 2006.
- Santos, C. C. N. Análise morfoscópica de agregado miúdo britado. **Relatório Técnico**, Brasília, 2007.
- Santos, C. C. N. **Crítérios de projetabilidade para as argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2003, 130p.
- Sbrigh, C. N. **A influência da natureza petrográfica da areia artificial de seus finos em algumas propriedades do betão**. Tese de Doutorado, Departamento Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1975, 101p.
- Silva, A.S.M. **Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aitcin-Faury modificado**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2003, 123p.
- Silva, C.B. et al Estudo de caso: Traços de concreto para estruturas pré-moldadas. **Anais do II SUFIBB- O uso da fração fina da britagem**. São Paulo-SP, 2005.

- Sobral, H. S. **Reologia e trabalhabilidade do concreto**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Estudo Técnico, no. 62, 2 ed. São Paulo, 1990, 84 p.
- Souza, J. G. G.; Bauer, E. Contribuição ao estudo da trabalhabilidade das argamassas mistas **Anais V SBTA Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas**, São Paulo, 2003.
- Souza, J. G. G.; Bauer, E. Reologia das argamassas de revestimento no estado fresco – parâmetros de estudo. In: **Anais do Encontro sobre Pesquisas em Materiais de Construção**, 2., 2002, Goiânia. Anais... Goiânia: UFG, 2002. CD-ROM.
- Souza, J.G. **Contribuição ao Estudo das Propriedades das Argamassas de Revestimento no Estado Fresco**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, DF, 2005, 233p.
- Svermova, L; Sonebi, M; Bartos, P. J. M. Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder **Cement and Concrete Composites** V 25, October 2003, p 737-749.
- Tan, T.S.; Wee, T.H; Tan. S.A; Tam, C.T; Lee, S.L. A consolidation model for bleeding of cement paste, **Cement and Concrete Research** V.1, 1987 pp 18– 26.
- Tanaka et al. A comparison of the fluidity of spherical cement with that of broad cement and a study of the properties of fresh concrete using spherical cement, **Cement and Concrete research** n°29, 1996 pp553-560
- Tanigawa, Y et al Analytical and experimental studies on casting of fresh concrete into wall form **Japan Concrete Society**, V.13, 1991
- Taylor, H. F. W. **Cement Chemistry** Thomas Telford, New York, 1997, 480p.
- Topçu, L.B; Elgün, V. B. Influence of concrete properties on bleeding and evaporation **Cement and Concrete Research** 2003 p 275–281.
- Turian, R. M; Ma, T.W; Hsu F. L. G; Sung, D. J. Characterization, Settling, and Rheology of Concentrated Fine Particulate Mineral Slurries **Powder Technology**, V.93 1997 pp219-233.
- Uchikawa, H. (1995). “Hydratation of cement and structure formation and properties of cement paste in the presence of organic admixture.” **J. Res. Chichibu Onada Cem.Corp.**, 46 (1), 3-47.
- Uchikawa, H; Hanehara, S; Sawaki, D. 1997. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. **Cement and Concrete Research**, Pergamon, Vol. 27, pp. 37-50.
- Vasconcelos, R. F. **Dosagem de Concreto pelo Método de Faury**, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. RJ, 1976.
- Veronez, M. **Estudo da influência do tipo de aditivo superplastificante e de adição mineral no comportamento termo-mecânico dos concretos de alto desempenho**, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, ES, 2006, 214p.

Wainwright P.J.; Aider H. The influence of cement source and slag additions on the bleeding of concrete **Cement and Concrete Research**, V. 25, October 1995 , pp.1445-1456.

Walevik, J. E. Relationship between the Bingham parameters and slump **Cement and Concrete Research** V.36 2006 pp1214-1221.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PROJETO EXPERIMENTAL 1: MÉTODOS DE DOSAGEM E MEMÓRIA DE CÁLCULO

APÊNDICE A – PROJETO EXPERIMENTAL 1: MÉTODOS DE DOSAGEM E MEMÓRIA DE CÁLCULO

1. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE DOSAGEM

1.1. MÉTODO ITERS-IPT-EPUSP

O método ITERS-IPT-EPUSP tem como fundamento a determinação do teor ideal de argamassa para uma determinada condição de trabalhabilidade e, conseqüentemente, o menor custo de produção. Segundo Helene & Terzian (1992), a falta de argamassa na mistura acarreta porosidade no concreto ou falhas de concretagem e o excesso proporciona um concreto de melhor aparência, mas aumenta o custo/m³, como também, o risco de fissuração por origem térmica e por retração de secagem.

É um método baseado na Lei de Lyse (equação 1.2) e na Lei de Abrams (equação 1.1) – a resistência e a durabilidade do concreto dependem da relação água/cimento. Assim, em primeira instância é determinado o teor de argamassa (α) (equação 1.3) ideal para um traço piloto e dada consistência, através da variação da quantidade de areia, cimento e água em uma betonada de ajuste. Em seguida, são determinados dois traços auxiliares (rico e pobre) através da variação do parâmetro agregados secos/cimento (m), com a consistência e o α fixos.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação 1.1}$$

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad \text{Equação 1.2}$$

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m} \quad \text{Equação 1.3}$$

Onde: f_{cj} : resistência característica do concreto a j dias (MPa);

m : relação agregados/cimento (adimensional);

a/c : relação água/cimento; a é a relação areia/cimento (adimensional);

α : teor de argamassa seca (%);

k_1, k_2, k_3 e k_4 : são parâmetros que dependem do traço (adimensional).

Para tanto, o método se resume nos seguintes passos:

- caracterização dos materiais, determinando, no mínimo:
 1. Cimento: finura, perda ao fogo e resíduos insolúveis e resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias;
 2. Agregados miúdos: granulometria, módulo de finura, massa unitária, massa específica, inchamento e umidade crítica (caso a dosagem seja em volume) e apreciação petrográfica;
 3. Agregados graúdos: granulometria, dimensão máxima característica, massa unitária, massa específica, apreciação petrográfica;
 4. Aditivo: massa específica, aspecto e desempenho.
- verificação da resistência característica do concreto para atendimento de especificações de projeto;
- escolha da dimensão característica máxima do agregado graúdo em função de características das peças a serem concretadas e do diâmetro do mangote de bombeamento, se for o caso;
- escolha da consistência do concreto em função das condições de transporte e lançamento e do tipo de peça a ser concretada;
- definição da relação a/c máxima para atendimento de critérios de durabilidade;
- definição da relação a/c para atendimento da resistência característica do concreto segundo as especificações de projeto - esta etapa pode utilizar as correlações entre a resistência à compressão e relação a/c para os tipos de cimento apresentadas em Helene & Terzian (1992);
- determinação do teor de argamassa seca ideal para o traço piloto (1:5);
- determinação dos traços auxiliares (pobre 1:6, 5 e rico 1:3, 5);
- realização das misturas experimentais e determinação das correlações entre consumo de cimento e traço e equação de Molinari (equação 1.4);

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m} \quad \text{Equação 1.4}$$

Onde: C: consumo de cimento (kg/m³);

k_5 e k_6 : são parâmetros que dependem dos constituintes do traço.

- construção do Diagrama de Dosagem

A avaliação do teor de argamassa ideal se faz pela inspeção visual de aspereza e envolvimento do corpo granular por argamassa e a consistência é verificada pelo ensaio de abatimento.

1.2. MÉTODO ACI 211.1

Segundo o *Ací Manual Of Concrete Practice* (1979), o método de dosagem ACI 211.1 é baseado nas seguintes hipóteses:

- Para uma dada combinação de materiais e dada consistência trabalhável, a resistência do concreto para uma certa idade depende da relação a/c;
- A maior resistência à compressão é dada pela menor relação a/c;
- Enquanto a resistência depende da relação água/cimento, a mistura mais econômica depende da porcentagem dos agregados que respondem por uma dada trabalhabilidade;
- A trabalhabilidade pode ser adequada tanto pela fração argamassa quanto pela adição de mais água;
- O objetivo da dosagem pelo método é conciliar resistência adequada ao mínimo consumo de cimento e aceitável trabalhabilidade;
- O método fornece uma primeira aproximação da dosagem devendo ser avaliada por betonadas de ajuste em laboratório ou em campo.

O procedimento para a determinação do traço inicial segundo o Método ACI 211.1 segue as etapas descritas na figura 1.1, tendo como base a caracterização dos materiais, através da análise granulométrica dos agregados gráudo e miúdos, massa unitária dos agregados, massa específica, absorção, umidade dos agregados e variação aproximada de água requerida.

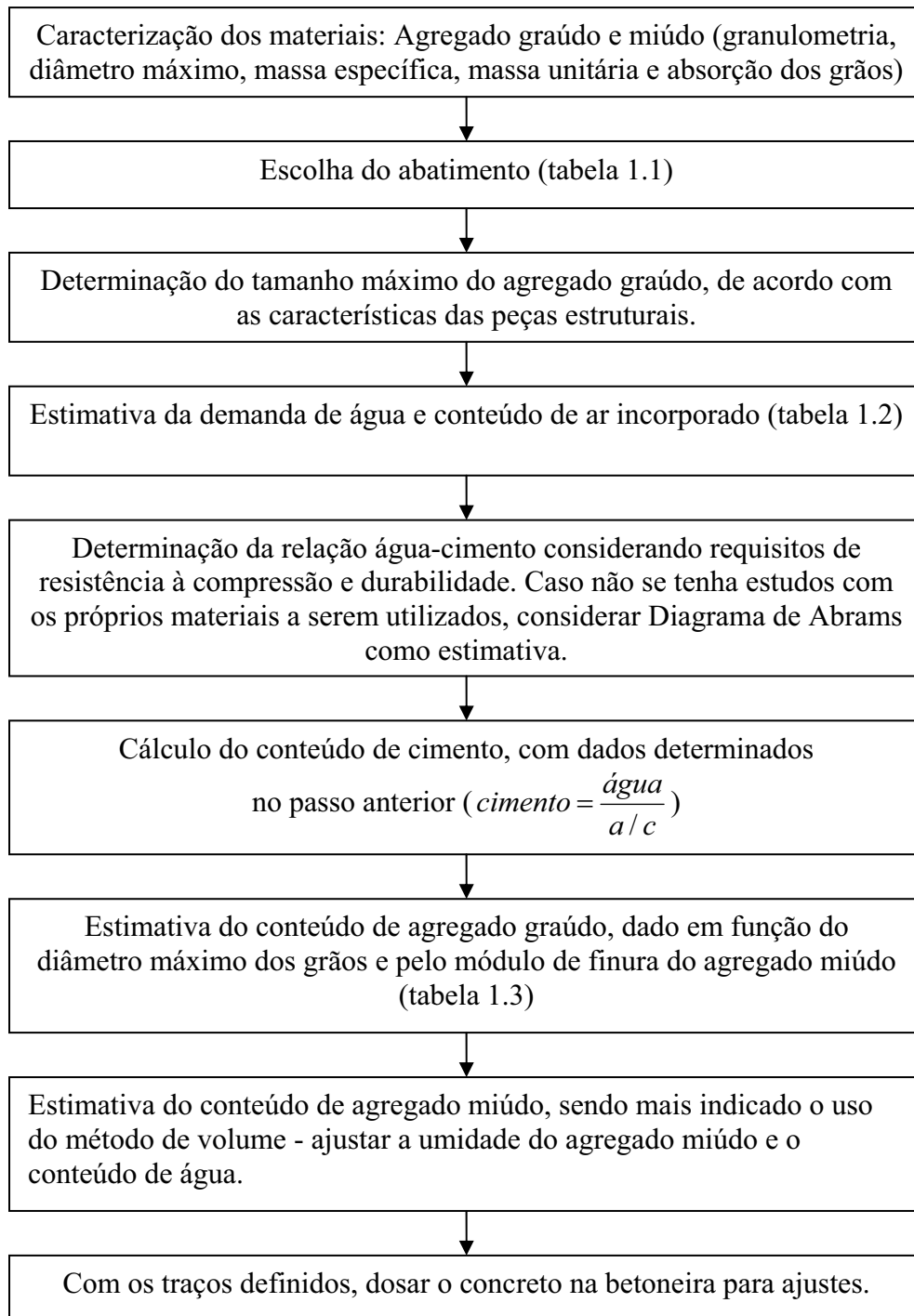


Figura 1.1 Procedimento para dosagem de concreto – Método ACI 211.1.

Tabela 1.1 Abatimento recomendado para diferentes tipos de construção (ACI 211.1-77).

Tipo de construção	Abatimento (mm)	
	Mínimo	Máximo
Fundação, paredes e sapatas armadas.	50	125
Sapatas não armadas, caixões e paredes de vedação.	25	100
Lajes, vigas e paredes armadas.	75	150
Pilares de edifícios.	75	150
Pavimentos.	50	75
Concreto massa.	25	75

Tabela 1.2 Consumo de água (l/m³ de concreto) recomendado para determinado abatimento (mm) e diâmetro máximo do agregado (mm).

Abatimento (mm)	Diâmetro máximo do agregado (mm)							
	9,5	12,5	19,0	25,0	38,0	50,0	76,0	152,0
25 a 50	208	198	183	178	163	153	143	124
75 a 100	228	218	203	193	178	168	158	139
150 a 180	242	228	213	203	188	178	168	149

% de ar incorporado previsto	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2

Tabela 1.3 Volume (m³) de agregado graúdo por m³ de concreto para determinado diâmetro máximo do agregado e módulo de finura da areia.

Diâmetro máximo do agregado (mm)	Módulo de finura da areia			
	2,4	2,6	2,8	3,0
	Volume (m ³) de agregado graúdo compactado a seco por m ³ de concreto			
9,5	0,46	0,44	0,42	0,40
12,5	0,55	0,53	0,51	0,49
19,0	0,65	0,63	0,61	0,59
25,0	0,70	0,68	0,66	0,64
38,0	0,76	0,74	0,72	0,70
50,0	0,79	0,77	0,75	0,73
76,0	0,84	0,82	0,80	0,78
152,0	0,90	0,88	0,86	0,84

1.3. MÉTODO DE FAURY

Segundo Vasconcelos (1976) Faury é um método que privilegia o estudo de Bolomey, o qual versa que a compactidade de grãos de graduação contínua corresponde à maior compactação e de Caquot sobre (i) o efeito parede – modificação da granulometria do concreto quando em contato com as superfícies do molde e da armadura, e (ii) a lei de variação do índice de vazios de uma curva granulométrica com o inverso da raiz quinta da dimensão máxima do agregado.

Para conseguir a maior compactidade dos grãos, Faury propõe uma curva granulométrica de referência, onde a abscissa é a raiz quinta do diâmetro dos grãos finos e a ordenada é a porcentagem do volume absoluto de material passante nas peneiras (Dreux, 1986).

A curva é composta de dois trechos que distinguem os grãos finos e médios ($<D/2$) e grossos ($>D/2$) e é traçada para o conjunto de materiais granulares, inclusive o cimento. Faury supunha que a menor dimensão do cimento era de 6,5 μm . Portanto a curva se estende desde 0,0065 mm até $D_{\text{máx}}$.

A abscissa do ponto de encontro dos dois trechos é fixa em $D/2$ e sua ordenada $P_{D/2}$ é dada pela equação 1.5. Esta equação computa o diâmetro máximo do agregado e os parâmetros que estão em função da qualidade dos agregados (rolados ou britados) e do tipo de adensamento (apiloamento, vibração mais ou menos intensa).

$$P_{D/2} = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D - 0,75} \quad \text{Equação 1.5}$$

Onde: A: parâmetro de rugosidade dos grãos do agregado - tabela 1.4 (adimensional);

B: parâmetro que considera potência de vibração - tabela 1.4 (adimensional);

D: dimensão máxima do agregado graúdo (mm);

R/D: parâmetro que considera o efeito parede e restrições das armaduras (adimensional).

Tabela 1.4 Parâmetros de dosagem - Valores de A e B.

Consistência	Compactação	Valores de A			Valores de B	Exemplo de concretagem
		Areia rolada pedra rolada	Areia rolada Pedra britada	Areia britada Pedra britada		
Muito fluida	Peso próprio	≥ 32	≥ 34	≥ 38	2,0 – 2,5	Submersa
Fluida	Apiloamento	30 – 32	32 – 34	36 – 38	2,0	Bombeamento
Mole	Vibração fraca	28 – 30	30 – 32	34 – 36	2,0	Comuns
Plástica	Vibração média	26 – 28	28 – 30	32 – 34	1,5	Pre-moldados e fundações
Seca	Vibração potente	24 – 26	26 – 28	30 – 32	1,0 a 1,5	Pavimentos e formas deslizantes
Terra Úmida	Vibração potente e compressão	22 – 24	24 – 26	28 – 30	1,0	Estacas Frank e manilhas

Neste método, a dimensão máxima das partículas é calculada segundo a equação 1.6, alteração justificada pelo fato de que, pelo critério da dimensão máxima ser o correspondente àquele que tem 5% de sua massa retida em determinada peneira, muitas vezes induz a existência de até 5% de grãos maiores que a dita “dimensão máxima”.

O método considera o efeito parede. Portanto, quando se dosa concreto para peças com alta densidade de armadura, deve-se limitar a dimensão máxima e enriquecer a dosagem com elementos finos para não prejudicar a máxima compacidade (Vasconcelos, 1976).

$$D = d_1 + (d_1 - d_2) \frac{x}{y} \quad \text{Equação 1.6}$$

Onde: D : dimensão máxima do agregado (mm);

d_1 : maior abertura da peneira na qual fica retido algum material (mm);

d_2 : abertura da peneira imediatamente inferior a d_1 (mm);

x : porcentagem de material, em massa, retida na peneira d_1 (%);

y : porcentagem de material, em massa, retida na peneira d_2 (%).

O volume de água e o volume absoluto de sólidos são dados em função do parâmetro I, volume de água mais vazios, regido pela equação empírica 1.7. Esta equação correlaciona os parâmetros K e K', que traduzem a rugosidade do agregado e a potência de vibração. Portanto, considera-se que a água irá preencher todos os vazios existentes no corpo.

$$I = \frac{k}{\sqrt[5]{D}} + \frac{k'}{R/D - 0,75}$$

Equação 1.7

Onde: I : volume de água mais vazios (l);

K : parâmetro que depende da rugosidade do agregado (rolado ou britado) (adimensional);

K' : parâmetro que depende da consistência que se pretende, a qual depende do meio de compactação previsto (adimensional).

Tabela 1.5 Parâmetros de dosagem - Valores de K e K'.

Consistência	Compactação	Valores de K			Valores de K'
		Areia rolada Pedra rolada	Areia rolada Pedra britada	Areia britada Pedra britada	
Muito fluida	Peso próprio	$\geq 0,390$	0,405 a 0,350	$\geq 0,460$	0,004
Fluida	Apiloamento	0,370 – 0,390	0,385 a 0,405	0,430 a 0,460	0,004
Mole	Vibração fraca	0,350 – 0,370	0,370 a 0,400	0,400 a 0,430	0,003
Plástica	Vibração média	0,330 – 0,350	0,365 a 0,385	0,370 a 0,400	0,003
Seca	Vibração potente	0,250 – 0,330	0,330 a 0,350	0,350 a 0,370	0,003
Terra Úmida	Vibração potente e compressão	$\leq 0,250$	$\leq 0,330$	$\leq 0,350$	0,002

Determinado o parâmetro I , o volume de água é calculado subtraindo o volume aproximado de vazios de I , obtido segundo a tabela 1.6, do *American Concrete Institute*. Subtraindo o volume de água e vazios de 1m^3 de concreto, obtém-se o volume de sólidos da mistura.

Tabela 1.6 Volume de vazios (l/m^3) do concreto compactado (ACI).

Máxima dimensão do agregado (mm)	Volume de vazios do concreto (l/m^3)
9,5	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3
152,4	2

Desse volume, tem-se cimento e agregados.

A quantidade de cimento por m^3 de concreto é determinada realizando-se betonadas de estudo com a variação da quantidade de cimento, partindo de $300\text{kg}/m^3$. Plota-se o gráfico de resistência à compressão por relação água/cimento, para dada consistência e mesmos

materiais. Parte-se para a construção da curva de referência. Logo após, realiza-se o desconto da quantidade de cimento.

Traçada a curva de referência sem cimento, na mesma curva traçam-se as distribuições granulométricas dos agregados e determina-se a porcentagem de cada um na mistura, através da média geométrica entre as distâncias em abscissas tomadas desde o ponto 0,0065 até as aberturas de peneiras que correspondam ao limite superior do agregado mais fino e ao limite inferior do agregado imediatamente mais grosso (equação 1.8).

$$x = \sqrt{y.z} \quad \text{Equação 1.8}$$

Onde: y : distância em abscissa tomada desde o ponto 0,0065 até o limite superior do agregado mais fino (cm);

z : distância em abscissa tomada desde o ponto 0,0065 até o limite inferior do agregado imediatamente mais grosso (cm).

De posse das porcentagens de cada agregado na mistura, as massas de cada componente para 1m^3 de concreto são determinados multiplicando-as pela massa específica e pelo volume total de agregados.

A curva ajustada deve ser plotada na curva de referência para a verificação de possíveis discontinuidades. A curva de melhor ajuste é aquela em que a área superior do gráfico seja o mais próxima da área inferior.

2. MEMÓRIA DE CÁLCULO

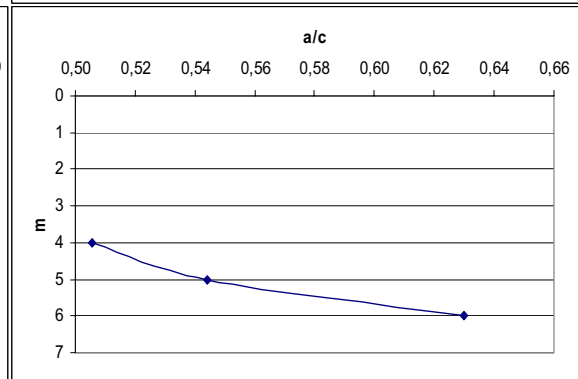
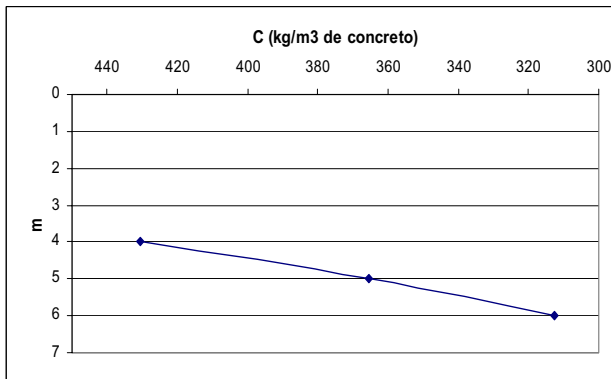
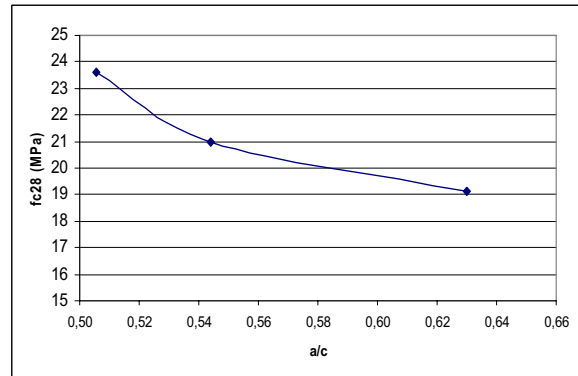
2.1. MÉTODO ITERS-IPT-EPUSP

ITERS-IPT-EPUSP - areia natural

m	a/c	kg/m ³	fcj
4	0,51	431	23,6
5	0,55	365	21,0
6	0,63	313	19,1

Traço

1:2,11:2,99:0,55

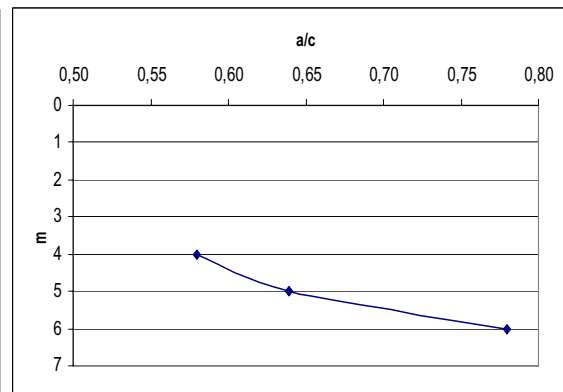
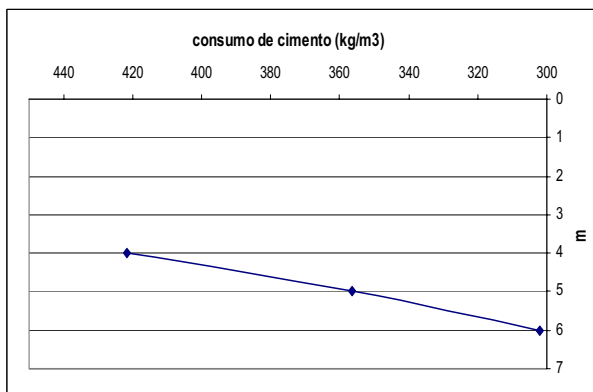
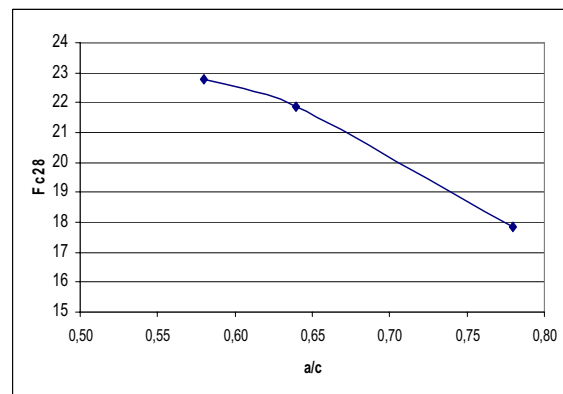


ITERS-IPT-EPUSP Areia britada sem VSI

m	a/c	kg/m ³	fcj
4	0,58	422	22,8
5	0,64	356	21,8
6	0,78	302	17,9

Traço:

1:1,55:2,45:0,58



ITERS-IPT-EPUSP Areia britada com VSI			
m	a/c	kg/m ³	fcj
4	0,48	439	25,2
5	0,58	364	20,9
6	0,68	311	18,0

Traço

1:1,96:2,84:0,55

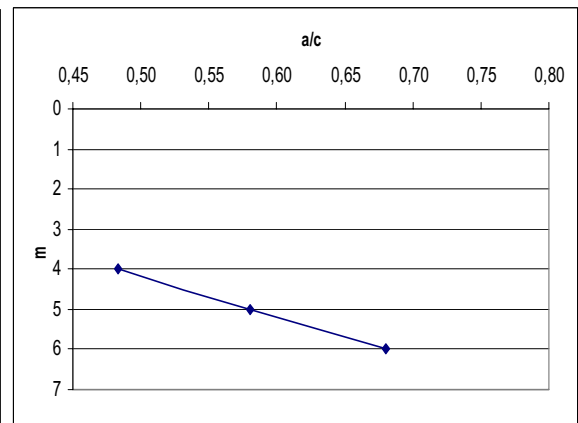
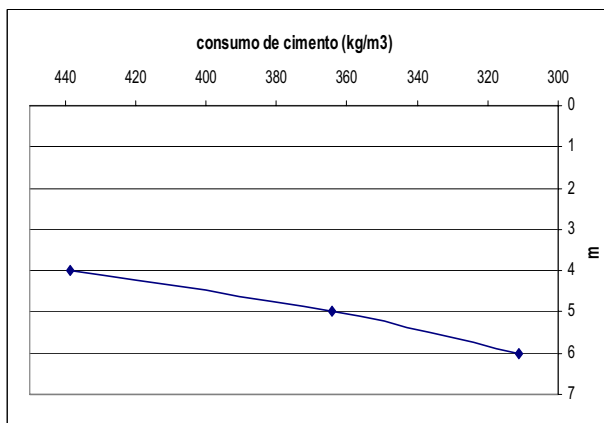
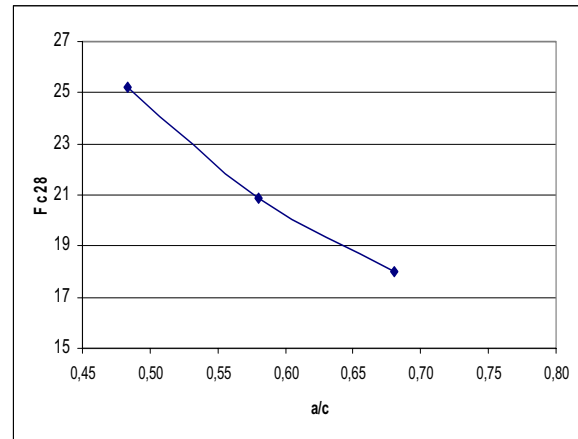


Figura 2.1 Diagramas de dosagem dos concretos dosados com areia natural (N), britada com VSI (BC) e britada sem VSI (BS).

Tabela 2.1 Parâmetros de mistura dos concretos dosados por IPT-ITERS-EPUSP.

Tipo de areia	Abatimento (mm)	Teor de argamassa (%)	H (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	m	%areia	%brita
natural	120	51	9,0	359,8	5,1	41,4	58,6
Britada sem VSI	110	51	11,5	422	4,0	38,8	61,3
Britada com VSI	120	51	9,5	379	4,8	40,8	59,2

2.2. MÉTODO ACI 211.1

Tabela 2.2 Parâmetros para definição do traço pelo Método ACI 211.1.

Areia	Abatimento (mm)	$d_{\text{máx}}$ (mm)	$C_{\text{água}}$ (l/m ³)	a/c	V_{cimento} (dm ³ /m ³)	$C_{\text{grauído}}$ (kg/m ³)
natural	120±10	19,0	208	0,55	378,0	785,2
Britada sem VSI	120±10	19,0	208	0,55	326,0	886,2
Britada com VSI	120±10	19,0	208	0,55	345,0	937,7

Tabela 2.3 Traço teórico e ajustado na betoneira para consistência de 120±10 mm.

Tipo de areia / Traço em massa	teórico	ajustado
Natural	1:2,08:2,65:0,55	1:2,08:2,65:0,55
Britada sem VSI	1:2,48:2,34:0,55	1: 1,86: 2,04: 0,66
Britada com VSI	1:2,34:2,48:0,55	1:2,34:2,48:0,55

Tabela 2.4 Método ACI 211.1: Parâmetros de dosagem.

Tipo de areia	Abatimento (mm)	Teor de argamassa (%)	H (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)	m	%areia	%brita
Natural	120	54	9,6	382	4,7	44,0	56,0
Britada sem VSI	110	58	13,4	413	3,9	47,7	52,3
Britada com VSI	130	60	9,5	377	4,8	51,5	48,5

2.3. MÉTODO DE FAURY

Tabela 2.5 Parâmetros para definição do traço pelo Método de Faury.

Dados e parâmetros	Brita 1 e areia natural	Brita 1 e areia britada sem VSI	Brita 1 e areia britada com VSI
Consistência	120±10 mm	120±10 mm	120±10 mm
A	32	36	36
B	2	2	2
D	25	25	25
R/D ¹⁵	0,5	0,5	0,5
K	0,385	0,43	0,43
K'	0,004	0,004	0,004
P(D/2)	56,4	60,4	60,4
Volume de água + vazios (l/m ³) - I	186	210	210
Volume absoluto de sólidos (l/m ³) - Vs	814	790	790
Volume de vazios (l/m ³) - Vv	15	15	15
Cágua (l) = I - Vv	171	195	195
a/c	0,55	0,55	0,55
Consumo de cimento (m ³) estimado	320	355	355
Volume absoluto de cimento (l)	102	113	113
Volume absoluto de inertes (l/m ³)	712	677	677
% de cimento / inertes	12,5	14,3	14,3

Tabela 2.6 Parâmetros do ajuste geométrico para definição da composição granulométrica.

Composição brita 1	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	p (%) volume absoluto de brita 1	a (%) volume absoluto de areia
Natural	12,5	13,3	12,9	55%	45%
Britada com VSI	12,7	13,4	13,0	52%	48%
Britada sem VSI	12,7	13,4	13,0	52%	48%

¹⁵Adotado como peça limite de aplicação, uma viga de 30x25cm e comprimento de 2,5m, com armadura paralela

Tabela 2.7 Traço teórico e ajustado na betoneira para consistência de 120±10 mm.

Tipo de areia / Traço em massa	Teórico	ajustado
Natural	1:2,46:3,14:0,55	1: 2,29: 2,93: 0,59
Britada sem VSI	1:2,77:2,56:0,60	1: 1,57: 2,26: 0,57
Britada com VSI	1:2,77:2,56:0,60	1: 2,00:3,13:0,55

Tabela 2.8 Método Faury: Parâmetros de dosagem.

tipo de areia	Abatimento (mm)	Teor de argamassa (%)	H (%)	Consumo de cimento (kg/m3)	m	%areia	%brita
Natural	120	53	9,5	352,3	5,2	43,9	56,1
Britada sem VSI	125	53	11,9	433,0	3,8	40,9	59,1
Britada com VSI	125	49	8,9	362,0	5,1	39,0	61,0

As figuras 2.2 a 2.7 apresentam a etapa de construção da curva de referência e o ajuste granulométrico para cada composição de brita e areia.

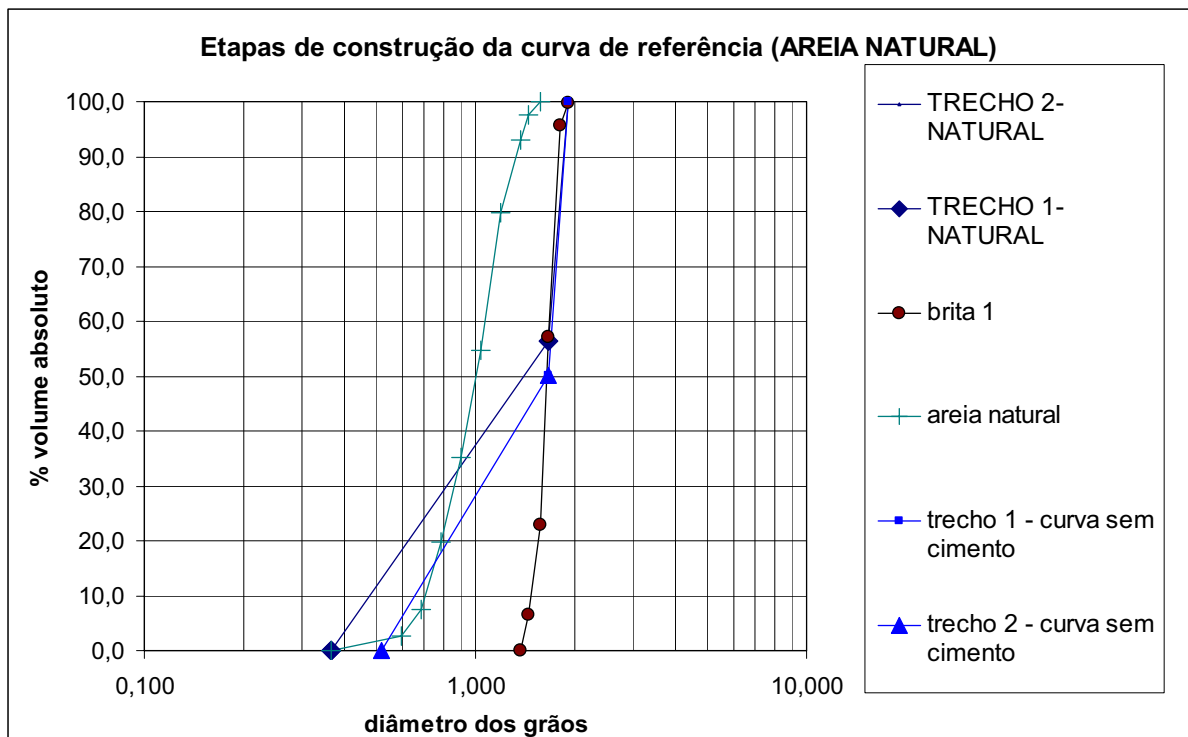


Figura 2.2 Método Faury: distribuição granulométrica dos agregados e etapas de construção da curva de referência – composição: brita + areia natural.

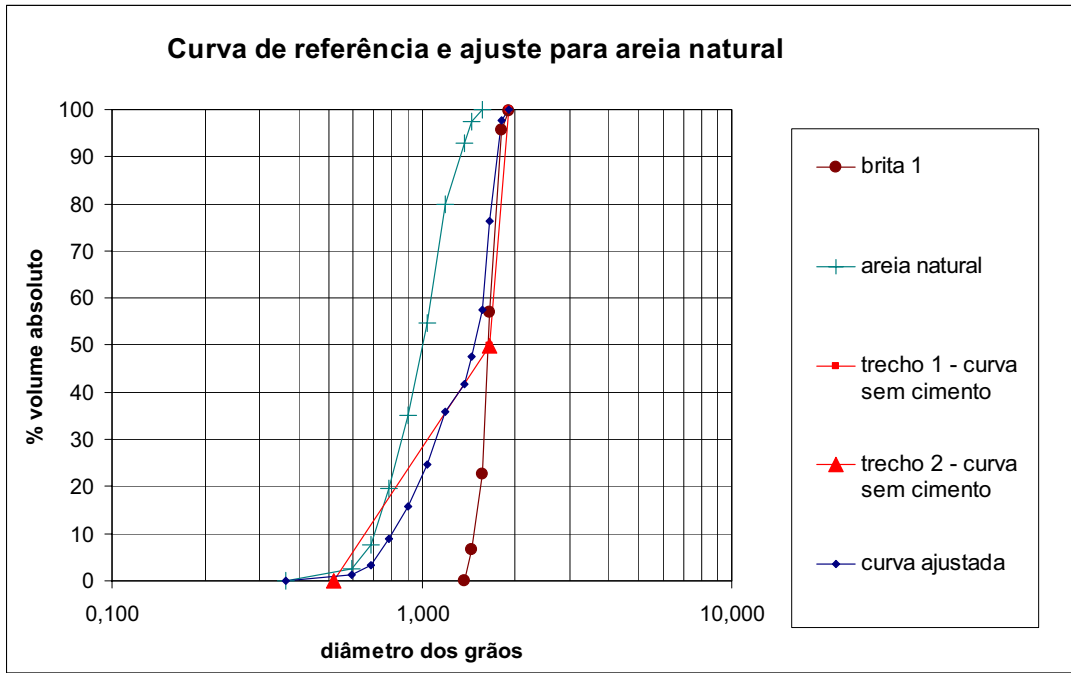


Figura 2.3 Método Faury: curva de referência e curva granulométrica ajustada para brita e areia natural.

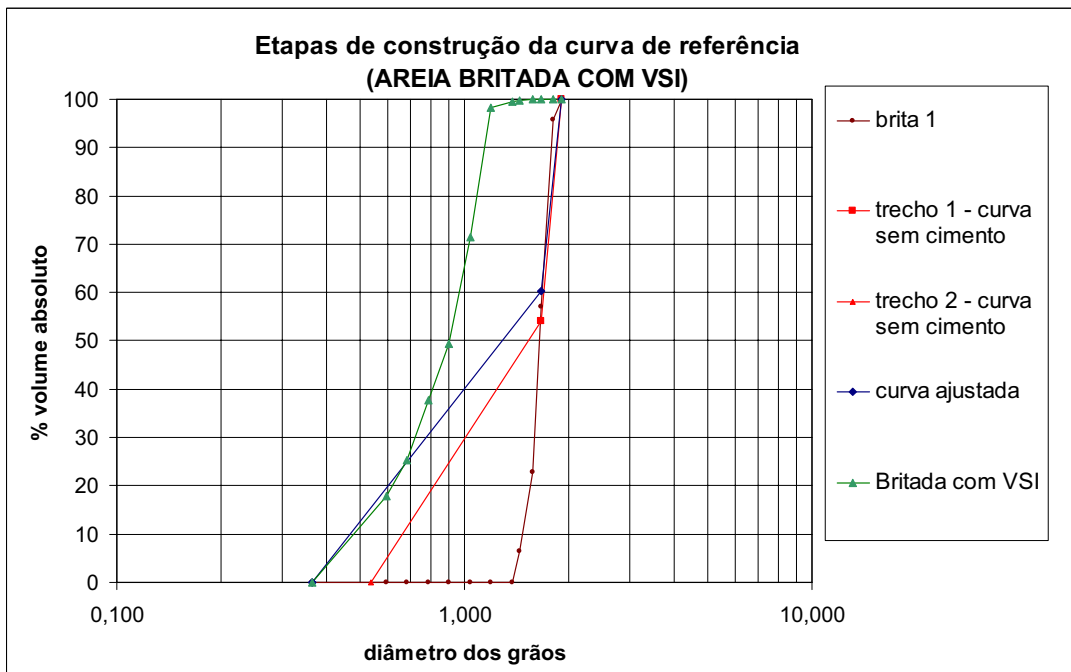


Figura 2.4 Método Faury: distribuição granulométrica dos agregados e etapas de construção da curva de referência – composição: brita + areia BC.

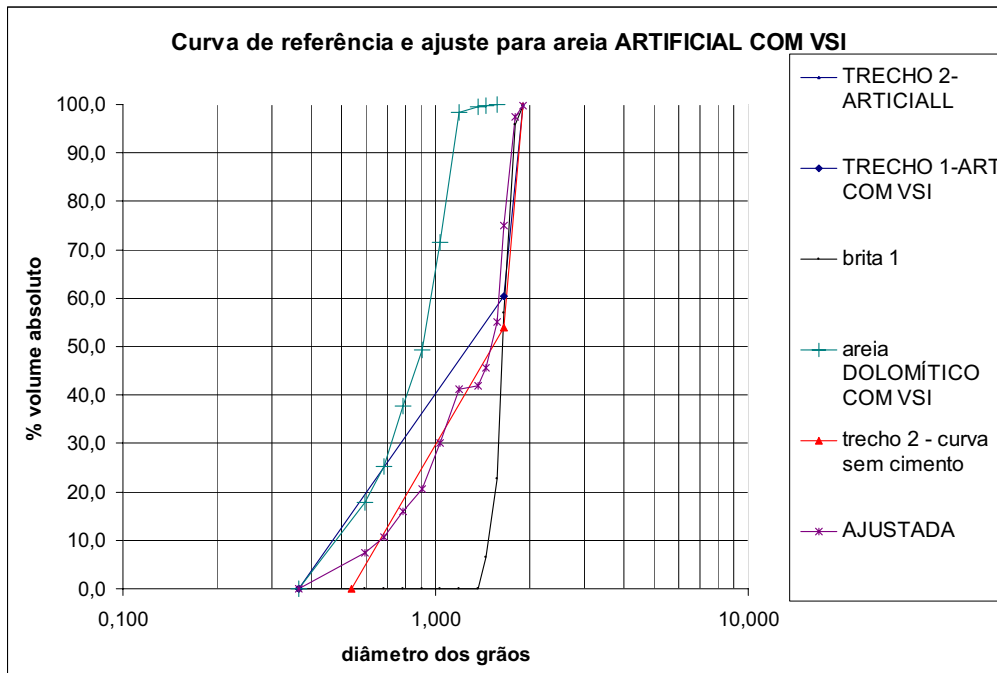


Figura 2.5 Método Faury: curva de referência e curva granulométrica ajustada para brita e areia britada com VSI.

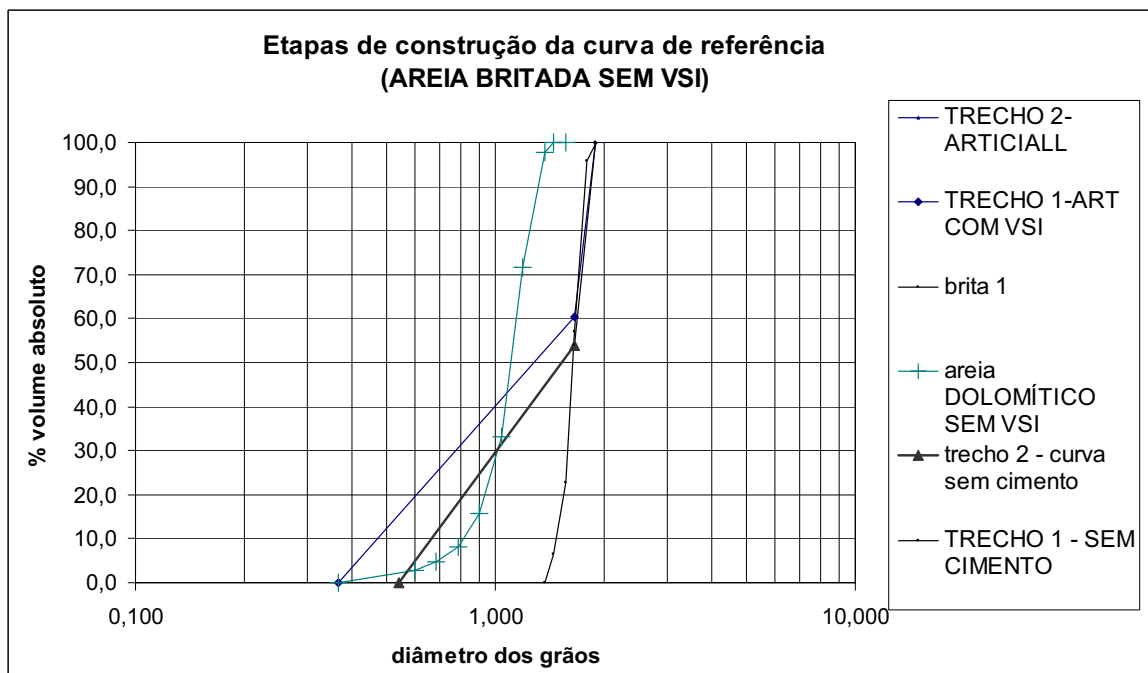


Figura 2.6 Método Faury: distribuição granulométrica dos agregados e etapas de construção da curva de referência – composição: brita + areia britada sem VSI.

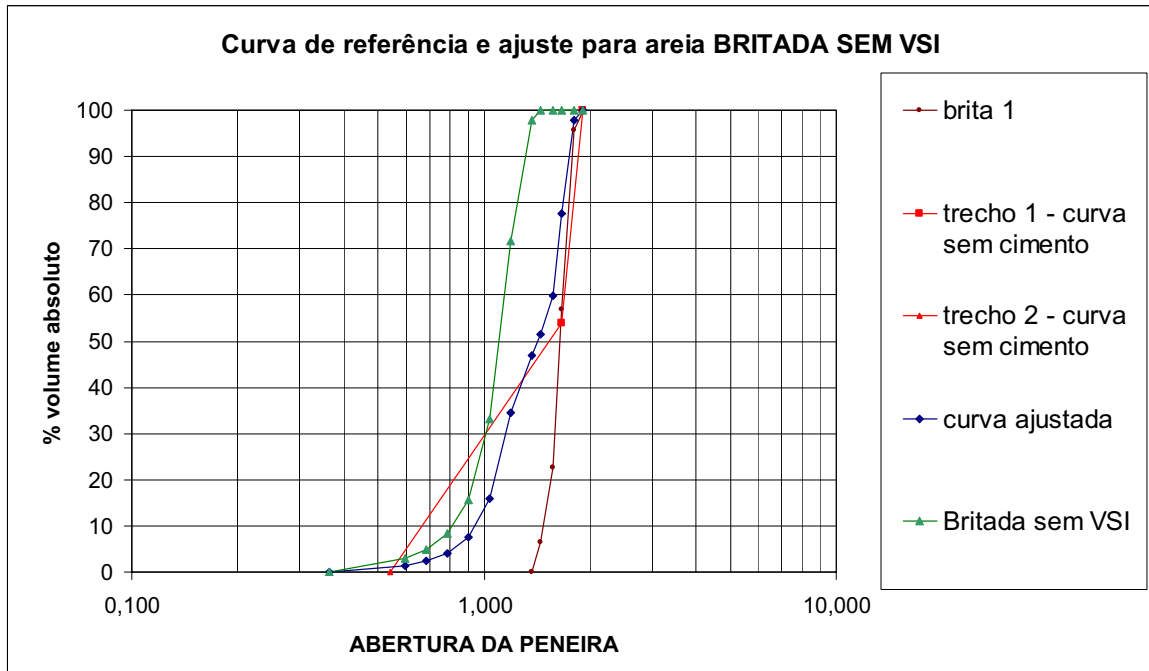


Figura 2.7 Método Faury: curva de referência e curva granulométrica ajustada para brita e areia britada sem VSI.

APÊNDICE B – PROJETO EXPERIMENTAL 2: MEMÓRIA DE CÁLCULO DA DOSAGEM POR FAURY

1. PARÂMETROS PARA DEFINIÇÃO DAS CURVAS

Tabela 1.1 Parâmetros para definição do traço pelo Método de Faury.

Dados e parâmetros	Brita 1 e areia natural	Brita 1 e areia britada sem VSI	Brita 1 e areia britada com VSI
Consistência	120±10 mm	120±10 mm	120±10 mm
A	32	36	36
B	2	2	2
D	25	25	25
R/D ¹⁶	0,5	0,5	0,5
K	0,385	0,43	0,43
K'	0,004	0,004	0,004
P(D/2)	56,4	60,4	60,4
Volume de água + vazios (l/m ³) - I	186	210	210
Volume absoluto de sólidos (l/m ³) - Vs	814	790	790
Volume de vazios (l/m ³) - Vv	15	15	15
Cágua (l) = I - Vv	171	195	195
C cimento (kg/m ³)	340	340	340
a/c	0,50	0,57	0,57
Volume absoluto de cimento (l)	110	110	110
Volume absoluto de inertes (l/m ³)	704	681	681
% de cimento / inertes	13,5	13,9	13,9

¹⁶Adotado como peça limite de aplicação, uma viga de 30x25cm e comprimento de 2,5m, com armadura paralela

Tabela 1.2 Porcentagem de material de cada composição granulométrica definidas por ajuste geométrico à curva de referência de Faury.

Teor de finos da areia (%)	Composição	Brita 1 e areia natural	Brita 1 e areia britada sem VSI	Brita 1 e areia britada com VSI
0	p (%)	0,46	0,49	0,52
	a (%)	0,55	0,51	0,48
10	p (%)	0,50	0,53	0,55
	a (%)	0,50	0,47	0,45
18	p (%)	0,53	0,56	0,58
	a (%)	0,47	0,44	0,43
25	p (%)	0,56	0,58	0,59
	a (%)	0,44	0,42	0,41

2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS

2.1. TEOR DE FINOS DA AREIA 0%

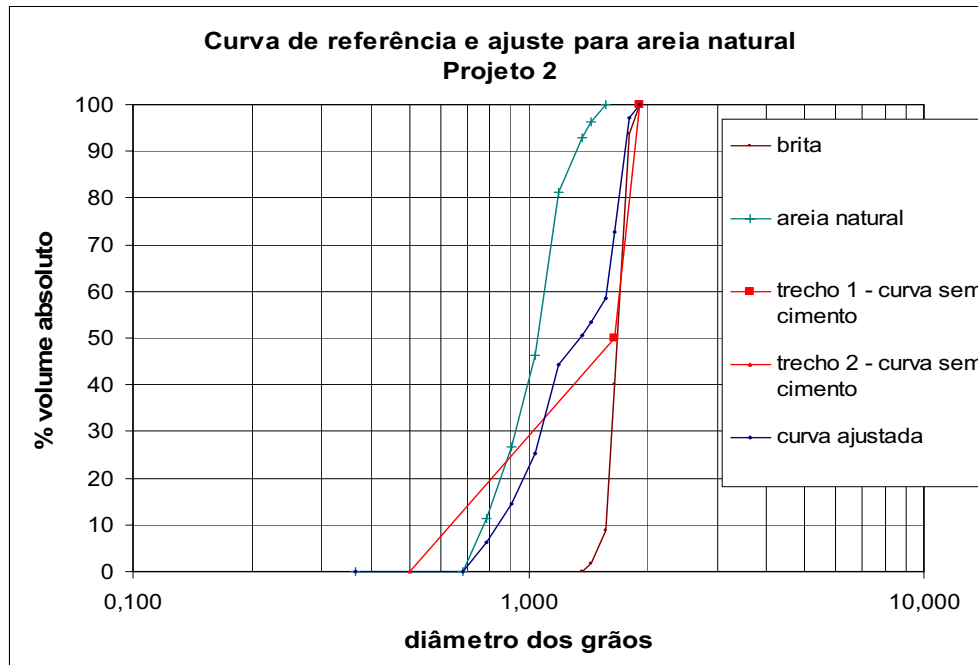


Figura 2.1 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia natural com 0% de finos da areia.

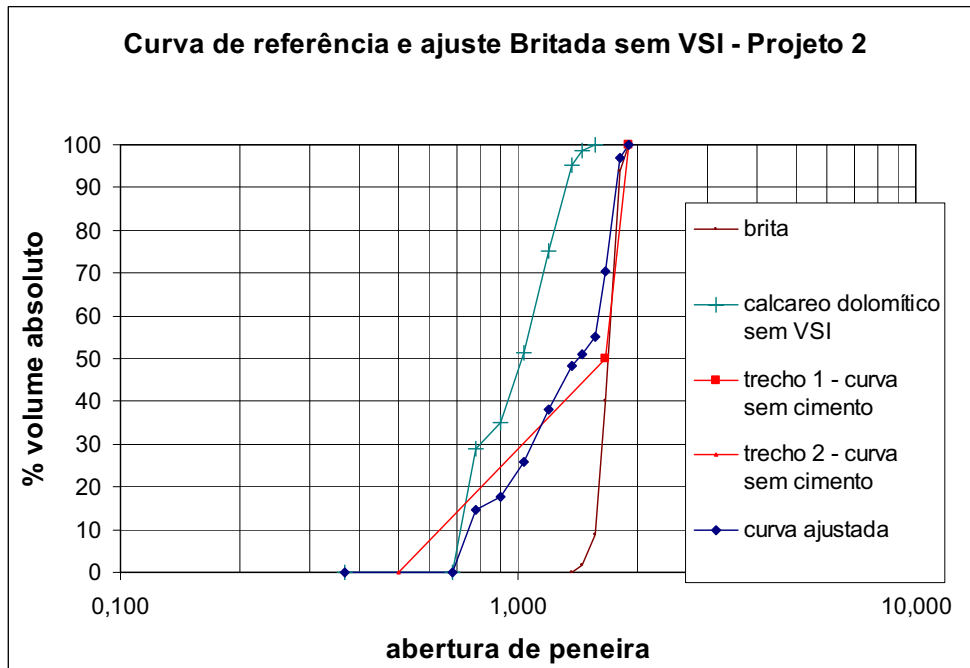


Figura 2.2 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 0% de finos da areia.

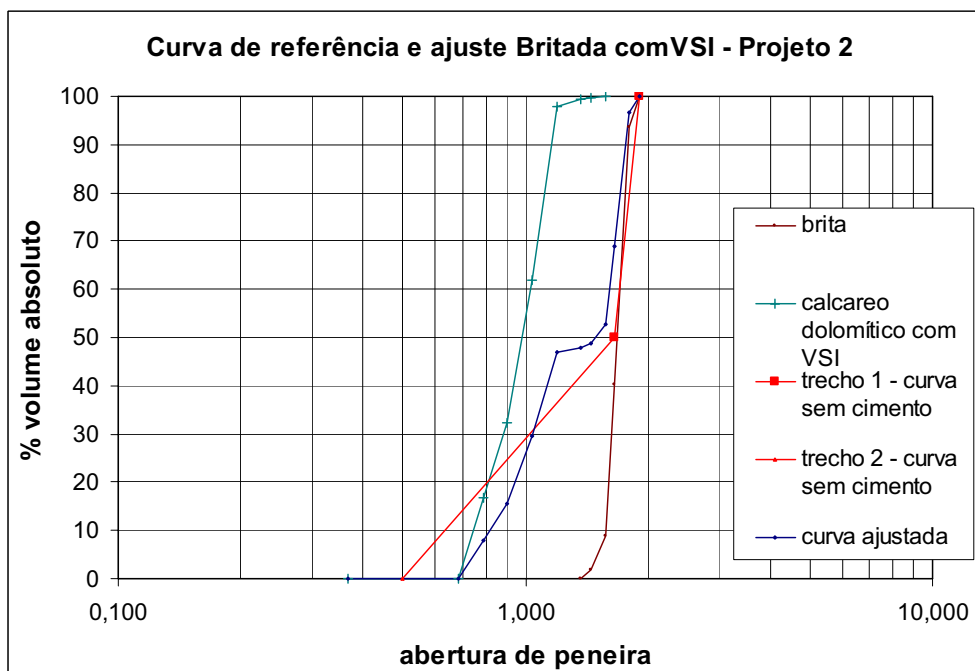


Figura 2.3 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 0% de finos da areia.

2.2. TEOR DE FINOS DA AREIA 10%

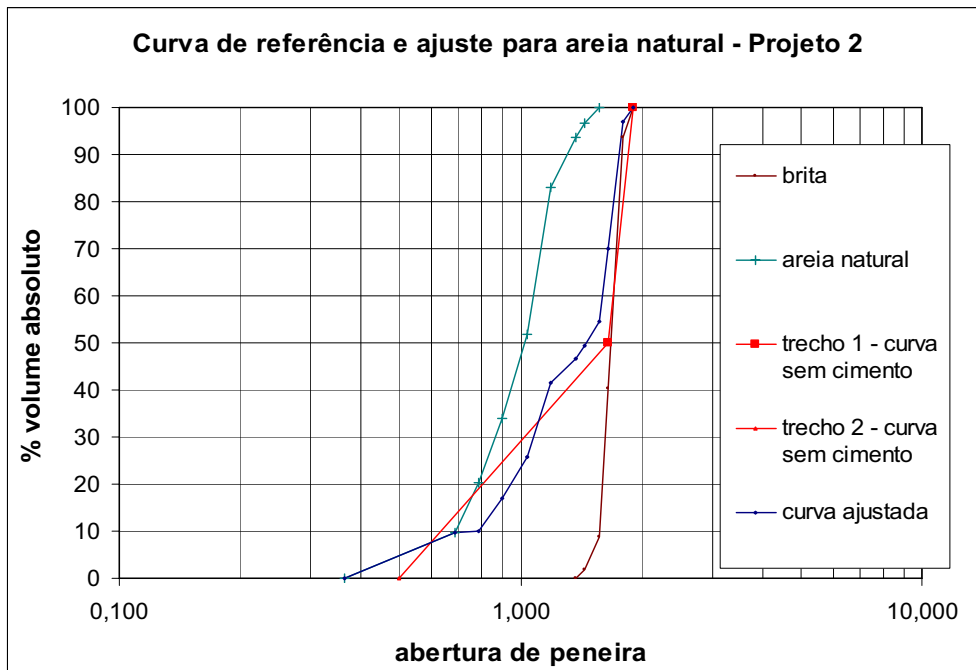


Figura 2.4 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia N com 10% de finos da areia.

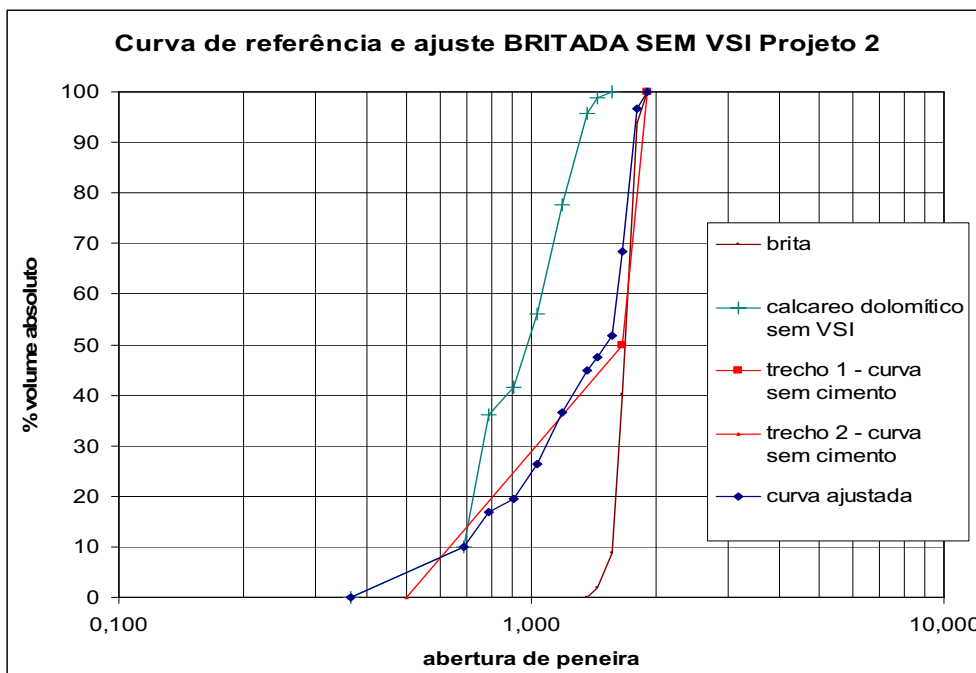


Figura 2.5 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 10% de finos da areia..

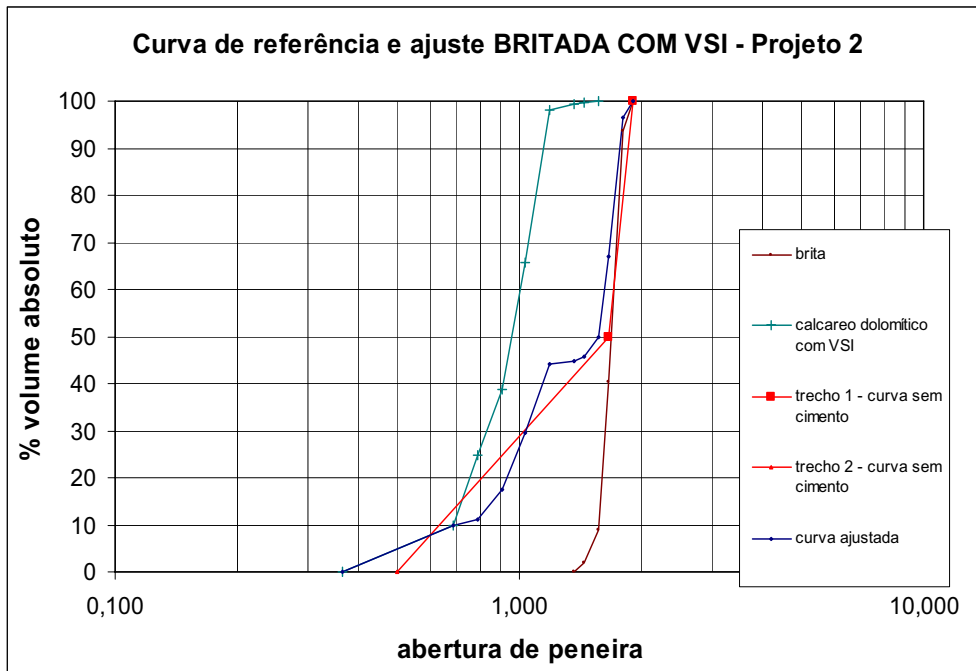


Figura 2.6 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 10% de finos da areia.

2.3. TEOR DE FINOS DA AREIA 18%

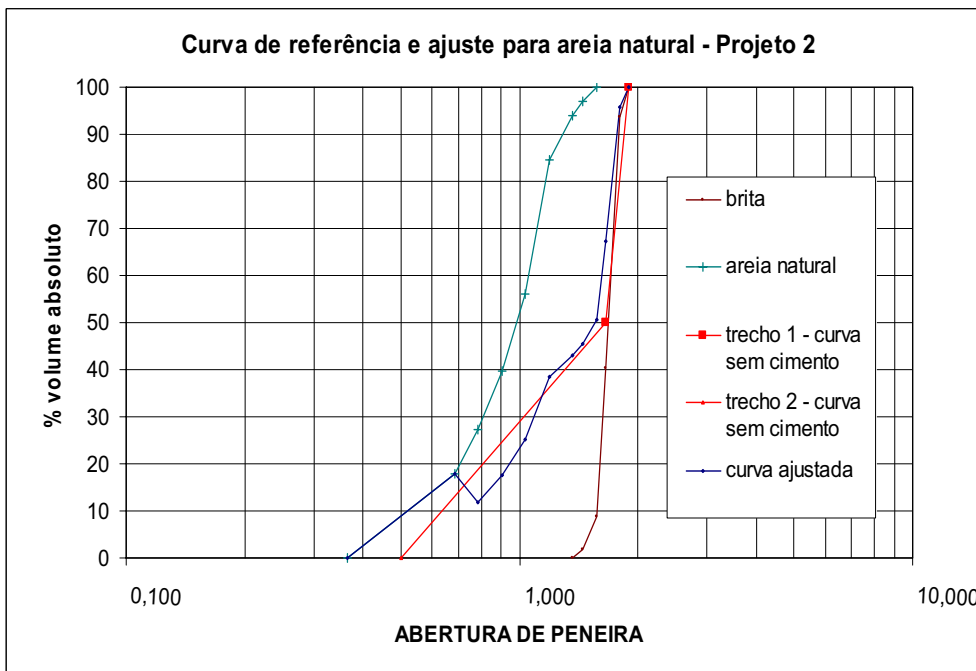


Figura 2.7 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia N com 18% de finos da areia.

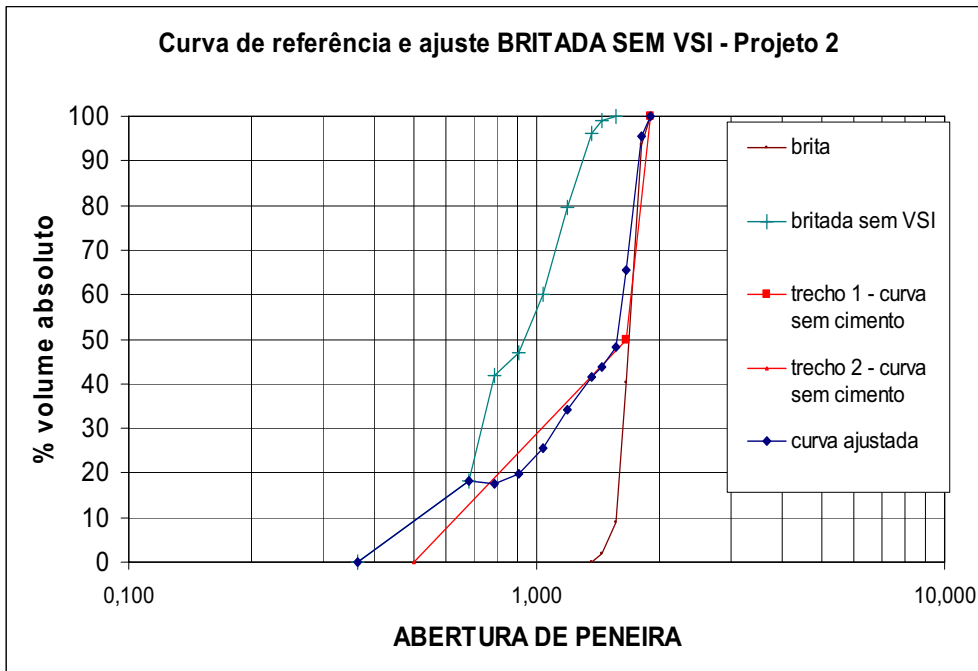


Figura 2.8 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 18% de finos da areia.

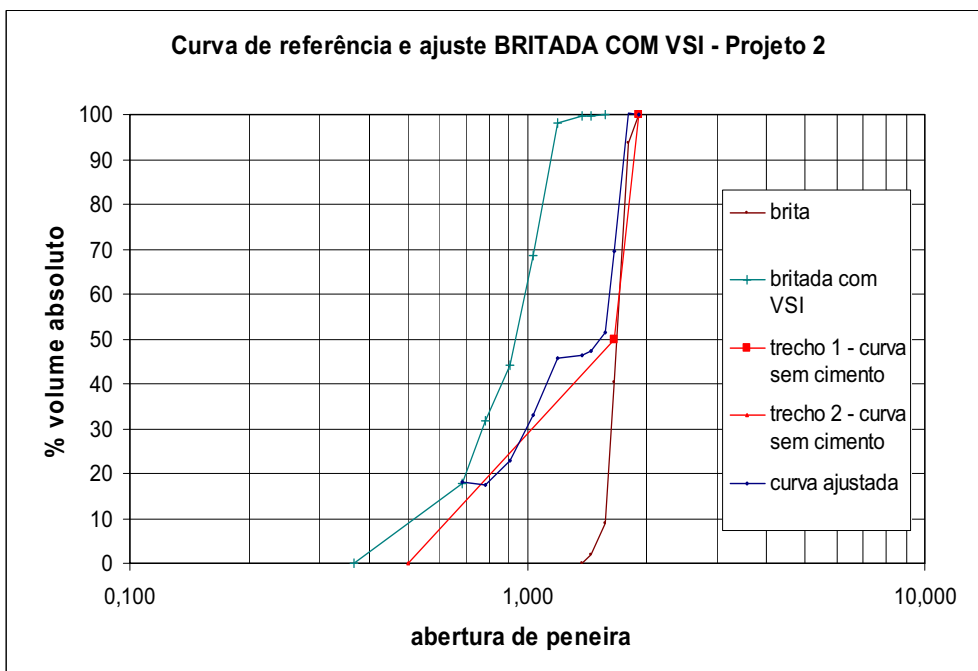


Figura 2.9 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 18% de finos da areia.

2.4. TEOR DE FINOS DA AREIA 25%

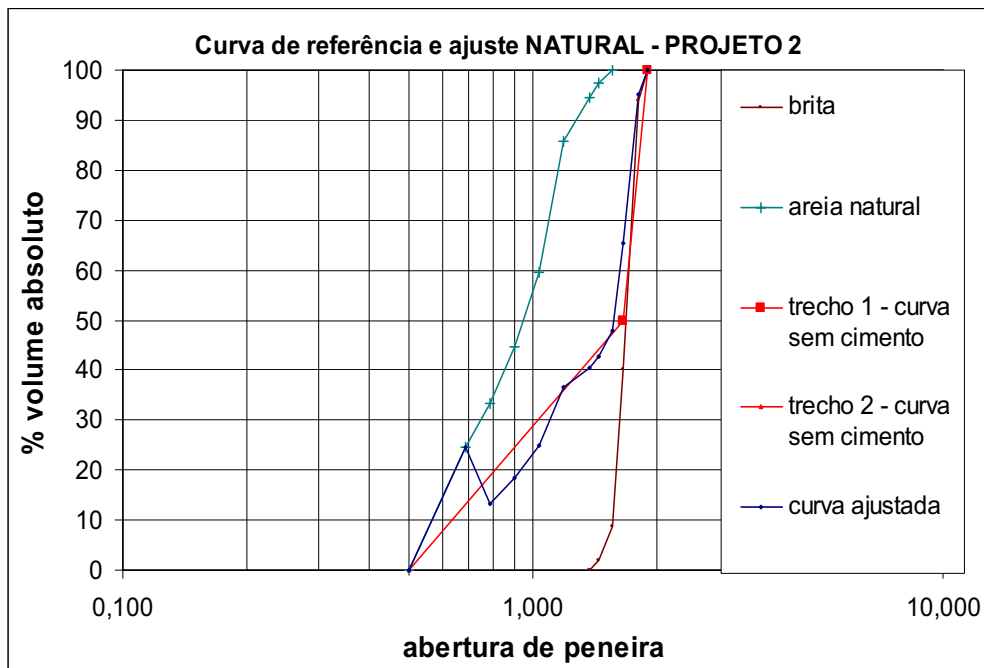


Figura 2.10 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia N com 25% de finos da areia.

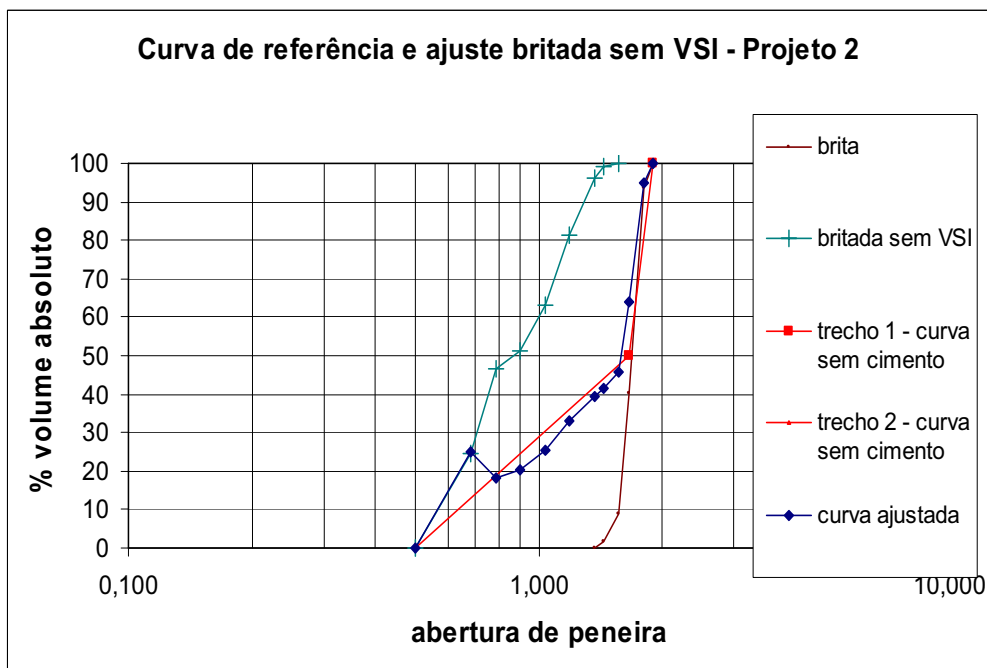


Figura 2.11 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BS com 25% de finos da areia.

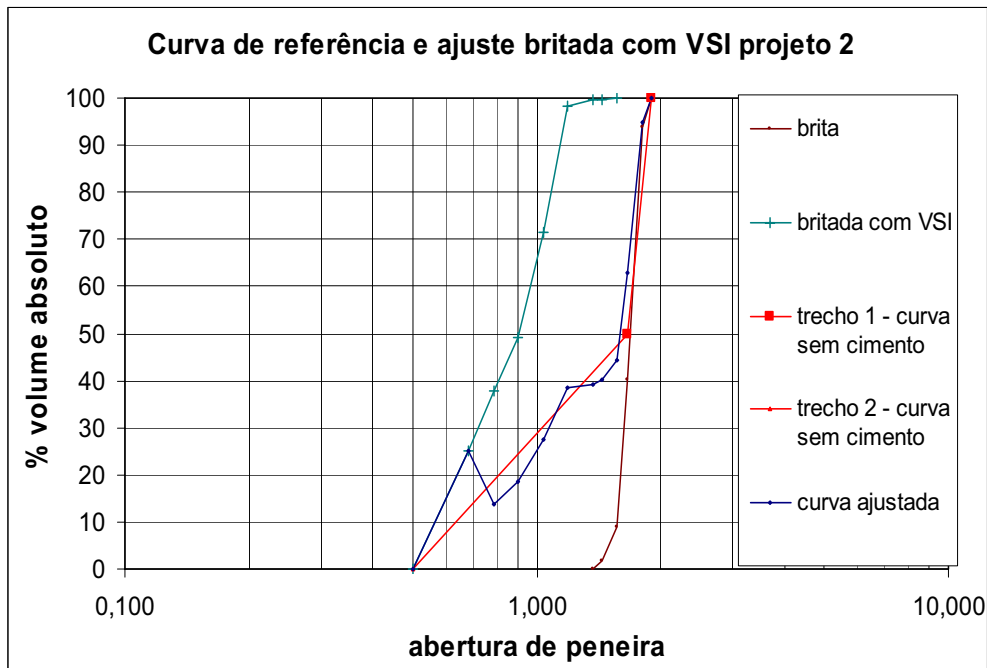


Figura 2.12 Distribuição granulométrica, curvas de referência e curva ajustada para a composição granulométrica de brita e areia BC com 25% de finos da areia.

3. CURVAS DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS AJUSTADAS

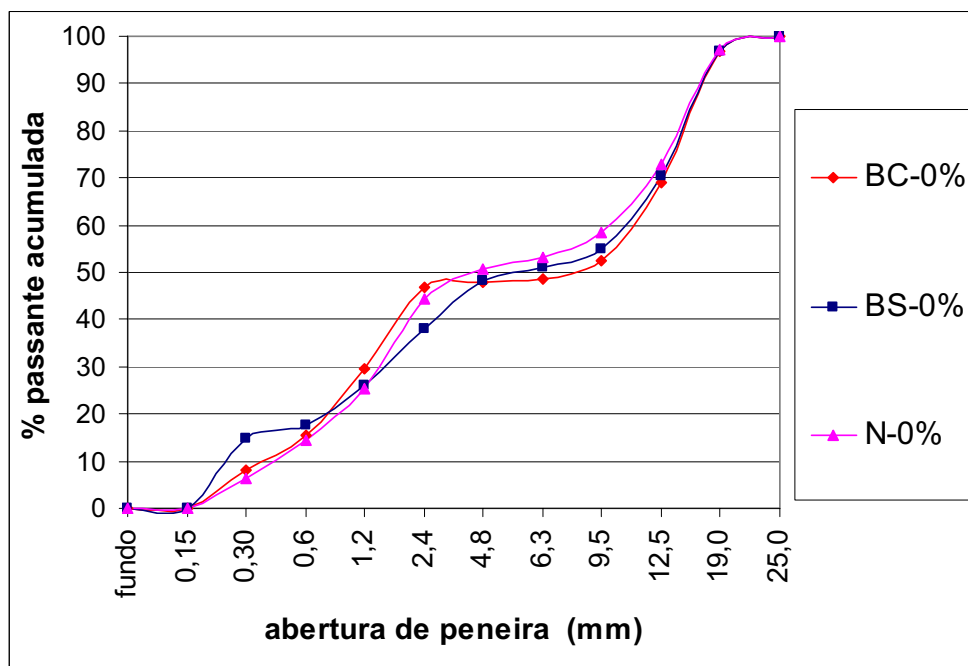


Figura 3.1 Distribuição granulométrica da composição para 0% de teor de finos das areias N, BS e BC.

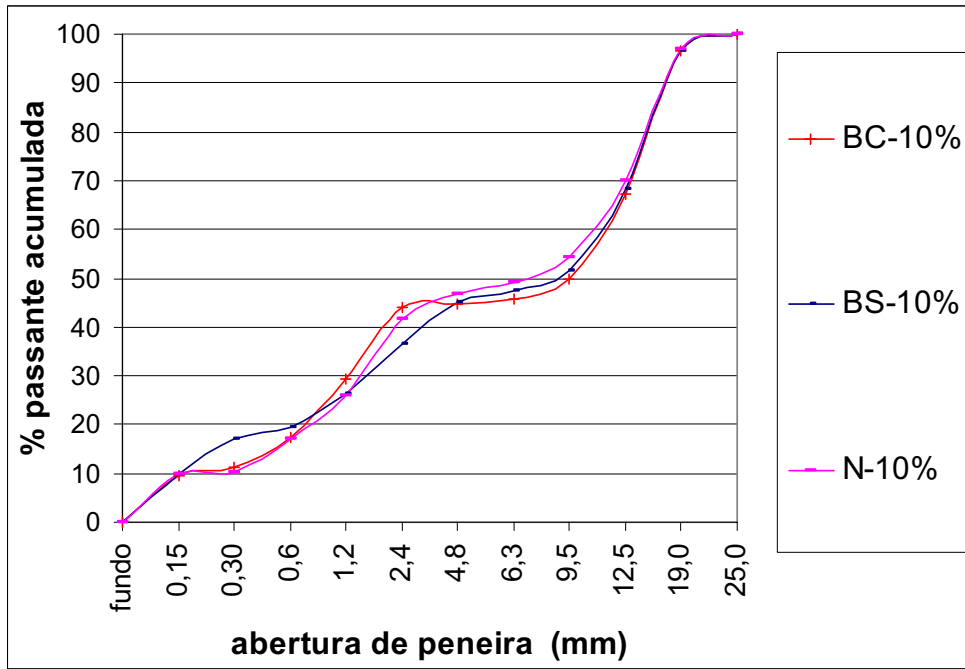


Figura 3.2 Distribuição granulométrica da composição para 10% de teor de finos areias N, BS e BC.

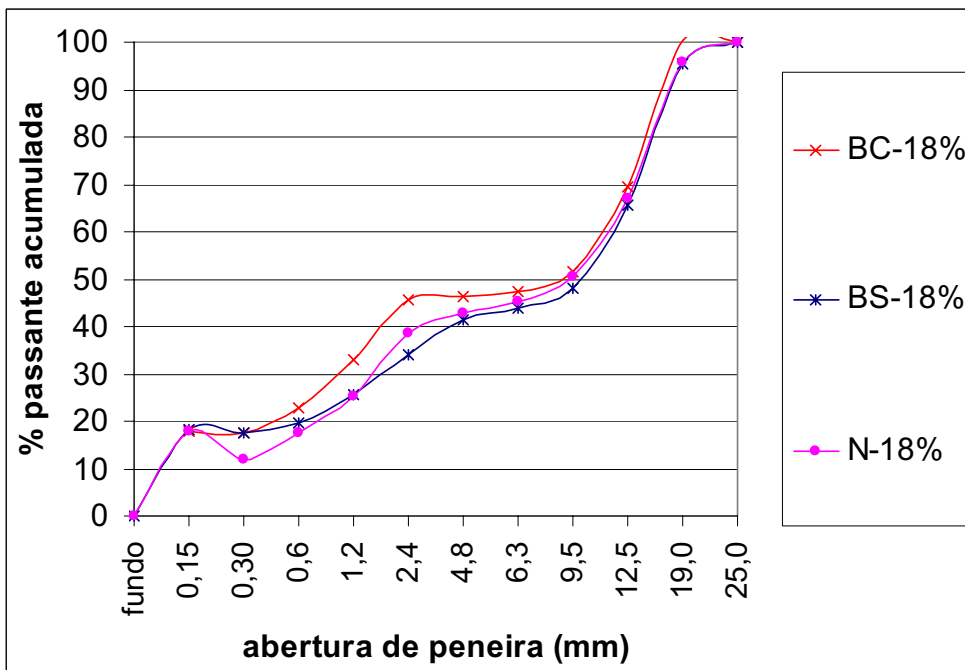


Figura 3.3 Distribuição granulométrica da composição para 18% de teor de finos areias N, BS e BC.

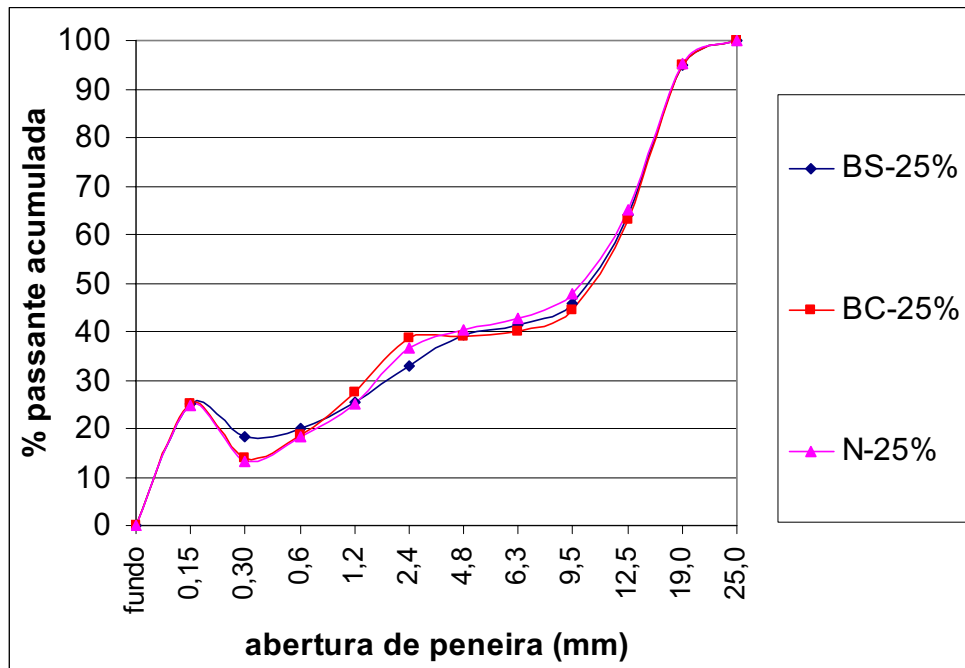


Figura 3.4 Distribuição granulométrica da composição para 25% de teor de finos areias N, BS e BC.