

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS**

**APLICAÇÃO DE AREIA DE BRITAGEM DE ROCHAS BASÁLTICAS NA
FABRICAÇÃO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

EDISON HUMBERTO VIERO

**CAXIAS DO SUL
2010**

EDISON HUMBERTO VIERO

**APLICAÇÃO DE AREIA DE BRITAGEM DE ROCHAS BASÁLTICAS NA
FABRICAÇÃO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.
Orientador: Prof. Carlos Alberto Costa, Ph.D.

CAXIAS DO SUL
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

V665a Viero, Edison Humberto
Aplicação de areia de britagem de rochas basálticas na
fabricação de concreto de cimento portland / Edison Humberto
Viero. - 2010.
137 p. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul,
Programa de Pós-Graduação em Materiais, 2010.
Apresenta bibliografia.
“Orientação: Prof. Dr. Carlos Alberto Costa.”

1. Areia 2. Concreto armado - Areia. 3. Materiais de construção.

CDU: 691.22

Índice para o catálogo sistemático:

1. Areia	691.22
2. Concreto armado - Areia	691.328.44:691.22
3. Materiais de construção	691

“APLICAÇÃO DE AREIA DE BRITAGEM DE ROCHAS BASÁLTICAS NA FABRICAÇÃO DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND”

Edison Humberto Viero

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.
Área de Concentração: Tecnologia do Concreto

Caxias do Sul, de Abril de 2010.

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Alberto Costa, Ph. D. (Orientador)
Universidade de Caxias do Sul

Prof.

Prof.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Tânia e filhos Filipe e Cláudia
pelo simples fato de serem o que são.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, esposa Tânia, filhos Filipe e Cláudia que me apoiaram, compreenderam e estiveram ao meu lado nos diversificados e complicados momentos que marcam um curso de mestrado.

Ao meu orientador Professor Dr. Carlos Alberto Costa, pela paciência e pela dedicação exercida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Givanildo Garlet pelo apoio técnico no desenvolvimento do trabalho experimental e pela disponibilidade do Laboratório de Tecnologia Construtiva do Curso de Arquitetura e Urbanismo da UCS.

À Professora Giovanna Machado pela disponibilidade do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do programa de Mestrado em Materiais.

Ao Professor Pedro Reginatto pela ajuda na caracterização geológica das rochas.

Aos técnicos do Laboratório de Tecnologia Construtiva do Curso de Arquitetura e Urbanismo da UCS, Marcelo S. Meira e Cleicimara C. Colvara, ao técnico do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do programa de Mestrado em Materiais, Alan P. Kauling, pelo apoio no desenvolvimento dos trabalhos experimentais.

Aos acadêmicos que desenvolveram seus estágios na parte experimental desse trabalho Glauco Bussanello e Abrahamo Nicoletti.

À secretária do programa de Mestrado em Materiais, Margarida Henz Borges pela atenção dada durante a minha estada neste programa.

Às empresas mineradoras e britadoras de rochas que doaram material para o desenvolvimento do trabalho experimental: Pedreira Caxiense Ltda, Coneresul Britagem Ltda, Fabrita Mineração Ltda, Minasul Ltda e Mineração Florense Ltda.

Aos professores do programa de mestrado em Materiais: Cláudio Perottoni, Janete Zorzi, Giovanna Machado, Mara Andrade, Eduardo Tentardini, Janaina Crespo e Israel Baumvol, pelos conhecimentos que me propiciaram.

E por fim um agradecimento especial à minha filha Cláudia e ao meu genro Tomás, pelo auxílio na formatação deste trabalho.

RESUMO

Na produção de concreto estrutural, apesar dos avanços tecnológicos, ainda se utilizam de materiais *in natura*, o que vem ocasionando problemas ambientais e econômicos a cadeia produtiva. Um dos problemas está associado à extração de areia do leito de rios, motivo pelo quais os profissionais envolvidos com a tecnologia do concreto vêm buscando alternativas ao uso dessa areia na produção de concreto estrutural. Uma alternativa que vem sendo estudada, pela grande disponibilidade, é o uso de uma areia produzida a partir da cominuição de rochas, chamada de areia de britagem. Na região de Caxias do Sul existem grandes reservas de rochas de origem basáltica (Riodacitos), a partir das quais é possível se produzir esse tipo de areia. Neste trabalho foi avaliada a viabilidade de se substituir à areia natural por areia de britagem de rochas basálticas produzidas em cinco empresas mineradoras localizadas na região de Caxias do Sul. O estudo foi desenvolvido em três etapas: na primeira foram avaliadas as características das areias decorrentes da mineralogia e petrografia das rochas e do processo de fabricação nas mineradoras; na segunda etapa foram avaliadas as propriedades do concreto através do método de dosagem EPUSP/IPT; na terceira etapa, para comprovar a eficiência do método de dosagem, foram produzidos traços específicos para cada tipo de areia. Os resultados de caracterização demonstraram que as areias de britagem possuem características diferentes das da areia natural e que apenas duas das cinco areias avaliadas apresentam propriedades que permitem a sua utilização em concreto estrutural. As propriedades decorrentes do processo de fabricação, como a presença de material pulverulento, forma e textura dos grãos provocaram um aumento no teor de argamassa, o que influenciou diretamente no proporcionamento dos materiais constituintes. Os resultados para a avaliação das propriedades do concreto demonstraram que, para um mesmo traço, a resistência a compressão axial e o módulo de elasticidade são menores nos concretos produzidos com areias de britagem. Corrigindo-se os teores de argamassa e produzindo-se traços específicos para cada tipo de areia é possível produzir concretos com resistências desejadas. Apesar das diferenças encontradas nas propriedades das areias foi comprovado que as areias de britagem estudadas podem ser utilizadas na produção de concreto estrutural de cimento Portland, substituindo totalmente à areia natural.

Palavras-chave: areia de britagem, areia natural, concreto estrutural.

ABSTRACT

Despite the technological advances on the structural concrete production, *in natura* materials are still used. This fact has been causing environmental and economic problems to the manufacturing chain. One of the problems is related to the sand extraction from riverbeds, this is the reason why professionals involved with concrete technology are searching for alternatives to the use of this type of sand in the structural concrete manufacturing. One alternative that is being studied in various parts of the country, because its large availability is a sand produced from the rocks' comminution, called crushing sand. In the Caxias do Sul region there are large reservations of basaltic rocks origin (Riodacitos), from which it is possible to produce this type of sand. In this work, it was evaluated the feasibility of substitute natural sand for crushing sand from basaltic rocks produced in five mining companies located at Caxias do Sul region. The study was developed in three stages: on the first one, the features of the sand that arises from rocks' mineralogy and petrography and from the mining manufacturing process were evaluated; on the second the concrete properties through the EPUSP/IPT dosage method were evaluated; on the third they were produced specific trace to each type of sand in order to verify the efficiency of the dosage method. The characterization results established that the crushing sand have different features IF compared with natural sand and that Just two out of Five evaluated sands presented properties that allow its use in structural concrete. The properties arising from the fabrication process, for example the presence of powder material, the grains' shape and texture caused the raise of the plaster content, which influenced directly on the constituents materials proportioning. The results of the concrete properties evaluation showed that, for the same trace, the resistance to axial compression and the elasticity module are smaller in the concretes produced with crushing sand. If the plaster content is corrected and the specific traces are produced for each type of sand it is possible to produce concretes with desired resistance. In spite of the differences found on the sand properties it was proven that the crushing sand produced at the Caxias do Sul region can be used on the portland cement structural concrete production, replacing totally the natural sand used.

Keywords: crushing sand, natural sand, structural concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Gráfico das curvas granulométricas – zona ótima e zona utilizável.	33
Figura 2.2: Curva de inchamento de uma areia extraída do Rio Cai - RS	35
Figura 2.3: Estados de umidade que um grão de agregado pode apresentar	37
Figura 2.4: Mapa Geológico da região de Caxias do Sul	45
Figura 2.5: Esquema de execução do Slump Test	53
Figura 2.6: Diagrama de dosagem, Método EPUSP/IPT, Modelo de comportamento.	62
Figura 2.7: Gráfico típico que expressa a Lei de Abrams.	63
Figura 2.8: Gráfico típico que expressa a Lei de Molinari.	64
Figura 2.9: Gráfico típico que expressa a Lei de Inge Lyse.	65
Figura 3.1: Gráfico para determinação do coeficiente de inchamento médio (V_h/V_s) e umidade crítica (h).	77
Figura 3.2 e 3.3: Medida de slump e consistência do concreto através de ensaio de abatimento de tronco de cone.	82
Figura 3.4: Etiqueta de identificação inicial dos corpos-de-prova	83
Figura 4.1: Curvas granulométricas da primeira coleta.	88
Figura 4.2: Curvas granulométricas da segunda coleta	88
Figura 4.3: Resultados comparativos dos módulos de finura com amostras da primeira coleta.	89
Figura 4.4: Resultados comparativos das dimensões máximas características com amostras da primeira coleta.	89
Figura 4.5: Resultados comparativos dos módulos de finura com amostras da segunda coleta.	90
Figura 4.6: Resultados comparativos das dimensões máximas características com amostras da segunda coleta.	90
Figura 4.7: Resultados comparativos das massas unitárias (MU (kg/m^3)).	91
Figura 4.8: Resultados comparativos do Índice de volume de vazios (IVV - %).	92
Figura 4.9: Resultados comparativos entre as massas específicas	92

Figura 4.10: Resultados comparativos do teor de material pulverulento encontrado nas areias da primeira coleta.	93
Figura 4.11: Resultados comparativos do teor de material pulverulento encontrado nas areias da segunda coleta.....	94
Figura 4.12: Resultados comparativos da absorção de água.	94
Figura 4.13: Representação comparativa entre valores de umidade crítica e coeficiente de inchamento médio.	95
Figura 4.14: Resultados comparativos do Índice de Forma – IF.....	97
Figura 4.15: Resultados comparativos da Esfericidade.....	97
Figura 4.16: Resultados comparativos da Área Superficial.	97
Figura 4.17: Forma e textura superficial dos grãos de areia natural – Imagens de MEV	98
Figura 4.18: Forma e textura superficial dos grãos da areia de britagem tipo A – Imagens de MEV	98
Figura 4.19: Curva granulométrica da areia A.	103
Figura 4.20: Curva granulométrica da areia D.	103
Figura 4.21: Teor de argamassa das três misturas	105
Figura 4.22: Consumo de materiais para um m ³ de concreto para o traço normal.....	106
Figura 4.23: Relação entre o teor de argamassa e o teor de material pulverulento	107
Figura 4.24: Relação entre a quantidade de material pulverulento e a relação água/cimento para os traços 1:5 das três misturas.	107
Figura 4.25: Comparação da consistência das misturas para os três traços	108
Figura 4.26: Dados comparativos da resistência à compressão axial das três misturas	109
Figura 4.27: Relação entre resistência à compressão axial e o teor de argamassa.....	109
Figura 4.28: Representação da Lei de Abrams para a mistura com a areia natural A N.....	110
Figura 4.29: Representação da Lei de Abrams para a mistura com a areia de britagem A....	111
Figura 4.30: Representação da Lei de Abrams para a mistura com a areia de britagem D....	111
Figura 4.31: Representação da Lei de Lyse para a mistura da areia natural A N.....	112
Figura 4.32: Representação da Lei de Lyse para a mistura da areia de britagem A.....	112
Figura 4.33: Representação da Lei de Lyse para a mistura da areia de britagem D.....	113

Figura 4.34: Representação da Lei de Molinari para a mistura de areia natural A N.	113
Figura 4.35: Representação da Lei de Molinari para a mistura de areia de britagem A.	114
Figura 4.36: Representação da Lei de Molinari para a mistura de areia de britagem D.	114
Figura 4.37: Diagrama de dosagem mistura com a areia natural A N.....	115
Figura 4.38: Diagrama de dosagem mistura com a areia de britagem A.....	115
Figura 4.39: Diagrama de dosagem mistura com a areia de britagem D.....	116
Figura 4.40: Consumo de materiais para um metro cúbico de concreto.	121
Figura 4.41: Resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias.	122
Figura 4.42: Resistência à compressão axial ao longo do tempo.	123
Figura 4.43: Resistência à compressão axial medidas aos 28 dias.....	123
Figura 4.44: Módulo de elasticidade medido aos 28 dias.....	123
Figura 4.45: Relação entre resistência à compressão, módulo de elasticidade e teor de argamassa.....	125
Figura 4.45: Relação entre módulo de elasticidade e material pulverulento.....	125
Figura 4.46: Comparação dos custos dos materiais para a produção de um metro cúbico de concreto.	126
Figura 4.47: Comparação dos custos dos materiais para a produção de um metro cúbico de concreto.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composições dos cimentos segundo a NBR 5732 (1991).....	26
Tabela 2.2: Limites da composição granulométrica do agregado miúdo, especificados na NBR 7211:2004.	32
Tabela 2.3: Abatimento recomendado para diferentes tipos de obra.	54
Tabela 2.4: Índice de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento.....	54
Tabela 2.5: Classificação do concreto de acordo com a sua resistência característica à compressão (fck) de acordo com a NBR 8953 (1992)	58
Tabela 2.6: Determinação do teor de argamassa seca para o traço 1:5 (brita = 30 kg).....	68
Tabela 3.1: Ensaios de caracterização realizados, laboratórios e normas utilizadas.	72
Tabela 3.2: Empresas selecionadas para participação no projeto com respectivas produções de agregados e areias.	72
Tabela 3.3: Identificação das amostras coletadas em campo.	73
Tabela 3.4: Identificação das amostras utilizadas na determinação da Composição Granulométrica.	74
Tabela 3.5: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Massa Unitária e Volume de Vazios.	75
Tabela 3.6: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Massa Específica.....	76
Tabela 3.7: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da determinação do material pulverulento.	76
Tabela 3.8: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da determinação do Inchamento.	77
Tabela 3.9: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Absorção de Água.....	78
Tabela 3.10: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Forma.	79
Tabela 3.11: Misturas analisadas para determinação das propriedades do concreto.....	79
Tabela 3.12: Identificação dos ensaios para determinação do teor de argamassa ideal	81
Tabela 3.13: Informações básicas utilizadas na realização dos ensaios de dosagem	81
Tabela 3.14: Distribuição dos corpos-de-prova.....	82

Tabela 3.15: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura AN, para ensaios de compressão axial.....	83
Tabela 3.16: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura AN, para ensaios de módulo de elasticidade.	83
Tabela 3.17: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura A, para ensaios de compressão axial.....	84
Tabela 3.18: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura A, para ensaios de módulo de elasticidade.	84
Tabela 3.19: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura D, para ensaios de compressão axial.....	84
Tabela 3.20: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura D, para ensaios de módulo de elasticidade.	84
Tabela 3.21: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para ensaios de compressão axial e Módulo de Elasticidade.	86
Tabela 4.1: Resumo dos resultados dos ensaios com as amostras das duas coletas, comparados com as especificações da norma. Precisão 0,1% em massa.	88
Tabela 4.2: Dimensão máxima característica e módulo de finura com amostras da primeira coleta. – Precisão 0,1% em massa.	89
Tabela 4.3: Dimensão máxima característica e módulo de finura com amostras da segunda coleta. – Precisão 0,1% em massa.	89
Tabela 4.4: Massa unitária e Índice de volume de vazios	91
Tabela 4.5: Massa específica – Precisão 0,01 g/cm ³	92
Tabela 4.6: Teor de material pulverulento (TMP) com amostras da primeira coleta. Precisão 0,1g	93
Tabela 4.7: Absorção de água.....	94
Tabela 4.8: Umidade crítica e coeficiente de inchamento médio.....	95
Tabela 4.9: Parâmetros indicativos de forma das areias.....	96
Tabela 4.10: Resumo das características das areias de britagem	99
Tabela 4.11: Misturas analisadas para determinação das propriedades do concreto.....	100
Tabela 4.12: Informações básicas utilizadas na realização dos ensaios de dosagem	100
Tabela 4.13: Composição do cimento	101

Tabela 4.14: Composição química	101
Tabela 4.15: Características físicas e mecânicas	101
Tabela 4.16: Características geológicas do basalto utilizado como agregado graúdo.	101
Tabela 4.17: Características petrológicas e mineralógicas do basalto utilizado como agregado graúdo.	102
Tabela 4.18: Características físicas do basalto utilizado como agregado graúdo	102
Tabela 4.19: Composição granulométrica e módulo de finura das areias.	102
Tabela 4.20: Características das areias utilizadas nos experimentos.....	104
Tabela 4.21: Dados de dosagem do traço rico em cimento.	104
Tabela 4.22: Dados de dosagem do traço normal em cimento.....	104
Tabela 4.23: Dados de dosagem do traço pobre em cimento.	105
Tabela 4.24: Consumo de materiais para execução de um metro cúbico de concreto.	105
Tabela 4.25: Consistência das misturas para os três traços.	108
Tabela 4.26: Resistência à compressão axial das três misturas.....	109
Tabela 4.27: Dados para elaboração dos gráficos das leis de comportamento do concreto da mistura A N.	110
Tabela 4.28: Dados e resultados da relação água/cimento	117
Tabela 4.29: Dados e resultados da relação materiais secos em massa.....	118
Tabela 4.30: Dados e resultados da quantidade de cimento para 1 m ³ de concreto	119
Tabela 4.31: Dados e resultados do traço individualizado para as três misturas.....	120
Tabela 4.32: Consumo de materiais para um metro cúbico de concreto.	120
Tabela 4.33: Propriedades do concreto no estado fresco.....	121
Tabela 4.34: Resistência a compressão axial aos 3, 7 e 28 dias.	122
Tabela 4.35: Traço em materiais para três resistências específicas.....	126
Tabela 4.36: Consumo de materiais para três resistências específicas.....	126
Tabela 4.37: Custo de materiais para a produção de um metro cúbico de concreto para três resistências específicas.	126

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.2 Justificativa	19
1.3 Objetivo	21
1.3.1 Objetivos específicos	21
1.4 Estrutura do Trabalho	22
1.5 Delimitação do Trabalho	22
2. REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 Concreto de Cimento Portland.....	23
2.2 Características do concreto de cimento Portland	24
2.3 Materiais Constituintes	25
2.3.1 Cimento	25
2.3.2 Agregado	26
2.3.3 Água	29
2.3.4 Aditivos	29
2.4 Forma de obtenção dos agregados	31
2.5 Caracterização dos agregados miúdos	31
2.5.1 Composição granulométrica	32
2.5.2 Índice de material pulverulento	33
2.5.3 Massa específica, massa específica aparente e massa específica relativa.	34
2.5.4 Massa unitária.....	34
2.5.5 Inchamento	34
2.5.6 Absorção de água.....	36
2.5.7 Forma e textura superficial	37
2.6 Areia de Britagem	39
2.7 Rochas Utilizadas Para a Produção de Agregados	43
2.7.1 Rochas Basálticas Encontradas no Rio Grande do Sul.....	44
2.7.2 Rochas Basálticas Encontradas na Região de Caxias do Sul	44
2.8 Propriedades do Concreto	46
2.8.1 Propriedade do concreto endurecido	46
2.8.1.1 Fatores que afetam a resistência à compressão do concreto	49
2.8.1.2 Fatores que afetam o módulo de deformação	50

2.8.1.3	Fatores que afetam a durabilidade	51
2.8.2	Propriedades do concreto fresco	52
2.8.2.1	Consistência	52
2.8.2.2	Plasticidade	54
2.8.2.3	Trabalhabilidade	55
2.8.2.4	Segregação e exsudação.....	56
2.8.3	Classificação dos concretos de acordo com a massa específica.....	56
2.8.4	Classificação dos concretos de acordo com a resistência.....	57
2.9	Dosagem dos concretos de cimento Portland	58
2.9.1	Métodos de dosagem	59
2.9.1.1	Método ABCP/ACI.....	60
2.9.1.2	Método ITN/LOBO CARNEIRO	60
2.9.1.3	Método ITERS/ELÁDIO PETRUCCI.....	60
2.9.1.4	Método SNCF/ROGER VALLETTE	61
2.9.1.5	Método EPUSP/IPT	61
2.9.2	Estudo teórico do método do EPUSP/IPT	62
2.9.2.1	Informações básicas para aplicação do método	66
2.9.2.2	Resistência de dosagem	66
2.9.2.3	Relação água/cimento na dosagem do concreto	67
2.9.3	Estudo experimental do método de dosagem EPUSP/IPT	68
3.	MÉTODOS E TÉCNICAS	71
3.1	Considerações Iniciais	71
3.2	Programa Experimental	71
3.2.1	Etapa 1 – Caracterização das areias.....	71
3.2.1.1	Coleta de amostras em campo	73
3.2.1.2	Preparação das amostras para os experimentos	73
3.2.1.3	Determinação da composição granulométrica	74
3.2.1.4	Determinação da massa unitária e volume de vazios	75
3.2.1.5	Determinação da massa específica.....	75
3.2.1.6	Determinação do teor de material pulverulento.....	76
3.2.1.7	Determinação do Inchamento	77
3.2.1.8	Determinação da absorção de água.....	78
3.2.1.9	Determinação da forma e textura superficial	78

3.2.2	Etapa 2 – Verificação das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido a partir da elaboração de diagramas de dosagem	79
3.2.2.1	Materiais constituintes	80
3.2.2.2	Determinação do teor de argamassa ideal	80
3.2.2.3	Determinação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade	82
3.2.3	Etapa 3 – Verificação Experimental dos Resultados e Determinação do Módulo de Elasticidade.....	85
3.2.4	Avaliação de Custos	86
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	87
4.1	Considerações Iniciais	87
4.2	Etapa 1 - Caracterização das Areias.....	87
4.2.1	Composição granulométrica	87
4.2.2	Massa Unitária e Índice de Volume de Vazios.....	91
4.2.3	Massa Específica	92
4.2.4	Teor de Material Pulverulento	93
4.2.5	Absorção de Água	94
4.2.6	Inchamento	95
4.2.7	Forma e Textura Superficial	96
4.2.8	Considerações sobre as características das areias.....	99
4.3	Etapa 2 – Propriedades do Concreto no Estado Fresco e Endurecido	99
4.3.1	Propriedades pré-estabelecidas.....	100
4.3.2	Características dos Materiais Secos Constituintes.....	101
4.3.2.1	Cimento.....	101
4.3.2.2	Agregado graúdo.....	101
4.3.2.3	Areias	102
4.3.3	Determinação do teor de argamassa ideal	104
4.3.4	Determinação da Consistência.....	107
4.3.5	Determinação da Resistência à Compressão Axial	108
4.3.6	Leis de Comportamento do Concreto	110
4.3.6.1	Lei de Abrams.....	110
4.3.6.2	Lei de Lyse.....	111
4.3.6.3	Lei de Molinari	113
4.3.7	Diagramas de Dosagens.....	114
4.4	Etapa 3 - Avaliação dos Resultados e Módulo de Elasticidade	116

4.4.1	Proporcionamento dos Materiais Constituintes.....	116
4.4.1.1	Resistência de Dosagem (fcj)	116
4.4.1.2	Determinação da relação água/cimento (a/c).....	117
4.4.1.3	Determinação dos materiais secos em massa (m).....	118
4.4.1.4	Determinação da quantidade cimento para 1 m ³ de concreto	118
4.4.1.5	Determinação do traço	119
4.4.1.6	Consumo de materiais.....	120
4.4.2	Avaliação das Propriedades do Concreto	121
4.4.2.1	Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco.....	121
4.4.2.2	Avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido.....	122
4.4.3	Avaliação de Custos	125
5.	CONCLUSÕES	127
5.1	Considerações Iniciais	127
5.2	Conclusões referentes à caracterização das areias	127
5.3	Conclusões referentes às propriedades do concreto	128
5.4	Considerações Finais	129
5.5	Perspectivas Futuras	129
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

1. INTRODUÇÃO

Construir é uma atividade quase tão antiga quanto à história do ser humano, entretanto as tecnologias construtivas pouco evoluíram. Ainda se constrói utilizando materiais naturais, pedras, argilas, madeiras, aplicados *in natura*. A evolução se resume ao ferro e ao concreto de cimento Portland¹, que surgiram durante a Revolução Industrial, no século XVIII (ISAIA, 2005). Foi a partir da possibilidade de produção em larga escala do ferro e da descoberta do cimento Portland, cujo processo de fabricação possibilitou a produção da pedra artificial (concreto), que o homem passou a substituir, gradativamente, as construções maciças de alvenarias por estruturas mais leves.

O concreto de cimento Portland é um material compósito, basicamente constituído de cimento, água e agregados (pedras naturais). Depois da água é o material mais consumido no mundo (em alguns países o consumo chega a ser 10 vezes maior que o consumo de aço) (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O concreto é aplicado em várias atividades humanas, sendo a grande produção aplicada como material estrutural na construção civil.

Dos materiais constituintes do concreto o cimento é o mais importante, o mais caro e o que ocupa a menor porcentagem do volume (10%). A água e aditivos químicos ocupam outros 10%, o restante é ocupado pelos agregados (80%). Apesar de ocupar mais de 2/3 do volume, os agregados custam menos de 1/3 do custo final (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os agregados são divididos em duas frações: a fração grossa, constituída normalmente por rochas britadas de basalto e a fração fina, constituída normalmente por areia de rio.

Os recursos minerais para a obtenção de agregados são abundantes, areias e rochas são facilmente encontradas na natureza. Segundo o Anuário Mineral Brasileiro de 2000, as reservas minerais de rochas no Brasil ultrapassam 20,5 bilhões de toneladas, para um consumo anual de 340 milhões de toneladas. Em 2006, somente na produção de concretos e argamassas o consumo chegou a 395 milhões de toneladas (BUEST, 2006). Entretanto, o processo de extração dos agregados, por ser considerado de alto impacto ecológico, vem sofrendo sérias restrições ambientais, que associadas à expansão urbana, tornam inviável o

¹ A descoberta do cimento é creditada a Joseph Aspdin, um pedreiro, que em 1824 patenteou o produto com o nome de cimento Portland, numa referência a portlandstone, um tipo de rocha arenosa muito utilizada na região de Portland, Inglaterra.

acesso a muitos desses recursos minerais. A situação mais grave e que está sendo rigidamente controlada e frequentemente coibida pelos órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), é a extração de areia natural. O controle rígido desse processo de extração se deve aos danos irreversíveis que causam ao ambiente. As restrições impostas pelos órgãos ambientais e o empobrecimento dos atuais locais de extração impõem aos mineradores a busca por novos pontos, geralmente distantes dos centros consumidores o que eleva consideravelmente o seu custo.

Considerando os fatos expostos é importante que se estudem alternativas para a substituição da areia natural na composição do concreto, que é objetivo desse trabalho.

1.2 Justificativa

As restrições impostas pelos órgãos de fiscalização do meio ambiente e a consequente elevação dos custos vêm incrementando ações no meio técnico e científico na busca por produtos que possam substituir a areia natural no processo de fabricação de concretos e argamassas.

Uma alternativa que vem sendo estudada nas universidades próximas aos grandes centros consumidores e que vem ganhando força é a utilização de um material obtido a partir do resíduo do processo de britagem de rochas, chamado de *areia de britagem*.

Nos Estados Unidos e Europa a viabilidade de utilização da areia de britagem já é comprovada desde a década de 1970. Os estudos atuais se concentram na viabilidade de utilização dos materiais finos resultantes do processo de britagem (FOWLER e CONSTANTINO, 1997; CELIK e MARAR, 1996). No Brasil, pesquisas recentes evidenciam que o uso de areia britada apresenta-se como uma boa opção para a substituição da areia natural na produção de concreto (BUEST, 2006; ANDRIOLO, 2005; ALMEIDA e SILVA, 2005; BASTOS, 2005; CHAVES, 2005; BARBOSA *et al.*, 2008; ALMEIDA e SAMPAIO, 2002; GARLET e REGINATO, 2008). Os resultados obtidos até então, demonstram que a substituição ainda que parcial da areia natural pela areia de britagem, melhora consideravelmente o desempenho do concreto em todas as suas fases e, que apesar de exigir operações complexas e controle operacional mais cuidadoso, a areia de britagem pode competir com vantagens com a areia natural.

A tecnologia do concreto consiste em determinar, entre outros aspectos a sua obtenção a partir dos materiais disponíveis na região de produção. Os agregados naturais são provenientes de rochas de vários tipos, sendo as mesmas compostas por vários minerais. A existência de diversos tipos de rochas, com composição mineralógica distinta sugere alterações nas propriedades físicas e mecânicas do agregado gerado, indicando a necessidade de estudos específicos dos materiais regionais.

As areias de britagem diferem das naturais na graduação, na forma e textura das partículas. Diferenças que de alguma maneira influenciam nas propriedades do concreto o que induz ao estudo dessas areias (McKEAGNEY, 1984).

Caxias do Sul e região possuem reservas minerais lavráveis de aproximadamente 15.000.000 m³ de rochas de origem vulcânica, litologicamente classificadas como riódacitos, popularmente conhecidas como basalto (REGINATO, 1998), que se caracterizam por serem de cor clara e lamelar. Conforme levantamento preliminar realizado, foram identificadas, na região, oito empresas mineradoras de rochas basálticas, produzindo em média 100.000 m³/mês de rochas britadas. No processo de britagem, do total de rocha que entra no britador primário, 55% resultam em produtos nobres (agregados graúdos), totalmente absorvidos pelo mercado. O restante (45%) resulta em um material considerado como resíduo, pois possui dimensões inferiores às recomendadas para uso como agregado graúdo, o que restringe o seu mercado. Frequentemente pode-se observar grandes quantidades desse material estocado nos pátios das empresas mineradoras. Desse material, 80% têm dimensões menores que 4,8mm, o que em princípio, potencializa o seu uso como areia na composição do concreto, substituindo a areia natural como agregado miúdo. Algumas dessas empresas produzem e fornecem areia britada ao mercado, contudo pouco se sabe sobre as suas características, o que implica em incertezas no momento da aplicação.

A maior parte das empresas produtoras de concreto utiliza areia de britagem, em substituição parcial à areia natural na composição dos concretos que produzem. Presume-se que essas empresas o façam sob bases técnicas controladas e seguras. Entretanto, sabe-se que para cada metro cúbico de concreto produzido em usinas de produção de concreto outro é produzido diretamente nos canteiros de obras. Normalmente o concreto produzido em canteiro de obra, com raras exceções, é feito de forma empírica, sendo seu traço, consistência e trabalhabilidade definidos pela experiência do mestre de obras ou do profissional (arquiteto ou engenheiro) no momento de produção.

A padronização e o controle de qualidade dos materiais de construção é fundamental para a melhoria da qualidade do produto final da construção civil. As empresas construtoras envolvidas com o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat – PBQP-H que visa à melhoria da qualidade com o aumento de produtividade e redução de custos exigirão a médio e a longo prazo a certificação dos fornecedores de materiais que deverão estar enquadrados nas normas técnicas vigentes da ABNT.

Considerando que a areia de britagem possui vantagens econômicas, ambientais e técnicas já comprovadas sobre a areia natural, que o consumo está em expansão e que as areias de britagem produzidas na região ainda não foram devidamente caracterizadas, este trabalho busca a produção de conhecimento que possibilite a utilização da areia de britagem em substituição total, da areia natural, na produção de concretos.

Tais conhecimentos poderão influenciar de forma decisiva o desempenho do concreto, trazendo benefícios à cadeia produtiva e aos profissionais da área da construção civil que poderão aplicar conhecimentos com base científica na busca pela qualidade e redução do custo de produção. Além disso, a utilização da areia de britagem, considerada durante muito tempo como um resíduo de pouca utilização, pode contribuir para a redução do alto impacto ambiental causado pela extração da areia natural.

1.3 Objetivo

Avaliar as propriedades do concreto de cimento Portland ao se substituir à areia natural pela areia de britagem produzida a partir do processo de cominuição de rochas basálticas encontradas na região de Caxias do Sul.

1.3.1 Objetivos específicos

- I. Quantificar a produção de areia de britagem na região;
- II. Comparar as características físicas das areias de britagem com as da areia natural;
- III. Comparar as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido produzido com a areia natural e com areia de britagem;
- IV. Elaborar diagramas de composição de materiais que permitam a determinação do proporcionamento de materiais à resistências desejadas.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 5 capítulos. O Capítulo 1 descreve a relevância da pesquisa e apresenta os objetivos. O Capítulo 2 revisa a literatura onde são enfocados aspectos relativos às propriedades do concreto e dos agregados. Também revisa os principais métodos de dosagem utilizados no Brasil. O Capítulo 3 explica os procedimentos e os materiais utilizados na pesquisa. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos, indicando dosagens a serem adotadas em canteiros de obra. Finalmente o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e sugere possibilidades de avanço nesta área.

1.5 Delimitação do Trabalho

As características do concreto são dependentes de muitas variáveis, algumas de difícil determinação e controle. Este trabalho tem como objetivo avaliar as características que estão associadas aos agregados miúdos, sem se preocupar com as razões pelas quais as propriedades se alteram quando se utilizam diferentes agregados. Assim, o trabalho se fixou em determinar as principais características, consistência e trabalhabilidade para o concreto no estado fresco e resistência à compressão axial e módulo de elasticidade para o concreto no estado endurecido.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Concreto de Cimento Portland

O concreto é um material estrutural com aplicações em várias áreas produtivas, é utilizado em obras de infra-estrutura urbana, estradas, pontes, viadutos e principalmente em edificações. O consumo de concreto ultrapassa qualquer outro material produzido pelo ser humano. Em 2004 o consumo mundial de concreto foi estimado em 6 bilhões de toneladas. (ISAIA, 2005)

O concreto endurecido é comparado a uma rocha. É um material compósito constituído por uma mistura de água e cimento Portland e agregados inertes em partículas de diferentes tamanhos (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A água e o cimento, quando misturados formam uma pasta que com o tempo endurece adquirindo resistência mecânica e aderindo às partículas dos agregados, preenchendo os vazios ligando-os, formando um material monolítico com características de pedra.

Durante muito tempo a ciência do concreto ficou estagnada. Entretanto, nos últimos 40 anos se desenvolveu de forma acentuada. Apesar de ser desenvolvido através de uma tecnologia simples, é fruto de uma ciência complexa que só recentemente vem sendo estudada. Atualmente o concreto é mais do que uma simples mistura de cimento, água e agregados. Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos aplicando-se técnicas sofisticadas que utilizam componentes minerais que conferem características específicas aos concretos. Também são utilizados aditivos químicos, que conferem propriedades que aumentam a trabalhabilidade, que retardam ou que aceleram o endurecimento do concreto (PAPAYIANNI *et al.*, 2007; AITCIN, 2000).

No mundo inteiro estão sendo desenvolvidas misturas de concretos que apresentam propriedades elevadas de resistência, trabalhabilidade e durabilidade a custos baixos. Concretos com adição de materiais pozzolâmicos (CHENGZI *et al.*, 1996; CHERIAF *et al.*, 1999), com adições de cinzas (ERDOGDU e TÜRKER, 1999), concretos reforçados com fibras artificiais (OCHI *et al.*, 2007) e naturais (BUI *et al.*, 2005) são alguns exemplos.

2.2 Características do concreto de cimento Portland

Em síntese, o concreto pode ser estudado como um material constituído de partículas de agregado, englobadas por uma matriz porosa de pasta de cimento com uma zona de transição entre as duas fases, constituídas de características próprias (NEVILLE, 1996). A resistência e a durabilidade do concreto dependem de três fatores: resistência do agregado, resistência da pasta (adesão) e resistência da ligação pasta/agregado. A conexão destes três fatores tem importância significativa nas propriedades do concreto, apesar das pesquisas, por um longo período de tempo, terem relegado a presença do agregado no processo de hidratação do aglomerante. As principais pesquisas recaíam sobre as facilidades de preenchimento da matriz e não em suas propriedades de ligação com os agregados. Os estudos de microestrutura do concreto considerando a porosidade da pasta de cimento e o mecanismo de ligação entre a pasta e os agregados são relativamente recentes. Nesses estudos, a interface torna-se essencial, por distinguir a aderência da natureza química relativa às ligações cristalinas entre a pasta e o agregado e a aderência mecânica devida à rugosidade superficial dos agregados (GUIMARÃES, 2005).

As principais informações de que se necessita para um estudo do concreto estão relacionados com a resistência, durabilidade e deformação.

A tecnologia do concreto consiste em determinar:

- I. As propriedades mecânicas do concreto endurecido;
- II. A obtenção a partir de materiais disponíveis na região de produção;
- III. As proporções das misturas e os processos executivos;
- IV. A influência da fase transitória (concreto fresco) nas características do concreto endurecido.

O estudo do concreto considera:

- I. Concreto endurecido;
- II. Concreto fresco;
- III. Materiais constituintes – cimento, agregados, aditivos;
- IV. Dosagens;

V. Produção;

VI. Qualidade;

VII. Custo.

Apesar da composição do concreto ser relativamente simples, ele apresenta uma estrutura complexa, a distribuição dos elementos constituintes é heterogênea, composta por componentes sólidos e vazios, de formas e tamanhos diversos que podem estar parcialmente ou completamente cheios de solução alcalina (PAULON, 2005).

2.3 Materiais Constituintes

Dos materiais que compõem o concreto, o cimento é o mais importante, o mais caro e o que ocupa a menor porcentagem do espaço ($\pm 10\%$), a água e os aditivos ocupam outros 10%, o restante ($\pm 80\%$) é ocupado pelos agregados.

2.3.1 Cimento

É um material finamente pulverizado, que sozinho não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes, como resultado da hidratação (reações químicas entre os minerais do cimento e água). Um cimento é chamado hidráulico quando os produtos de hidratação são estáveis em meio aquoso. O cimento hidráulico mais utilizado para fazer concreto é o cimento portland, que consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, os quais são os principais responsáveis pela característica adesiva do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A norma NBR 5732 (1991) define o cimento como sendo um aglomerante hidráulico obtido através da moagem de clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a operação, quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio. Durante a moagem permite-se a adição de misturas de materiais pozolanaicos, escórias granuladas de altoforno, e/ou materiais carbonáticos, relacionados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composições dos cimentos segundo a NBR 5732 (1991)

Componentes % em massa						
Sigla	Nome	Classe	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático
CPI	Comum	25, 32, 40	100	0		
CPI-S			99 – 95	1 – 5		
CPII-E	Composto	25, 32, 40	94 – 56	6 – 34	-	0 – 10
CPII-Z			94 – 76	-	6 – 14	0 – 10
CPII-F			94 – 90	-	-	6 – 10
CP III	Alto forno	25, 32, 40	65 – 25	35 – 70	-	0 – 5
CP IV	Pozolânico	25, 32	85 – 45	15 – 50	-	0 – 5
CPV	Alta resistência inicial	-	100 – 95	-	-	0 – 5
ARI						
CPB	Branco estrutural	25, 32, 40	100 – 75	-	-	0 – 5
CPB	Branco não estrutural	-	74 – 50	-	-	26 – 50

Fonte: Normas Brasileiras – NBRs 5732 (1991), 11578 (1991), 5735(1991), 5736 (1991), 5733 (1991) e 12989 (1993).

Os materiais utilizados na fabricação do cimento Portland são: calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, que ao serem submetidos à alta temperatura reagem dando origem ao clínquer, que é composto por:

- I. Silicato tricálcio, $(3CaOSiO_2)$;
- II. Silicato dicálcio, $(2CaOSiO_2)$;
- III. Aluminato tricálcio, $(3CaOAl_2O_3)$;
- IV. Ferro aluminato tetracálcico, $(4CaOAl_2O_3Fe_2O_3)$.

Todos esses compostos reagem na presença da água, por hidrólise, dando origem a compostos hidratados (AÏTCIN, 2000).

2.3.2 Agregado

Agregado é um material granular, inerte, sem forma ou volume definido, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia. São agregados: as rochas britadas, fragmentos rolados existentes no leito de rios e materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas (PETRUCCI, 1998), mesma definição estabelecida pela norma NBR 9935 (2005).

O termo agregados para a construção civil é empregado para identificar um segmento do setor mineral que produz matéria-prima mineral bruta ou beneficiada, de emprego imediato na indústria da construção civil e são basicamente a areia e a rocha britada (DNPM, 2009).

Os agregados para a construção civil são os insumos minerais mais consumidos no mundo. Em 16 países europeus o consumo é de 6 a 10 t/habitante/ano. Nos Estados Unidos a taxa é de 8 t/habitante/ano. No Brasil, em São Paulo e região metropolitana as taxas são em torno de 4 t/habitante/ano. As reservas de areia e brita no Brasil são estimadas em 2,7 bilhões de toneladas e 12 bilhões de toneladas respectivamente (SUMÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2008).

Durante muito tempo acreditou-se que o papel do agregado no concreto era apenas de enchimento, que se tratava de um material granular inerte destinado a baratear o custo final da produção do concreto (PETRUCI, 1998). Entretanto, com o aumento no consumo e com a aplicação em larga escala, o agregado passou a ser reconhecido com a importância técnica, econômica e social que lhe é peculiar. Os problemas técnicos decorrentes do mau uso do agregado, principalmente a partir da metade do século 20, indicaram a necessidade de ampliação dos estudos das suas características e da sua influência na resistência mecânica, durabilidade e estabilidade dimensional. Sabe-se hoje que muitas propriedades do concreto dependem das características dos agregados (NEVILLE, 1997).

Na produção de concretos, as propriedades dos agregados que interessam são classificadas em geológicas, físicas e mecânicas (FRAZÃO, 2002). As propriedades geológicas, (mineralogia e petrografia) estão estreitamente ligadas à natureza da rocha. A natureza das rochas utilizadas para a produção de britas na região de Caxias do Sul foram avaliadas em um trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia Construtiva do curso de arquitetura e urbanismo da Universidade de Caxias do Sul (GARLET e REGINATO, 2008). As análises permitiram identificar que as rochas exploradas na região correspondem a Riodacitos e Dacitos. Com relação às litologias pode-se observar que as diferenças entre as rochas estão associadas a texturas que variam desde faneríticas muito finas a faneríticas médias.

As propriedades físicas e mecânicas são influenciadas pelas propriedades geológicas. As físicas podem ser resumidas em: porosidade, composição granulométrica, absorção de água, estabilidade, forma e textura superficial dos grãos, resistência mecânica, módulo de deformação e substâncias deletérias presentes. A partir do conhecimento dessas propriedades

passou-se a cuidar melhor da seleção dos agregados para uso em concretos em ambientes específicos de inserção (SBRIGHI, 2005).

Todas essas propriedades devem ser consideradas quando se estuda a utilização de novos tipos de agregados na composição dos concretos, como é o caso da areia de britagem e outros tipos como os agregados reciclados, que apresentam características peculiares ao chegarem às centrais de produção (RASHWAN e ABOURIZK, 1997).

Quanto à origem, os agregados são classificados em quatro tipos: naturais, encontrados na natureza já preparados para uso sem qualquer beneficiamento que não seja a lavagem; britados, submetidos ao processo de cominuição, geralmente por britagem; artificiais, derivados de processos industriais e reciclados; resíduos industriais granulares, que tenham propriedades adequadas (SBRIGHI, 2005; NBR 9935, 2005; NBR 7211, 2005).

Quanto à dimensão dos grãos, a norma NBR 7211 (2005) classifica os agregados em graúdo, miúdo, total e filler.

Agregado graúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75mm, em ensaios realizados de acordo com a norma ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela norma ABNT NBR ISO 3310-1 (1996).

Agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 0,15 mm, em ensaio realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela norma ABNT NBR ISO 3310-1 (1996).

Agregado total é o agregado resultante da britagem de rochas cujo beneficiamento resulta em uma distribuição granulométrica constituída por agregados graúdos e miúdos ou por uma mistura intencional de agregados britados e areia natural ou britada, possibilitando o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do concreto a ser preparado com esse material.

Filler é um material fino, constituído por partículas de dimensões inferiores a 0,075mm. São partículas que passam² na peneira número 200 da série normal (SBRIGHI, 2005).

Quanto à massa unitária, a norma NBR 9935 (2007) classifica os agregados em agregados densos ou pesados e leves.

Agregado denso é aquele que possui massa unitária elevada, entre 1500 e 1700 kg/m³. São os agregados que produzem concretos normais com aproximadamente 2400 kg/m³. Como exemplo, pode-se citar a barita (minério de bário), a hematita (minério de ferro) e a limonita (crostas hidratadas de minerais ferruginosos) (PETRUCCI, 1998).

Agregado leve é aquele que possui baixa massa unitária, abaixo de 1120 kg/m³. São usados para produzir concretos leves. São os produzidos a partir de expansão térmica de argila, escória siderúrgica, vermiculita, ardósia, resíduo de esgoto sintetizado. (PETRUCCI, 1998)

2.3.3 Água

Segundo MEHTA e colaboradores (MEHTA e MONTEIRO, 1994), nenhum tipo de água, em princípio, deve ser rejeitada para o amassamento do concreto. Do ponto de vista da resistência, água alcalina, ácida, salgada, salobra, colorida ou com mau cheiro, podem ser utilizadas. Isso é importante, pois águas residuais de processos industriais podem ser utilizadas. Entretanto, Nevile (1997) alerta que impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência do concreto, causar manchas na superfície e até mesmo provocar corrosão nas armaduras. Via de regra a água deveria apresentar um Ph entre 6,0 e 9,0.

2.3.4 Aditivos

São substâncias químicas adicionadas na composição do concreto para fins específicos, como melhoria da trabalhabilidade, aceleração ou retardo do processo de cura, controle de resistência, entre outros. São utilizados desde a época dos romanos (existem documentos que comprovam a utilização de clara de ovo como impermeabilizante, sangue

² Entende-se por partículas que passam em uma determinada peneira, aquelas que contém até 5% de grãos retidos na peneira especificada.

como incorporador de ar, açúcar e sal como retardadores e aceleradores de pega, etc.). Os avanços tecnológicos na área de aditivos iniciaram na década de 1950, com o surgimento dos concretos de alta resistência. No Brasil, os aditivos começaram a serem utilizados de forma intensiva a partir da década de 1990.

A norma NBR 11768 (1982) define os aditivos como “produtos que, adicionados em pequena quantidade a concretos e argamassas de cimento portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”. A norma NBR 11768 (1982) classifica os aditivos para concreto em:

I. Aditivos Plastificantes (tipo P)

Produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento;

II. Aditivo Retardador (tipo R)

Produto que aumenta os tempos de início e final de pega dos concretos;

III. Aditivo Acelerador (tipo A)

Produto que diminui os tempos de início e fim de pega do concreto, bem como acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais;

IV. Aditivo Plastificante Retardador (tipo PR)

Produto que combina os efeitos dos aditivos plastificantes e retardador;

V. Aditivo Plastificante Acelerador (tipo PA)

Produto que combina os efeitos dos aditivos plastificantes e acelerador;

VI. Aditivos Incorporadores de Ar (tipo IAR)

Produto que incorpora pequenas bolhas de ar no concreto;

VII. Aditivo Superplastificante (tipo SP)

Produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento;

VIII. Aditivo Superplastificante Retardador (tipo SPR)

Produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificantes e retardador;

IX. Aditivo Superplastificante Acelerador (tipo SPA)

Produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificantes e acelerador.

Os aditivos mais utilizados são os plastificantes, cujo objetivo principal é aumentar o índice de consistência do concreto mantendo-se a quantidade de água de amassamento. Para a hidratação do cimento portland se completar são necessários aproximadamente 30% em massa de água. Toda água que excede este teor resultará em correspondente porosidade na matriz do concreto. Portanto, a importância do uso de aditivos redutores de água torna-se evidente, uma vez que permite o alcance da trabalhabilidade desejada, permitindo melhoria na porosidade da matriz do concreto pela redução da quantidade de água (JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994).

2.4 Forma de obtenção dos agregados

Os agregados são obtidos de três formas: por extração direta de jazidas de dois tipos: os areiros ou depósitos de areia, donde são extraídos agregados miúdos (areias) e as cascalheiras, donde são extraídos agregados graúdos (cascalhos ou pedregulhos) e de pedreiras desenvolvidas a partir de afloramentos de rochas, de onde podem ser obtidos agregados graúdos e miúdos a partir do processo de cominuição de rochas (SBRIGHI, 2005).

Os agregados naturais são obtidos a partir da exploração de jazidas localizadas nos leitos de rios, extraídas por dragagem a partir de dragas flutuantes e também em solos secos, neste caso são extraídos através de desmonte hidráulico com mangueiras de água sob pressão. Os agregados britados são provenientes de pedreiras a partir de afloramentos de rochas através de um processo de cominuição. A produção é realizada em pedreiras em um processo que compreende a limpeza, o desmonte, a britagem e o beneficiamento (SBRIGHI, 2005).

2.5 Caracterização dos agregados miúdos

As propriedades do concreto dependem da densidade e da resistência do agregado que por sua vez, são determinadas mais por características físicas do que por características químicas da estrutura do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994). As principais características são: composição granulométrica, índice de material pulverulento, massa unitária, massa específica, inchamento, absorção de água, forma e textura superficial.

2.5.1 Composição granulométrica

Mostra a distribuição das partículas que constituem os agregados. A norma NBR 7211 (2004) determina que a granulometria seja expressa em termos de porcentagens individuais ou acumuladas retidas em peneiras da série normal ou intermediária definidas pela norma ABNT NBR ISO 3310-1 (1996). Na avaliação da granulometria são utilizados como referência a dimensão máxima característica e o módulo de finura. A norma NBR citada define dimensão máxima característica como sendo uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado que corresponde à abertura nominal (em mm) da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura é obtido através da soma das porcentagens retidas acumuladas (em massa) de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

A norma NBR 7211 (2004) apresenta, para uso em concretos convencionais, curvas granulométricas em intervalos que correspondem a zonas de utilização e a zonas ótimas, estabelecendo limites inferiores e superiores para ambas as situações. A limitação é em virtude da influência da granulometria na trabalhabilidade e no custo. A Tabela 2.2 apresenta os limites recomendados pela norma e a Figura 2.1 apresenta o gráfico com as curvas correspondentes. É importante notar que o módulo de finura varia: de 2,2 a 2,9 para a zona ótima; de 1,55 a 2,20 para o limite inferior da zona utilizável e de 2,9 a 3,5 para o limite superior da zona utilizável.

Tabela 2.2: Limites da composição granulométrica do agregado miúdo, especificados na norma NBR 7211:2004.

PENEIRA # (mm)	PORCENTAGEM EM MASSA, RETIDA ACUMULADA			
	LIMITE INFERIOR		LIMITE SUPERIOR	
	ZONA UTILIZÁVEL	ZONA ÓTIMA	ZONA ÓTIMA	ZONA UTILIZÁVEL
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: Norma NBR 7211 (ABNT 2004)

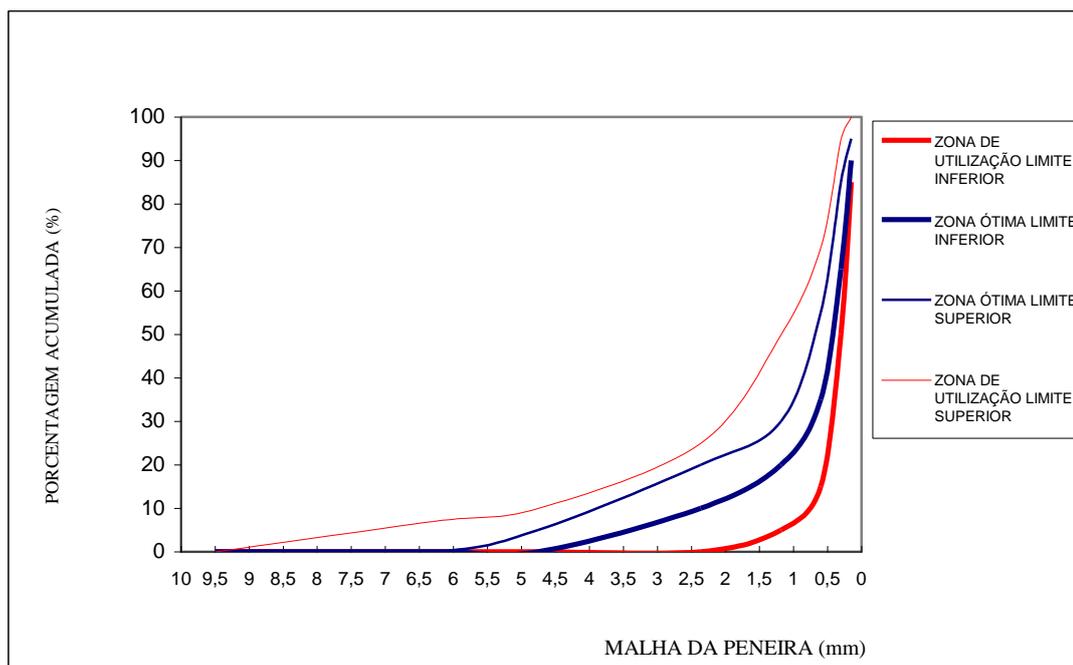


Figura 2.1: Gráfico das curvas granulométricas – zona ótima e zona utilizável.
Fonte: Norma NBR 7211 (ABNT 2004).

Uma mistura de concreto com granulometria de areia equilibrada como a sugerida pela norma, produzirá um concreto com boa trabalhabilidade e com uma estrutura de massa mais fechada, diminuindo o volume de vazios, impedindo assim, a penetração de agentes agressivos, na forma de líquidos, gases e vapores (SBRIGHI, 2005).

2.5.2 Índice de material pulverulento

A norma ABNT NBR 9935:2005 define material pulverulento como sendo partículas com dimensão inferior a 0,075mm presentes nos agregados, incluindo os materiais solúveis em água. Nas areias naturais é constituído de partículas de argila e silte. Nas areias britadas, tem origem no processo de cominuição de rocha, constituindo-se no mesmo material do agregado.

As argilas, reduzida a um pó muito fino, podem contribuir com o preenchimento dos vazios da areia, possibilitando um envolvimento melhor dos grãos pelo cimento e ligando-os mais fortemente. Contudo, se a argila formar uma película que envolva cada grão de maneira a que não se separem durante a mistura, será altamente prejudicial ao concreto (PETRUCCI, 1998). A norma NBR 7211:2005 limita a presença de material fino com dimensões menores que 0,075mm em 3% em concretos submetidos a desgaste superficial e a 5% para concretos protegidos do desgaste superficial. O mesmo pode acontecer com os finos gerados totalmente

a partir do processo de britagem de rocha. Neste caso, a norma aumenta os limites de 3% para 10% e de 5% para 12%, desde que seja comprovado, por apreciação petrográfica, que os grãos constituintes não interferem nas propriedades do concreto. Estudos realizados na Universidade do Texas (EUA), demonstram que os finos podem ser benéficos, pois têm a capacidade de preencherem os vazios existentes entre as partículas grossas da areia, o que confere uma resistência mecânica maior ao concreto (NAM-SHIK, 2000).

2.5.3 Massa específica, massa específica aparente e massa específica relativa.

A Norma Mercosul NM 52 (2002) define massa específica como sendo a massa do agregado seco por unidade de volume, excluindo os poros permeáveis. A massa específica aparente é definida como sendo a massa do agregado seco por unidade de volume, incluindo os poros permeáveis. A massa específica relativa é definida como sendo a relação entre a massa da unidade de volume, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, a uma determinada temperatura, e a massa de um volume igual de água destilada, livre de ar a uma temperatura estabelecida. O conceito de massa específica relativa pode ser aplicado tanto à massa específica, quanto à massa específica aparente.

Para efeitos de dosagem do concreto é importante conhecer o volume ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas. Portanto, o que interessa é a massa específica aparente. Para muitas rochas utilizadas como agregados a massa específica aparente varia entre 2600 e 2700 kg/m³ (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.5.4 Massa unitária

É definida como sendo a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume. O conceito de massa unitária surge porque não é possível de empacotar as partículas dos agregados juntas, de tal forma que não haja espaços vazios entre elas. A massa unitária se refere ao volume ocupado pelas partículas do agregado e pelos espaços vazios entre elas. A massa unitária aproximada dos agregados comumente utilizados na produção do concreto varia entre 1300 a 1750 kg/m³. É uma informação indispensável para a conversão dos traços do concreto em massa para volume ou vice versa (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.5.5 Inchamento

Ao serem usadas em obras, as areias se apresentam com teores de umidade diversos. As diferenças de umidade implicam, consideravelmente, em diferenças de peso unitário. A água livre aderente aos grãos provoca um afastamento entre eles, por conseqüência, ocorre um

inchamento do conjunto (PETRUCCI, 1998). O inchamento depende da composição granulométrica e do grau de umidade da areia. Quanto maior a superfície específica maior será o inchamento. Em condições normais o inchamento máximo ocorre para teores de umidade entre 4 e 6%, após o inchamento decresce até, praticamente, se anular com o saturamento da areia.

Nas condições ambientais, em Porto Alegre, verificou-se que a umidade média da areia é de 4,2%, com um desvio padrão de 1,0% (PETRUCCI, 1998).

Na Figura 2.2 pode-se observar a representação gráfica do fenômeno do inchamento para uma areia de granulometria média.

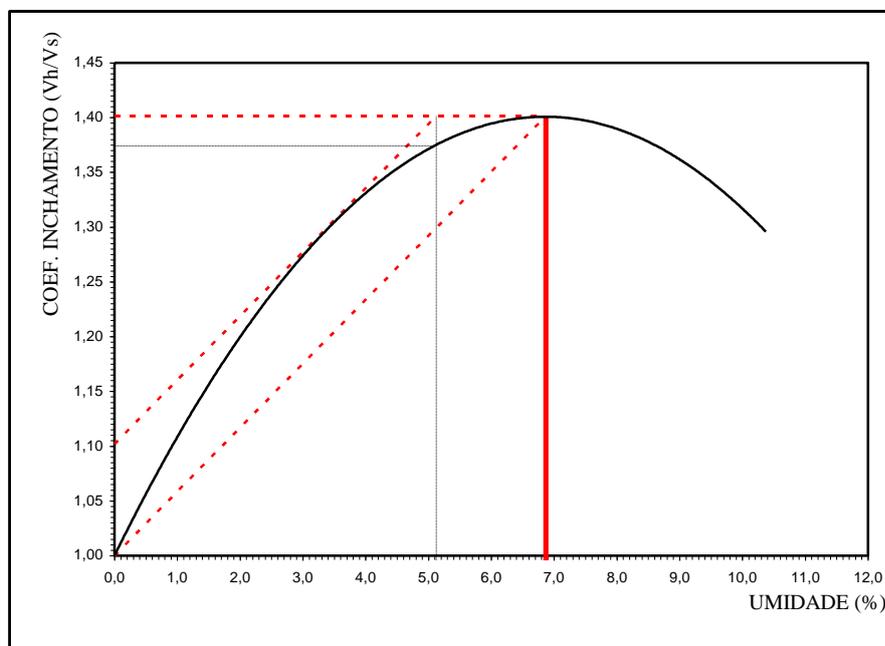


Figura 2.2: Curva de inchamento de uma areia natural extraída do Rio Caí - RS

No gráfico representado na Figura 2.2, no eixo das abscissas são marcados os teores de umidade e no eixo das ordenadas as relações entre os volumes, úmidos e secos para um mesmo peso da areia.

Em observações de inúmeras curvas traçadas para areias originárias dos rios do Rio Grande do Sul, concluiu-se que o valor da umidade acima da qual o inchamento pode ser considerado constante, excepcionalmente ultrapassa a 3%, o que possivelmente pode ser estendido a todo o país (PETRUCCI, 1998).

Como resultados das pesquisas de Petrucci, as areias foram caracterizadas sob o ponto de vista do inchamento por dois índices: a umidade crítica e o coeficiente médio de inchamento. Os conceitos definidos por Petrucci estão descritos na norma ABNT NBR 9935 (2005) como:

Inchamento do agregado miúdo: Fenômeno da variação do volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos grãos e que incide sobre a sua massa unitária.

Coeficiente de inchamento: Quociente entre os volumes úmido (V_h) e seco (V_o) de uma massa de agregado, calculado segundo a norma ABNT NBR 6467 (2006).

Umidade crítica: Teor de umidade acima do qual o coeficiente de inchamento pode ser considerado constante e igual ao coeficiente de inchamento médio.

Coeficiente de inchamento médio: Valor médio entre o coeficiente de inchamento máximo e o coeficiente de inchamento no ponto de umidade crítica.

2.5.6 Absorção de água

Por serem materiais naturais porosos, os agregados absorvem água em certas proporções. O conhecimento dos teores de umidade dos agregados miúdos é de fundamental importância, uma vez que, na produção de concreto, os agregados podem ser utilizados em diversas condições de umidade (PETRUCCI, 1998). A norma NM 30 (2000) define absorção como sendo o processo pelo qual um líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. É o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de um líquido (água) em seus poros permeáveis, em relação a sua massa em estado seco.

De acordo com o teor de umidade, os agregados podem estar nos seguintes estados (PETRUCCI, 1998):

- Seco em estufa: condição em que toda a água evaporável é eliminada em estufa a 100°C ;
- Seco ao ar: quando o agregado não apresenta umidade superficial, porém tendo umidade interna sem estar saturado;
- Saturado superfície seca (SSS): condição em que todos os poros estão preenchidos, sem a existência de película de água na superfície;
- Saturado: quando estiver saturado com umidade livre na superfície.

A Figura 2.3 ilustra os diferentes estados de umidade. Os círculos brancos representam a areia, os azuis a umidade.

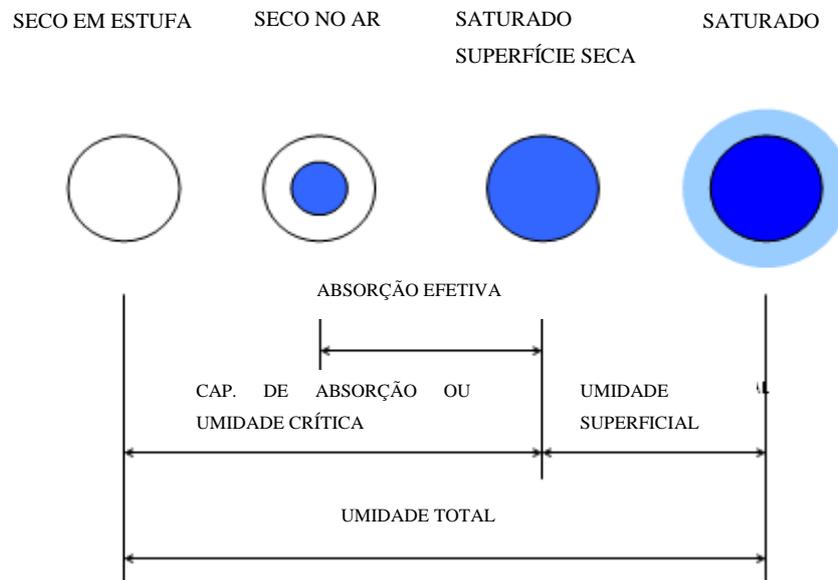


Figura 2.3: Estados de umidade que um grão de agregado pode apresentar
Fonte: PETRUCCI, 1998.

A capacidade de absorção é definida como a quantidade total de água necessária para levar o agregado da condição seca para a condição SSS. A absorção efetiva é definida como a quantidade de água necessária para levar o agregado da condição seca ao ar para a condição SSS. A umidade superficial é definida como a quantidade de água presente no agregado além daquela requerida para alcançar a condição SSS (PETRUCCI, 1998).

Os dados de absorção, absorção efetiva e umidade superficial são utilizados para a correção do traço do concreto. Em geral as areias originárias de rochas de boa qualidade apresentam valores de absorção baixos em torno de 1% (SBRIGHI, 2005).

2.5.7 Forma e textura superficial

A forma e a textura superficial das partículas dos agregados têm influência direta nas propriedades do concreto, principalmente na trabalhabilidade e por consequência na resistência à compressão. Ensaio experimental Bonavetti e Irassar (1994) demonstram que a demanda de água cresce com a proporção de finos, devido ao aumento da área superficial dos

grãos. A forma irregular das partículas diminui a trabalhabilidade, exigindo um aumento de cimento e água.

Geometricamente os agregados podem apresentar formas arredondadas, angulosas, alongadas ou achatadas. As areias naturais obtidas em leitos de rios apresentam formas arredondadas e lisas. As areias britadas de rochas intrusivas apresentam formas angulosas com vértices e arestas bem definidos e superfície áspera. Partículas com espessura relativamente pequena com relação às outras duas dimensões são chamadas de lamelares ou achatadas. As partículas lamelares devem ser evitadas ou pelo menos limitadas a 15% em massa do total do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os agregados de superfície arredondada e lisa têm sido usados nos traços de concreto, proporcionando uma diminuição no consumo de água, melhorando a trabalhabilidade. Contudo, a textura lisa induz a uma aderência menor entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, podendo prejudicar o nível de resistência à tração, principalmente nas primeiras idades. Os agregados britados, conhecidos pela angulosidade de sua forma e aspereza da superfície, induzem a um consumo de água e cimento maiores; contudo, há evidências de que a resistência à flexão, principalmente nas primeiras idades, é favorecida pela formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado (GUIMARÃES, 2005).

A forma e a textura superficial dos agregados graúdos são avaliados de forma visual, conforme especificado na norma NBR 7389 (1992).

Para agregados miúdos, não existem no Brasil normas específicas que caracterizem a forma e a textura superficial. Na Inglaterra, a British Standards Institution (BSI 812 Seção 105.1/89) estabelece alguns índices para determinar a lamelaridade, o alongamento e a forma dos agregados.

- Índice de Lamelaridade: Uma partícula é considerada lamelar quando sua espessura é menor que 0,6mm de sua dimensão nominal) média das aberturas das peneiras limites da fração da partícula). O índice corresponde à relação da massa das partículas lamelares pela massa da amostra.

- Índice de Alongamento: Considera que uma partícula é alongada quando a sua maior dimensão é igual ou superior a 1,8 da sua dimensão nominal. Corresponde ao quociente da massa das partículas alongadas pela massa da amostra.

- Índice de Forma: Está relacionado com a cubicidade da partícula, onde a razão entre o comprimento e a largura deve ser menor que 3 (para que a partícula seja considerada cúbica). O índice corresponde ao quociente da massa das partículas não cúbicas pela massa da amostra.

A norma NBR 7211 (2005) determina que os agregados graúdos tenham em média, uma relação inferior a três, medidas entre o comprimento e a espessura do grão, conforme especificação da norma NBR 7809 (1983). O índice de forma, segundo a norma será a média da relação obtida nas medições. Este procedimento, até pouco tempo, era inviável para os agregados miúdos, pois, não era possível de se realizar as medições. Entretanto, com o auxílio da microscopia eletrônica, é possível de se visualizar as dimensões e por consequência, determinar os índice de forma e a esfericidade dos agregados miúdos. Almeida (2004) realizou ensaios para determinação de forma de agregados miúdos a partir de imagens bidimensionais obtidas em microscópio estereoscópico (lupa), seguido de análise de imagens em computador. Através dos dados obtidos calculou os parâmetros indicativos de forma através das equações 2.1 e 2.2:

$$\text{Esfericidade} = (4 \cdot \pi \cdot \text{área}) / \text{Perímetro}^2 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$\text{Índice de Forma} = \text{largura} / \text{comprimento} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

A esfericidade indica o quanto à partícula se aproxima da forma esférica, já o índice de forma indica a aproximação das medidas do comprimento e da largura.

2.6 Areia de Britagem

A produção de areia natural no Brasil em 2007 ultrapassou 200 milhões de toneladas (SUMÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2008), cujo material foi retirado quase que exclusivamente do leito de rios e várzeas. Do total da areia consumida 30% são utilizadas na produção de concreto. Atualmente o setor mineral discute o problema da disponibilidade desses recursos, principalmente aqueles localizados dentro ou no entorno dos aglomerados urbanos. A possibilidade de exploração destes bens minerais vem declinando em virtude do inadequado planejamento urbano e territorial, de problemas de sustentabilidade ambiental, de zoneamentos restritivos e de usos competitivos do solo, tornando preocupantes as perspectivas de garantia de suprimento futuro. O processo de retirada da areia natural agride a calha natural dos rios, aumenta a vazão de água e acelera a erosão, causando sérios problemas

ambientais. As restrições ambientais associadas à escassez do produto, próximo aos centros urbanos, que esgotaram suas jazidas, vêm dificultando a aplicação da areia natural para a produção de concreto e por consequência elevando os custos.

Outro problema que dificulta a aplicação da areia natural em alguns centros urbanos, elevando o seu custo, é à distância das jazidas de extração. Na região de Caxias do Sul, por exemplo, que está a uma distância de aproximadamente 100 km das jazidas, o custo da areia chega a ser 100% maior.

Em virtude das dificuldades crescentes que a aplicação da areia natural vem sofrendo, pesquisadores de várias universidades, de associações e de empresas produtoras de concretos e agregados, vêm procurando alternativas para a substituição dessa areia. Um produto que vem apresentando bons resultados, e por esse motivo vem merecendo a atenção dos pesquisadores, é um produto produzido a partir do resíduo decorrente do processo de cominuição de rochas para obtenção de brita, chamado de *Areia de Britagem*.

As rochas, a partir das quais se pode obter a areia de britagem existem, praticamente, em toda a crosta terrestre, estando assim disponíveis próximos aos grandes centros urbanos.

As rochas utilizadas para produção de brita são, fundamentalmente, granitos e gnaisses, seguidos por calcários, dolomitos e basaltos. No Brasil, os grandes centros consumidores, representados pelas regiões metropolitanas, estão, geralmente, localizados em áreas geologicamente favoráveis a reservas de boa qualidade.

A utilização das areias obtidas a partir da cominuição de rochas em substituição à areia natural, não é recente. Nos Estados Unidos e Europa já vem sendo utilizada desde os anos 70. No Brasil os primeiros registros de aplicação datam de 1982, na construção de barragens (Itaipu, Salto Santiago, Salto Osório, entre outras) (BUEST, 2006).

Entretanto, de uma forma geral, o uso da areia de britagem sempre constituiu um problema para os profissionais da construção civil, principalmente para os envolvidos com a tecnologia do concreto e argamassas. Até pouco tempo a areia de britagem era considerada um material secundário, pouco desejável, devido a sua aspereza e forma lamelar, além da presença de grande quantidade de materiais finos, características que implicavam em um aumento considerável de água para manter a trabalhabilidade e por consequência um aumento de cimento para não perder a resistência, elevando assim o custo.

Ao longo do tempo percebeu-se que esses inconvenientes podiam ser combatidos com a introdução de aditivos plastificantes e aperfeiçoamento no processo de britagem.

Em Niterói, Estado do Rio de Janeiro, na década de 80, a Central de Concreto Cipel através de um programa intenso de estudos de traços de concreto em laboratório e de um rigoroso controle de qualidade na produção de areia de britagem, desenvolveu um produto utilizando 100% dessa areia (ALMEIDA, 2005). No laboratório da empresa foram sistematicamente estudadas as composições de concretos produzidos pela central e controlado o seu desempenho. Foram também testadas a incorporação de misturas com aditivos químicos plastificantes. Alguns artigos foram escritos a partir das experiências da Cipel (ALMEIDA e SAMPAIO, 2002), descrevendo os mecanismos adotados para a dosagem e o controle tecnológico do material. No entanto Almeida (1984) em sua dissertação de mestrado registra que a areia de britagem era utilizada sem qualquer beneficiamento, apesar de possuir características aceitáveis pelas normas vigentes na época (ALMEIDA, 1984).

Com o objetivo de desenvolver um processo economicamente viável de obtenção de areia de britagem com características adequadas para uso na produção de concreto um grupo de pesquisadores do Centro de Tecnologia Mineral do Rio de Janeiro montou uma usina piloto de britagem com capacidade de 4t/h. A instalação foi feita em pedreiras produtoras de brita de diferentes tipos de rocha existentes na região metropolitana do Rio de Janeiro. O sistema consistia em uma unidade de britagem separada de um aero-separador. O britador utilizado foi do tipo VSI (*Vetical Shaft Impactors*) que processa a cominuição da rocha através do impacto entre as partículas da própria rocha. O resultado obtido foi o de partículas britadas com formato que se aproxima da forma cúbica. Os produtos finais foram classificados em um aero-separador do tipo Sturtevant, com capacidade de 200 kg/h. A classificação gerou dois produtos. Um mais fino, menor que 0,074 mm e um mais grosso, entre 0,074 mm e 3 mm que pode ser utilizado como areia, principal produto desejado (ALMEIDA e SAMPAIO, 2002).

A areia obtida foi encaminhada ao Departamento de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ para que fossem feitos testes de trabalhabilidade com argamassas e concreto. Foi feito, também, análises para a determinação do formato das partículas, para o qual, foram utilizados dois parâmetros: fator de forma e razão de aspecto. (ALMEIDA e SAMPAIO, 2002)

Na busca de uma tecnologia para a produção de areia de britagem de qualidade, no ano de 2000, a pedreira Transportes e Comércio Ltda (TCL), localizada no município de

Contagem na região metropolitana de Belo Horizonte, começou a lavar o pó de pedra produzido na pedreira transformando-o em areia de britagem (OHASHI, 2005).

O resultado foi uma areia de boa qualidade, com granulometria adequada e isenta de contaminantes. Com o sucesso da operação a TCL resolveu investir em uma planta específica para a produção de areia de britagem para atender a uma demanda crescente, tanto em volume, quanto em qualidade, principalmente na cubicidade das partículas, que ainda não era satisfatória, pelo simples processo de lavagem.

No segundo semestre de 2002 a TCL implantou a primeira linha de areia de britagem com capacidade de produção de 120t/h, com equipamentos fornecidos pela Metso Minerals, que além de fornecer equipamentos é detentora de um conceito de produção de areia de britagem sem geração de resíduos e total aproveitamento da rocha (OHASHI, 2005).

Em função da ótima qualidade da areia produzida, a TCL resolveu ampliar a capacidade e diversificar o produto, implantando mais uma linha de produção, que opera desde o início de 2003. Atualmente 25% da areia de britagem para utilização em concreto é vendida sem lavagem, com alto teor de micro-finos e vem crescendo. Na prática as vantagens da areia de britagem com alto teor de micro-finos vem se confirmando. Importantes propriedades do concreto apresentaram melhorias: resistência à compressão, trabalhabilidade, contração, permeabilidade e resistência à abrasão. Em alguns casos apresentou até uma diminuição do consumo de cimento.

A TCL aposta na produção da areia de britagem, não só pela qualidade, mas também pelas restrições ambientais ao processo de extração da areia natural. A TCL é atualmente a maior produtora de areia de britagem do Brasil.

No Departamento de Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, foram realizados estudos de dosagens de concreto com o emprego de areia de britagem de rocha basáltica em substituição parcial da areia natural (BASTOS, 2005). Foram realizados dois traços de concreto, onde foram feitas substituições parciais da areia natural por areia de britagem basáltica nas proporções de 15%, 30%, 50% e 70%, em massa. Nos dois traços foi verificado que a resistência à compressão aumentou com o aumento do índice de substituição, o que é de esperado, uma vez que, a relação água/cimento foi menor. Foi verificado também que quanto maior o teor de substituição menor foi a profundidade da carbonatação. Nos dois traços ficou evidente que o uso de areia de britagem apresentou um

melhor desempenho em todos os aspectos, devido a redução da demanda de água e o aumento do consumo de cimento. A mistura com 70% de substituição foi a que apresentou melhor desempenho.

Na Universidade Federal de Minas Gerais, estudou-se a influência do beneficiamento, por peneiramento, da areia natural de rio e de areias britadas, nas características mecânicas do concreto de cimento Portland (REIS, 2005). Foram feitos onze misturas de concreto com características diferentes. Como agregado miúdo foram utilizadas: areia natural e areia de britagem de gnaiss e calcário. A areia de britagem foi utilizada em relação a areia natural nas proporções de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os ensaios foram realizados em idades de: 3 dias, 7 dias, e 28 dias. Foram avaliadas as características dos agregados e dos concretos nos estados fresco (trabalhabilidade) e endurecido: compressão axial, tração (por compressão diametral e na flexão), módulo de elasticidade (elástico e dinâmico), caracterização micro estrutural e análise mineralógica.

O beneficiamento das areias por peneiramento melhorou de forma acentuada as propriedades dos concretos, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. O concreto em estado fresco apresentou boa trabalhabilidade, houve um aumento de 14,3% na resistência à tração por compressão diametral e 19,6% na resistência à tração na flexão. Nas análises com o Microscópio Eletrônico de Varredura, foi verificado um contato íntimo entre a calcita e a pasta de cimento hidratado. Através da técnica de difração de raios X foi possível verificar que alguns dos minerais presentes na areia natural e na gnaiss apresentaram características expansivas.

O estudo concluiu que a utilização de areia de rochas britadas e o seu beneficiamento por peneiramento, contribuiu de forma significativa para o aumento da resistência à tração de concretos de cimento Portland.

2.7 Rochas Utilizadas Para a Produção de Agregados

Na crosta terrestre existem diversos tipos de rochas, com composição mineralógica distintas que sugerem alterações nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados produzidos. As rochas são classificadas de acordo com a origem em três grupos principais (MEHTA e MONTEIRO, 1994):

I. Rochas ígneas

São formadas pelo resfriamento do magma (material rochoso em fusão) acima, abaixo, ou próximo da superfície terrestre.

II. Rochas sedimentares

São rochas estratificadas, usualmente depositadas debaixo d'água, mas algumas vezes são acumuladas através da ação do vento e do gelo. Dependendo do método de deposição e consolidação, é conveniente subdividi-las em três grupos: depositadas mecanicamente, depositadas mecanicamente e consolidadas e depositadas e consolidadas por via química;

III. Rochas metamórficas

São rochas ígneas ou sedimentares que tiveram alteradas a sua textura original, estrutura cristalina ou composição mineralógica, face a condições químicas e físicas abaixo da superfície terrestre.

2.7.1 Rochas Basálticas Encontradas no Rio Grande do Sul

Recena (2002) classifica as rochas basálticas encontradas no Rio Grande do Sul para a produção de agregados em três tipos: Basalto tipo A, uma rocha de cor clara, com fratura muito lamelar. É encontrada na região serrana do Estado, nas cidades de Caxias do Sul, Farroupilha, Flores da Cunha, Bento Gonçalves, Garibaldi, Gramado, Canela entre outras. Basalto tipo B uma rocha de cor escura, tendendo ao cinza chumbo, com fratura menos lamelar que a do tipo A. É encontrada na região metropolitana de Porto Alegre. Basalto tipo C, uma rocha que apresenta uma coloração que tende ao preto, com fratura que se aproxima da forma cúbica. É encontrada predominantemente no norte do estado, na divisa com o estado de Santa Catarina (RECENA 2002).

2.7.2 Rochas Basálticas Encontradas na Região de Caxias do Sul

As rochas analisadas nesse estudo estão inseridas na província geológica do Planalto e na Formação Geológica Serra Geral (Figura 2.4). Essa formação geológica é caracterizada por uma seqüência vulcânica básica e ácida, onde as principais litologias são basaltos toleíticos, andesitos, riolitos e dacitos (RADAM/BRASIL, 1986; ROISENBERG, 1990).

Na região de Caxias do Sul predomina a seqüência de rochas vulcânicas ácidas sendo os riolitos as principais litologias exploradas visando o seu emprego na construção civil.

Essas rochas são denominadas popularmente por “basaltos”, mas possuem mineralogia e composição química diferenciada dos verdadeiros basaltos (REGINATO, 1998).

Como a denominação basalto é um termo utilizado no ramo comercial e industrial, essa denominação é utilizada somente para a descrição geral do estudo, sendo que para a caracterização geológica deve-se utilizar o termo técnico que corresponde ao verdadeiro tipo de rocha existente na região (REGINATO, 1998).

A caracterização geológica permitiu identificar que a rocha explorada nas áreas de extração, macroscopicamente, corresponde a riolacitos cujas principais diferenças geológicas estão associadas ao tipo de estruturação apresentada pela seqüência de rochas, grau de fraturamento e tipo de preenchimento existente nos planos de fraturas. Somente numa área foi encontrada a ocorrência de dacitos (GARLET e REGINATO, 2008).

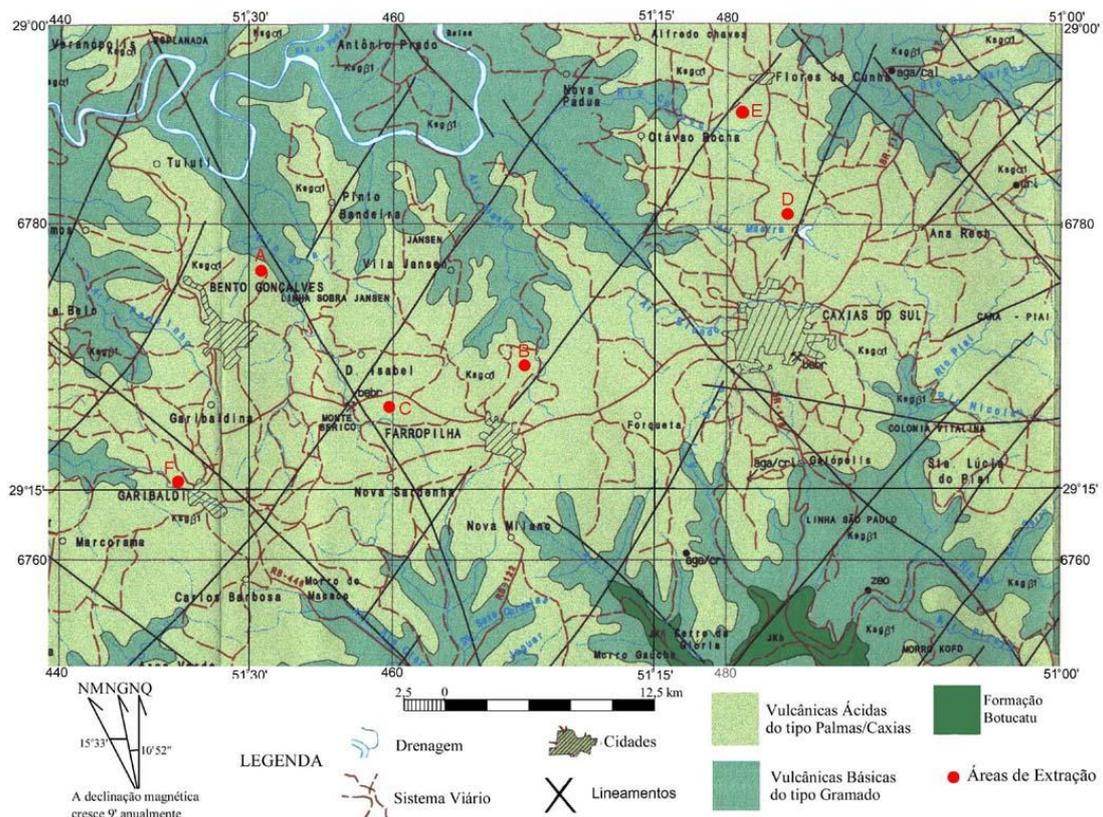


Figura 2.4 – Mapa Geológico da região de Caxias do Sul com a localização das áreas de extração em estudo.

Fonte: CPRM, 1998.

Os riódacitos correspondem a rochas de coloração cinza clara, média a escura, alguns apresentando tonalidades avermelhadas (pequena ocorrência). A textura dessas rochas, em geral, é fanerítica fina a muito fina, algumas apresentando um bandamento mineralógico e um padrão mosqueado (textura “carijó”). A mineralogia principal dessas rochas é marcada pela presença de plagioclário, quartzo, anfibólios e piroxênios, caracterizando essas rochas como ácidas (conteúdo de sílica superior a 65%) (GARLET e REGINATO, 2008).

As estruturas primárias associadas a essas rochas consistem de zonas maciças, zonas de disjunção horizontal (camadas plano-paralelas com espaçamento centimétrico a decimétrico) e zonas vesiculares a amigdalóides. Nesse último caso, essas estruturas são caracterizadas por feições arredondadas a alongadas que correspondem a espaços vazios (vesículas) ou preenchidos por minerais (amigdalas), que apresentam tamanhos centimétricos (predomínio) a decimétricos. Os minerais que preenchem as amigdalas são o quartzo (cristal de rocha), calcita, zeolitas, argilominerais e óxidos (GARLET e REGINATO, 2008).

A estruturação tectônica é marcada por planos de fraturas de orientação vertical a sub-vertical que na maior parte dos casos estão preenchidos por mineralizações de sílica, carbonatos e zeolitas. Algumas áreas também apresentaram veios, de dimensões milimétricas, preenchidos por sílica, carbonatos e óxidos de ferro. Além disso, deve-se salientar que a quantidade de fraturas está relacionada ao grau de fraturamento, sendo que em todas as áreas estudadas, o mesmo foi caracterizado como de grau médio (GARLET e REGINATO, 2008).

2.8 Propriedades do Concreto

A produção do concreto compreende duas fases, a fase em que o concreto está em estado fresco e a fase em que está endurecido. O estudo das propriedades do concreto deve ser feito nas duas fases, uma vez que, algumas propriedades do concreto no estado endurecido dependem das propriedades do concreto no estado fresco. As principais propriedades do concreto endurecido são expressas pelo projetista e as propriedades no estado fresco são determinadas pelas técnicas de execução, transporte, lançamento e adensamento do concreto (HELENE, 2005).

2.8.1 Propriedade do concreto endurecido

Os materiais de engenharia escolhidos para aplicações específicas, normalmente levam em conta a capacidade de resistência às forças aplicadas. Dependendo de como as forças

agem sobre o material, as tensões decorrentes poderão ser distintas. As relações tensão-deformação dos materiais são geralmente expressas em termos de resistência, módulo de elasticidade, ductilidade e tenacidade e a durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

I. Resistência

A resistência à compressão é o parâmetro de controle de resistência mais utilizado, embora a resistência a tração por flexão ser comum em projetos de elementos de concreto. Para a maioria das aplicações, utiliza-se o concreto com uma resistência à compressão que varia de 20 a 40 MPa, apesar de já estarem sendo produzidos, comercialmente, concretos de alta resistência de até 130 MPa. As resistências à tração e à flexão do concreto são da ordem de 10 e 15%, respectivamente, da resistência à compressão. A razão da diferença entre a resistência à tração e à compressão é atribuída à estrutura heterogênea e complexa do concreto. O processo de endurecimento do concreto de cimento portland é muito longo, podendo chegar a 2 anos para se completar. Na idade de 28 dias o processo atinge de 75 a 90% da resistência final. A resistência de projeto em que o cálculo se baseia é a apresentada aos 28 dias após a sua execução (HELENE, 2005).

A resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), é considerada a propriedade mais importante do concreto, uma vez que os códigos nacionais e internacionais procuram associar as outras resistências e propriedades a esta (JACINTHO e GIONGO, 2005).

Para a resistência característica à tração pura (f_{ct}), a norma NBR 6118 recomenda que na falta de determinação experimental se adote:

- para $f_{ck} \leq 18$ MPa deve-se adotar $f_{ct} = 1/10$ do valor de f_{ck} .
- para $f_{ck} \geq 18$ MPa deve-se adotar $f_{ct} = 0,006 f_{ck} + 0,7$ MPa.

II. Módulo de elasticidade

Em materiais homogêneos o módulo de elasticidade, que é a medida das forças de ligações interatômicas, geralmente não é afetado por mudanças microestruturais, o que não é válido para materiais multifásicos como o concreto. O módulo de elasticidade à compressão de concretos estruturais varia de 14 a 40 GPa. Segundo a norma NBR 6118 (2003) o módulo de elasticidade deve ser obtido segundo descrito na norma NBR 8522 (2003), sendo considerado nessa norma o módulo de deformação tangente inicial a 30% f_{ci} ou outra tensão especificada em projeto.

O concreto apresenta deformações elásticas e inelásticas, além das deformações por retração na secagem. Tais deformações frequentemente levam à fissuração, uma resposta do material à carga externa e ao meio. O termo elasticidade é definido como a maior ou menor dificuldade de deformação de um dado material e está relacionado com dois conceitos, o de fluência (aumento gradual da deformação ao longo do tempo) e o de relaxação (diminuição gradual da deformação ao longo do tempo). O concreto não é um material verdadeiramente elástico e as deformações não ocorrem uniformemente em sua estrutura, o que provoca a divisão do concreto em sistemas: estáveis e instáveis, à medida que a tensão é aplicada sobre o material. Existem 2 tipos principais de módulos de deformação (unidade GPa) que podem ser obtidos da curva tensão/deformação:

- tangente (dado pela declividade de uma reta tangente à curva em qualquer ponto da mesma),
- secante (dado pela declividade de uma reta traçada da origem a um ponto da curva correspondendo a 40% da tensão da carga de ruptura).

Fatores que afetam o módulo de deformação:

- agregados: interferem diretamente na porosidade do material, e esta determina sua rigidez e por sua vez controla a capacidade do agregado em restringir deformações. Em geral, quanto maior a quantidade de agregado gráudo com alto módulo de deformação, maior o módulo de deformação do concreto. A resistência do concreto não é afetada pela porosidade do concreto. Outras características dos agregados podem influenciar a micro fissuração na zona de transição e afetar o módulo de deformação.
- matriz da pasta de cimento: assim como no agregado, o módulo de deformação da matriz é afetado por sua porosidade. É controlada pela relação água/cimento, grau de adensamento, aditivos e hidratação do cimento.
- zona de transição: espaços vazios, micro-fissuras e cristais de hidróxido de cálcio interferem na qualidade da zona de transição, que por sua vez altera sua porosidade, e torna a região uma das principais componentes do módulo de deformação do concreto.

O módulo de deformação também depende dos parâmetros e das condições de ensaio, da idade do concreto, da cura, dentre outros fatores.

III. Dutilidade e tenacidade

Apesar de o concreto sob compressão apresentar alguma deformação não elástica ou permanente antes do rompimento, a deformação na fratura é da ordem de 2000×10^{-6} , que é consideravelmente mais baixa que a deformação de rompimento em metais estruturais. Entretanto, para aplicações práticas, o concreto não é considerado como um material dúctil e não é recomendado para uso em condições onde possa ser submetido a impactos.

IV. Durabilidade

É definida como a vida útil do material sob dadas condições ambientais. Normalmente os concretos densos ou impermeáveis apresentam durabilidade a longo prazo. Concretos impermeáveis são menos duráveis. A durabilidade está intimamente relacionada à sua permeabilidade, que depende das proporções da mistura, da compactação, da cura e das microfissuras causadas pelos ciclos normais de temperatura e umidade. Geralmente, há uma estreita relação entre a resistência e a durabilidade do concreto.

2.8.1.1 Fatores que afetam a resistência à compressão do concreto

A resposta do concreto às tensões aplicadas é resultado de interações complexas que dependem de vários fatores. Para simplificar o entendimento esses fatores são analisados e discutidos separadamente em três categorias: Características e proporções dos materiais, condições de cura e parâmetros de ensaio.

I. Características dos materiais: a relação água/cimento é a mais importante, pois afeta, independentemente de outros fatores, a porosidade, tanto da matriz pasta de cimento, como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo. O tipo de cimento irá afetar a resistência do concreto de acordo com o seu grau de hidratação, que em síntese determina o grau de porosidade da pasta de cimento endurecida. Quanto mais rápido for o processo de hidratação menor será a porosidade e, portanto, será obtida uma matriz de maior resistência. A influência do agregado na resistência do concreto, geralmente, não é levada em conta, pois, normalmente, a resistência do agregado é bem maior do que a resistência da matriz e da zona de transição. Entretanto, o tamanho, a forma, a textura da superfície, a granulometria e a mineralogia, reconhecidamente influenciam na resistência do concreto em vários níveis. Tais características afetam não só a relação água/cimento, mas, também, as características da zona de transição. Ensaios experimentais realizados por (BONAVETI e IRASSAR, 1996), demonstram que a demanda de água cresce com a proporção de finos, devido ao aumento da

área de superfície a ser umedecida, levando a uma redução da trabalhabilidade. Já Bolsiljkov, diz que a adição de materiais finos melhora diversas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido (BOLSILJKOV, 2003).

II. Cura: é um termo adotado para os procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento. A cura está relacionada ao controle do tempo, da temperatura e das condições de umidade após a colocação do concreto nas fôrmas. Para uma dada relação água/cimento, a porosidade da pasta endurecida de cimento hidratada é determinada pelo grau de hidratação do cimento. Em condições normais de temperatura alguns dos constituintes do cimento Portland começam a hidratar na medida em que é adicionada água, mas as ações de hidratação são retardadas consideravelmente quando os produtos de hidratação cobrem os grãos de cimento. Essa é a razão pela qual a hidratação somente pode proceder satisfatoriamente em condições de saturação.

III. Parâmetros de ensaio: os resultados dos ensaios de resistência do concreto são significativamente afetados por parâmetros relativos ao corpo-de-prova e as consequentes condições de carregamento. Dentre os parâmetros do corpo-de-prova estão o tamanho, a geometria e o estado de umidade. Os parâmetros de carregamento compreendem o nível e duração da tensão e a velocidade com que a tensão é aplicada.

2.8.1.2 Fatores que afetam o módulo de deformação

Para o concreto, a relação direta entre resistência e módulo de deformação provém do fato de que ambos são afetados pela porosidade das fases constituintes, embora não no mesmo grau. O comportamento elástico do material é determinado pela massa específica, o módulo de deformação dos principais constituintes e as características da zona de transição. Uma vez que a massa específica é inversamente proporcional à porosidade, obviamente que os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz da pasta de cimento e da zona de transição são as mais importantes.

I. Módulo de deformação dos agregados: Agregados densos têm módulo de deformação alto. Assim quanto maior a quantidade de agregado denso em uma mistura de concreto, maior será o módulo de deformação do concreto. Testes em exemplares de rochas mostraram que o módulo de deformação de agregados naturais de baixa porosidade, tais como granito e basalto está na faixa de 69 a 138 GPa. Outras propriedades do agregado também

influenciam o módulo de deformação do concreto, tais como: dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria e a composição mineralógica.

II. Matriz da pasta de cimento: O módulo de deformação da matriz da pasta de cimento é determinado pela sua porosidade. Os fatores que afetam a porosidade são: a relação água/cimento, o conteúdo de ar incorporado, as adições minerais e o grau de hidratação do cimento.

III. Zona de transição: Os espaços vazios, as micro-fissuras e os cristais orientados de hidróxido de cálcio são relativamente mais comuns na zona de transição do que na matriz da pasta de cimento, fato que os tornam determinantes nas relações tensão deformação do concreto.

2.8.1.3 Fatores que afetam a durabilidade

Durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deteriorização (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Significa que, para ser durável o concreto deve conservar a sua forma, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao ambiente.

A maioria dos problemas de durabilidade do concreto está relacionada à água. Sabe-se que, em sólidos porosos, a água causa muitos problemas de processos físicos e químicos de degradação. Os fenômenos físicos-químicos associados com os movimentos da água em sólidos porosos são controlados pela permeabilidade do sólido.

I. Permeabilidade da pasta de cimento: É definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A água adicionada é indiretamente responsável pela permeabilidade da pasta endurecida de cimento, pois o seu teor determina o espaço total e o espaço vazio, que a água é consumida pelo processo de hidratação e evaporação para o ambiente. O coeficiente de permeabilidade da pasta de cimento recém misturada é da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s. À medida que a porosidade capilar cai devido ao processo de hidratação, o coeficiente de permeabilidade diminui de forma não proporcional.

II. Permeabilidade dos Agregados: Comparando a porosidade capilar de 30 a 40% de pastas típicas de cimento em concreto endurecido, o volume de poros na maioria dos

agregados naturais está normalmente abaixo de 3% e raramente excede 10%. O coeficiente de permeabilidade da maioria das rochas vulcânicas, mármore, basaltos, granitos densos variam de 1×10^{-12} a 10×10^{-12} cm/s. Enquanto que a maioria dos poros capilares da pasta de cimento hidratada é na ordem de 10 a 100 nm, os poros nos agregados são, em média, maiores que 10 μm .

III. Permeabilidade do concreto: Teoricamente a introdução de partículas de agregados com baixa permeabilidade em uma pasta de cimento deveria diminuir a permeabilidade do sistema, contudo não é o que acontece. Dados experimentais demonstram que a adição de agregados aumenta consideravelmente a permeabilidade. O aumento está diretamente relacionado ao tamanho do agregado. A explicação está no surgimento de micro-fissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. O tamanho e a granulometria dos agregados afetam as características de exsudação da mistura que, por sua vez, influenciam a resistência da zona de transição, devido a esforços diferenciais entre a pasta de cimento e o agregado. As fissuras na zona de transição são muito pequenas, contudo, têm largura maior que a maioria das cavidade capilares, portanto, são responsáveis pelas interconexões que aumentam a permeabilidade do sistema.

2.8.2 Propriedades do concreto fresco

Na fase de projeto, diversos parâmetros são estabelecidos para atender as necessidades de estabilidade e durabilidade dos concretos no estado endurecido. Contudo, para atingir esses parâmetros a execução dos elementos estruturais deve atender certas propriedades. O concreto no estado fresco deve possuir uma trabalhabilidade que permita o transporte, o lançamento, o adensamento e o acabamento sem perder a homogeneidade. Para tanto, a mistura no estado fresco deve se manter, durante essas etapas, com fluidez e coesão mínimas, de acordo com as condições de lançamento do concreto. A fluidez é a facilidade de mobilidade e a coesão é a resistência à exsudação e à segregação (GUIMARÃES, 2005). As principais propriedades do concreto no estado fresco são: consistência, plasticidade, poder de retenção de água e trabalhabilidade.

2.8.2.1 Consistência

A consistência é a propriedade que determina o grau de fluidez da mistura do concreto no estado fresco, relacionando-se com a mobilidade da massa. A relação entre a água e os materiais secos é o principal fator que tem influência na consistência. Esta relação é o teor de

água/materiais secos que é estabelecida pelo peso da água e o peso dos materiais secos multiplicada por 100, pode ser representado pela letra H (Equação 2.3).

$$H = \frac{Pa}{Pc + Pm} \times 100 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

onde:

Pa = peso da água

Pc = peso do cimento

Pm = peso dos materiais secos

A consistência adequada está condicionada à natureza da obra, dimensões das formas, distribuição das armaduras e aos processos de lançamento e adensamento do concreto.

Em função da consistência, o concreto é classificado em:

- I. Seco ou úmido – quando H está entre 6% e 8%;
- II. Plástico – quando H está entre 8% e 11%;
- III. Fluido - quando H está entre 11% e 14%;

O processo de verificação da consistência mais utilizado no Brasil, pela simplicidade e facilidade de execução é o ensaio de abatimento de tronco de cone, conhecido como *Slump Test* (Figura 2.5).

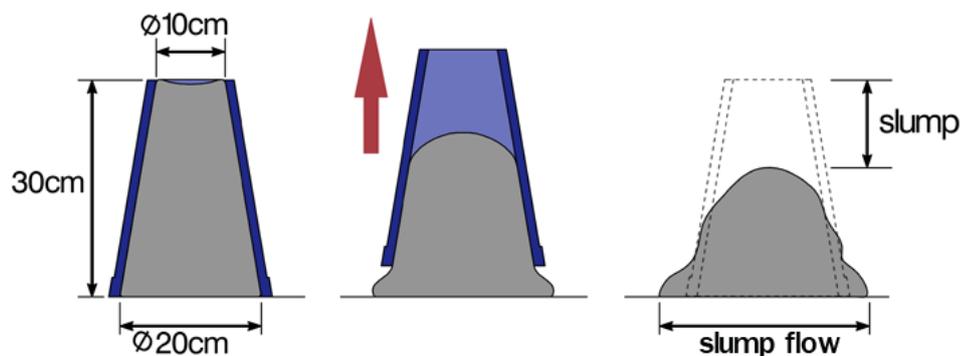


Figura 2.5: Esquema de execução do *Slump Test*.

Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Slump_test.png

A norma NBR 6118 recomenda que a consistência devem ser definidas de acordo com as dimensões das peças a serem concretadas. As Tabelas 2.3 e 3.4 fornecem algumas indicações sobre resultados do *slump test* (ARAÚJO, RODRIGUES e FREITAS, 2000).

Tabela 2.3: Abatimento recomendado para diferentes tipos de obra.

Tipo de obra	Abatimento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Bloco sobre estaca e sapata	8	2
Viga e parede armada	10	2
Pilar de edifício	10	2
Laje maciça e nervurada	8	2

Fonte: Materiais de construção – Araújo, Rodrigues e Freitas (2000)

Tabela 2.4: Índice de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento.

Consistência	Abatimento (cm)	Tipo de obra	Tipo de adensamento
Extremamente seca	0	Pré fabricação	Condições especiais de adensamento
Muito seca	0	Grandes massas pavimentações	Vibração muito enérgica
Seca	0 a 2	Estruturas de concreto armado ou protendido	Vibração enérgica
Rija	2 a 5	Estruturas correntes	Vibração normal
Plástica (média)	5 a 12	Estruturas correntes	Adensamento manual
Úmida	12 a 20	Estruturas correntes sem grandes responsabilidades	Adensamento manual
Fluída	20 a 25	Concreto inadequado para qualquer uso	-x-

Fonte: Materiais de construção – Araújo, Rodrigues e Freitas (2000).

2.8.2.2 Plasticidade

É a propriedade do concreto fresco que define a facilidade de moldagem sem que haja rompimento. Depende da consistência e do grau de coesão entre os materiais constituintes. Quando não existe coesão os materiais se separam, ocorrendo segregação.

Os agregados exercem grande influência na plasticidade do concreto. Areias mais finas, por possuírem áreas específicas maiores requerem mais água, diminuindo a resistência do concreto, entretanto, o teor de areia requerido para um concreto de igual plasticidade será menor, compensando assim, o efeito negativo causado pela finura da areia. As areias mais

grossas, quando utilizadas em concretos, cuja dimensão máxima do agregado é em torno de 9,5mm, resultam em misturas ásperas e pouco coesivas.

A forma e textura superficial das partículas da areia influenciam a plasticidade na medida em que quanto mais angulosas, rugosas e alongadas forem diminuem a plasticidade.

Agregados provenientes de britagem de rochas, por possuírem forma cúbica e uma textura superficial rugosa, apresentam uma área específica maior, exigindo uma quantidade maior de água de amassamento, o que implica em um consumo de cimento maior.

2.8.2.3 Trabalhabilidade

É de difícil conceituação, pois envolve uma série de outras propriedades, ainda não bem determinadas. A norma ASTM C 125 (1993) define trabalhabilidade como a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável da homogeneidade. A norma ACI 116R (1990) descreve trabalhabilidade como a facilidade e homogeneidade com que o concreto fresco pode ser manipulado desde a mistura até o acabamento. Petrucci (1998) define trabalhabilidade como sendo a propriedade do concreto fresco que identifica sua maior ou menor aptidão para ser empregado com determinada finalidade, sem perda da sua homogeneidade. Existem dois fatores que afetam a trabalhabilidade: Fatores internos e fatores externos (PETRUCCI, 1998).

I. Fatores internos:

- a) consistência, identificada pela relação água/cimento ou teor de água/materiais secos;
- b) proporção entre cimento e agregado, conhecido como traço;
- c) proporção entre agregado miúdo e graúdo, que corresponde a granulometria do concreto;
- d) forma do grão dos agregados, depende do modo de obtenção (obtido de forma natural ou por processo de britagem);
- e) aditivos plastificantes.

II. Fatores externos:

- a) Tipo de mistura (manual ou mecânica);

- b) Tipo de transporte;
- c) Tipo de lançamento;
- d) Tipo de adensamento;
- e) Dimensões e armadura dos elementos.

A atuação dos fatores descritos não se manifesta sempre em um mesmo sentido, considerando que todos podem atuar em conjunto. A trabalhabilidade compreende propriedades que são fundamentais: consistência ou fluidez, compacidade, e travamento. A consistência é função da quantidade de água. A compacidade varia com os vazios entre os tamanhos dos grãos dos agregados e com a existência de grãos menores para preenchimento desses vazios. O travamento está relacionado com a quantidade de finos e com a continuidade do diâmetro dos grãos (PETRUCCI, 1998).

A consistência determina a facilidade de deformação, a compacidade torna possível o adensamento e o travamento está relacionado com a capacidade de o concreto manter a sua homogeneidade.

2.8.2.4 Segregação e exsudação

É a separação dos elementos que constituem o concreto, de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme. A principal causa da segregação é o excesso de água, entretanto os diferentes tamanhos das partículas e das massas específicas dos constituintes e os métodos impróprios de adensamento também podem provocar a segregação do concreto (RAMACHANDRAN e FELDMAN, 1984).

A exsudação acontece quando parte da água do concreto se separa tendendo a subir para a superfície, pois de todos os constituintes a água é a que possui menor massa específica. A exsudação pode causar o enfraquecimento entre a ligação pasta agregado e pasta armadura, também, pode aumentar a permeabilidade e a formação de nata na superfície dos elementos (NEVILE, 1997).

2.8.3 Classificação dos concretos de acordo com a massa específica

Com base na massa específica MEHTA e colaboradores (MEHTA e MONTEIRO, 1994) classificam o concreto em três categorias:

- I. Concreto de peso normal: Concreto que contém areia natural, seixo rolado ou pedra britada, com massa específica em torno de 2400 kg/m^3 , geralmente usado para a confecção de peças estruturais.
- II. Concreto leve: Com massa específica menor que 1800 kg/m^3 , é usado em aplicações em que se deseja uma alta relação entre resistência e peso. Pode ser obtido utilizando-se alguns agregados naturais, ou processados termicamente e que possuem baixa densidade.
- III. Concreto pesado: É um concreto produzido a partir de agregados de alta densidade, que geralmente tem peso acima de 3200 kg/m^3 .

2.8.4 Classificação dos concretos de acordo com a resistência

Segundo MEHTA e colaboradores (MEHTA e MONTEIRO, 1994), o concreto pode ser classificado quanto à sua resistência à compressão aos 28 dias em três categorias:

- I. Baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;
- II. Resistência moderada: resistência à compressão de 20 MPa a 40 MPa;
- III. Alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa;

A norma NBR 8953 (2009) classifica os concretos em grupos de resistência, grupo I e grupo II, conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}), determinada a partir do ensaio de corpos-de-prova preparados de acordo com a norma NBR 5738 (2003) e rompidos conforme a norma NBR 5739 (1994). Dentro dos grupos, os concretos normais com massa específica seca compreendida entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3 , são designados pela letra C seguida do valor da resistência característica à compressão (f_{ck}), expressa em MPa (NBR 9778, 2009), conforme Tabelas I e II da norma (Tabela 2.5).

Tabela 2.5: Classificação do concreto de acordo com a sua resistência característica à compressão (f_{ck}) de acordo com a norma NBR 8953 (1992)

GRUPO I		GRUPO II	
CLASSE	f_{ck} (MPa)	CLASSE	f_{ck} (MPa)
C10	10	C55	55
C15	15		
C20	20	C60	60
C25	25		
C30	30	C70	70
C35	35		
C40	40	C80	80
C45	45		
C50	50		

Fonte: Norma NBR 8953/1992 – concreto para fins estruturais- classificação por grupos de resistência.

Os concretos leves (NBR 9778, 2009), com massa específica seca menor que 2000 kg/m³, são designados pelo símbolo CL, seguido do valor de resistência a compressão (f_{ck}), expresso em MPa, utilizando-se os valores das tabelas I e II da NBR 8953 (1992) (Tabela 2.4).

2.9 Dosagem dos concretos de cimento Portland

O termo dosagem, refere-se aos procedimentos necessários à obtenção das proporções entre os materiais constitutivos do concreto. Comumente, a dosagem é conhecida como traço do concreto. A proporção pode ser expressa em massa ou em volume. A tendência mundial, por ser mais rigorosa, é a proporção expressa em massa seca de materiais (HELENE, 2005).

Os materiais passíveis de uso nos concretos e que são utilizados no estudo de dosagens são: os cimentos, os agregados miúdos e graúdos, a água e os aditivos. Com relação aos agregados pode-se fazer distinção entre agregados naturais, artificiais e reciclados (NBR 7211, 2005).

A grande diversidade de métodos impede que aspectos comuns possam ser aprofundados e uniformizados. Apesar disso, certos procedimentos são comuns a todos os métodos: o cálculo da resistência média de dosagem, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento, a consideração da natureza dos agregados e outras atividades.

Segundo MEHTA e colaboradores (MEHTA *et al.*,1994) o estudo da dosagem sempre é feito com o intuito de se obter a mistura ideal e mais econômica para atender uma série de requisitos que podem ser englobados em:

- I. Resistência mecânica: é o parâmetro mais frequente, sendo a resistência à compressão a mais utilizada;
- II. Trabalhabilidade: deve ser adequada a cada situação particular de utilização do concreto (forma, taxa de armadura, detalhes geométricos, tipos de equipamentos utilizados, necessidades de acabamento, condições ambientais etc.).
- III. Durabilidade: o concreto deve ser durável frente às solicitações às quais será exposto durante a sua vida útil.
- IV. Deformabilidade: a deformação inicial e principalmente a deformação lenta podem ser muito prejudiciais no que se refere à relação com os outros materiais construtivos (paredes, pisos, esquadrias, elevadores, etc.) razão pela qual é um requisito importante na dosagem do concreto.

Os estudos de dosagem, apesar de terem fundamentos científicos e tecnológicos fortes, sempre envolvem uma parte experimental em laboratório, o que leva muitos pesquisadores e profissionais a considerarem que a dosagem de concreto é mais uma arte do que uma ciência, Basílio, define a dosagem como “a técnica e a arte de fixar as quantidades dos elementos componentes de modo a garantir-lhe as características exigidas na fase plástica e na fase após o endurecimento” (BASÍLIO, 1977), definição compartilhada por Mehta e colaboradores, que afirmam que “somente aos profissionais capazes de dominar o processo de dosagem são conferidos os benefícios econômicos e técnicos do uso correto do concreto” (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.9.1 Métodos de dosagem

Apesar de existirem vários estudos de dosagem, (NEVILLE e BROOKS, 1987; ALAEJOS; CÁNOVAS, 1992; AMERICA CONCRETE INSTITUTE, 1994; NEVILLE, 1997; HELENE e TERZIAN, 1992; PETRUCCI, 1988) com descrições detalhadas de métodos e procedimentos, não existe no Brasil um consenso de como se deve proceder para o estudo da dosagem do concreto, o que tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos, que não raras vezes são confundidos como uma recomendação das instituições para o qual trabalham.

Boggio (2000) desenvolveu um estudo comparativo entre cinco métodos de dosagem utilizados no Brasil, escolhidos a partir dos principais centros tecnológicos e instituições de pesquisa do país, devido a sua grande difusão nos meios acadêmicos e técnicos profissionais. Os métodos analisados e comparados são:

2.9.1.1 Método ABCP/ACI

Baseado no texto da Norma ACI 211.1 (1981), uma adaptação do método americano às condições brasileiras. Foi publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland em 1984 em um estudo técnico desenvolvido pelo Eng. Públio Penna Firme Rodrigues com o título “Parâmetros de Dosagem do Concreto” (RODRIGUES, 1990). O método se preocupa fundamentalmente com a trabalhabilidade através de fatores que consideram os materiais, as condições de fabricação, o adensamento e as dimensões dos elementos. É um procedimento desenvolvido para concretos de consistência plástica que fornece traços com baixos teores de areia, com o objetivo de obter misturas econômicas.

2.9.1.2 Método ITN/LOBO CARNEIRO

Desenvolvido em 1933 pelo Eng. Fernando Lobo Carneiro em estudo realizado no Instituto Nacional de Tecnologia – INT – do Rio de Janeiro (CARNEIRO, 1953), o método tinha por base as curvas granulométricas propostas por Otto Graf e Bolomey (pesquisadores europeus). O método desenvolvido levou à obtenção de curvas granulométricas adimensionais para diferentes tamanhos de agregado. O método teve sua primeira publicação em 1937 com o título “Dosagem de Concretos Plásticos”. A aplicação do método levou a uma nova publicação em 1943 intitulada “Dosagem dos Concretos”. Esta versão abordada de forma mais didática tinha a preocupação de realizar uma análise teórica da dosagem, complementada com experiências práticas que tornaram o método um excelente instrumento de proporcionamento dos materiais de composição do concreto. A vantagem do método é que ele pode ser desenvolvido com poucos ensaios de laboratório, sendo necessário que se determine apenas a composição granulométrica dos agregados.

2.9.1.3 Método ITERS/ELÁDIO PETRUCCI

É um método de caráter eminentemente experimental, desenvolvido pelo Eng. Eládio Petrucci em 1951 no então Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul – ITERS – atual Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul – CIENTEC. (PETRUCCI, 1998) Destinado à produção de concretos estruturais correntes em obras de

engenharia. Baseado na lei de Lyse (1932) e em função do tipo de adensamento (manual ou vibratório), Petrucci determinou, para diferentes tamanhos máximos, as relações correspondentes entre a quantidade de água total de amassamento necessária e o total de materiais secos da mistura de concreto.

2.9.1.4 Método SNCF/ROGER VALLETTE

Em 1948 o Eng. Civil Roger Vallette, engenheiro de pontes e barragens da SNCF (Societê Nationale dês Chemins de Fer Français) apresentou um método essencialmente experimental de dosagens, a partir do conhecimento das características intrínsecas dos materiais disponíveis na região, dentro das condições específicas da aplicação dos concretos em obra (VALLETTE, 1963). O método proposto por Vallette pode ser aplicado tanto para agregados de granulometria contínua quanto descontínua, onde o que se procura é uma trabalhabilidade a ser obtida através de misturas experimentais de materiais inertes constituídas por um mínimo de grãos finos que apresentem uma relação máxima entre agregados graúdos e miúdos.

2.9.1.5 Método EPUSP/IPT

É uma atualização feita pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP – a partir do método desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. Apresentado por Helene e Terzian em 1992, tem como premissa a consistência do concreto fresco dependente da forma e composição granulométrica do agregado graúdo, da consistência da argamassa, que está associada à forma, da granulometria do agregado miúdo e também pela consistência da pasta que depende da quantidade de água em relação à quantidade de cimento (HELENE E TERZIAN, 1992). O método apresenta como resultado final um diagrama de dosagem (Figura 2.6) que representa as três leis comportamentais do concreto para uma dada consistência medida pelo abatimento de tronco de cone e materiais estabelecidos. As leis são: Lei de Abrams, Lei de Molinari e Lei de Inge Lyse e Teor de Argamassa Seca.

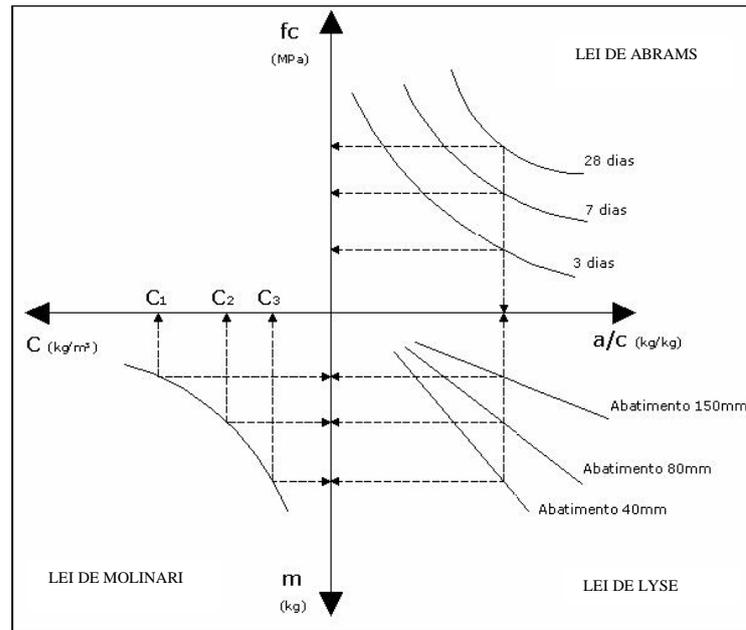


Figura 2.6: Diagrama de dosagem, Método EPUSP/IPT, Modelo de comportamento.

Legenda: f_c – resistência a compressão, a/c – relação água/cimento, m -massa dos agregados e C - consumo de cimento

Fonte: Helene e Terzian, 1992

Boggio (2000) ressalta que dos cinco métodos estudados, apenas dois têm origem em métodos adotados em outros países, o SNCF (de origem francesa) e o da ABCP (de origem norte americana), os demais foram desenvolvidos no Brasil por tecnologistas brasileiros. O estudo conclui que todos os métodos são eficientes dando resultados satisfatórios quando se trata de produzir concretos estruturais com consistência plástica e com resistência à compressão consideradas nas faixas baixas e médias (entre 15 e 40 MPa na idade de 28 dias).

2.9.2 Estudo teórico do método do EPUSP/IPT

O estudo teórico do método está fundamentado nos conceitos:

- I. O parâmetro mais importante do concreto estrutural é a relação água/cimento;
- II. Definida a relação água/cimento e definidos os materiais, a resistência e a durabilidade do concreto são únicas;
- III. O concreto é mais econômico quanto maior for a dimensão máxima característica do agregado graúdo e menor o abatimento do tronco de cone (consistência mais seca);
- IV. As correções são assumidas como “leis de comportamento” e “leis complementares” Lei de Abrams, Lei de Molinari e Lei de Inge Lyse e Teor de Argamassa Seca.

A Lei de Abrams diz que para um conjunto particular de materiais, a resistência do concreto é função da relação água/cimento (Figura 2.7). A relação é estabelecida experimentalmente em função do tipo de cimento. É expressa pela equação 2.4.

$$f_{cj} = k_1/k_2^{a/c} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

onde:

f_{cj} = resistência a compressão axial em MPa, à idade de j (dias);

a/c = relação água/cimento, em massa (kg/kg);

k_1 e k_2 = constantes empíricas que dependem exclusivamente dos materiais.

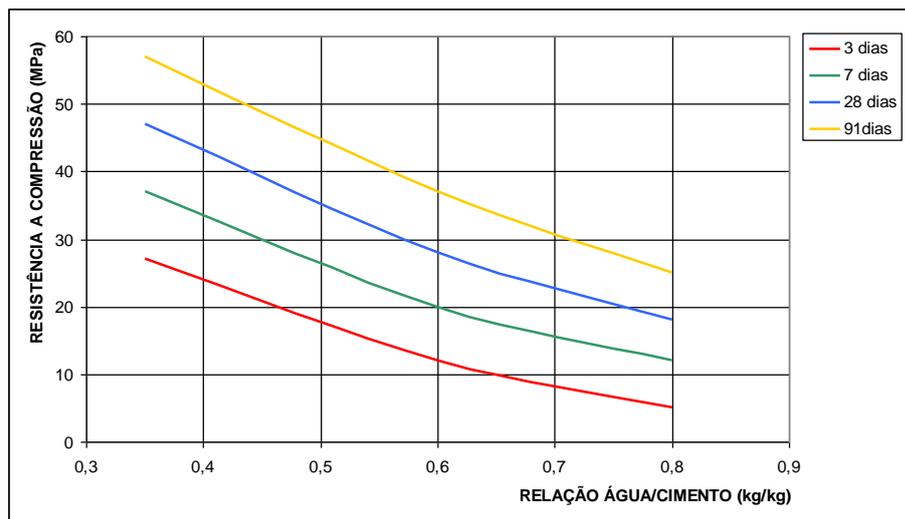


Figura 2.7: Gráfico típico que expressa a Lei de Abrams.

Fonte: Helene e Terzian, 1992

A Lei de Molinari diz que o consumo de cimento de um concreto correlaciona-se com o valor do traço seco “ m ” através de uma curva dada pela equação 2.5 (Figura 2.8).

$$C = 1000 / (k_5 + k_6 \cdot m) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

C = consumo de cimento por m^3 de concreto;

m = relação agregados/cimento, em massa (kg/kg);

k_5 e k_6 = constantes que dependem exclusivamente dos materiais empregados.

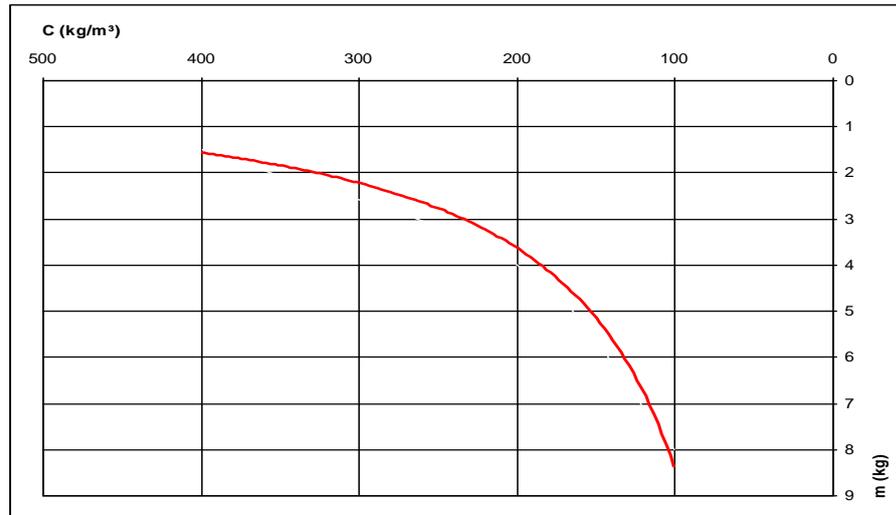


Figura 2.8: Gráfico típico que expressa a Lei de Molinari.

Fonte: Helene e Terzian, 1992

A Lei de Inge Lyse diz que para concretos fabricados com os mesmos materiais e mesma relação de agregados e com o mesmo *slump*, H é um número praticamente constante, independentemente do traço, ou seja, para um certo conjunto particular de materiais, a consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone, é função da relação água/materiais secos e é independente do traço seco (1:m) (Equação 2.6 – Figura 2.9).

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad (\text{Eq. 2.6})$$

onde:

m = relação agregado / cimento, em massa (kg/kg);

k_3 e k_4 = constantes que dependem exclusivamente dos materiais empregados;

a/c = relação água/cimento em massa (kg/kg).

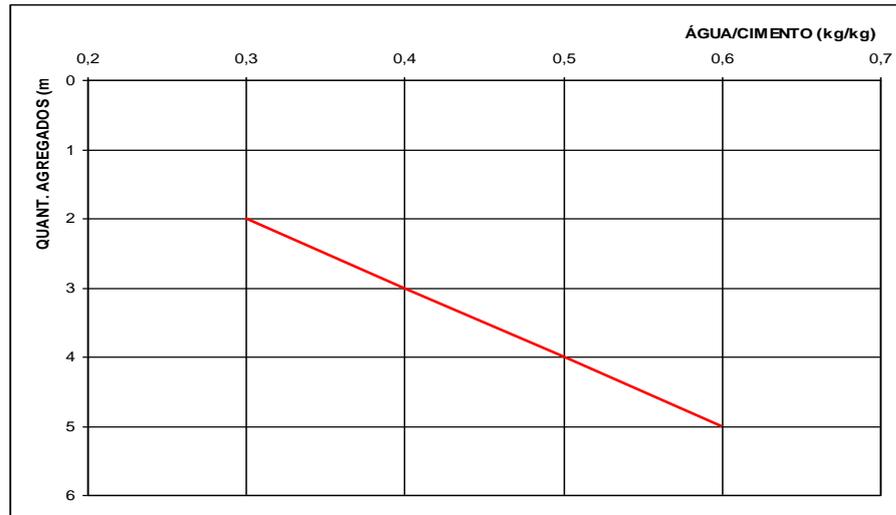


Figura 2.9: Gráfico típico que expressa a Lei de Inge Lyse.
Fonte: Helene e Terzian, 1992

O Teor de argamassa seca relaciona os agregados secos e cimento em massa, é expresso pela equação 2.7. Deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg.

$$\alpha = (1 + a) / (1 + m) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

onde:

α = teor de argamassa seca;

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

m = relação agregados secos/cimento em massa.

As leis complementares determinam o consumo de cimento e o consumo de água por metro cúbico de concreto – Equações 2.8 a 2.1

$$C = \gamma / (1 + a + p + a/c) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

$$C = (1.000 - ar) / (1/\gamma_c + 1/\gamma_a + 1/\gamma_p + a/c) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$A = C \cdot a/c \quad (\text{Eq. 2.10})$$

onde:

A = consumo de água por metro cúbico de concreto em kg/m^3 ;

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado em kg/m^3 ;

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m^3 ;

γ_c = massa específica do cimento em kg/dm^3 ;

γ_a = massa específica do agregado miúdo em kg/dm^3 ;

γ_p = massa específica do agregado graúdo em kg/dm^3 ;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico em dm^3/m^3 .

2.9.2.1 Informações básicas para aplicação do método

O estudo de dosagem parte de informações que estão relacionadas com a situação em que o concreto será utilizada. A seguir são apresentadas algumas informações necessárias, que podem ser alteradas em função da necessidade e experiência de cada profissional.

- I. Resistência característica do concreto à compressão (f_{ck});
- II. Espaçamento entre barras de aço;
- III. Dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- IV. Definição dos elementos estruturais (pilares, vigas, lajes);
- V. Escolha da consistência do concreto (medido através do ensaio de abatimento do tronco de cone) em função do tipo de elemento estrutural;
- VI. Definição da relação água/cimento;
- VII. Definição do tipo de aditivo, quando necessário;
- VIII. Estimativa da perda de argamassa do concreto no sistema de transporte e lançamento.

2.9.2.2 Resistência de dosagem

Apesar de ser apenas um dos itens a serem considerados na dosagem de concretos, a resistência de dosagem tem um papel importante tecnicamente e economicamente, pois é a partir dela que se faz o proporcionamento dos materiais a serem utilizados. Sua importância técnica está diretamente relacionada com a segurança do projeto estrutural pela influência que

exerce sobre as outras propriedades do concreto endurecido. A importância econômica está relacionada com o consumo de materiais.

O projeto estrutural especifica a resistência desejada a partir de uma resistência mínima, entretanto a resistência real obtida em obra ou em laboratório é variável, o que leva a escolha de um concreto com uma resistência média superior a resistência mínima (NEVILE, 1997).

O cálculo da resistência de dosagem deve atender às condições de variabilidade prevalentes durante a construção. Esta variabilidade é medida por um desvio padrão (Sd) que é levado em conta no cálculo, de acordo com a equação 2.11

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 Sd \quad (\text{Eq. 2.11})$$

onde:

f_{cj} = é a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias em MPa;

f_{ck} = é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

Sd = é o desvio padrão da dosagem, em MPa.

Normalmente o Sd é fixado com no mínimo 20 resultados consecutivos obtidos no intervalo de 30 dias. Quando não se tem os resultados, a norma NBR 12655 (2006) recomenda que se adotem os valores constantes da Tabela 1 da norma.

2.9.2.3 Relação água/cimento na dosagem do concreto

Uma fase importante na determinação da dosagem é a determinação da correlação existente entre a resistência a compressão axial e a relação água/cimento. Todos os métodos de estudado têm na relação água/cimento o fator determinante na resistência à compressão do concreto. Um estudo desenvolvido a nível nacional estabeleceu relações para os vários tipos de cimento existentes, entretanto estas relações devem estar desatualizadas considerando a evolução dos cimentos, o que, praticamente, nos obriga a fazer estudos experimentais para estabelecer estas relações (HELENE e TERZIAN, 1992).

2.9.3 Estudo experimental do método de dosagem EPUSP/IPT

Para poder montar o diagrama de dosagem (Figura 2.1) de forma experimental é necessário que sejam definidos três pontos em cada quadrante do diagrama, que correlacionam à resistência à compressão, a relação água/cimento, a relação cimento/materiais secos e o consumo de cimento. Parte-se de uma mistura de materiais secos (traço) de 1:5 (cimento/agregados secos totais em massa). Com as informações obtidas para a mistura inicial se produz mais duas misturas, uma com traço 1:3,5 (traço rico em cimento) e outra com traço 1:6,5 (traço pobre em cimento).

A fase mais importante do método experimental é a que determina o teor ideal de argamassa para os traços, pois é a fase que determina a adequabilidade do concreto quando lançado em forma. O termo adequabilidade significa ter trabalhabilidade e consistência adequadas. A proporção adequada dos materiais é obtida por tentativas e observações práticas.

Helene e Terzian partindo do traço 1:5 apresentam a quantidade de materiais necessários correspondentes a cada teor de argamassa adotado (Tabela 2.6) (HELENE e TERZIAN, 1992).

Tabela 2.6: Determinação do teor de argamassa seca para o traço 1:5
(brita = 30 kg)

Teor de Argamassa (%)	Traço Unitário (1:a:p)	Quantidade de Areia (kg)		Quantidade de Cimento (kg)	
		Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo
35	1:1,10:3,90	8,46	1,22	7,69	0,25
37	1:1,22:3,78	9,68	1,31	7,94	0,26
39	1:1,34:3,66	10,99	1,37	8,20	0,27
41	1:1,46:3,54	12,36	1,50	8,47	0,30
43	1:1,58:3,42	13,86	1,59	8,77	0,32
45	1:1,70:3,30	15,45	1,72	9,09	0,34
47	1:1,82:3,18	17,17	1,85	9,43	0,37
49	1:1,94:3,06	19,02	2,00	9,80	0,40
51	1:2,06:2,94	21,02	2,17	10,20	0,44
53	1:2,18:2,82	23,19	2,36	10,64	0,47
55	1:2,30:2,70	25,55	2,59	11,11	0,52
57	1:2,42:2,58	28,14	2,84	11,63	0,57
59	1:2,54:2,46	30,98	3,12	12,20	0,62
61	1:2,66:2,34	34,10	3,47	12,82	0,69
63	1:2,78:2,22	37,57	3,86	13,51	0,78
65	1:2,90:2,10	41,43		14,29	

Fonte: Helene e Terzian, 1992, p. 245

Definido o teor de argamassa para o traço 1:5, pode-se calcular o teor de argamassa para os traços rico e pobre, utilizando-se as equações 2.12 e 2.13 para o traço rico e as equações 2.13 e 2.14 para o traço pobre.

$$a_r = \alpha (1 + 3,5) - 1 \quad (\text{Eq. 2.12})$$

$$p_r = 3,5 - a_r \quad (\text{Eq. 2.13})$$

onde:

α = teor de argamassa seca do traço 1:5;

a_r = quantidade de agregado miúdo – areia

p_r = quantidade de agregado graúdo - brita

$$a_p = \alpha (1 + 6,5) - 1 \quad (\text{Eq. 2.14})$$

$$p_p = 6,5 - a_p \quad (\text{Eq. 2.15})$$

onde:

α = teor de argamassa seca do traço 1:5;

a_p = quantidade de agregado miúdo – areia

p_p = quantidade de agregado graúdo - brita

Obtidos os traços individuais realizam-se as misturas experimentais definindo-se as seguintes relações:

- I. Relação água/cimento, necessária para obter a consistência desejada (*slump*);
- II. Consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
- III. Massa específica do concreto fresco;
- IV. Abatimento do tronco de cone.

Com os dados obtidos no estudo experimental é possível construir as correlações entre traço de concreto e relação água/cimento, consumo de cimento e traço, dando origem ao diagrama de dosagem (Figura 2.1), que é válido apenas para o mesmo tipo de cimento.

3. MÉTODOS E TÉCNICAS

3.1 Considerações Iniciais

Considerando que o objetivo do projeto de pesquisa é a avaliação comparativa das propriedades do concreto decorrente da substituição da areia natural por areia de britagem, o método de desenvolvimento deste trabalho é essencialmente experimental.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia Construtiva (LABTEC), localizado no Campus 8 da Universidade de Caxias do Sul e no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV), localizado no bloco V da Cidade Universitária, da Universidade de Caxias do Sul. A configuração do LABTEC está disponível em http://www.ucs.br/ucs/extensao/servicos_tecnologicos/pesquisa_tecnologia/labtec/apresentacao.

3.2 Programa Experimental

O programa experimental está estruturado em 3 etapas:

- Etapa 1: Caracterização das areias, natural e de britagem;
- Etapa 2: Verificação das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido a partir da elaboração de diagramas de dosagem;
- Etapa 3: Verificação experimental dos resultados obtidos nos diagramas de dosagem e determinação do módulo de elasticidade

3.2.1 Etapa 1 – Caracterização das areias

Esta etapa tem por objetivo determinar as características físicas da areia natural e das areias de britagem, objeto de pesquisa deste trabalho.

Foram analisadas características decorrentes do processo de fabricação, composição granulométrica, material pulverulento e forma e as características decorrentes da composição mineralógica: massa unitária, massa específica inchamento e absorção de água. Todos os ensaios de caracterização foram realizados tendo por base as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Normas do Mercosul (NM), conforme especificado na Tabela 3.1.

As amostras de areia natural, originária do vale do rio Caí, foram coletadas em dois pontos diferentes. Uma parte da coleta ocorreu em loja de material de construção em Caxias do Sul, e outra em uma obra no momento da descarga do material. As amostras das areias de britagem foram coletadas diretamente nas empresas mineradoras de basalto participantes do

projeto. Todas as coletas foram feitas conforme recomendações da norma NM 26. A tabela 3.2 identifica as empresas com letras maiúsculas do alfabeto descreve a localização e a produção de agregados e areias.

Tabela 3.1: Ensaios de caracterização realizados, laboratórios e normas utilizadas.

ENSAIO	FINALIDADE	LABORATÓRIO	NORMAS	QUANT.
Composição Granulométrica	Mostra a distribuição dos grãos que constitui o agregado. Também foi determinada a dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado.	LABTEC	NBR NM 248 NBR 7211 NM ISO 3310 NBR NM 26 NBR NM 27	24
Massa Unitária Volume de Vazios	Determina a massa das partículas da areia que ocupam um determinado volume e o índice de vazios entre os grãos.	LABTEC	NM 45 NBR 7211 NM ISO 3310 NBR NM 26 NBR NM 27	18
Massa Específica	Tem por objetivo estabelecer a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.	LABTEC	NBR NM 52 NBR NM 26 NBR NM 27	18
Teor de Material Pulverulento	Tem por objetivo determinar a quantidade de material mais fino que a abertura da malha da peneira de 75 µm da série normal especificada pela NM ISO 3310.	LABTEC	NBR NM 46 NM ISO 3310 NBR NM 26 NBR NM 27	24
Inchamento	Tem por objetivo determinar a variação do volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos grãos do agregado, que altera a sua massa unitária.	LABTEC	NBR 6467 NM 45 NBR NM 26 NBR NM 27	18
Absorção de Água	Determina o incremento de massa de um corpo sólido poroso em relação a sua massa em estado seco devido à penetração de água em seus poros permeáveis.	LABTEC	NM 30 NBR NM 26 NBR NM 27	18
Forma	Determina o índice de forma dos grãos através da média da relação entre o comprimento e a espessura e o fator de forma, também chamado de esfericidade.	LMEV	NBR 7809 NM ISO 3310 NBR NM 26 NBR NM 27	(1200grãos)

Tabela 3.2: Empresas selecionadas para participação no projeto com respectivas produções de agregados e areias.

EMPRESA	LOCALIZAÇÃO	PROD. DE AGREGADO	PROD. DE AREIA
A	Bento Gonçalves	450.000,00 t/ano	216.000,00 t/ano
B	Farroupilha	126.000,00 t/ano	12.600,00 t/ano
C	Farroupilha	360.000,00 t/ano	36.000,00 t/ano
D	Caxias do Sul	270.000,00 t/ano	54.000,00 t/ano
E	Flores da Cunha	360.000,00 t/ano	72.000,00 t/ano

Analisando-se a tabela percebe-se que a produção de areia de britagem das empresas selecionadas é de aproximadamente 417.600,00 t/ano. Esses dados foram fornecidos pelos administradores das empresas através de entrevistas realizadas nas dependências das empresas

3.2.1.1 Coleta de amostras em campo

O procedimento de coleta foi efetuado de acordo com as recomendações da Norma Mercosul NM 26 (2000). Foram coletadas amostras em dois momentos diferentes, com um espaço de tempo entre as coletas de 7 meses. A primeira coleta ocorreu durante o mês de janeiro de 2008, a segunda durante o mês de agosto de 2008. Em cada momento foram coletadas amostras de aproximadamente 45 kg de areia, totalizando 90 kg de material de cada tipo de areia. O procedimento de coleta em um intervalo de tempo ocorreu devido a possíveis diferenças nas características dependentes do processo de extração e fabricação das areias.

As amostras foram armazenadas em sacos com aproximadamente 15 kg de areia cada, devidamente identificados para posterior separação para cada tipo de ensaio a ser realizado. As amostras de areia de britagem foram identificadas com as letras que correspondem às empresas fornecedoras, “A a E”. As amostras de areia natural foram identificadas com as letras AN (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Identificação das amostras coletadas em campo.

TIPO	CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO	DATA	QUANTIDADE (kg)	ARMAZENAMENTO
AREIA NATURAL	AN1	Jan/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
	AN2	Ago/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
AREIA DE BRITAGEM EMPRESA A	A1	Jan/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
	A2	Ago/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
AREIA DE BRITAGEM EMPRESA B	B1	Jan/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
	B2	Ago/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
AREIA DE BRITAGEM EMPRESA C	C1	Jan/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
	C2	Ago/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
AREIA DE BRITAGEM EMPRESA D	D1	Jan/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
	D2	Ago/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
AREIA DE BRITAGEM EMPRESA E	E1	Jan/2008	45	3 embalagens – 15 kg.
	E2	Ago/2008	45	3 embalagens – 15 kg.

3.2.1.2 Preparação das amostras para os experimentos

Inicialmente as amostras coletadas em campo foram misturadas e homogeneizadas. As amostras para utilização dos ensaios em laboratório foram preparadas com base nas recomendações da Norma Mercosul NM 27 (2000). Foram preparadas em quantidades apropriadas a cada tipo de ensaio. A separação foi feita com um separador mecânico com

doze calhas de igual abertura e/ou misturador mecânico tipo betoneira. Foram utilizados, também, recipientes adequados para introdução e recepção das amostras. Após a separação as amostras foram armazenadas em sacos plásticos, identificadas e guardadas para futura realização dos ensaios. A identificação das amostras foi feita com letras maiúsculas, números e letras minúsculas. Exemplo: “CG-A1a”, onde “CG” significa o tipo do ensaio (Composição Granulométrica), “A” é o tipo ou empresa de fabricação da areia (Areia da empresa A), o número “1” representa a coleta da amostra (Primeira coleta) e “a” representa a amostra (Amostra a).

3.2.1.3 Determinação da composição granulométrica

Para a determinação da composição granulométrica, foram utilizadas amostras das duas coletas de campo. Para cada tipo de areia coletada foram preparadas duas amostras com massas que variam de 1.000 a 1.700 g., totalizando 24 amostras identificadas na Tabela 3.4. Os experimentos foram realizados conforme recomendações da norma ABNT NBR NM 248. O peneiramento foi executado com peneiras da serie normal com tampa e fundo, atendendo às exigências da norma NM ISO 3310. Para processo de peneiramento foi utilizado um agitador mecânico.

Tabela 3.4: Identificação das amostras utilizadas na determinação da Composição Granulométrica.

ENSAIO	COLETA 1		COLETA 2	
	COD. IDENT.	MASSA (g)	COD. IDENT.	MASSA (g)
Composição Granulométrica	CG-AN1a	1290,00	CG-AN2a	1000
	CG-AN1b	1295,00	CG-AN2b	1000
	CG-A1a	1642,00	CG-A2a	1000
	CG-A1b	1524,00	CG-A2b	1000
	CG-B1a	1218,00	CG-B2a	1000
	CG-B1b	1182,00	CG-B2b	1000
	CG-C1a	1010,00	CG-C2a	1000
	CG-C1b	1162,00	CG-C2b	1000
	CG-D1a	1286,00	CG-D2a	1000
	CG-D1b	1402,00	CG-D2b	1000
	CG-E1a	1152,00	CG-E2a	1000
	CG-E1b	1004,00	CG-E2b	1000

3.2.1.4 Determinação da massa unitária e volume de vazios

Foram preparadas amostras com as areias das duas coletas. Inicialmente as areias das duas coletas foram misturadas e homogeneizadas. Após a homogeneização foram preparadas 3 amostras de cada tipo de areia, com massa de aproximadamente 15 kg cada, totalizando 18 amostras identificadas na Tabela 3.5. O ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da norma NM 45:2006 – Método C, empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto.

Tabela 3.5: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Massa Unitária e Volume de Vazios.

ENSAIO	COLETA 1 e 2 – HOMOGENEIZADAS	
	COD. IDENT.	MASSA (g)
Massa Unitária e Volume de Vazios	MU-ANa	15260
	MU-ANb	14825
	MU-ANc	15220
	MU-Aa	14295
	MU-Ab	14425
	MU-Ac	14590
	MU-Ba	14870
	MU-Bb	14960
	MU-Bc	14810
	MU-Ca	12660
	MU-Cb	12990
	MU-Cc	12640
	MU-Da	15635
	MU-Db	15630
	MU-Dc	15570
	MU-Ea	14815
	MU-Eb	15860
	MU-Ec	15070

3.2.1.5 Determinação da massa específica

Assim como no item anterior, foram utilizadas as areias das duas coletas homogeneizadas. Para cada tipo de areia foram preparadas três amostras com massa de $500 \pm 0,1g$, totalizando 18 amostras identificadas na Tabela 3.6. Os experimentos foram realizados de acordo com as recomendações da norma NM 52 (2002).

Tabela 3.6: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Massa Específica

ENSAIO	COLETA 1 e 2 - HOMOGENEIZADAS	
	COD. IDENT.	MASSA (g)
Massa Específica	ME-AN1a	500
	ME-AN1b	500
	ME-AN1c	500
	ME-A1a	500
	ME-A1b	500
	ME-A1c	500
	ME-B1a	500
	ME-B1b	500
	ME-B1c	500
	ME-C1a	500
	ME-C1b	500
	ME-C1c	500
	ME-D1a	500
	ME-D1b	500
	ME-D1c	500
	ME-E1a	500
	ME-E1b	500
	ME-E1c	500

3.2.1.6 Determinação do teor de material pulverulento

Para a realização deste ensaio foram utilizadas as areias das duas coletas de campo. Foram preparadas duas amostras de cada tipo de areia de cada coleta, com massa de 500 g. cada, totalizando 24 amostras identificadas na Tabela 3.7. Os experimentos foram realizados de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR NM 46.

Tabela 3.7: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da determinação do material pulverulento.

ENSAIO	COLETA 1		COLETA 2	
	COD. IDENT.	MASSA (g)	COD. IDENT.	MASSA (g)
Material Pulverulento	MP-AN1a	500,00	MP-AN2a	500
	MP-AN1b	500,00	MP-AN2b	500
	MP-A1a	500,00	MP-A2a	500
	MP-A1b	500,00	MP-A2b	500
	MP-B1a	500,00	MP-B2a	500
	MP-B1b	500,00	MP-B2b	500
	MP-C1a	500,00	MP-C2a	500
	MP-C1b	500,00	MP-C2b	500
	MP-D1a	500,00	MP-D2a	500
	MP-D1b	500,00	MP-D2b	500
	MP-E1a	500,00	MP-E2a	500
	MP-E1b	500,00	MP-E2b	500

3.2.1.7 Determinação do Inchamento

Foram utilizadas as areias homogeneizadas das duas coletas. Após a homogeneização foram preparadas seis amostras, uma para cada tipo de areia com massa de aproximadamente 30.000 g., identificadas na Tabela 3.8. Os experimentos foram realizados de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR 6467:2006.

Os valores do coeficiente de inchamento médio e do teor de umidade crítica foram obtidos através de determinação gráfica do coeficiente de inchamento (V_h/V_s) em função do teor de umidade (Tu) (Figura 3.1)

Tabela 3.8: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da determinação do Inchamento.

ENSAIO	COLETA 1 e 2 - HOMOGENEIZADAS	
	COD. IDENT.	MASSA (g)
Inchamento	IN-AN	30000
	IN-A1	30000
	IN-B1	30000
	IN-C1	30000
	IN-D1	30000
	IN-E1	30000

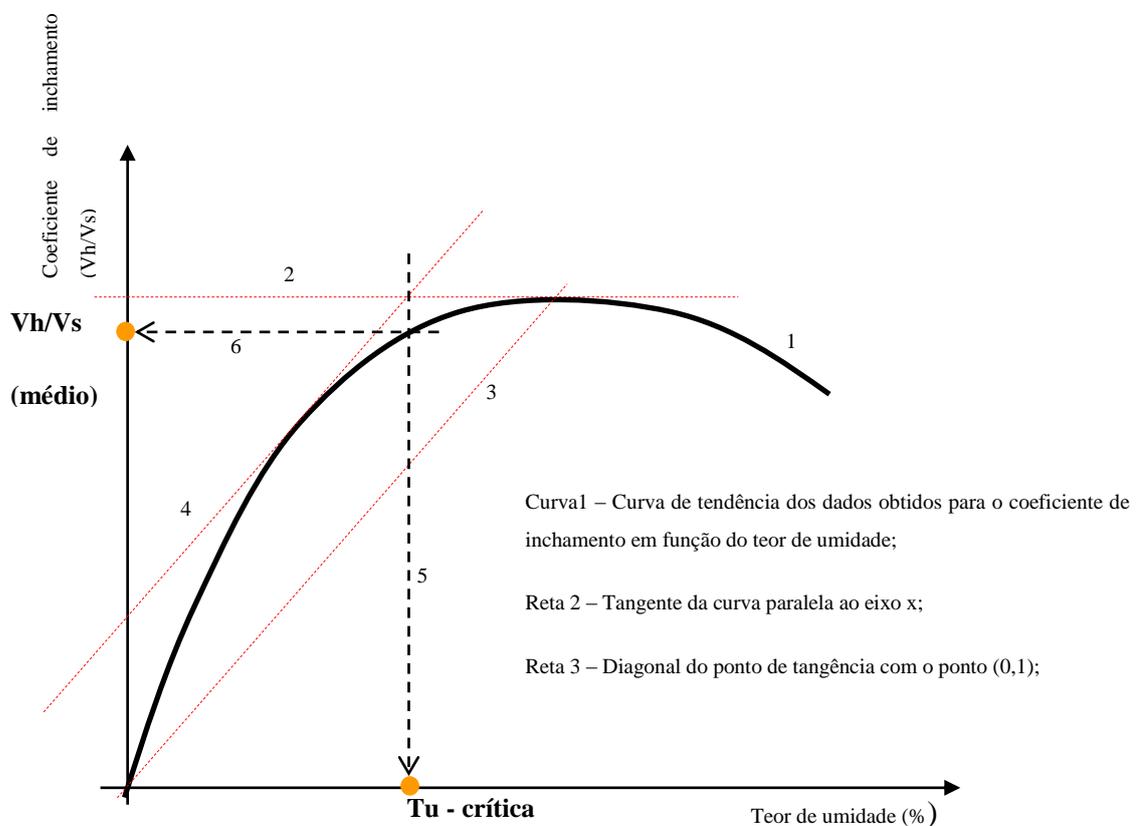


Figura 3.1: Gráfico para determinação do coeficiente de inchamento médio (V_h/V_s) e umidade crítica (h)

3.2.1.8 Determinação da absorção de água

A partir da homogeneização das duas coletas foram preparadas 3 amostras de cada tipo de areia, com massa de 1000g., totalizando 18 amostras identificadas na Tabela 3.9. Os experimentos foram realizados de acordo com as recomendações da NM 30.

Tabela 3.9: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Absorção de Água

ENSAIO	AMOSTRA 1	
	COD. IDENT.	MASSA (g)
Absorção de Água	AA-AN1a	1000
	AA-AN1b	1000
	AA-AN1c	1000
	AA-A1a	1000
	AA-A1b	1000
	AA-A1c	1000
	AA-B1a	1000
	AA-B1b	1000
	AA-B1c	1000
	AA-C1a	1000
	AA-C1b	1000
	AA-C1c	1000
	AA-D1a	1000
	AA-D1b	1000
	AA-D1c	1000
	AA-E1a	1000
	AA-E1b	1000
	AA-E1c	1000

3.2.1.9 Determinação da forma e textura superficial

As amostras foram preparadas a partir das areias separadas durante o ensaio da composição granulométrica das areias das duas coletas. Para cada tipo de areia foram separados, aproximadamente, 200 grãos com dimensões passantes na série de peneiras especificadas na norma NM ISO 3310. A quantidade de grãos para cada fração dimensional foi determinada de acordo com as recomendações da norma NBR 7809. Em todas as frações dimensionais foram analisados 1200 grãos divididos em 49 grupos, identificados na Tabela 3.10.

Os grãos foram analisados e dimensionados em programa de computador SigmaScan Pro5 a partir de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) Shimadzu SSX-550. Desse experimento foram obtidas as dimensões lineares e de superfície, a partir das quais foi possível, com o auxílio do programa de computador Microsoft Excel, obter os

parâmetros indicativos de forma, índice de forma e esfericidade dos grãos. As imagens obtidas com a MEV possibilitaram, também, a verificação da forma geométrica e a textura dos grãos.

Tabela 3.10: Identificação das amostras utilizadas no ensaio da Forma.

AREIAS		FAIXA GRANULOMÉTRICA / AMOSTRAS						
		2,36 -4,36	1,18-2,36	0,6-1,18	0,3-0,6	0,15-0,3	0,075-0,15	<0,075
AN	COD. IDENT.	F-AN1	F-AN2	F-AN3	F-AN4	F-AN5	F-AN6	F-AN7
	N. DE GRÃOS	3	6	36	116	35	4	0
A	COD. IDENT.	F-A1	F-A2	F-A2	F-A3	F-A4	F-A5	F-A6
	N. DE GRÃOS	25	52	48	27	17	11	20
B	COD. IDENT.	F-B1	F-B2	F-B3	F-B4	F-B5	F-B6	F-B7
	N. DE GRÃOS	39	38	42	28	20	16	17
C	COD. IDENT.	F-C1	F-C2	F-C3	F-C4	F-C5	F-C6	F-C7
	N. DE GRÃOS	10	43	47	32	26	19	23
D	COD. IDENT.	F-D1	F-D2	F-D3	F-D4	F-D5	F-D6	F-D7
	N. DE GRÃOS	60	43	45	23	11	6	12
E	COD. IDENT.	F-E1	F-E2	F-E3	F-E4	F-E5	F-E6	F-E7
	N. DE GRÃOS	32	27	34	31	27	20	29

3.2.2 Etapa 2 – Verificação das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido a partir da elaboração de diagramas de dosagem

Esta etapa tem por objetivo estabelecer o proporcionamento dos materiais constituintes, de forma a avaliar as propriedades do concreto produzido com as areias de britagem, nos estados fresco e endurecido conforme descrito na revisão da literatura, capítulo 2, item 2.6.

Para tanto foram realizados experimentos que determinaram o teor de argamassa ideal através de ensaios de abatimento de tronco de cone (*slump test*) (NBR NM 67, 1998), testes para a determinação da resistência à compressão axial (NBR 5739, 1998) e módulo de elasticidade (NBR 8522, 2003) com três misturas: mistura utilizando areia natural (AN), mistura com areia de britagem da empresa A e mistura com areia de britagem da empresa D. A composição das misturas esta descrita na tabela 3.11.

Tabela 3.11: Misturas analisadas para determinação das propriedades do concreto.

MISTURA	MATERIAIS SECOS		
	CIMENTO	AGREGADO GRAÚDO	AGREGADO MIÚDO
AN	CP IV-32 Votoran	BRITA 1	AREIA NATURAL - AN
A	CP IV-32 Votoran	BRITA 1	AREIA DE BRITAGEM - A
D	CP IV-32 Votoran	BRITA 1	AREIA DE BRITAGEM - D

O procedimento teve por base o método do EPUSP/ IPT (HELENE e TERZIAN, 1992) sem materiais finos e aditivos, ou seja, foram utilizados apenas cimento, agregados e água. O método foi escolhido por ser o mais utilizado em todo o país, por ser de fácil realização e, principalmente, por possibilitar a construção experimental de um diagrama de dosagem que correlaciona a resistência à compressão, a relação água/cimento, a proporção de materiais secos e o consumo de cimento por metro cúbico de concreto.

3.2.2.1 Materiais constituintes

I. Cimento: O cimento escolhido para a realização dos ensaios foi o cimento portland CP IV 32 da Votoran, por ser o cimento atualmente mais utilizado na fabricação dos elementos de concreto estrutural. As características físicas, químicas e mecânicas foram fornecidas pelo fabricante.

II. Agregado graúdo: Como agregado graúdo foi utilizado brita de origem basáltica tipo 1, com dimensão máxima característica de 19 mm, fornecida pela empresa D. As caracterizações, geológica, petrológica, mineralógica e as propriedades físicas foram determinadas em pesquisa intitulada *Agregado*, realizada pelos professores Givanildo Garlet e Pedro Reginato da Universidade de Caxias do Sul em 2007, entretanto, considerando que a pesquisa citada foi realizada a algum tempo, e que os processos de fabricação podem ser alterados, algumas características, como granulometria, dimensão máxima característica, módulo de finura, índice de forma e massa unitária foram novamente determinadas.

III. Agregado miúdo: foram utilizadas as areias objeto de pesquisa deste trabalho, areia natural AN e as areias de britagem das empresas A e D. As areias das empresas B, C e E não foram utilizadas por não atenderem as recomendações da norma NBR 7211:1983 “Agregado para Concreto”.

IV. Água: A água utilizada foi fornecida pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul, disponível no LABTEC.

3.2.2.2 Determinação do teor de argamassa ideal

Partindo do princípio de que são necessários três pontos para que se possa montar um diagrama de dosagem, conforme apresentado na Figura 2.5 do Capítulo 2 foram executados três traços (proporção entre materiais secos) misturados em betoneira para cada mistura de concreto (Tabela 3.11). Conforme recomenda o método partiu-se do traço 1:5 (uma parte de cimento para cinco partes de agregados secos em massa). Com base nas informações obtidas

com a formulação do traço 1:5 formulou-se mais dois traços definidos com as proporções 1:3,5 (traço rico em cimento) e 1:6,5 (traço pobre em cimento), totalizando 12 determinações, identificadas na tabela 3.12.

Tabela 3.12: Identificação dos ensaios para determinação do teor de argamassa ideal.

CÓDIGO DO ENSAIO	TRAÇO EM MASSA (1: m)	CÓDIGO DO ENSAIO	TRAÇO EM MASSA (1: m)	CÓDIGO DO ENSAIO	TRAÇO EM MASSA (1: m)
A N-N	1:5	A N-R	1:3,5	A N-P	1:6,5
A-N	1:5	A-R	1:3,5	A-P	1:6,5
D-N	1:5	D-R	1:3,5	D-P	1:6,5

Legenda: AN – Areia Natural, A – Areia da empresa A, D – Areia da empresa D, N – Traço Normal, R – Traço Rico, P – Traço Pobre.

A realização dos ensaios está condicionada a uma série de informações consideradas básicas com a capacidade que o concreto deve ter para ser lançado e adensado adequadamente no interior das formas dos elementos estruturais. A Tabela 3.13 apresenta informações básicas utilizadas na realização dos ensaios.

Tabela 3.13: Informações básicas utilizadas na realização dos ensaios de dosagem.

1	Descrição do ensaio
2	Especificação da classe do concreto – NBR 8953
3	Condição das armaduras – NBR 6118
4	Especificação da dimensão máxima característica do agregado graúdo
5	Definição dos elementos estruturais a serem concretados
6	Determinação da consistência do concreto (medida através do ensaio de abatimento de tronco de cone (<i>slump test</i>))
7	Especificação do cimento
8	Determinação da resistência de dosagem (NBR 6118)
9	Determinação do edsvio padrão de dosagem a 28 dias, produção em massa com controle rigoroso da umidade dos agregados - NBR 12655
10	Determinação das idades de ruptura dos corpos-de-prova
11	Determinação do traço (1:m) para a primeira mistura experimental (kg/kg)

A determinação da quantidade adequada de argamassa foi feita através de tentativas e observações práticas. Para cada adição de materiais executou-se um ensaio de abatimento de tronco de cone, onde se verificou o *slump* e a consistência do concreto (Figuras 3.2 e 3.3).



Figura 3.2 – Ensaio para medição de *slump* e Figura 3.3 – Ensaio para verificação da consistência.

Foram determinados os teores de argamassa e a relação água/cimento para três misturas de concreto (Tabela 3.11), onde em cada ensaio manteve-se constante a quantidade de agregado graúdo (30 kg) com acréscimos proporcionais de cimento e areia, sempre mantendo-se o traço de 1:5, conforme Tabela 2.1 do Capítulo 2. Os outros traços (1:3,5 e 1:6,5) foram formulados mantendo-se fixo o teor de argamassa (α) e o abatimento do tronco de cone ($slump = 60 \pm 10\text{mm}$), determinados para o traço 1:5.

Com os teores de argamassa definidos foi calculado o consumo de materiais necessário para a moldagem de corpos-de-prova para a realização dos ensaios para a verificação da resistência à compressão axial e do módulo de elasticidade.

3.2.2.3 Determinação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Obtidos os traços individuais e definidas as quantidades de materiais, realizaram-se misturas para a confecção de corpos-de-prova cilíndricos para ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade, com previsão de rompimento às idades de 3, 7 e 28 dias. Os corpos – de-prova foram moldados de acordo com as recomendações da norma NBR 5738/1996. Para cada tipo de mistura foram moldados e preparados 36 corpos-de-prova, sendo 24 para ensaios de compressão axial e 12 para ensaios de módulo de elasticidade, totalizando 108 corpos-de-prova, distribuídos conforme Tabela 3.14.

Tabela 3.14: Distribuição dos corpos-de-prova.

MISTURA	TRAÇOS (1:m) em massa			TOTAL
	1:3,5	1:5	1:6,5	
AN	12	12	12	36
A	12	12	12	36
D	12	12	12	36
TOTAL	36	36	36	108

Legenda: AN – Areia Natural, A – Areia da empresa A, D – Areia da empresa D

A moldagem foi executada em moldes cilíndricos de aço identificados com uma etiqueta (Figura 3.4). Após 24 horas os corpos-de-prova foram desmoldados, a etiqueta de identificação retirada. Uma nova identificação, contendo um código e a datas de moldagem e rompimento, foi feita com tinta especial à prova de umidade. O código de identificação foi feito conforme Tabelas 3.15 a 3.20. Após a identificação foram encaminhados à câmara úmida para cura.

<p>MESTRADO PROF. EDISON</p> <p>MISTURA: _____</p>
--

Figura 3.4: Etiqueta de identificação inicial dos corpos-de-prova

Tabela 3.15: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura AN, para ensaios de compressão axial.

MISTURA AN – ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL					
TRAÇO 1:3,5 (R)		TRAÇO 1:5 (N)		TRAÇO 1:6,5 (P)	
Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)
AN-R1	3	AN-N1	3	AN-P1	3
AN-R2	3	AN-N2	3	AN-P2	3
AN-R3	3	AN-N3	3	AN-P3	3
AN-R4	7	AN-N4	7	AN-P4	7
AN-R5	7	AN-N5	7	AN-P5	7
AN-R6	7	AN-N6	7	AN-P6	7
AN-R7	28	AN-N7	28	AN-P7	28
AN-R8	28	AN-N8	28	AN-P8	28
AN-R9	28	AN-N9	28	AN-P9	28

Tabela 3.16: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura AN, para ensaios de módulo de elasticidade.

MISTURA AN – ENSAIOS DE DE MÓDULO DE ELASTICIDADE					
TRAÇO 1:3,5 (R)		TRAÇO 1:5 (N)		TRAÇO 1:6,5 (P)	
Código	Ruptura (dias)	Código	Código	Ruptura (dias)	Código
AN-R10	28	AN-N10	+ de 28	AN-P10	+ de 28
AN-R11	28	AN-N11	+ de 28	AN-P11	+ de 28
AN-R12	28	AN-N12	+ de 28	AN-P12	+ de 28

Tabela 3.17: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura A, para ensaios de compressão axial.

MISTURA A – ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL					
TRAÇO 1:3,5 (R)		TRAÇO 1:5 (N)		TRAÇO 1:6,5 (P)	
Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)
A-R1	3	A-N1	3	A-P1	3
A-R2	3	A-N2	3	A-P2	3
A-R3	3	A-N3	3	A-P3	3
A-R4	7	A-N4	7	A-P4	7
A-R5	7	A-N5	7	A-P5	7
A-R6	7	A-N6	7	A-P6	7
A-R7	28	A-N7	28	A-P7	28
A-R8	28	A-N8	28	A-P8	28
A-R9	28	A-N9	28	A-P9	28

Tabela 3.18: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura A, para ensaios de módulo de elasticidade.

MISTURA A – ENSAIOS DE DE MÓDULO DE ELASTICIDADE					
TRAÇO 1:3,5 (R)		TRAÇO 1:5 (N)		TRAÇO 1:6,5 (P)	
Código	Ruptura (dias)	Código	Código	Ruptura (dias)	Código
A-R10	+ de 28	A-N10	+ de 28	A-P10	+ de 28
A-R11	+ de 28	A-N11	+ de 28	A-P11	+ de 28
A-R12	+ de 28	A-N12	+ de 28	A-P12	+ de 28

Tabela 3.18: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura D, para ensaios de compressão axial.

MISTURA A – ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL					
TRAÇO 1:3,5 (R)		TRAÇO 1:5 (N)		TRAÇO 1:6,5 (P)	
Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)
D-R1	3	D-N1	3	D-P1	3
D-R2	3	D-N2	3	D-P2	3
D-R3	3	D-N3	3	D-P3	3
D-R4	7	D-N4	7	D-P4	7
D-R5	7	D-N5	7	D-P5	7
D-R6	7	D-N6	7	D-P6	7
D-R7	28	D-N7	28	D-P7	28
D-R8	28	D-N8	28	D-P8	28
D-R9	28	D-N9	28	D-P9	28

Tabela 3.20: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para a mistura D, para ensaios de módulo de elasticidade.

MISTURA A – ENSAIOS DE DE MÓDULO DE ELASTICIDADE					
TRAÇO 1:3,5 (R)		TRAÇO 1:5 (N)		TRAÇO 1:6,5 (P)	
Código	Ruptura (dias)	Código	Código	Ruptura (dias)	Código
D-R10	+ de 28	D-N10	+ de 28	D-P10	+ de 28
D-R11	+ de 28	D-N11	+ de 28	D-P11	+ de 28
D-R12	+ de 28	D-N12	+ de 28	D-P12	+ de 28

Atingidos os tempos de cura, os corpos-de-prova foram rompidos para a determinação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados no LABTEC em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC – PC 200 I (certificado de calibração – 2170/09 em 26/05/2009), de acordo com as recomendações da norma NBR 5739. Com os resultados de resistência à compressão axial foram montados, através de estudos teóricos, gráficos e equações que representam as leis de comportamento do concreto, citadas no Capítulo 2, seção 2.1.8.2, obtendo-se os diagramas de dosagem especificados no método Edusp/IPT. Para tanto foram utilizados os softwares Microsoft Excel e Origin.

Após a realização dos ensaios de compressão axial, iniciaram-se os ensaios para determinação do módulo de elasticidade, entretanto, percebeu-se que se estava realizando ensaios em corpos de prova de diferentes resistências, o que inviabiliza a comparação entre os concretos produzidos com as diferentes areias, então os ensaios foram suspensos.

3.2.3 Etapa 3 – Verificação Experimental dos Resultados e Determinação do Módulo de Elasticidade

Essa etapa tem por objetivo verificar se os diagramas de dosagem elaborados na etapa 2 podem ser utilizados para a determinação da composição de materiais para resistências desejadas. Nessa etapa também foram verificados os módulos de elasticidade. Para tanto foram elaborados traços a partir de uma resistência à compressão axial de projeto de 25 MPa. Com base nesses novos traços foram produzidos concretos e moldados 12 corpos-de-prova para cada tipo de mistura. A moldagem foi executada em moldes cilíndricos de aço identificados com uma etiqueta (Figura 3.3). Após 24 horas os corpos-de-prova foram desmoldados, a etiqueta de identificação retirada. Uma nova identificação, contendo um código e a datas de moldagem e rompimento foi feita com tinta especial à prova de umidade. O código de identificação foi feito conforme tabela 3.21. Após a identificação foram encaminhados à câmara úmida para cura.

Tabela 3.21: Identificação dos corpos-de-prova elaborados para ensaios de compressão axial e Módulo de Elasticidade.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE					
AREIA NATURAL (A N)		AREIA A		AREIA D	
Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)	Código	Ruptura (dias)
AN1	3	A1	3	D1	3
AN2	3	A2	3	D2	3
AN3	3	A3	3	D3	3
AN4	7	A4	7	D4	7
AN5	7	A5	7	D5	7
AN6	7	A6	7	D6	7
AN7	28	A7	28	D7	28
AN8	28	A8	28	D8	28
AN9	28	A9	28	D9	28
AN10	28 - ME	A10	28 - ME	D10	28 - ME
AN11	28 - ME	A11	28 - ME	D11	28 - ME
AN12	28 - ME	A12	28 - ME	D12	28 - ME

Atingidos os tempos de cura, os corpos-de-prova foram rompidos para a determinação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados no LABTEC em uma máquina universal de ensaio marca EMIC – PC 200 I (certificado de calibração – 2170/09 em 26/05/2009), de acordo com as recomendações da norma NBR 5739, “Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio”.

Os resultados foram tabulados com o auxílio do programa de computador Microsoft Excel, avaliados e comparados com os cálculos teóricos.

3.2.4 Avaliação de Custos

Com a finalidade de verificar a viabilidade econômica da utilização da areia de britagem foram determinados, com base nos diagramas de dosagem, as quantidades e os custos dos materiais necessários para a produção de um metro cúbico de concreto para três resistências características (20 MPa, 25 MPa e 30 MPa). A análise foi feita para as três misturas em estudo. Os valores do cimento e areia natural foram obtidos no mercado de Caxias do Sul. O valor da brita e os valores das areias de britagem foram fornecidos pelas empresas produtoras. O valor da água foi fornecido pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul (SAMAE). Todos os preços foram pesquisados durante o mês de novembro de 2009.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Tratando-se de uma pesquisa que pretende investigar a possibilidade de substituição de um material por outro e que todos os resultados obtidos em ensaios de laboratório são de caráter numérico, os registros estão apresentados em forma de tabelas e gráficos. A análise dos resultados tem como foco a comparação entre resultados obtidos com a areia natural e com as areias de britagem, tendo como parâmetro as recomendações da bibliografia e das normas técnicas.

A apresentação e análise dos resultados serão feitas em três etapas, conforme o programa experimental descrito no Capítulo 3, item 3.2.

4.2 Etapa 1 - Caracterização das Areias

Os resultados da caracterização das areias estão apresentados em tabelas e gráficos específicos para cada tipo de característica analisada. No final são apresentados tabelas e gráficos comparativos, onde são analisados os resultados.

4.2.1 Composição granulométrica

Conforme descrito no Capítulo 3, foram realizados ensaios com amostras coletadas em dois momentos. Nos ensaios foram obtidas a distribuição granulométrica, a dimensão máxima característica e o módulo de finura.

Os resultados da distribuição granulométrica estão registrados nas Tabelas 4.1 e representados nas Figuras 4.1, e 4.2. Os valores estão expressos em porcentagens individuais retidas e acumuladas no conjunto de peneiras da série normal especificadas na norma NM ISO 3310, comparados com os limites normativos especificados na norma NBR 7211 (2004). O módulo de finura e a dimensão granulométrica das areias estão apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3 e representados nas Figuras 4.3 a 4.6.

Tabela 4.1: Resumo dos resultados dos ensaios com as amostras das duas coletas, comparados com as especificações da norma. Precisão 0,1% em massa.

PENEIRA ABERTURA (mm)	POCENTAGEM EM MASSA RETIDA ACUMULADA															
	LIMITES NORMATIVOS				AMOSTRA 1						AMOSTRA 2					
	LIMITE INFERIOR		LIMITE SUPERIOR		AN	A	B	C	D	E	AN2	A2	B2	C2	D2	E2
	ZU	ZO	ZU	ZO												
9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,75	0	0	5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,36	0	10	20	25	1,2	28,1	17	3,9	27,6	20,6	0,7	12,8	19,5	3,9	32,4	15,8
1,18	5	20	30	50	4,3	57,7	35,2	28,6	49,9	38	1,8	39,1	38,4	28,6	52,6	29,4
0,6	15	35	55	70	22,3	77,5	58,9	55,2	74,3	58,2	11,7	63	59,3	55,2	73,3	46,7
0,3	50	65	85	95	80,9	86,4	74,3	69,7	85,6	71,4	62	76,5	73,5	69,7	85,2	61,9
0,15	85	90	95	100	98,7	91,2	85,5	80,6	91	82,1	96,8	84,7	83,4	80,6	90,6	75,5
0,075					99,8	95,3	94,9	89,4	94,4	92,3	99,5	90,2	91,5	89,4	93,4	85,6
FUNDO					100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Observação: Os números em vermelho mostram que os valores estão fora dos limites normativos.

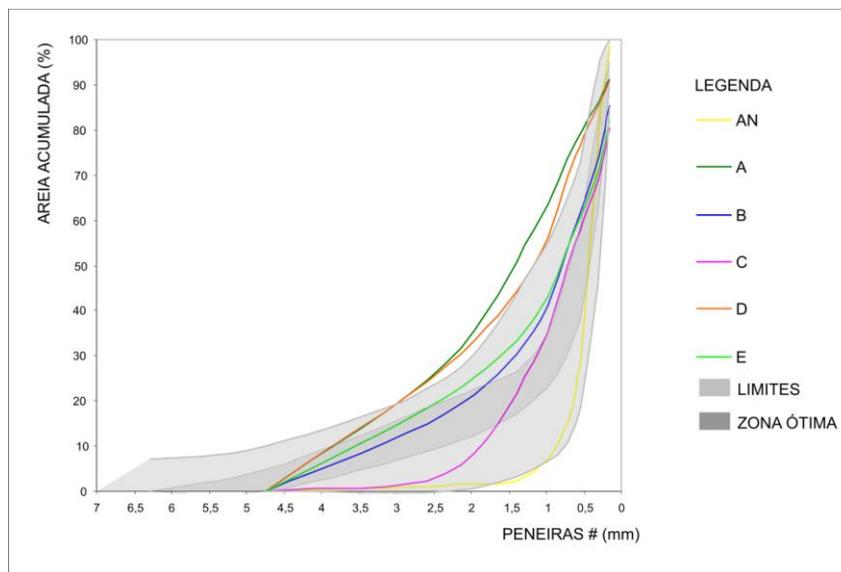


Figura 4.1: Curvas granulométricas da primeira coleta.

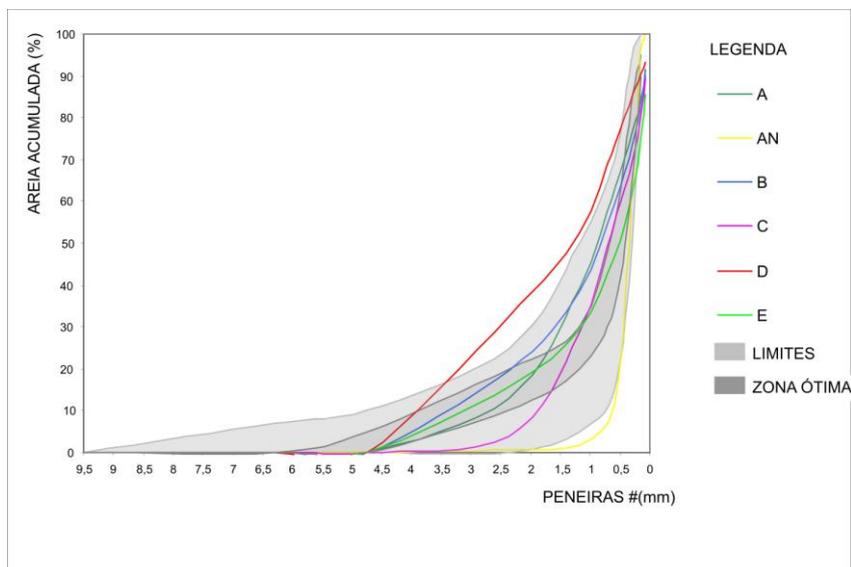


Figura 4.2: Curvas granulométricas da segunda coleta.

Tabela 4.2: Dimensão máxima característica e módulo de finura com amostras da primeira coleta. Precisão 0,1% em massa.

CARACTERÍSTICAS	UN	NORMAS BIBLIOG.	AREIAS					
			AN	A	B	C	D	E
Dim. máxima carac.	mm	4,80	2,36	4,75	4,75	2,36	4,75	4,75
Módulo de finura	adimensional	1,55 a 3,50	2,07	3,39	2,71	2,38	3,28	2,70

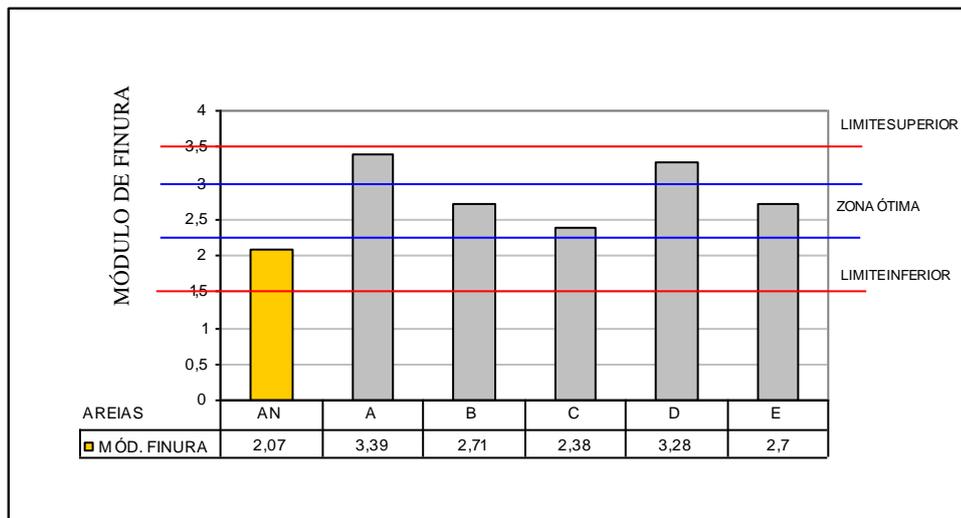


Figura 4.3: Resultados comparativos dos módulos de finura com amostras da primeira coleta.

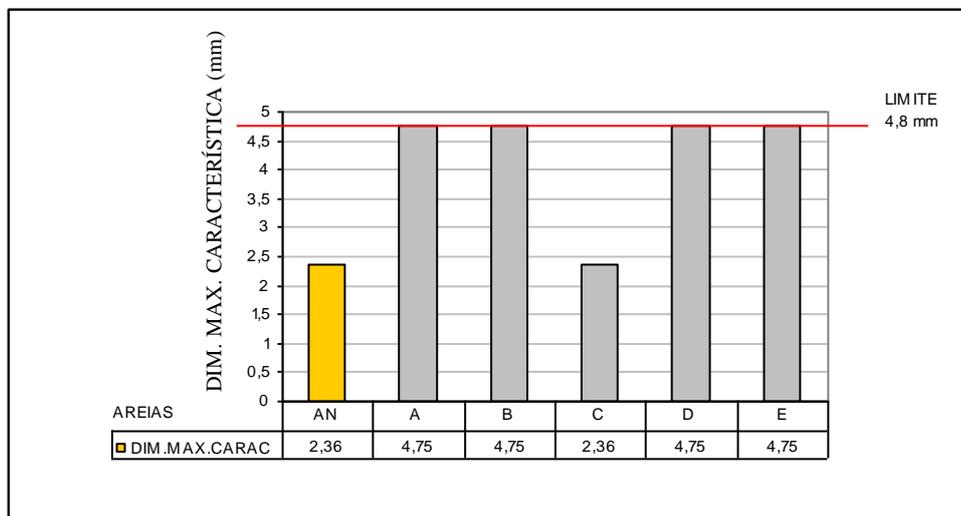


Figura 4.4: Resultados comparativos das dimensões máximas características com amostras da primeira coleta.

Tabela 4.3: Dimensão máxima característica e módulo de finura com amostras da segunda coleta. – Precisão 0,1% em massa.

CARACTERÍSTICAS	UN	NORMAS BIBLIOG.	AREIAS					
			AN	A	B	C	D	E
Dim. máxima carac	mm	4,80	2,36	4,75	4,75	2,36	4,75	4,75
Módulo de finura	adimensional	1,55 a 3,50	1,73	2,76	2,74	2,25	3,34	2,29

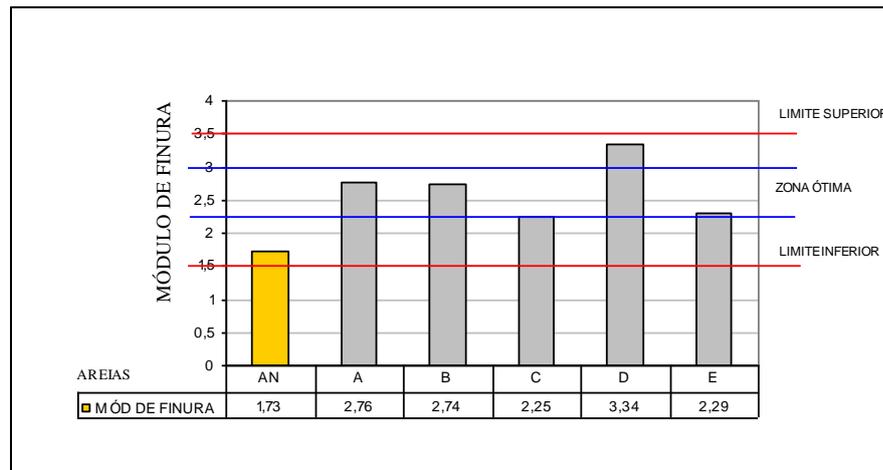


Figura 4.5: Resultados comparativos dos módulos de finura com amostras da segunda coleta.

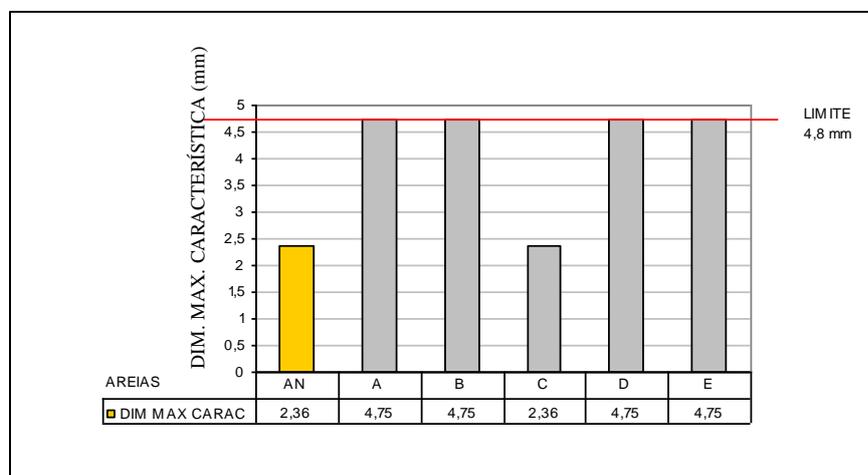


Figura 4.6: Resultados comparativos das dimensões máximas características com amostras da segunda coleta.

Analisando-se a composição granulométrica, percebe-se que:

- I. Não existem diferenças significativas entre os resultados das duas coletas, com exceção da areia A que apresentou resultados melhores com as amostras da segunda coleta.
- II. As areias A, B, C e E apresentaram uma granulometria adequada, segundo as recomendações da norma NBR 7211:2004.
- III. A curva da areia D está acima do limite superior entre as frações 0,6 e 2,36 mm em ambas as coletas, caracterizando uma areia grossa o que em princípio excluiria esta areia do processo de fabricação do concreto. Entretanto, a norma NBR 7211 item 5.1, permite o uso desde que o módulo de finura e dimensão máxima característica estejam dentro dos limites normativos, e que sejam realizados ensaios de laboratório que comprovem a sua eficácia.

- IV. A areia natural (AN) apresenta uma curva muito próxima ao limite inferior, o que a caracteriza como uma areia fina, o que se comprova no seu módulo de finura, bem abaixo das areias de britagem.
- V. Nenhuma das areias analisadas apresentou granulometria equilibrada dentro da zona ótima de utilização, entretanto todas as areias apresentam valores que estão dentro dos limites normativos, o que as qualifica para serem utilizadas na composição do concreto.

4.2.2 Massa Unitária e Índice de Volume de Vazios

Os valores apresentados na Tabela 4.4 e representados nas Figuras 4.7 e 4.8 demonstram que as areias de britagem apresentaram valores de massa unitária dentro dos limites normativos e que são semelhantes com os valores obtidos para a areia AN, com exceção da areia C, que apresentou massa unitária um pouco abaixo dos limites normativos. Os resultados permitem afirmar que substituindo-se a areia natural pela areia de britagem, as propriedades do concreto como, permeabilidade e absorção, não deverão ser alteradas.

Tabela 4.4: Massa unitária e Índice de volume de vazios.

CARACTERÍSTICAS	UN	BIBLIOG.	AREIAS					
			AN	A	B	C	D	E
Massa unitária	kg/m ³	1.300 a 1.750	1.482,30 ± 13,63	1.417,03 ± 8,38	1.460,54 ± 4,28	1.252,78 ± 11,14	1.532,36 ± 2,05	1.496,70 ± 30,38
Índ de vol de vazios	%	Sem referência	41,60 ± 0,50	44,53 ± 0,33	43,05 ± 0,17	49,38 ± 0,45	39,07 ± 0,08	38,29 ± 1,27

Observação: Os valores correspondem a média de três determinações obtidas em quilogramas por metro cúbico com precisão de 0,01 kg/m³. Os valores de índice de volume de vazios correspondem a três determinações obtidas em porcentagem, com precisão de 0,01%.

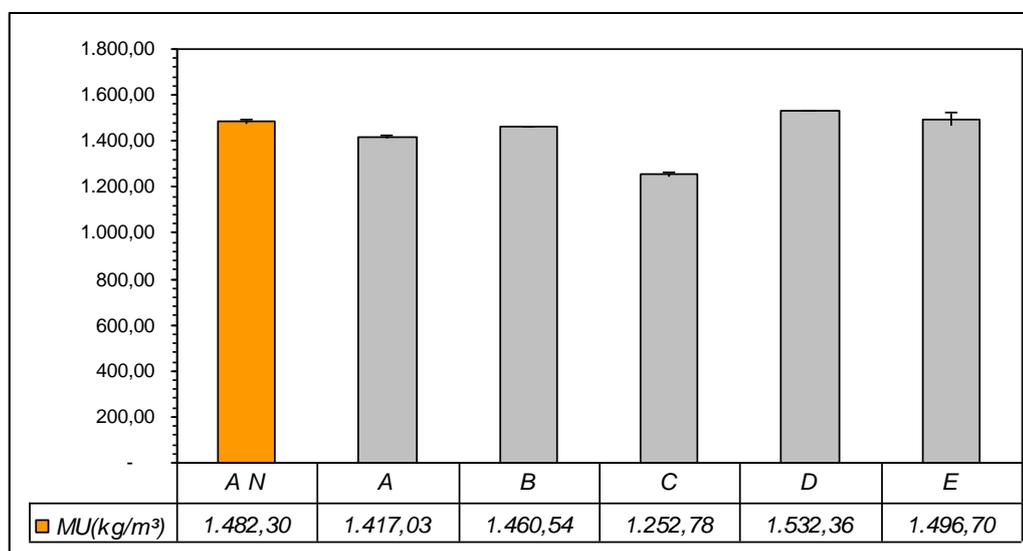


Figura 4.7: Resultados comparativos das massas unitárias (kg/m³).

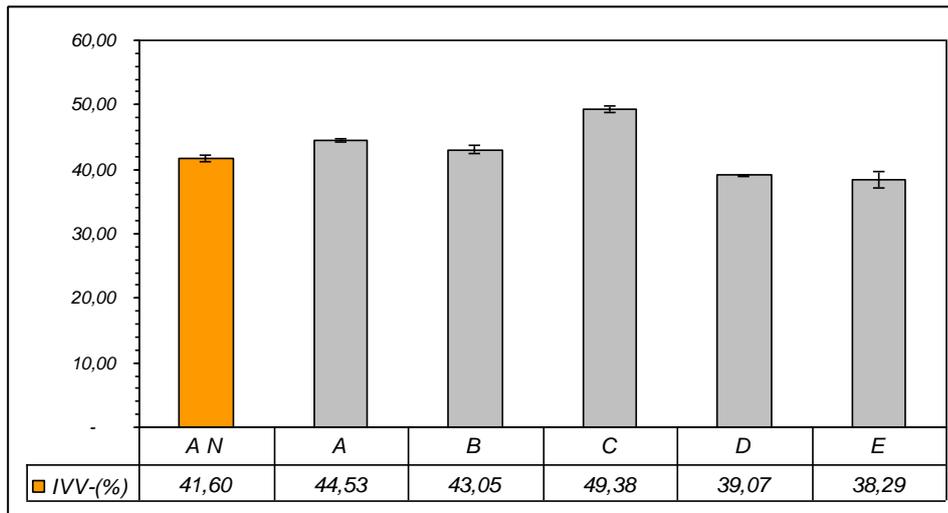


Figura 4.8: Resultados comparativos do índice de volume de vazios (IVV - %).

4.2.3 Massa Específica

Os resultados apresentados na Tabela 4.5 e representados na Figura 4.9 demonstram que tanto a areia natural quanto as areias de britagem apresentam valores de massa específica um pouco abaixo, mas muito próximos dos indicados na bibliografia (MEHTA, 1994), o que indica que não deverá haver diferenças significativas no peso específico do concreto nos estados fresco e endurecido.

Tabela 4.5: Massa específica – Precisão 0,01 g/cm³.

CARACTERÍSTICAS	UN	BIBLIOGRAFIA	AREIAS					
			AN	A	B	C	D	E
Massa Específica	g/cm ³	2,6 a 2,7	2,56 ± 0,02	2,55 ± 0,03	2,55 ± 0,03	2,47 ± 0,03	2,51 ± 0,03	2,43 ± 0,02

Observação: Os resultados foram obtidos através da média aritmética dos valores obtidos em três determinações para todas as areias com precisão de 0,01 g/cm³.

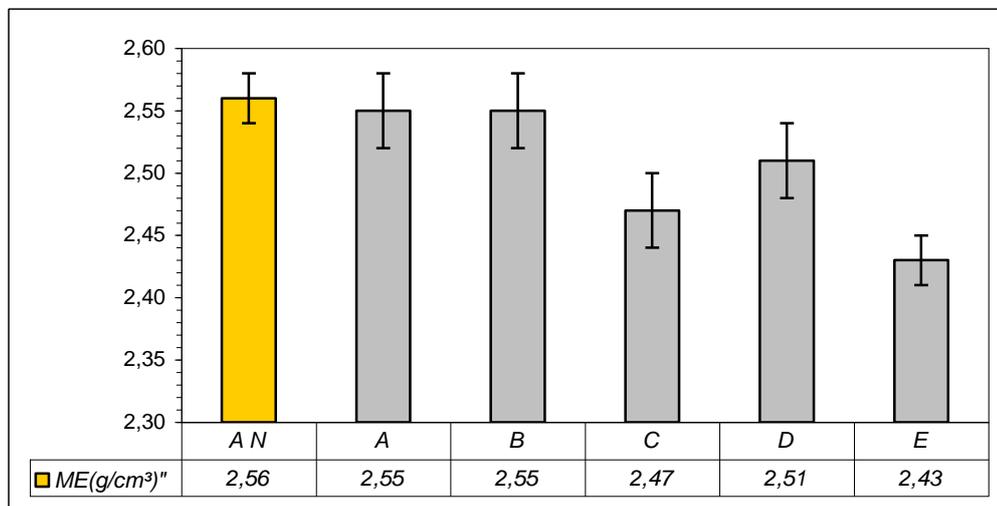


Figura 4.9: Resultados comparativos entre as massas específicas.

4.2.4 Teor de Material Pulverulento

Analisando-se a Tabela 4.6 e as Figuras 4.10 e 4.11 percebe-se que nas duas coletas as areias B, C e E apresentam uma quantidade de material pulverulento acima dos limites recomendados pela norma NBR 7211 (2004). Este fato, em princípio, inviabiliza utilização das areias B, C e E, pois quantidades de pó acima dos recomendados pela norma tendem a reduzir de forma expressiva a trabalhabilidade do concreto, exigindo para correção, um consumo muito alto de água, podendo reduzir drasticamente a resistência do concreto. As diferenças encontradas na quantidade de material pulverulento das areias justificam as diferenças encontradas na composição granulométrica (Tabela 4.1).

Tabela 4.6: Teor de material pulverulento (TMP) com amostras da primeira coleta.
Precisão 0,1g

CARACTERÍSTICAS	UN	NORMAS	AREIAS					
			AN	A	B	C	D	E
TMP – 1ª coleta	%	MP < 12	2,60 ± 0,60	7,60 ± 0,80	17,27 ± 0,40	15,16 ± 0,00	8,00 ± 0,08	15,80 ± 1,00
TMP – 2ª coleta	%	MP < 12	2,65 ± 0,60	12,00 ± 0,20	18,20 ± 0,40	15,80 ± 0,30	10,70 ± 0,80	16,20 ± 0,90

Observações: Os números em vermelho mostram que os valores estão acima dos limites normativos. Os resultados foram definidos através da média aritmética dos valores obtidos em duas determinações para cada tipo de areia, com precisão de 0,1g.

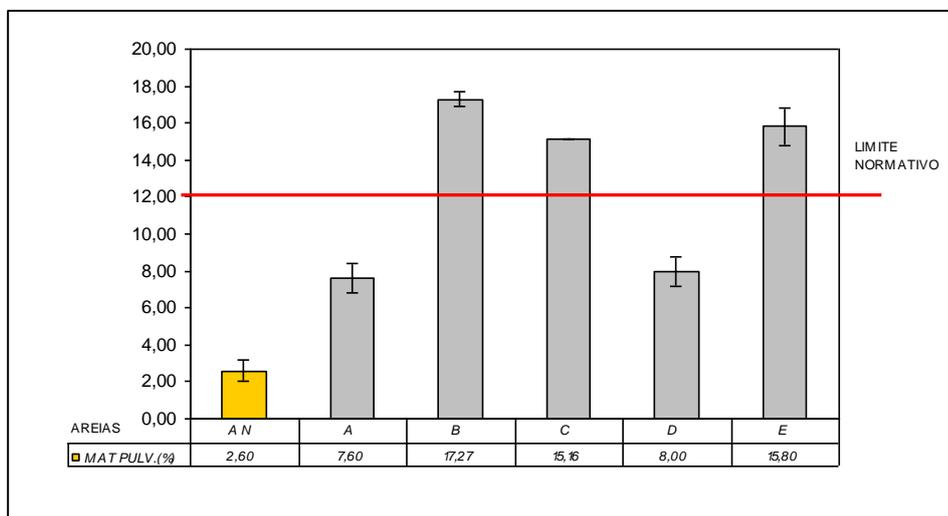


Figura 4.10: Resultados comparativos do teor de material pulverulento encontrado nas areias da primeira coleta.

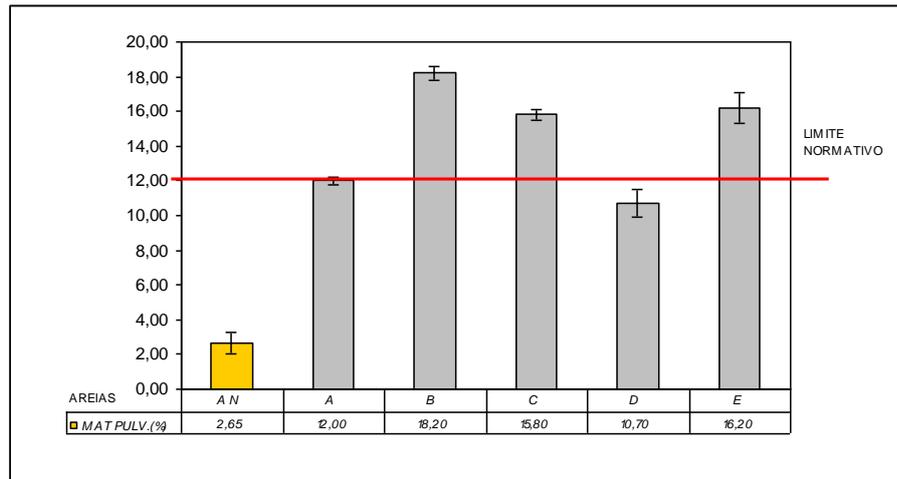


Figura 4.11: Resultados comparativos do teor de material pulverulento encontrado nas areias da segunda coleta.

4.2.5 Absorção de Água

Os resultados apresentados na Tabela 4.7 e representados na Figura 4.12 demonstram que as areias de britagem apresentam índices de absorção de água semelhantes aos da areia natural e dentro dos limites indicados na bibliografia (MEHTA, 1994). Assim esta característica não deverá modificar as características do concreto, uma vez que, o incremento de massa decorrente da absorção de água será semelhante.

Tabela 4.7: Absorção de água

CARACTERÍSTICAS	UN	REF. BIBLIOG.	AREIAS					
			NA	A	B	C	D	E
Absorção de Água	%	1,00 e 2,00	2,01 ± 0,00	1,60 ± 0,12	1,81 ± 0,11	2,02 ± 0,00	2,03 ± 0,00	2,03 ± 0,00

Observação: Os resultados foram obtidos através da média aritmética de duas determinações com precisão de 0,1g.

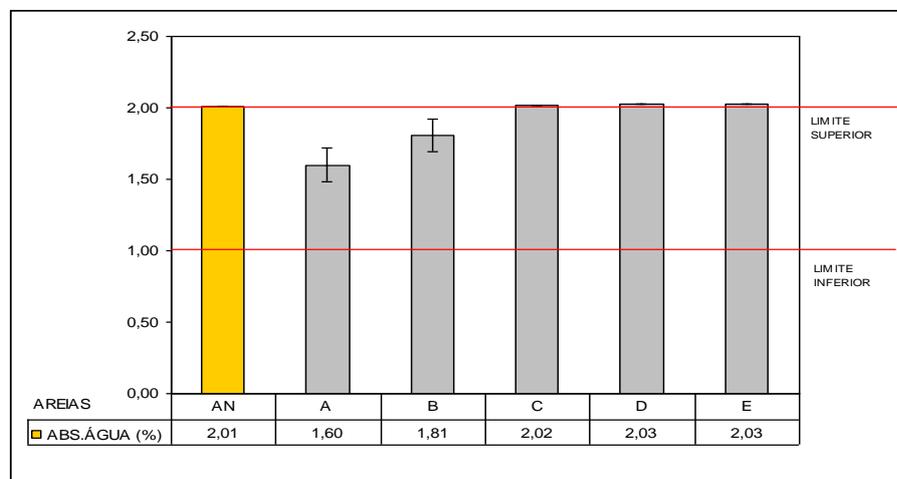


Figura 4.12: Resultados comparativos da absorção de água.

4.2.6 Inchamento

Os resultados apresentados na Tabela 4.8 e representados na Figura 4.13 demonstram que as areias de britagem apresentam valores de umidade maiores dos da areia natural, o que indica que as areias de britagem possuem uma superfície específica maior e um conseqüente volume aparente maior, o que deverá aumentar o volume de material seco. O aumento de volume pode representar um ganho econômico. Entretanto, como as diferenças entre os coeficientes de inchamento são pequenas, o ganho econômico pode ser desconsiderado.

Percebe-se também que existe uma discrepância nos resultados obtidos para a areia B, indicando que deve ter havido algum problema na realização do experimento. O experimento deveria ter sido repetido, entretanto, não o foi por se tratar de um experimento demorado e de pouca utilidade para a pesquisa, uma vez que, nesse momento já se percebeu que a areia B seria descartada na continuidade das pesquisas.

Tabela 4.8: Umidade crítica e coeficiente de inchamento médio.

CARACTERÍSTICAS	UN	REF. BIBLIOG	AREIAS					
			AN	A	B	C	D	E
Umidade crítica	%	4 e 6%	5,12 ± 2,79	8,53 ± 2,79	24,10 ± 2,79	8,65 ± 2,79	9,71 ± 2,79	6,97 ± 2,79
Coef. de incham. médio	adimens.	sem ref	1,374 ± 0,06	1,291 ± 0,06	1,680 ± 0,06	1,455 ± 0,06	1,299 ± 0,06	1,410 ± 0,06

Observação: Os resultados foram obtidos com precisão de 0,1%

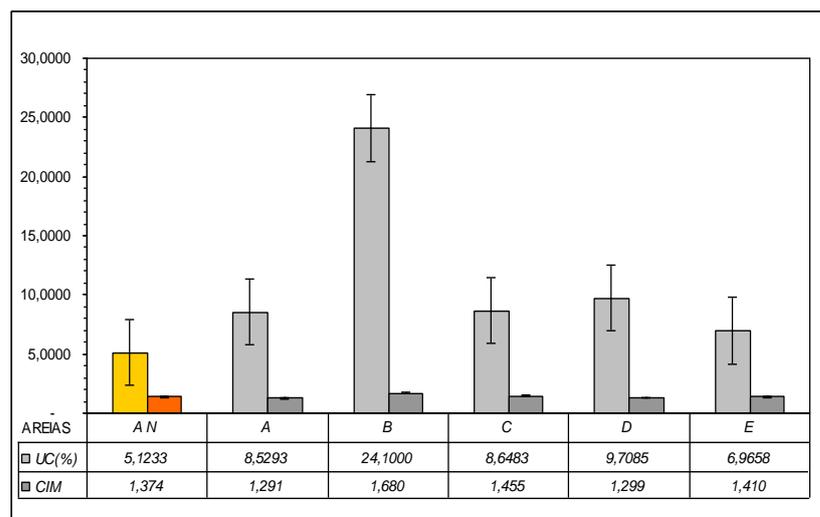


Figura 4.13: Representação comparativa entre valores de umidade crítica e coeficiente de inchamento médio.

4.2.7 Forma e Textura Superficial

Nos resultados apresentados na Tabela 4.9 e representados nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 percebe-se que os índices de forma da areia natural e das areias de britagem e que estão bem abaixo do índice máximo indicado para os agregados graúdos, o que em princípio, as qualifica para o uso em concreto.

Com relação à esfericidade, apesar de os índices serem praticamente iguais, analisando-se as imagens obtidas nos ensaios com microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Figuras 4.17 e 4.18), percebe-se que existem diferenças na forma e textura dos grãos. A areia natural possui grãos com formas arredondadas e textura lisa, enquanto que os grãos das areias de britagem possuem forma cúbica com arestas vivas e textura rugosa.

No que se refere a área superficial e ao perímetro dos grãos, as areias de britagem apresentam valores superiores aos da areia natural, fato que se explica pela quantidade de material fino presentes nas areias. As areias de britagem possuem 3 vezes mais grãos com dimensões abaixo de 0,075mm do que as areias naturais (Tabela 4.6).

As diferenças encontradas na forma, textura e dimensões dos grãos indica que os concretos produzidos com areia de britagem necessitarão de uma quantidade maior de água para manter a trabalhabilidade. O aumento na quantidade de água deverá fragilizar o concreto, diminuindo a sua resistência à compressão axial. Para manter a trabalhabilidade e resistência à compressão axial será necessário aumentar a quantidade de cimento.

Tabela 4.9: Parâmetros indicativos de forma das areias.

CARACTERÍSTICAS	UN	BIBLIOG.	AREIAS					
			NA	A	B	C	D	E
Área Superficial	mm ²	s/ ref	0,70 ± 0,14	3,16 ± 0,28	3,79 ± 0,54	2,09 ± 0,21	4,04 ± 0,29	3,27 ± 0,38
Perímetro	mm.	s/ ref	2,65 ± 0,15	5,75 ± 0,31	6,02 ± 0,42	4,49 ± 0,28	6,79 ± 0,32	5,08 ± 0,38
Índice de Forma	adimensional	IF < 3	1,50 ± 0,02	1,66 ± 0,08	1,51 ± 0,02	1,69 ± 0,06	1,43 ± 0,02	1,53 ± 0,00
Esfericidade	adimensional	s/ ref	0,75 ± 0,00	0,74 ± 0,00	0,75 ± 0,00	0,73 ± 0,00	0,76 ± 0,00	0,75 ± 0,00

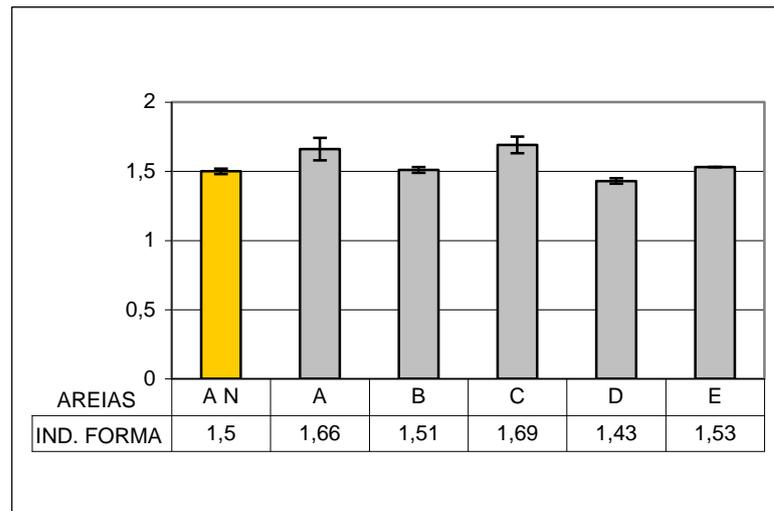


Figura 4.14: Resultados comparativos do Índice de Forma – IF.

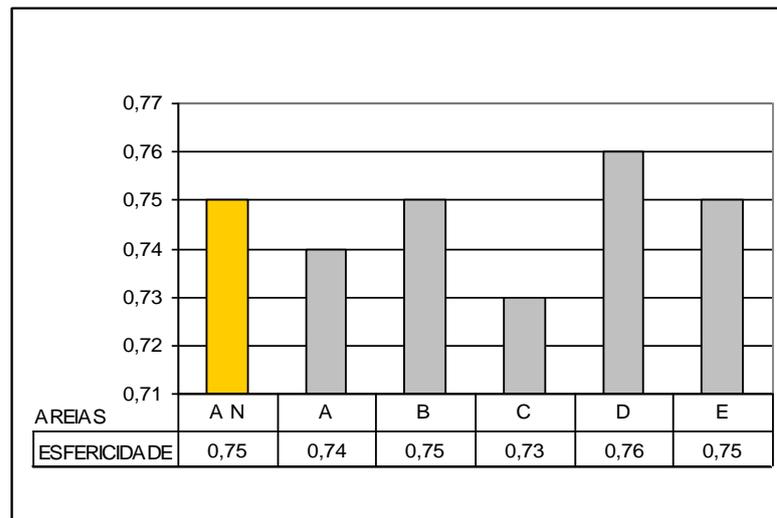


Figura 4.15: Resultados comparativos da Esfericidade.

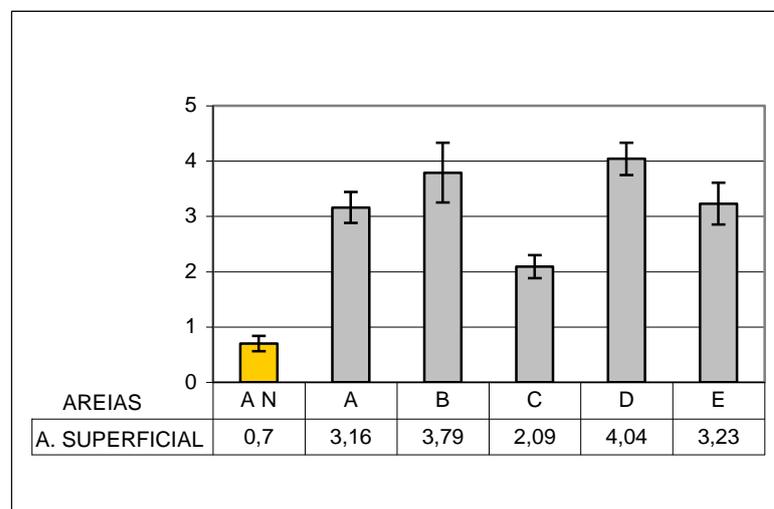


Figura 4.16: Resultados comparativos da Área Superficial.

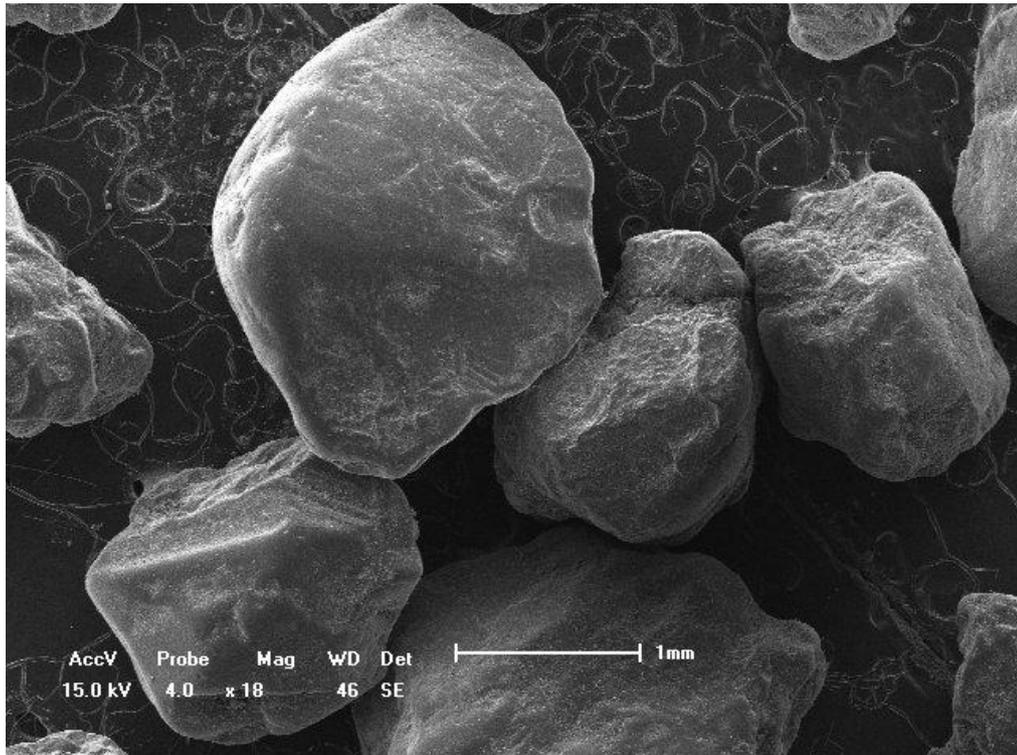


Figura 4.17: Forma e textura superficial dos grãos de areia natural – Imagens obtidas por MEV.

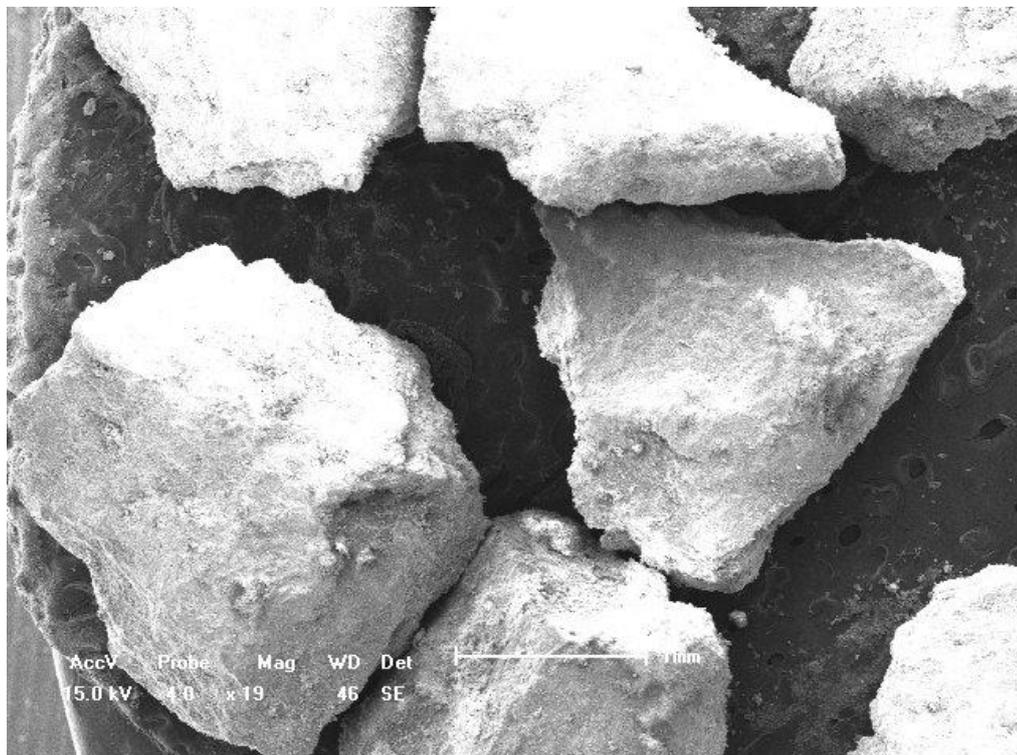


Figura 4.18: Forma e textura superficial dos grãos da areia de britagem tipo A – Imagens obtidas por MEV.

4.2.8 Considerações sobre as características das areias

Os experimentos de caracterização indicaram que todas as areias de britagem possuem características mineralógicas e petrográficas que permitem a sua utilização na produção de concretos estruturais de cimento portland. As areias B, C e E apresentaram problemas nas características relacionadas com o processo de fabricação, problemas que podem ser corrigidos ajustando-se os processos nas indústrias produtoras.

Os resultados apresentados de forma concentrada na Tabela 4.10 indicam que as areias de britagem, devido à presença de altos teores de material pulverulento devem provocar alterações nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Outro fator que deve influenciar as propriedades é a forma e a textura superficial dos grãos.

Tabela 4.10: Resumo das características das areias de britagem

CARACTERÍSTICAS	UN	NORMAS BIBLIOG.	AREIAS					
			AN	A	B	C	D	E
Comp. Granulom. (1)								
Dim. máxima carac.	mm	4,80	2,36	4,75	4,75	2,36	4,75	4,75
Módulo de finura	un	1,55 a 3,50	2,07	3,39	2,71	2,38	3,28	2,70
Comp. Granulom. (2)								
Dim. máxima carac	mm	4,80	2,36	4,75	4,75	2,36	4,75	4,75
Módulo de finura%	un	1,55 a 3,50	1,73	2,76	2,74	2,25	3,34	2,29
Massa Unitária								
Massa unitária	kg/m ³	1300 a 1750	1482,30	1417,03	1.460,54	1252,78	1532,36	1496,70
Índ de vol de vazios	%	s/referencia	41,6	44,53	43,05	49,38	39,07	38,29
Massa Específica	g/cm ³	2,6 a 2,7	2,56	2,55	2,55	2,47	2,51	2,43
Mat. Pulverulento (1)	%	MP<12	2,60	7,60	17,27	15,16	8,00	15,80
Mat. Pulverulento (2)	%	MP<12	2,65	12,00	18,20	15,80	10,70	16,20
Absorção de Água	%	s/referencia	2,01	1,60	1,81	2,02	2,03	2,03
Inchamento								
Umidade crítica	%	s/referencia	5,12	8,53	24,10	8,65	9,71	6,97
Coef. de incham. médio	un	s/referencia	1,374	1,291	1,680	1,455	1,299	1,410
Forma								
Índice de Forma	adimens	IF< 3	1,50	1,66	1,51	1,69	1,43	1,53
Esfericidade	adimens	s/referencia	0,75	0,74	0,75	0,73	0,76	0,75

Observação: Os números em vermelho indicam que os valores estão fora dos limites normativos.

4.3 Etapa 2 – Propriedades do Concreto no Estado Fresco e Endurecido

Seguindo o método do EDUSP IPT foram realizados experimentos com três misturas, mistura com a areia natural (AN), mistura com areia de britagem da empresa A e mistura com areia de britagem da empresa D. Os materiais constituintes estão descritos na Tabela 4.11.

Misturas com as areias de britagem B, C e E não foram realizadas, pois as mesmas foram desqualificadas devido à presença de quantidades de material pulverulento acima dos limites normativos.

Tabela 4.11: Misturas analisadas para determinação das propriedades do concreto.

MISTURA	MATERIAIS SECOS		
	CIMENTO	AGREGADO GRAÚDO	AGREGADO MIÚDO
AN	CP IV-32 Votoran	BRITA 1	AREIA NATURAL - AN
A	CP IV-32 Votoran	BRITA 1	AREIA DE BRITAGEM -A
D	CP IV-32 Votoran	BRITA 1	AREIA DE BRITAGEM - D

4.3.1 Propriedades pré-estabelecidas

Para a realização dos experimentos é necessário que se caracterizem os materiais constituintes e que se determinem propriedades e situações em que o concreto será utilizado.

As informações consideradas básicas com a capacidade que o concreto deve ter para ser lançado e adensado adequadamente no interior das formas dos elementos estruturais estão apresentadas na Tabela 4.12

Tabela 4.12: Informações básicas utilizadas na realização dos ensaios de dosagem.

1	Tipo de concreto	Concreto normal classe C20 a C40 – NBR 8953
2	Espaçamento entre barras de aço	Conforme projeto – condição normal 22mm.
3	Dimensão máxima característica do agregado graúdo	Foi adotado a brita 1 com dimensão máxima característica de 19,5mm
4	Elementos estruturais a serem concretados	Pilares, vigas e lajes
6	Consistência do concreto (medida através do ensaio de abatimento de tronco de cone (<i>slump test</i>))	Estruturas pouco armadas 60 ± 10 mm
7	Cimento	CP IV 32 – Votoran
8	Resistência de dosagem (NBR 6118)	$f_{cd28} = f_{ck28} + 1,65 \cdot S_d$
9	Desvio padrão de dosagem a 28 dias, produção em massa com controle rigoroso da umidade dos agregados	$S_{d28} = 4$ MPa
10	Idade de ruptura dos corpos-de-prova	3, 7 e 28 dias
11	Traço (1:m) para a primeira mistura experimental (kg/kg)	1:5

4.3.2 Características dos Materiais Secos Constituintes

4.3.2.1 Cimento

O cimento utilizado na composição das misturas foi da marca Votoran tipo CP IV 32. A composição e as características químicas, físicas e mecânicas estão apresentadas nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15. Todas as características apresentadas foram obtidas no site do fabricante. (www.votorantin-cimentos.com.br).

Tabela 4.13: Composição do cimento.

TIPO	SIGLA	CLASSE	NORMA	CLIQUEL + GESSO	CALCÁRIO	POZOLANA
IV	CP	32	NBR 5736	45 a 87 %	0 a 5 %	15 a 50%

Legenda: IV – pozolan,; CP – cimento portland; 32 – resistência a compressão – 32 MPa

Tabela 4.14: Composição química.

RESÍDUO INSOLÚVEL (%)	PERDA DE RESISTÊNCIA AO FOGO (%)	MgO (%)	SO3 (%)	CO2 (%)	S (%)
-	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-

Tabela 4.15: Características físicas e mecânicas.

FINURA		TEMPO DE PEGA		EXPANSIVIDADE		RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO			
Resíduo na peneira 75mm(%)	Área específica (m ² /kg)	Início (h)	Término (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
≤ 8	-	≥ 1	≤ 12	≤ 5	≤ 6	-	≥ 10	≥ 20	≥ 32

4.3.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo foi fornecido pela empresa fabricante da areia D. As características foram determinadas conforme descrito no Capítulo 3, item 3.2.2.1. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18

Tabela 4.16: Características geológicas da rocha utilizada como agregado graúdo.

Tipo de Rocha	Riodacito cinza claro com textura fanerítica fina a média, podendo apresentar tonalidades avermelhadas em alguns pontos
Estruturação Primária	Zona de disjunção tabular com espaçamento decimétrico
Estruturação Tectônica	Fraturas verticais a sub-verticais com orientações diversas preenchidas por carbonato de cálcio – Grau de fraturamento médio
Forma de Extração	Em bancadas – uma única bancada

Fonte: Garlet e Reginato, relatório de pesquisa intitulado Agregado.

Tabela 4.17: Características petrológicas e mineralógicas da rocha utilizado como agregado graúdo.

Tipo de Rocha	Mineralogia	Textura	Coloração	Grau de Alteração	Estruturação
Riodacito	Plagioclásio, Quartzo e Piroxênio – Aglomerados de Plagioclásio	Fanerítica Fina “Carijó”	Cinza clara com pontos esbranquiçados	Baixa a Muito Baixa	Maciça
Riodacito	Plagioclásio, Quartzo e Piroxênio	Fanerítica Fina	Cinza clara	Muito Baixa	Planos de Fraturas Carbonatos

Análise dos Agregados: alguns fragmentos um pouco alterados (fração 9,5 mm)

Fonte: Garlet e Reginato, relatório de pesquisa Agregado.

Tabela 4.18: Características físicas do basalto utilizado como agregado graúdo.

Tipo	Módulo de Finura	Dimensão Máxima Característica	Índice de Forma	Massa Unitária
Brita 1	4,67	19 mm	3,0	1734,31 kg/m ³

4.3.2.3 Areias

Considerando que para a realização dos experimentos foi necessária uma nova coleta de areias de britagem e que algumas características, principalmente as decorrentes do processo de fabricação, podem ser alteradas a composição granulométrica e a quantidade de material pulverulento foram novamente verificadas. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.19 e representados nas Figuras 4.19 e 4.20

Tabela 4.19: Composição granulométrica e módulo de finura das areias.

CARACTERÍSTICAS	UN	NORMAS BIBLIOG.	AREIAS		
			AN	A	D
Dim. máxima carac.	mm	4,80	2,36	4,75	4,75
Módulo de finura	adimensional	1,55 a 3,50	2,07	2,86	3,00
Mat. Pulverulento	%	MP<12	2,60	12,00	11,00

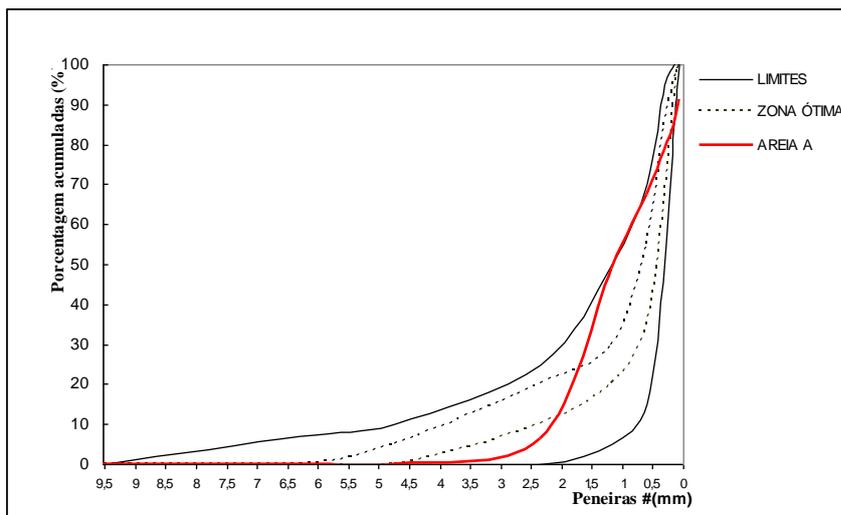


Figura 4.19: Curva granulométrica da areia A.

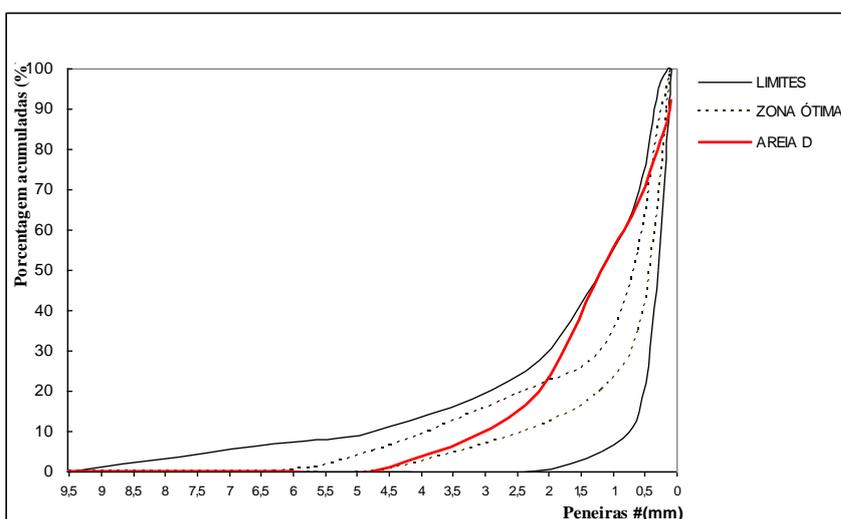


Figura 4.20: Curva granulométrica da areia D.

Comparando os resultados com os das coletas anteriores (Tabela, 4.1) percebe-se que as características da areia A apresentaram praticamente os mesmos resultados da segunda coleta. A areia D apresentou uma curva granulométrica dentro dos limites normativos, o que não ocorreu nas coletas anteriores. Observou-se, também, que o módulo de finura da área D diminuiu. Assim, as demais características a serem adotadas como referência serão as determinadas na segunda coleta de material (Tabela 4.20).

Para as misturas com areia natural foi utilizada areia da segunda coleta e suas propriedades mantidas.

Tabela 4.20: Características das areias utilizadas nos experimentos.

CARACTERÍSTICAS	UN	NORMAS BIBLIOGRÁF.	AREIAS		
			A N	A	D
Dim. máxima carac.	mm	4,80	2,36	4,75	4,75
Módulo de finura	adimensional	1,55 a 3,50	2,07	2,86	3,00
Massa unitária	kg/m ³	1300 a 1750	1.482,30	1.417,03	1.532,36
Índ de vol de vazios	%	s/referencia	41,60	44,53	39,07
Massa Específica	g/cm ³	2,6 a 2,7	2,56	2,55	2,51
Mat. Pulverulento	%	MP<12	2,60	12,00	11,00
Absorção de Água	%	s/referencia	2,01	1,60	2,30
Umidade crítica	%	s/referencia	5,12	8,53	9,71
Índice de Forma	Adimensional	IF< 3	1,50	1,66	1,43
Esfericidade	adimensional	s/referencia	0,75	0,74	0,76

4.3.3 Determinação do teor de argamassa ideal

Seguindo o método do EPUSP/ IPT, descrito no Capítulo 2, seção 2.7.1.5 o teor de argamassa ideal foi determinado para um traço normal (1:5) para todas as misturas. A partir dos resultados obtidos, utilizando-se as equações 2.11 a 2.14, foram determinados os teores de argamassa para outros dois traços, um rico em cimento (1:3,5) e um pobre em cimento (1:6,5). Os experimentos possibilitaram a determinação do proporcionamento de materiais, a relação água/cimento, a medida de trabalhabilidade (*slump*) e a massa específica para todas as misturas. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 e representados nas Figuras 4.21 e 4.22.

Tabela 4.21: Dados de dosagem do traço rico em cimento.

MISTURAS	TEOR DE ARGAMASSA (%)	TRAÇO RICO - 1:3,5 c(a+p)	a/c	SLUMP (mm)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
A N	51 ± 2	1:1,30:2,20	0,46	64	2268,28
A	59 ± 2	1:1,66:1,84	0,66	60	2197,56
D	54 ± 2	1:1,48:2,02	0,50	60	2170,11

Legenda: c(a+p)= cimento +areia+pedra – a/c= relação água/cimento.

Tabela 4.22: Dados de dosagem do traço normal em cimento.

MISTURAS	TEOR DE ARGAMASSA (%)	TRAÇO NORMAL - 1:5,0 c(a+p)	a/c	SLUMP (mm)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
A N	51 ± 2	1:2,06:2,94	0,57	58	2243,33
A	59 ± 2	1:2,54:2,46	0,77	60	2164,45
D	54 ± 2	1:2,30:2,70	0,68	60	2215,38

Legenda: c(a+p), cimento +areia+pedra – a/c, relação água/cimento.

Tabela 4.23: Dados de dosagem do traço pobre em cimento.

MISTURAS	TEOR DE ARGAMASSA (%)	TRAÇO POBRE - 1:6,5 c(a+p)	a/c	SLUMP (mm)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
A N	51 ± 2	1:2,83:3,67	0,70	63	2237,95
A	59 ± 2	1:3,34:3,07	0,73	63	2125,45
D	54 ± 2	1:3,13:3,37	0,78	59	2208,48

Legenda: c(a+p), cimento + areia + pedra – a/c, relação água/cimento.

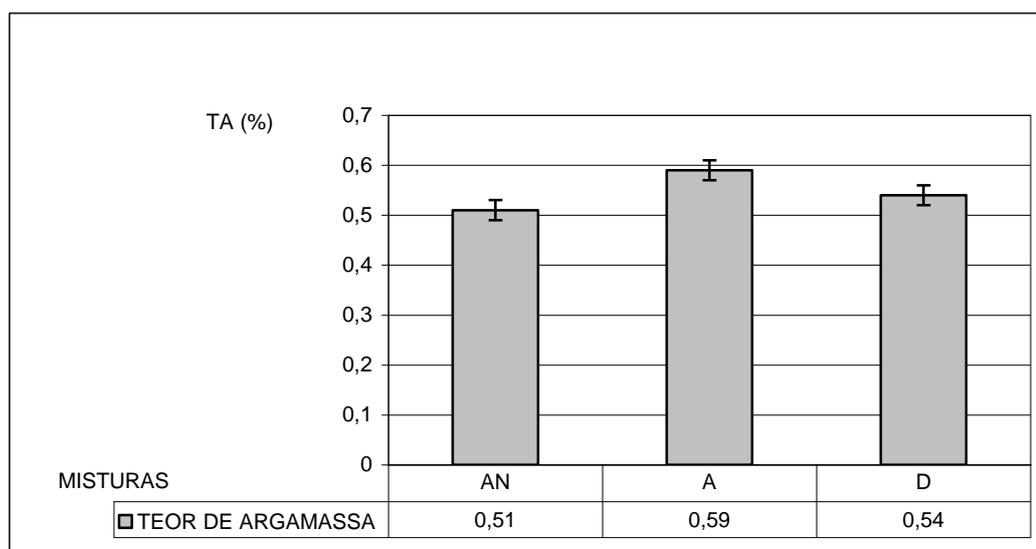


Figura 4.21: Teor de argamassa das três misturas.

Tabela 4.24: Consumo de materiais para execução de um metro cúbico de concreto.

MATERIAIS Kg/m ³	TRAÇO RICO - 1:3,5			TRAÇO NORMAL - 1:5			TRAÇO POBRE - 1:6,5		
	AN	A	D	AN	A	D	AN	A	D
CIMENTO	457,31	425,88	434,02	343,11	322,60	331,64	272,92	261,11	266,72
AREIA	594,51	706,97	642,35	706,81	819,42	762,78	772,37	872,11	834,85
BRITA	1.006,09	783,63	876,72	1.008,75	793,61	895,44	1.001,62	801,61	898,86
ÁGUA	210,36	281,08	217,01	185,28	225,82	225,52	191,04	190,61	208,05

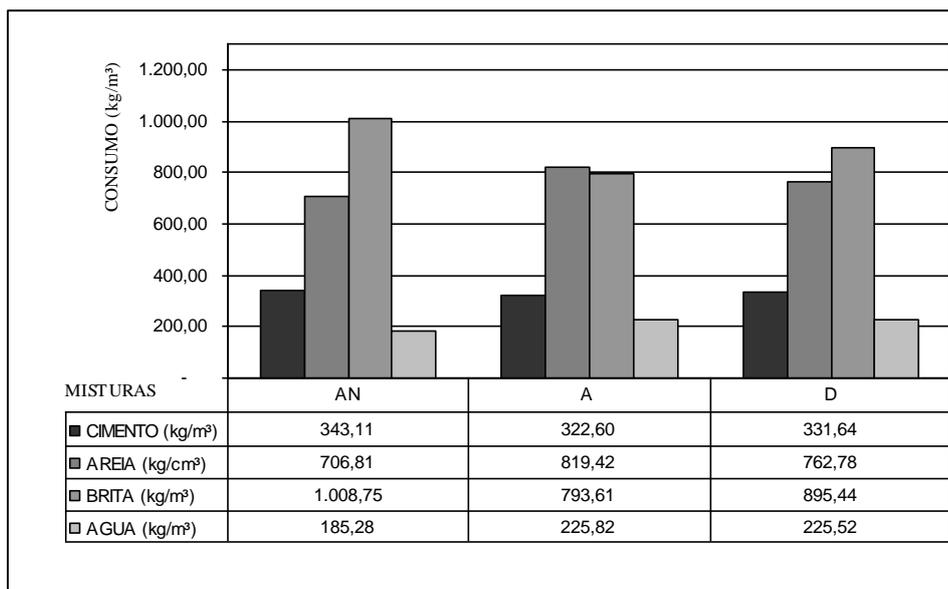


Figura 4.22: Consumo de materiais para um m³ de concreto para o traço normal.

Os resultados demonstram que o teor de argamassa e a relação água/cimento são maiores nas misturas com areia de britagem. Isto acontece provavelmente devido à maior presença de material pulverulento (em torno de 4 vezes maior). A Figura 4.23 mostra a relação entre o teor de argamassa e a quantidade de material pulverulento existente nas areias. A Figura 4.24 mostra a relação entre a quantidade de material pulverulento e a relação água/cimento para o traço normal (1:5).

Comparando-se os resultados entre as areias de britagem, percebe-se que existe um aumento expressivo no teor de argamassa e na relação água/cimento, indicando que existem fatores associado ao material pulverulento provocando o aumento nessas propriedades.

Um fator que pode justificar esse comportamento é a área superficial, que nas areias de britagem é maior que na areia natural (Figura 4.16). Outro fator pode estar relacionados com forma. As areias de britagem possuem formas cúbicas e a textura rugosa, enquanto que a areia natural possui forma esférica e textura lisa (Figuras 4.17 e 4.18).

Esses resultados indicam que para uma dada resistência o aumento do teor de argamassa associado ao aumento da relação água/cimento tende a elevar o consumo de cimento.

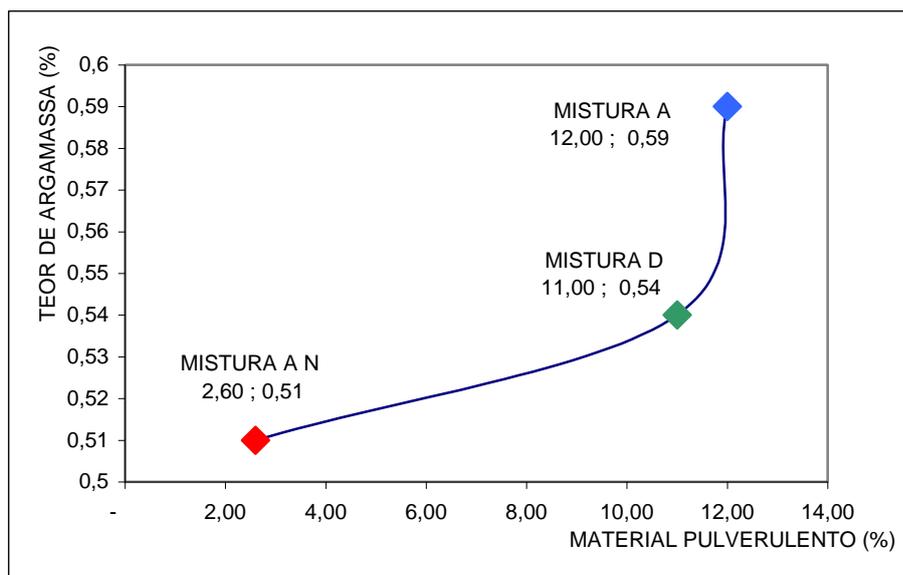


Figura 4.23: Relação entre o teor de argamassa e o teor de material pulverulento.

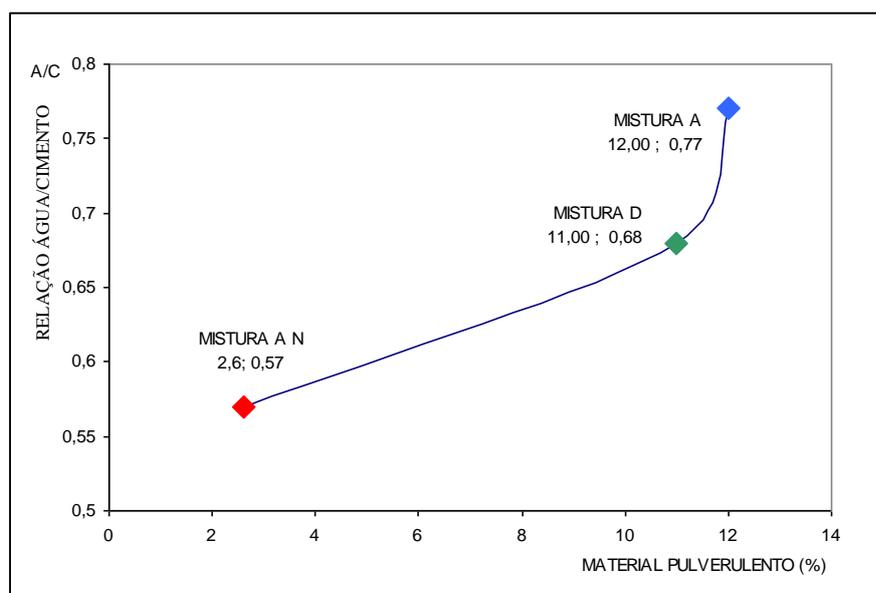


Figura 4.24: Relação entre a quantidade de material pulverulento e a relação água/cimento para os traços 1:5 das três misturas.

4.3.4 Determinação da Consistência

Nos dados apresentados na Tabela 4.25 e representados na Figura 4.25 percebe-se que não existe variação entre os valores, com exceção da mistura A para o traço rico, que apresentou uma variação de 21%. Conforme descrito no Capítulo 2, seção 2.6.2.1 de acordo com a consistência as misturas produziram um concreto considerado plástico, recomendado para estruturas correntes.

Tabela 4.25: Consistência das misturas para os três traços.

MISTURAS	H (%)		
	TRAÇO RICO (1:3,5)	TRAÇO NORMAL (1:5,0)	TRAÇO POBRE (1:6,5)
A N	10,22	9,00	9,33
A	14,67	11,67	9,73
D	11,11	11,33	10,4

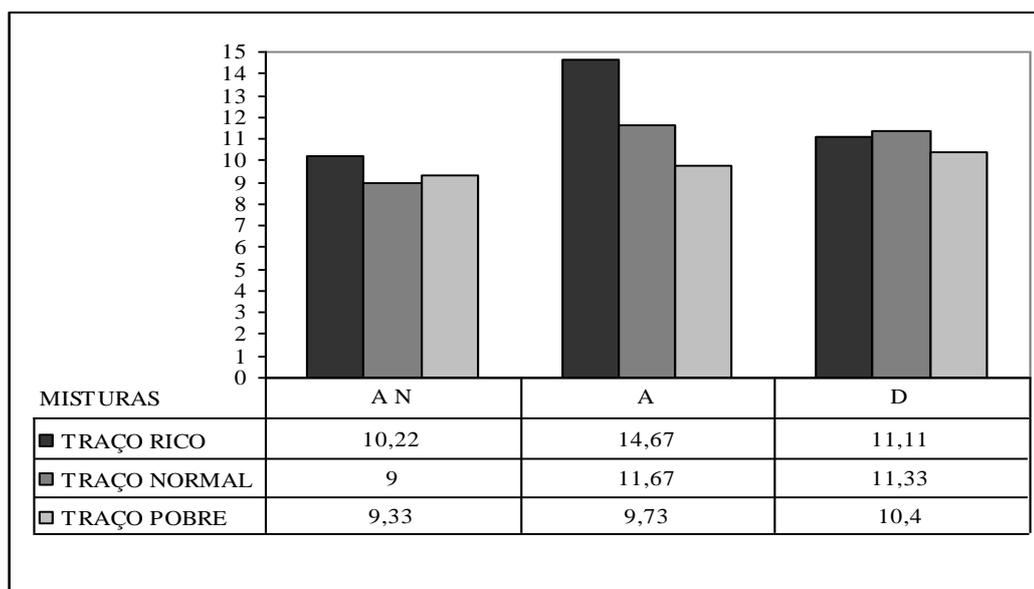


Figura 4.25: Comparação da consistência das misturas para os três traços.

4.3.5 Determinação da Resistência à Compressão Axial

Definidos os teores de argamassa e os traços para as diferentes misturas, foram moldados corpos-de-prova cilíndrico conforme descrito no capítulo 3, item 3.2.2.3. Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Os resultados apresentados na Tabela 4.26 e representados na Figura 4.26 demonstram que a resistência à compressão axial das areias de britagem é menor dos da areia natural, e que os resultados da areia D são maiores dos da areia A.

A diminuição de resistência, provavelmente, está associada ao teor de argamassa (Figura 4.27), que por sua vez está associada a quantidade de material pulverulento (Figura 4.23).

Tabela 4.26: Resistência à compressão axial das três misturas medidas aso 3, 7 e 28 dias.

TRAÇO	MISTURA - AN			MISTURA - A			MISTURA - D		
	3dias (Mpa)	7dias (Mpa)	28dias (Mpa)	3dias (Mpa)	7dias (Mpa)	28 dias (Mpa)	3dias (Mpa)	7dias (Mpa)	28dias (Mpa)
1:3,5	23,27 ± 0,60	28,25 ± 1,08	37,94 ± 0,55	16,53 ± 0,16	23,35 ± 0,78	30,58 ± 0,40	14,11 ± 0,83	21,13 ± 0,40	34,46 ± 0,99
1:5,0	15,14 ± 0,29	20,08 ± 0,26	29,67 ± 0,77	11,32 ± 0,17	15,30 ± 0,29	21,16 ± 0,63	9,45 ± 0,22	13,29 ± 0,36	24,72 ± 1,01
1:6,5	9,64 ± 0,08	12,84 ± 0,39	19,12 ± 0,51	6,52 ± 0,16	9,49 ± 0,03	13,74 ± 0,26	7,12 ± 0,51	10,64 ± 0,91	19,63 ± 0,66

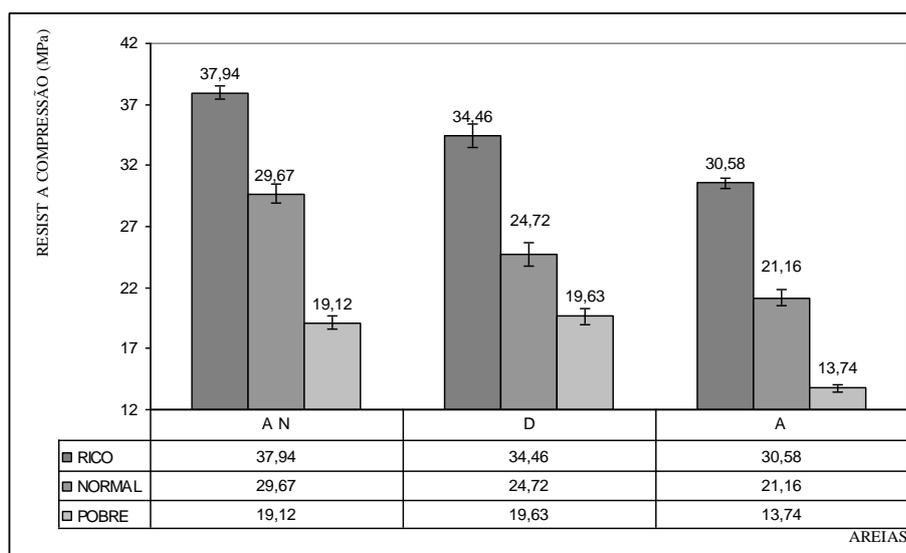


Figura 4.26: Dados comparativos da resistência à compressão axial das três misturas medidas aos 28 dias.

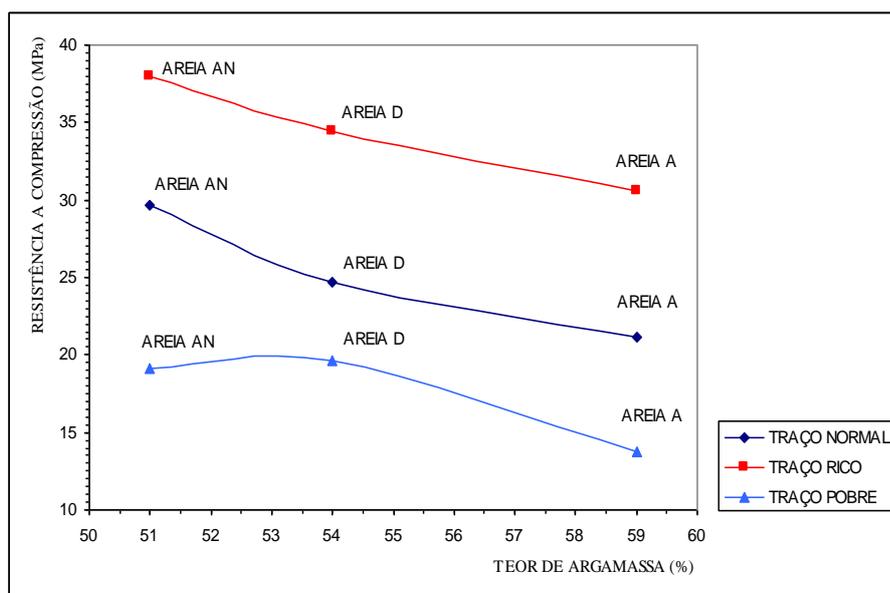


Figura 4.27: Relação entre resistência à compressão axial e o teor de argamassa.

4.3.6 Leis de Comportamento do Concreto

Os gráficos e as equações que representam as leis de comportamento do concreto foram montados a partir de estudo teórico especificado pelo método EPUSP/IPT, descrito no capítulo 2, item 2.7.2. Os dados utilizados foram os determinados nos itens 4.3.3 e 4.3.4, mais especificamente, a quantidade de cimento por m³ de concreto, a relação água/cimento e a resistência à compressão axial (Tabela 4.27). Os gráficos foram montados e as equações construídas com o auxílio dos programas de computador Microsoft Excel e Origin.

Tabela 4.27: Dados para elaboração dos gráficos das leis de comportamento do concreto da mistura A N.

TRAÇO (1:m)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO			a/c (kg/kg)	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS		
1:3,5	23,27	28,25	37,94	0,46	457,31
1:5,0	15,14	20,08	29,67	0,54	343,11
1:6,5	9,64	12,84	19,12	0,70	272,92

4.3.6.1 Lei de Abrams

As Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 e as equações 4.1, 4.2 e 4.3 representam os gráficos de Abrams para as três misturas A N, A e D, respectivamente. As equações referem-se às curvas de resistência aos 28 dias.

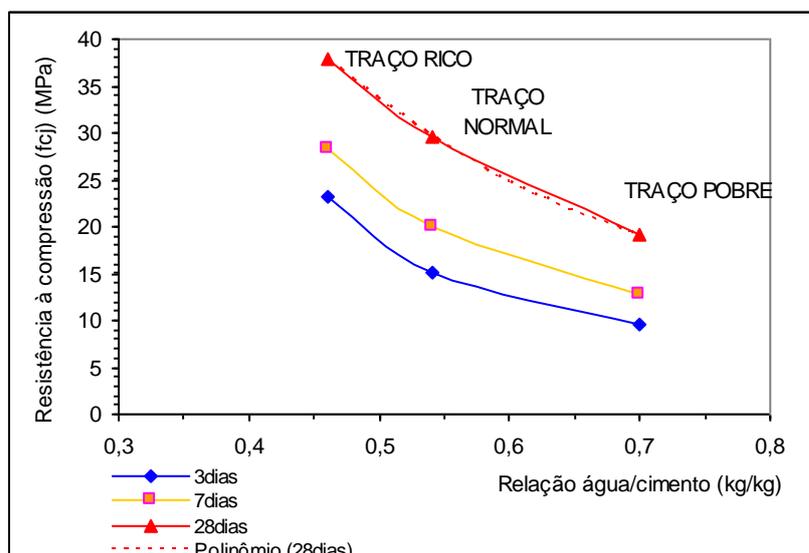


Figura 4.28: Representação da Lei de Abrams para a mistura com a areia natural AN.

$$y = 155,99x^2 - 259,36x + 124,24 \quad (R^2)=1 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

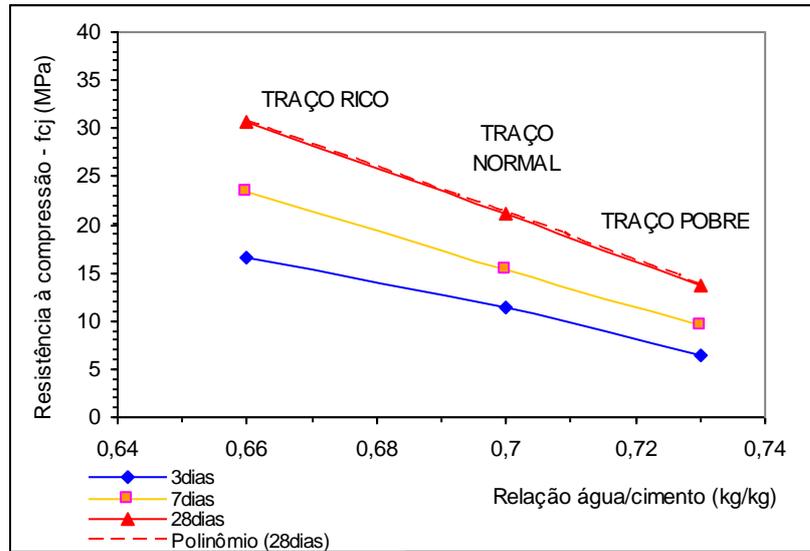


Figura 4.29: Representação da Lei de Abrams para a mistura com a areia de britagem A.

$$y = -168,05x^2 - 5,5952x + 107,91 \quad (R^2=1) \quad \text{Eq. (4.2)}$$

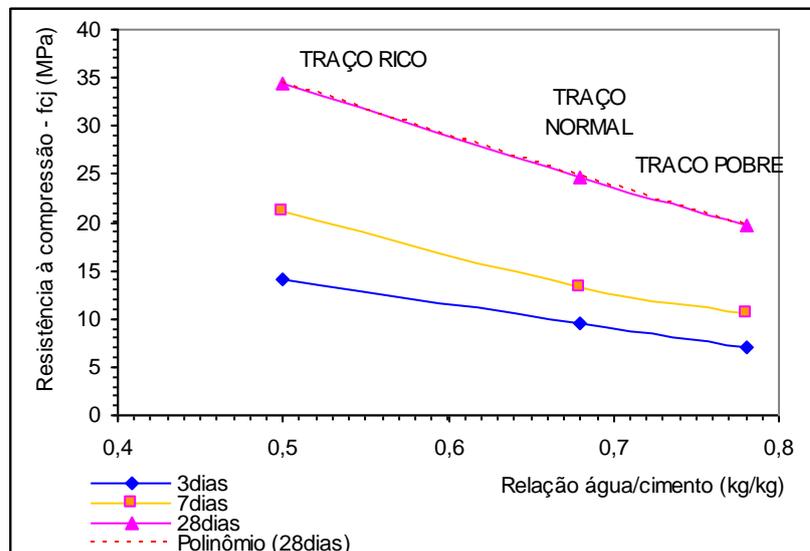


Figura 4.30: Representação da Lei de Abrams para a mistura com a areia de britagem D.

$$y = 11,825x^2 - 68,065x + 65,536 \quad (R^2=1) \quad \text{(Eq. 4.3)}$$

4.3.6.2 Lei de Lyse

Considerando que a consistência do concreto é função da relação água/materiais secos, através da lei de Lyse pode-se determinar a relação de agregados para uma determinada

relação água/cimento. As Figuras 4.31, 4.32, 4.33 e as equações 4.4, 4.5 e 4.7, representam as relações estabelecidas para as três misturas, AN, A e D, respectivamente.

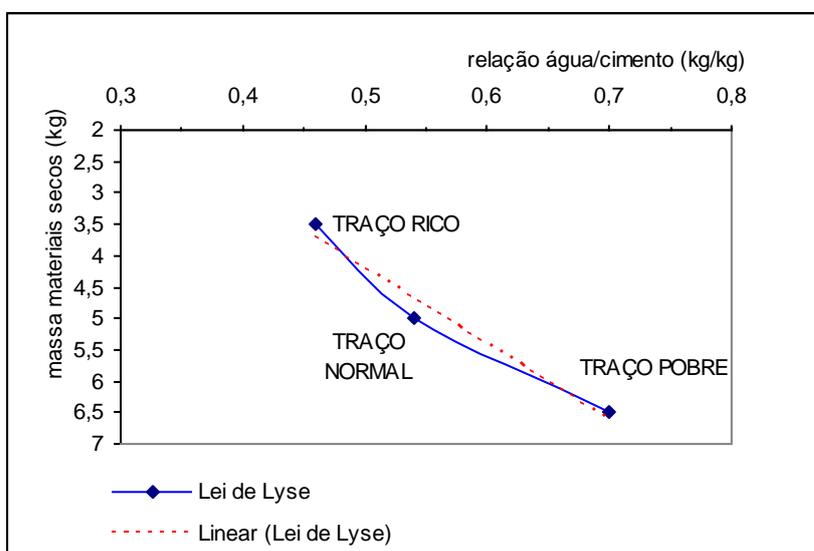


Figura 4.31: Representação da Lei de Lyse para a mistura da areia natural AN.

$$y = 12,054x - 1,8304 \quad (R^2=0,9643) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

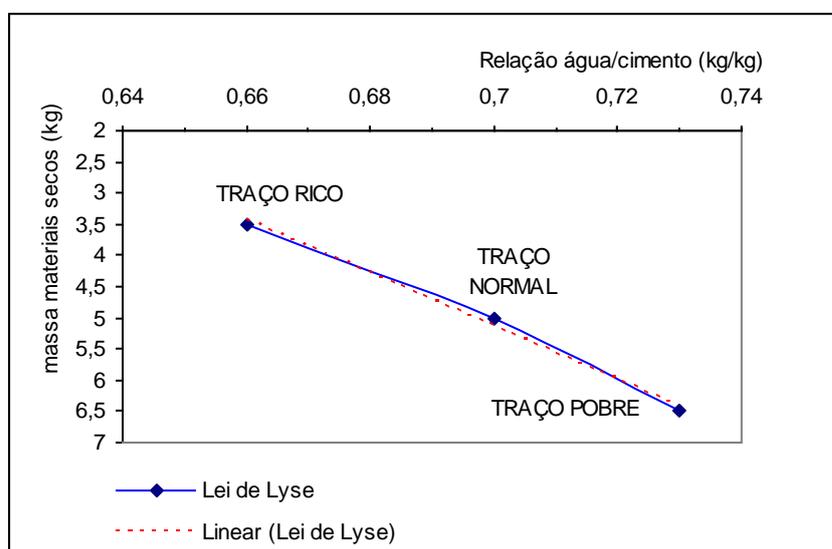


Figura 4.32: Representação da Lei de Lyse para a mistura da areia de britagem A.

$$y = 42,568x - 24,655 \quad (R^2 = 0,9932) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

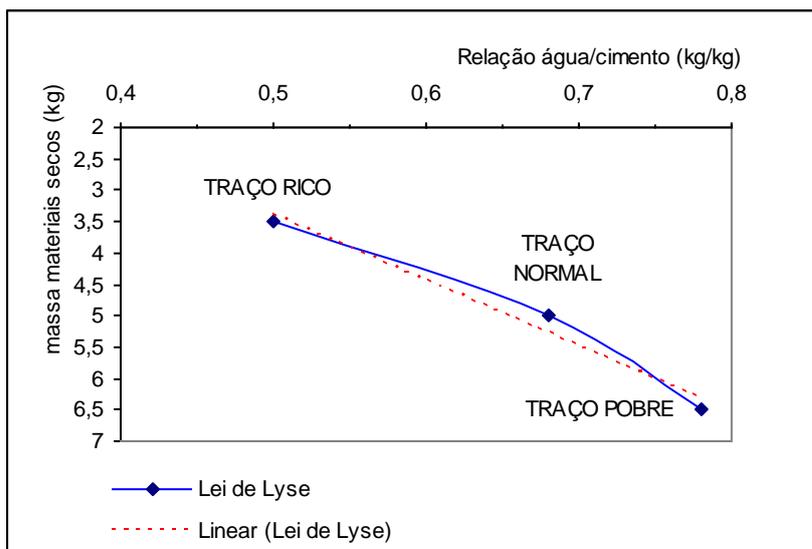


Figura 4.33: Representação da Lei de Lyse para a mistura da areia de britagem D.

$$y = 10,43x - 1,8146 \quad (R^2 = 0,9932) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

4.3.6.3 Lei de Molinari

Determinadas as relações de agregados, pode-se, através da lei de Molinari determinar o consumo de cimento para um determinado traço. As Figuras 4.34, 4.35, 4.36 e as equações 4.8, 4.9 e 4.10 representam as relações estabelecidas para as três misturas AN, A e D respectivamente.

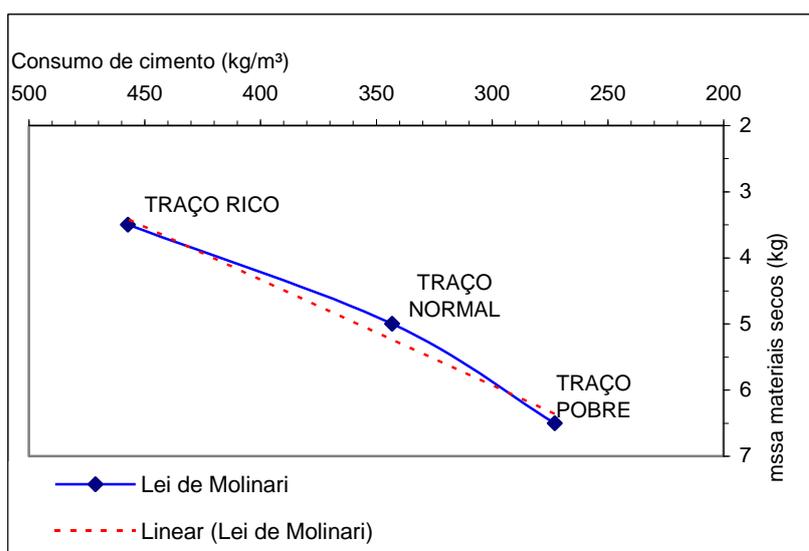


Figura 4.34: Representação da Lei de Molinari para a mistura de areia natural A N.

$$y = 4E - 05x^2 - 0,0489 + 16,515 \quad (R^2 = 1) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

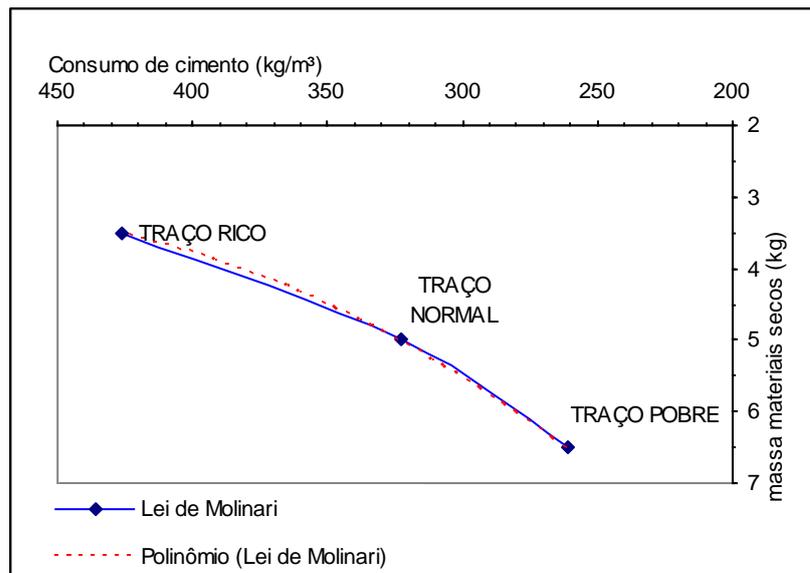


Figura 4.35: Representação da Lei de Molinari para a mistura de areia de britagem A.

$$y = 6E - 05x^2 - 0,0594 + 17,916 \quad (R^2 = 1) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

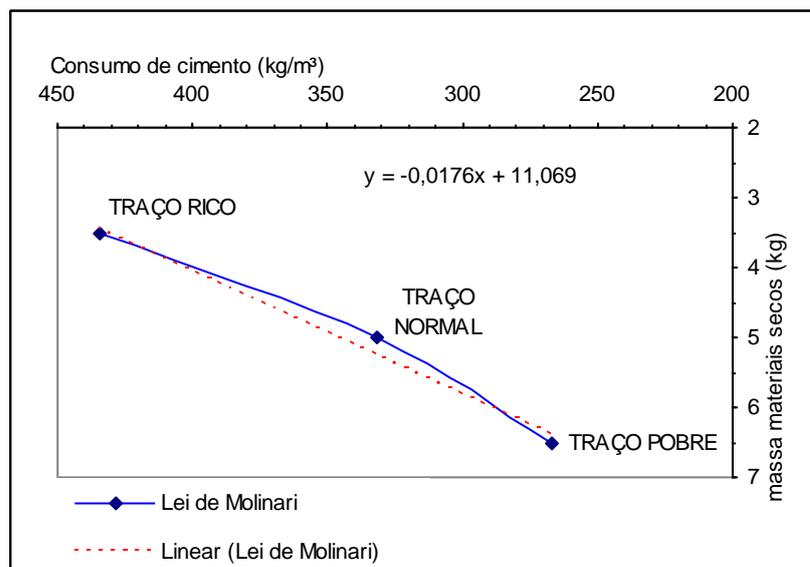


Figura 4.36: Representação da Lei de Molinari para a mistura de areia de britagem D.

$$y = 5E - 05x^2 - 0,0533 + 17,133 \quad (R^2 = 1) \quad (\text{Eq. 4.10})$$

4.3.7 Diagramas de Dosagens

Os diagramas de dosagem são montados a partir da junção dos gráficos que demonstram as leis de comportamento do concreto. Com base nas curvas representadas nos diagramas e nas equações de dosagem pode-se, a partir de um parâmetro específico, calcular

todos os componentes de um traço. As Figuras 4.37, 4.38 e 4.39 apresentam os diagramas de dosagem para as três misturas elaboradas. No sub-Capítulo 4.4 apresenta-se um exemplo numérico onde se determina, a partir de uma determinada resistência, o traço para as três misturas em estudo.

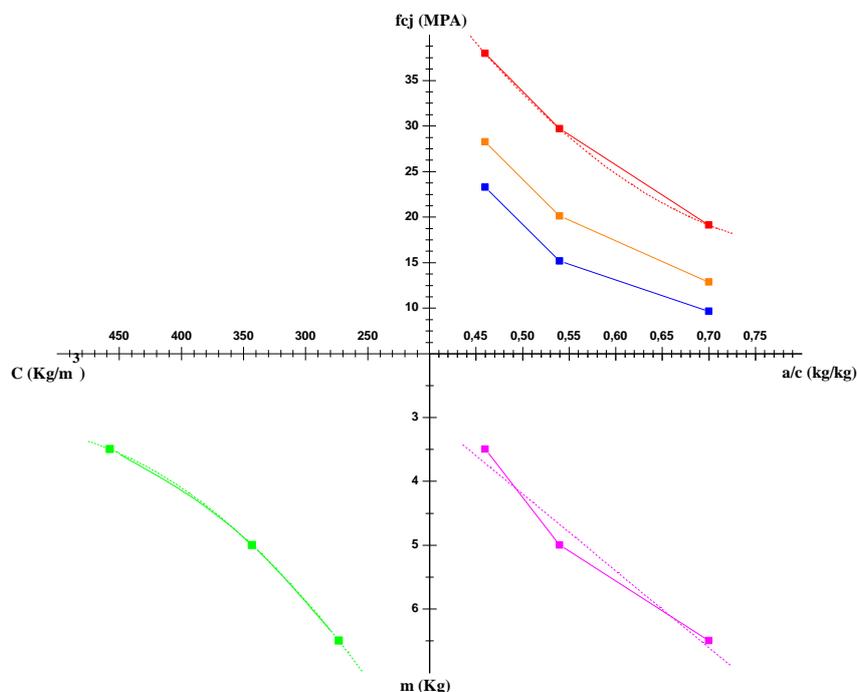


Figura 4.37: Diagrama de dosagem mistura com a areia natural A N.

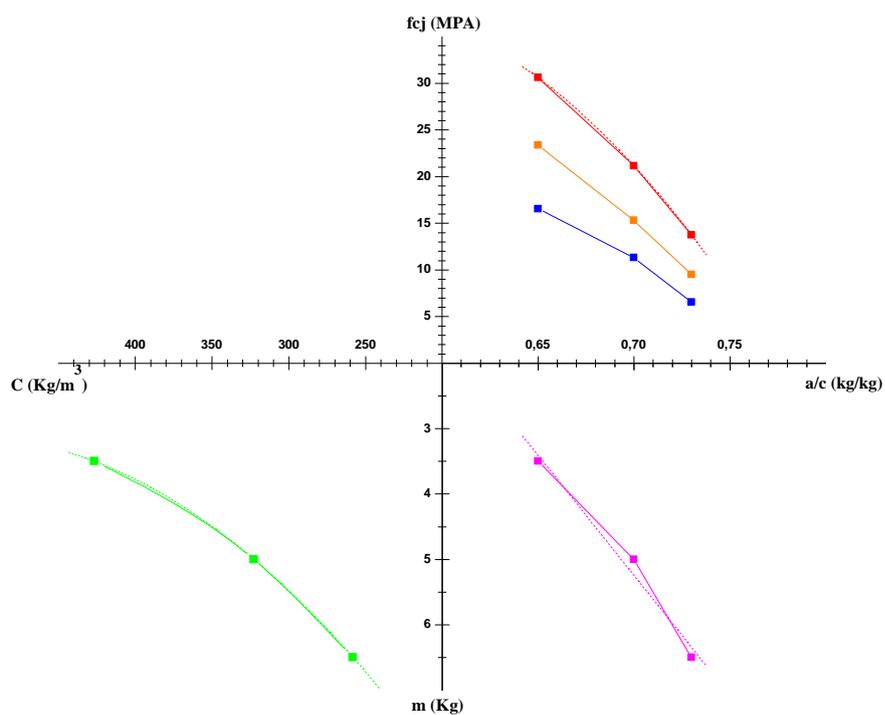


Figura 4.38: Diagrama de dosagem mistura com a areia de britagem A.

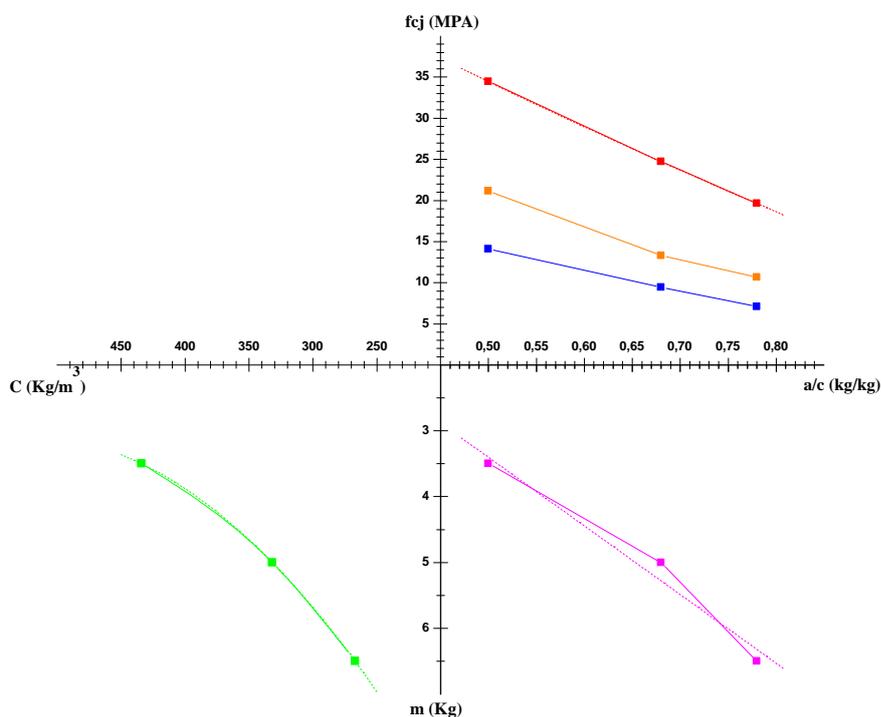


Figura 4.39: Diagrama de dosagem mistura com a areia de britagem D.

4.4 Etapa 3 - Avaliação dos Resultados e Módulo de Elasticidade

Para verificar se os resultados obtidos até então são confiáveis e para analisar o módulo de elasticidade foram realizados experimentos com misturas elaboradas a partir da definição de um determinado parâmetro extraído dos diagramas de dosagem.

O parâmetro escolhido para a elaboração das novas misturas foi à resistência à compressão, por ser o parâmetro inicial na definição do projeto de elementos em concreto estrutural.

4.4.1 Proporcionalamento dos Materiais Constituintes

4.4.1.1 Resistência de Dosagem (f_{cj})

Apesar de a norma NBR 6118 determinar que a resistência mínima a ser considerada no cálculo estrutural é de 20 MPa, para a realização desse experimento foi escolhida uma resistência inicial mínima de projeto de 25 MPa, por ser a resistência atualmente utilizada na região de Caxias do Sul.

Sendo f_{ck} a resistência inicial de projeto igual a 25 MPa e S_d o desvio padrão, determinado pela norma NBR 12655 igual a 4,0 (condição A - controlada), a resistência de

dosagem (f_{cj}) foi determinada como sendo igual a 31,6 MPa. A partir dessa resistência é que o proporcionamento dos materiais constituintes para a composição das misturas foi determinado.

4.4.1.2 Determinação da relação água/cimento (a/c)

A relação água/cimento foi determinada através das equações definidas no item 4.3.6.1 (Lei de Abrams). Os dados e os resultados estão apresentados na Tabela 4.48

I. Determinação da relação água/cimento para a mistura com areia natural (AN)

Equação 4.11

$$a/c = \frac{2,59,36 - (\sqrt{258,36^2 - 4 \times 155,99 \times 92,39})}{2 \times 155,99} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

II. Determinação da relação água/cimento para a mistura com areia de britagem A

Equação 4.12

$$a/c = \frac{5,5952 - \sqrt{5,5952^2 - 4 \times -169,05 \times 76,31}}{2 \times -169,05} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

III. Determinação da relação água/cimento para a mistura com areia de britagem D

Equação 4.13

$$a/c = \frac{67,644 - \sqrt{67,644^2 - 4 \times 11,468 \times 33,815}}{2 \times 11,468} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Tabela 4.28: Dados e resultados da relação água/cimento

MISTURAS	$f_{ck_{28}}$ (MPa)	$f_{cd_{28}}$ (MPa)	Teor de argamassa a (%)	Relação água/cimento (kg/kg)
AN	25,00	31,60	51	0,52
A	25,00	31,60	59	0,66
D	25,00	31,60	55	0,55

4.4.1.3 Determinação dos materiais secos em massa (m)

A relação de materiais secos em massa foi determinada através das equações definidas no item 4.3.6.2 (Lei de Lyse). Os dados utilizados e os resultados estão apresentados na Tabela 4.49.

- I. Determinação do traço em massa de materiais secos da mistura com a areia natural AN
Equação 4.14.

$$m = 12,054 \times 0,52 - 1,8304 \quad (\text{Eq. 4.14})$$

- II. Determinação do traço em massa de materiais secos da mistura com a areia de britagem A
Equação 4.15.

$$m = 42,568 \times 0,66 - 24,655 \quad (\text{Eq. 4.15})$$

- III. Determinação do traço em massa de materiais secos da mistura com a areia de britagem D
Equação 4.16

$$m = 10,43 \times 0,55 - 1,8146 \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Tabela 4.29: Dados e resultados da relação materiais secos em massa.

MISTURAS	RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO (kg/kg)	RELAÇÃO MATERIAIS SECOS (kg)
A N	0,52	4,43
A	0,66	3,25
D	0,55	3,94

4.4.1.4 Determinação da quantidade cimento para 1 m³ de concreto

A quantidade de cimento necessária para a produção de 1 m³ de concreto foi determinada através das equações definidas no item 4.3.6.3 (Lei de Molinari). Os dados utilizados e os resultados estão apresentados na Tabela 4.50.

- I. Determinação da quantidade de cimento para a produção de 1 m³ de concreto para a mistura com areia natural A N – Equação 4.17

$$C = \frac{0,0489 - \sqrt{0,0489^2 - 4 \times 0,00004 \times 12,08321}}{2 \times 0,00004} \quad (\text{Eq.4.17})$$

- II. Determinação da quantidade de cimento para a produção de 1 m³ de concreto para a mistura com areia de britagem A – Equação 4.18

$$C = \frac{0,0594 - \sqrt{0,0594^2 - 4 \times 0,00006 \times 14,667}}{2 \times 0,00006} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

- III. Determinação da quantidade de cimento para a produção de 1 m³ de concreto para a mistura com areia de britagem D – Equação 4.19

$$C = \frac{0,0533 - \sqrt{0,0533^2 - 4 \times 0,00005 \times 13,20}}{2 \times 0,00005} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Tabela 4.30: Dados e resultados da quantidade de cimento para 1 m³ de concreto

MISTURA	TEOR DE ARGAMASSA (α - %)	fcd ₂₈ (MPa)	a/c (kg/kg)	MATERIAIS SECOS EM MASSA (m - kg/kg)	CIMENTO (kg)
A N	51	31,6	0,52	4,43	344,00
A	59	31,6	0,66	3,25	471,00
D	55	31,6	0,55	3,94	391,00

4.4.1.5 Determinação do traço

Com base nas definições das seções 4.4.1 a 4.4.4 pode-se estabelecer a proporção entre cimento, agregados, ou seja, o traço em materiais secos das misturas. A partir dos traços em materiais secos e do teor de argamassa foram definidos, com base da equação 4.20, os traços unitários que estabelecem as proporções individualizadas de todos os materiais, cimento, areia, brita e água. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.51

$$\alpha = \frac{1+a}{1+m} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

onde:

α = teor de argamassa

a = areia

$m = (a+p)$ = matérias secas em massa

Tabela 4.31: Dados e resultados do traço individualizado para as três misturas.

MISTURAS	TEOR DE ARGAMASSA (α - %)	TRAÇO EM MATERIAIS SECOS EM MASSA (c:m)	a/c (kg/kg)	TRAÇO UNITÁRIO (c:a:p:A)
A N	51	1:4,43	0,52	1:1,77:2,66:0,52
A	59	1:3,25	0,66	1:1,51:1,74:0,66
D	55	1:3,94	0,55	1:1,72:2,22:0,55

4.4.1.6 Consumo de materiais

Com base nos traços unitários foi possível definir o consumo de materiais por metro cúbico de concreto. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.52 e representados na figura 4.40.

Tabela 4.32: Consumo de materiais para um metro cúbico de concreto.

MATERIAIS (kg)	MISTURAS		
	A N	A	D
CIMENTO (kg/m³)	343,77	470,94	390,98
AREIA (kg/m³)	608,47	711,12	672,49
BRITA 1 (kg/m³)	914,43	819,44	867,98
ÁGUA (kg/m³)	178,76	310,82	215,04

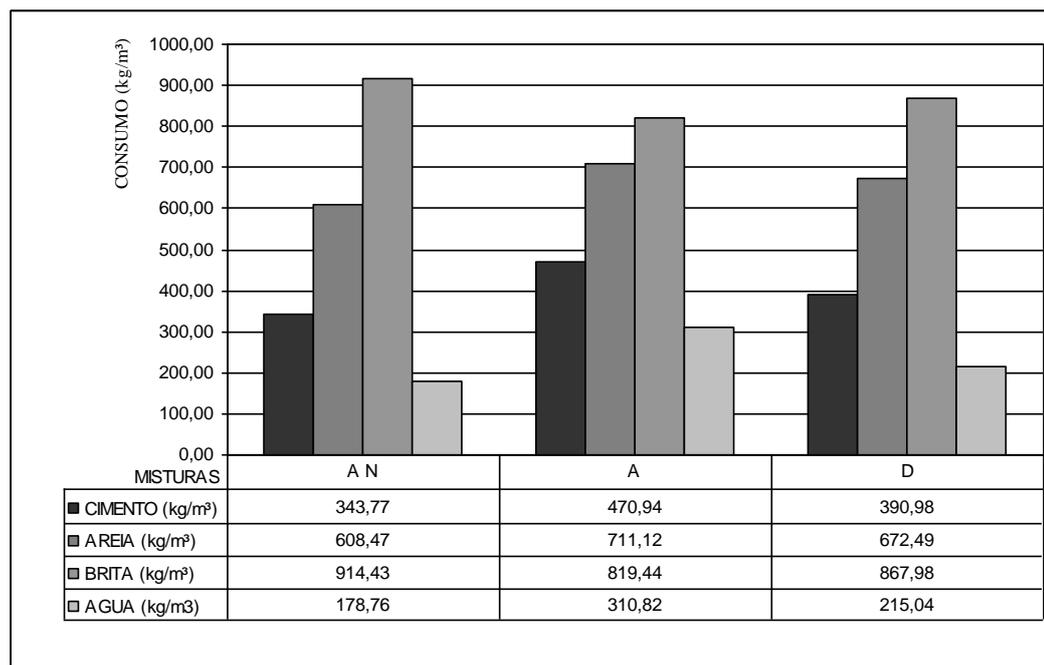


Figura 4.40: Consumo de materiais para um metro cúbico de concreto.

Os resultados demonstram que as areias de britagem necessitam para atingir uma mesma resistência de uma quantidade maior de cimento, areia e água e de uma quantidade menor de brita, confirmando os resultados apresentados no item 4.3.3.

4.4.2 Avaliação das Propriedades do Concreto

Definidos os traços unitários foram elaboradas três misturas a partir das quais foram moldados 36 corpos-de-prova para a avaliação das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

4.4.2.1 Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco

Os resultados apresentados na Tabela 4.53 demonstram que as misturas possuem trabalhabilidade e consistências adequadas a produção de concreto estrutural, sendo as misturas AN e D são classificadas como plásticas e a mistura A como fluída, (ver Capítulo 2, seção 2.6.2).

Tabela 4.33: Propriedades do concreto no estado fresco.

MISTURAS	TEOR DE ARGAMASSA (a - %)	TRAÇO UNITÁRIO EM MAT. SECOS c(a+P)	a/c (kg/kg)	SLUMP (mm)	CONSISTÊNCIA (%)
A N	51	1:1,77:2,66	0,52	65	9,58
A	59	1:1,51:1,74	0,66	68	15,53
D	55	1:1,72:2,22	0,55	63	11,13

4.4.2.2 Avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido

Foram analisadas a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.54 e representados nas Figuras 4.41, 4.42, 4.43 e 4.44.

Os resultados de resistência a compressão, medidos aos 3 e 7 dias, representam a média de três determinações.

Os resultados de resistência à compressão, medidos aos 28 dias, representam a média de seis determinações.

Os resultados de módulo de elasticidade foram medidos aos 28 dias e representam a média de três determinações.

Tabela 4.34: Resistência a compressão axial aos 3, 7 e 28 dias.

MISTURAS	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL (MPa)			MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)
	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	
A N	15,59 ± 0,67	20,08 ± 0,43	30,20 ± 0,33	27,33 ± 0,88
A	18,27 ± 0,28	24,67 ± 0,12	29,98 ± 0,60	20,85 ± 0,66
D	16,36 ± 0,17	20,99 ± 0,42	30,94 ± 0,61	23,20 ± 0,37

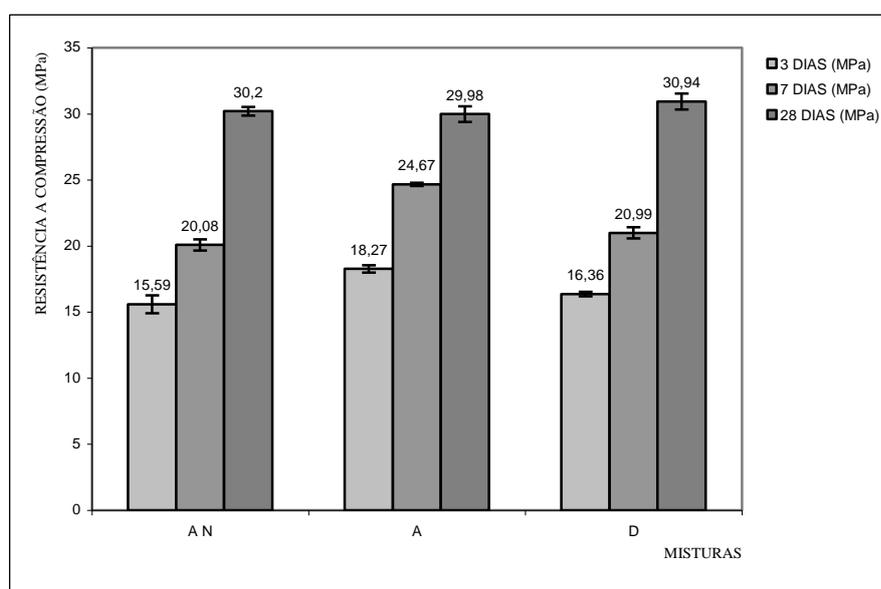


Figura 4.41: Resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias.

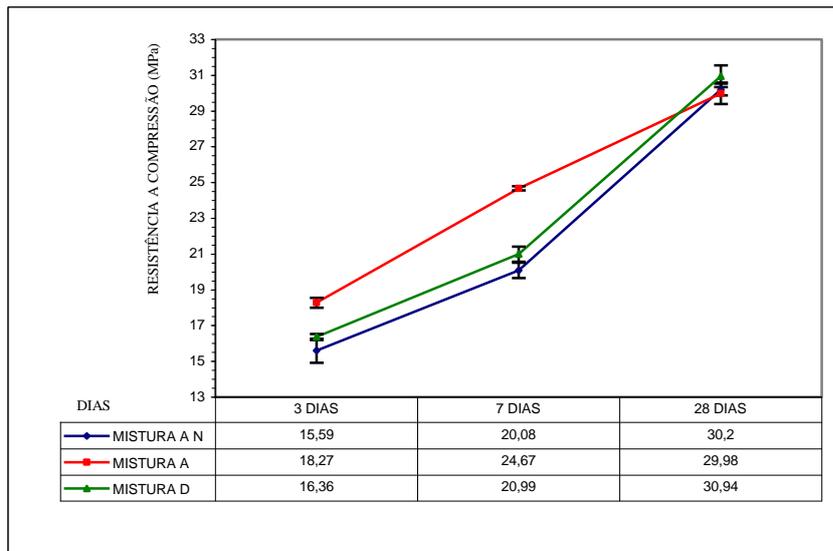


Figura 4.42: Resistência à compressão axial ao longo do tempo.

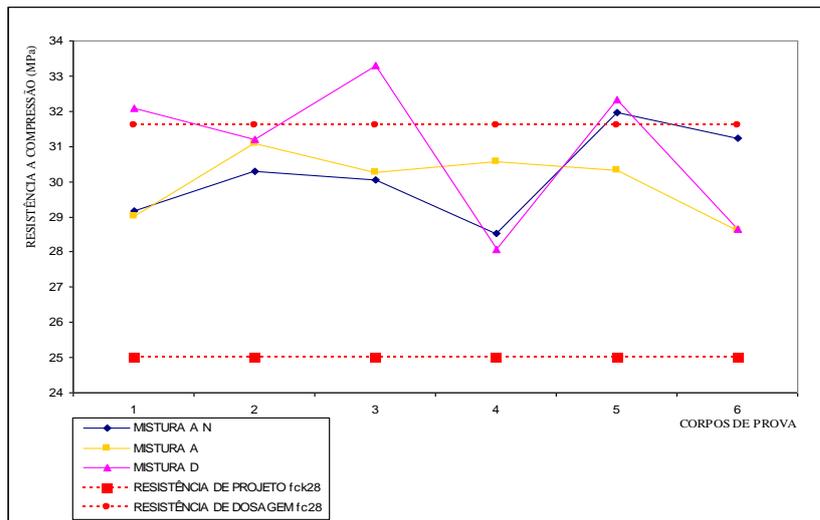


Figura 4.43: Resistência à compressão axial medidas aos 28 dias.

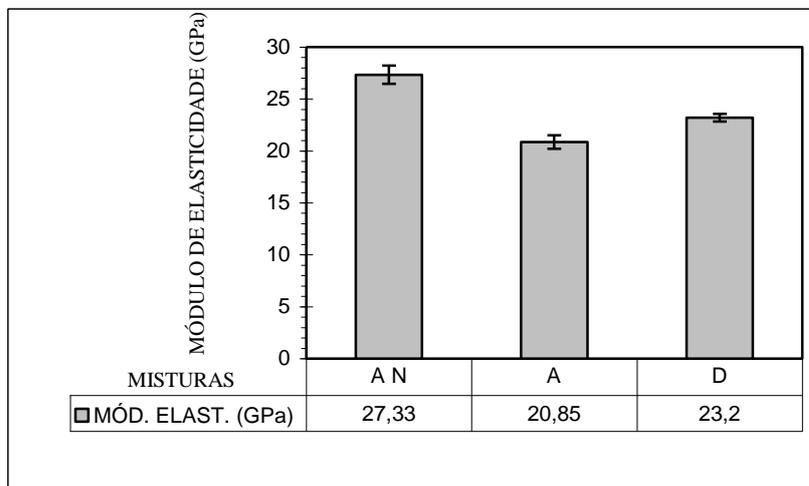


Figura 4.44: Módulo de elasticidade medido aos 28 dias.

Analisando os resultados percebe-se que:

- I. As resistências aos 3, 7 e 28 dias das misturas AN e D são praticamente iguais;
- II. A mistura A apresenta resistência maior que as misturas AN e D aos 3 e aos 7 dias, no entanto um pouco menor aos 28 dias;
- III. As resistências à compressão axial aos 28 dias atingiram valores, entre 25MPa e 31,6MPa, nas três misturas, o que era esperado;
- IV. As diferenças entre os valores encontrados aos 28 dias são na ordem de 3%, estatisticamente iguais.
- V. Os módulos de elasticidade apresentaram valores diferentes nas três misturas e abaixo dos esperados para concretos classe C25, (28 GPa)
- VI. Os módulos de elasticidade dos concretos que utilizaram areia de britagem apresentaram valores 30 % abaixo dos valores dos concretos executados com areia natural.

Os resultados de resistência a compressão axial demonstram que os traços corrigidos, com base nos diagramas de dosagem apresentados no item 4.3.7, estão corretos.

Os resultados de módulo de elasticidade apresentam valores decrescentes, na medida em que cresce o teor de argamassa das misturas, mesmo com o traço corrigido. Observa-se que o mesmo acontece com a resistência à compressão para um mesmo traço (1:5), (Figura 4.45). Não existe uma razão aparente para que isso esteja acontecendo, uma vez que mantendo o teor de argamassa e corrigido o traço se atinge resistências de compressão iguais.

A explicação pode estar no teor de material pulverulento, na forma e na textura superficial dos grãos, (Figura 4.46), que afetam diretamente o teor de argamassa. O aumento do teor de argamassa implica em uma diminuição da quantidade de agregado graúdo, que pode levar a uma diminuição do módulo de elasticidade (Cap. 2, seção 2.6.1), conforme constatado.

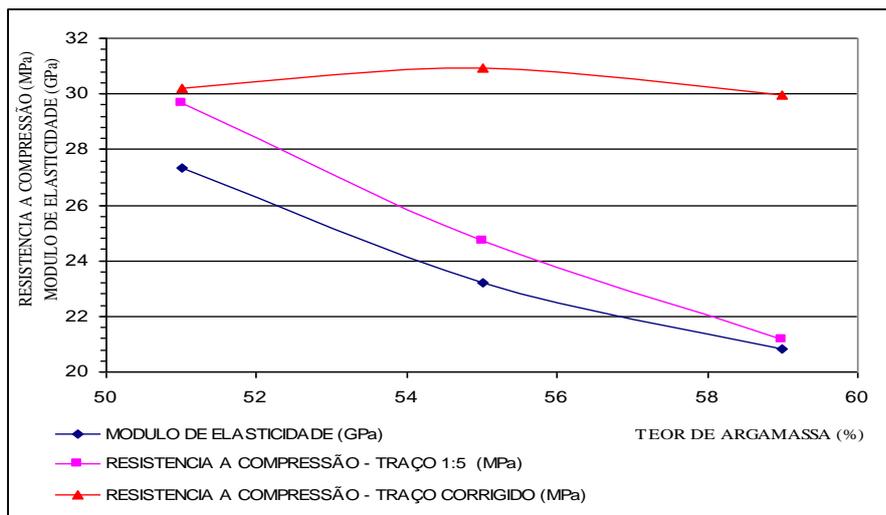


Figura 4.45: Relação entre resistência à compressão, módulo de elasticidade e teor de argamassa.

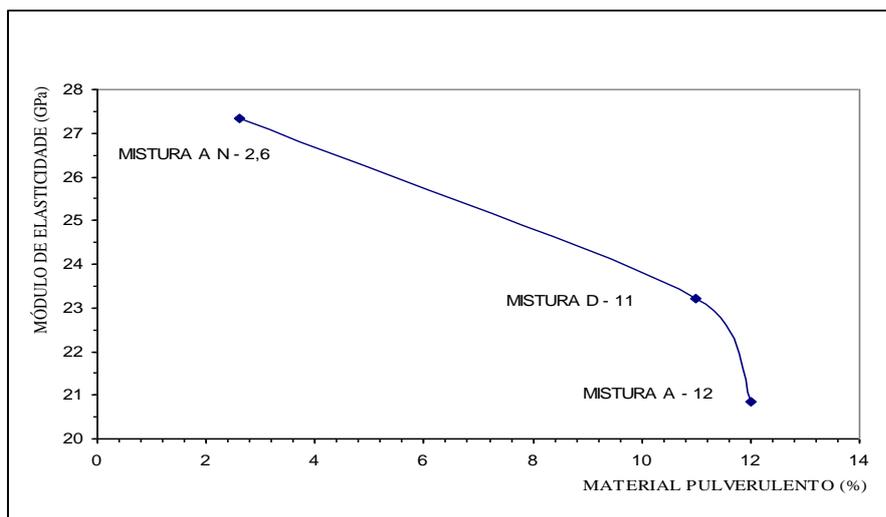


Figura 4.46: Relação entre módulo de elasticidade e material pulverulento.

4.4.3 Avaliação de Custos

Com base nos diagramas de dosagem foram montados traços para três resistências de projeto específicas, 20, 25 e 30 MPa para cada mistura em estudo (Tabela 4.55). Com a definição dos traços foi definido o consumo de materiais e o custo de materiais para a produção de um metro cúbico de concreto (Tabela 4.56 e 4.57), (Figura 4.47).

Analisando as tabelas e o gráfico percebe-se que os custos variam de forma diferente entre as misturas dependendo da resistência. Para uma resistência de 20 MPa o custo da mistura D é menor do que o custo das outras misturas. Já para uma resistência de 25 MPa o custo da mistura A N é menor. Comparando os custos das misturas que utilizam areia de

britagem com a mistura que utiliza areia natural. Comparando as misturas que utilizam areia de britagem a mistura D apresentou menores custos em todas as resistências.

Tabela 4.35: Traço em materiais para três resistências específicas.

RESISTÊNCIA	RESISTÊNCIA fck 20 MPa			RESISTÊNCIA fck 25 MPa			RESISTÊNCIA fck 30 MPa		
	A N	A	D	A N	A	D	A N	A	D
AREIAS									
TRAÇO (1:m)	1:5,11	1:4,17	1:4,90	1:4,43	1:3,25	1:3,94	1:3,86	1:2,30	1:3,01
a/c	0,58	0,68	0,64	0,52	0,66	0,55	0,47	0,63	0,46

Tabela 4.36: Consumo de materiais para três resistências específicas.

MATERIAIS (kg)	MISTURAS – fck 20 MPa			MISTURAS – fck 25 MPa			MISTURAS – fck 30 MPa		
	A N	A	D	A N	A	D	A N	A	D
CIMENTO	313,63	368,73	334,25	343,77	470,94	390,98	428,31	489,41	457,00
AREIA	664,89	755,91	417,82	608,47	711,11	672,48	633,90	460,05	548,40
BRITA 1	940,89	781,72	889,11	914,42	819,43	867,97	1019,38	660,70	822,60
ÁGUA	181,90	250,74	213,92	178,76	310,82	215,04	201,31	308,33	210,22

Tabela 4.37: Custo de materiais para a produção de um metro cúbico de concreto para três resistências específicas.

RESISTÊNCIA fck - (MPa)	MISTURAS		
	A N (R\$)	A (R\$)	D (R\$)
20	181,06	188,80	167,45
25	187,88	225,52	195,23
30	223,61	217,43	213,13

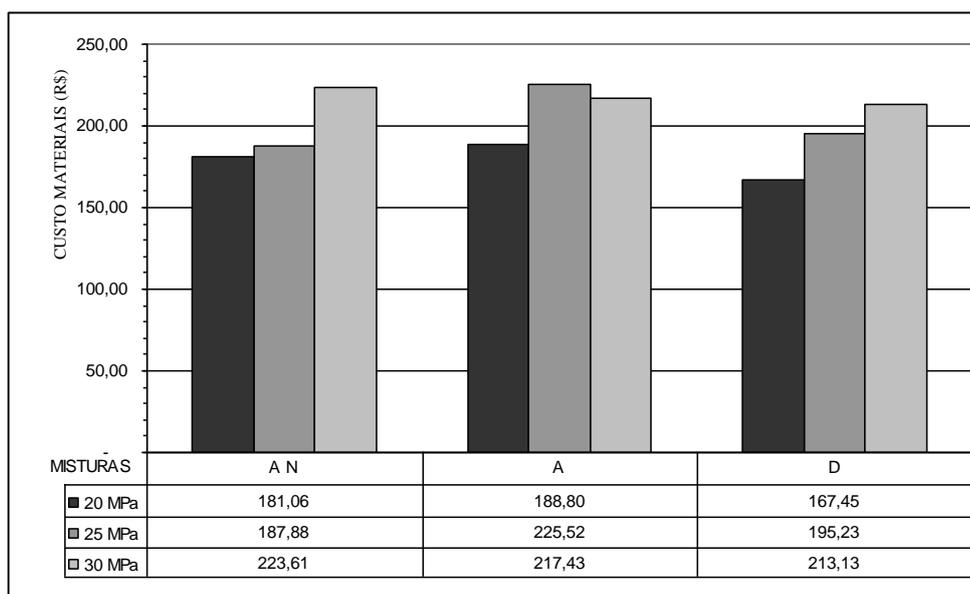


Figura 4.47: Comparação dos custos dos materiais para a produção de um metro cúbico de concreto.

5. CONCLUSÕES

5.1 Considerações Iniciais

Essa dissertação apresentou um estudo comparativo entre as areias de britagem produzidas na região de Caxias do Sul e a areia natural extraída do leito de rios, com o objetivo de verificar a viabilidade de substituição total da areia natural pela areia de britagem no processo de fabricação do concreto estrutural de cimento Portland.

Numa primeira fase as areias, natural e de britagem foram caracterizadas através de análises laboratoriais onde foram verificadas e comparadas, com base em normas técnicas, as propriedades físicas decorrentes da composição mineralógica e petrográfica e do processo de fabricação. Numa segunda fase as areias foram avaliadas, comparativamente, quanto ao seu desempenho como agregado miúdo nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Os métodos adotados tanto para a caracterização das areias, quanto para a avaliação das propriedades do concreto se mostraram adequados e eficientes. As conclusões do trabalho estão apresentadas nos itens 5.2 e 5.3.

5.2 Conclusões referentes à caracterização das areias

Os ensaios de caracterização das areias de britagem quanto à composição mineralógica e petrográfica (massa específica, massa unitária), comparados com os da areia natural apresentaram variações inferiores a 3% e dentro dos limites normativos com exceção da areia C que apresentou massa unitária um pouco abaixo do limite inferior (Tabela 4.10). Tais resultados indicam que as rochas basálticas existentes na região têm características adequadas para a produção de areia a serem utilizadas na produção de concreto estrutural, sem alteração de propriedades importantes do concreto como o peso específico e a permeabilidade. Já as características decorrentes do processo de fabricação das areias de britagem nas empresas produtoras, (composição granulométrica, teor de material pulverulento, forma e textura superficial), apresentaram diferenças que interferiram nas propriedades do concreto tanto estado fresco quanto no estado endurecido.

Apesar de apresentarem composição granulométrica dentro dos limites normativos, as areias de britagem apresentam uma concentração de grãos próximo da faixa superior do limite normativo, altos teores de material pulverulento (material fino com dimensões inferiores a

0,075 mm), grãos com forma cúbica e textura rugosa (Capítulo 4, seção 4.2.4). Tudo indica que essas características foram responsáveis pelas alterações no teor de argamassa, na relação água/cimento afetando a trabalhabilidade, a consistência, a resistência a compressão axial e o módulo de elasticidade, (Capítulo 4, seção 4.3). A quantidade de material fino presente nas areias B, C e E (quantidades superiores aos limites normativos) foi o fator determinante para a exclusão dessas areias nas etapas de pesquisa 2 e 3.

5.3 Conclusões referentes às propriedades do concreto

Conforme demonstrado na Etapa 3, (Capítulo 4, seção 4.4.2.1) para manter a trabalhabilidade e a consistência do concreto no estado fresco, dentro dos limites normativos para a fabricação de concreto estrutural, executado com areias de britagem, foi necessário aumentar o teor de argamassa em 4% e 8% para as misturas D e A, respectivamente, em relação a mistura com a areia natural. Por consequência a relação água/cimento também aumentou 5,77% para a mistura com areia D e 26,92% para a mistura com areia A. Os aumentos nos teores de argamassa provocaram alterações no proporcionamento dos materiais, elevando o consumo de cimento (Tabela 4.32). Os resultados indicam que a causa principal pode estar relacionada com a quantidade de material pulverulento presente nas areias de britagem (Figuras 4.23 e 4.24). Outras possíveis causas podem estar relacionadas com a forma e a textura superficial dos grãos que se apresentam mais cúbicas e rugosas (Capítulo 4, seção 4.2.7). Assim para se manter as características do concreto foram necessárias correções nos traços para as misturas com areia de britagem, A e D.

Uma vez corrigidos os traços, as propriedades do concreto endurecido para as três misturas (resistência à compressão axial e módulo de elasticidade) deveriam ser as mesmas. Com relação à resistência à compressão axial os ensaios aos 28 dias apresentaram variações inferiores a 3% (Tabela 4.54). Com relação ao módulo de elasticidade os ensaios, também aos 28 dias, demonstraram que os concretos produzidos com areias de britagem apresentam módulos de elasticidade em torno de 15% inferiores aos produzidos com areia natural. A diminuição foi proporcional ao aumento no teor de argamassa, evidenciando a influência negativa da presença elevada de material pulverulento (Figuras 4.45 e 4.46). Entretanto os valores encontrados estão dentro dos valores admitidos para o tipo de concreto analisado (Capítulo 2, seção 2.6.1).

5.4 Considerações Finais

Os resultados indicaram que a substituição da areia natural pela areia de britagem é tecnicamente viável. Pela análise dos diagramas de dosagem montados com base nas leis de comportamento do concreto foi possível a elaboração de equações que permitem a determinação do proporcionamento dos materiais constituintes do concreto para resistências desejadas (Capítulo 4, seção 4.3.6). Entretanto, as diferenças nas características decorrentes do processo produtivo das areias de britagem avaliadas, provocaram variações nas propriedades dos concretos produzidos com diferentes areias, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Para cada tipo de areia foi necessária uma composição diferente dos materiais constituintes para uma mesma resistência. Esse fato impediu a formulação de um traço único para misturas com as areias de britagem, indicando a necessidade de ajustes no processo produtivo de forma a se obter uma areia padronizada.

Se as empresas de britagem ajustarem seus processos produtivos, de forma a produzir uma areia de britagem com uma composição granulométrica equilibrada conforme sugerido pela norma (NBR 7211) e com teor de material pulverulento adequado será possível produzir concretos com desempenho técnico, econômico e ambiental superiores aos concretos produzidos com areia natural.

Por fim os dados apresentados e discutidos neste trabalho indicam que as areias de britagem produzidas pelas empresas A e D podem ser utilizadas na produção de concreto estrutural. Permitem também que os profissionais responsáveis pela produção e aplicação de concreto tenham segurança na aplicação da areia de britagem na produção de concretos estrutural, melhorando a cadeia produtiva.

5.5 Perspectivas Futuras

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se desenvolver estudos para:

- I. Ajustar os processos produtivos com o objetivo de se padronizar as características das areias;
- II. Formular um traço com um proporcionamento de materiais de forma a se obter concretos técnica e economicamente mais eficientes;
- III. Analisar outras propriedades do concreto produzidos com areia de britagem como a reação álcali-agregado, retração e absorção de água;
- IV. Identificar as causas da diminuição do módulo de elasticidade com misturas com areia de britagem;

- V. Analisar custos de produção e aplicação de concretos produzidos com as areias de britagem;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Consumo de Concreto. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>

AÏTCIN, P. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 9, p. 1349-59, 2000.

ALAEJOS G. P.; CANOVAS, M. F. Composición y dosificación de hormigones de alta resistênciã. *Cemento e Hormigón*, n. 709, p. 971 – 990, ago/1992.

ALMEIDA, I. R. *Programa de Economia de Cimento e Qualificação Técnico-Econômica de Aditivos para Concreto*. Niterói: UFF, 1984. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Fluminense, 1984.

ALMEIDA, S.L.; DAVID, T.A.; CUNHA, E.R.; TAVARES, L.M. Produção de Areia Artificial em usina piloto na Pedra Sul Mineração. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 20, 2004, Florianópolis. 105-112.

ALMEIDA, I.R., Concretos dosados em central, com areia 100% artificial. In: *II SUFFIB: O uso da fração fina de britagem*, 2, 2005. *Anais*, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.1-8: Standart practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete: ACI manual of concrete practice. Detroit, Michigan, 1985. (revised 1988) Part 1: materials and general properties of concrete.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 116 R-90: Cement end concrete terminology: ACI manual of concrete practice. Detroit, 1994b. part 1: materials and general properties of concrete.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM C 125. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, 1993

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES E. H. V.; FREITAS E. G. A. *Materiais de construção*. EDUR, 2000, 203p. v. 1. ISBN 8585720239.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5732 – *Cimento Portland Comum*. Rio de Janeiro. 1991;

____NBR 5738 – *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro. 1994;

____NBR 5739 – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro. 1994;

____NBR 6118 – *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro. 2007;

____NBR 6467 – *Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio*. Rio de Janeiro. 2006;

____NBR 7211 – *Agregado para Concreto - Especificação*. Rio de Janeiro. 2005;

____NBR 7389-1 – *Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto*. Rio de Janeiro. 2009;

____NBR 7809 – *Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro*. Rio de Janeiro. 1983;

____NBR 8953 – *Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro. 2009;

____NBR 9778 – *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro. 2009;

____NBR 9935 – *Agregados – Terminologia*. Rio de Janeiro. 2005;

____NBR 12655 – *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento*. Rio de Janeiro. 2006;

____NBR NM 26 – *Agregados – Amostragem*. Rio de Janeiro. 2005;

____NBR NM 27 – *Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório*. Rio de Janeiro. 2000;

____NBR NM 30 – *Agregado miúdo – Determinação da absorção da absorção de água*. Rio de Janeiro. 2001;

____NBR NM 45 – *Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro. 2006;

____NBR NM 46 – *Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.* Rio de Janeiro. 2003;

____NBR NM 52 – *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.* Rio de Janeiro. 2003;

____NBR NM 67 – *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.* Rio de Janeiro. 1998.

____NBR NM 248 – *Agregados – Determinação da composição granulométrica.* Rio de Janeiro. 2003;

____NBR NM-ISO 3310-1 – *Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação.* Rio de Janeiro.1997;

____NBR NM-ISO 3310-2 – *Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação.* Rio de Janeiro.1997;

BASÍLIO F. A. Considerações Gerais sobre a Dosagem do Concreto. In: Colóquio Sobre Dosagem do Concreto, maio de 1977, São Paulo. São Paulo: IBRACON, 1977.

BASTOS, S. R. B. *Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção de concretos convencionais.* In: II SUFFIB – Seminário: O uso da fração fina de britagem. Anais. 2005.

BOGGIO, A. J. Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de concretos de cimento Portland. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia civil, 2000.

BOLSILJKOV, V. B. SCC Mixes With Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler, *Cement and Concrete Research*, n.33, p. 1279-1286, 2003.

BONAVETTI, V. L., IRASSAR, E. F. The effect of stone dust content in sand. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n.3, p. 580-590, 1994.

BSI – BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS-812-105.1:89. Testing Aggregate. London, 1990.

BUEST NETO, G.T. *Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland*. Curitiba: UFPR, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, 2006.

BUI D. D.; HU J.; STROEVEN P. Particle size effect on the strength of rice husk ash blended gap-graded Portland cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, v.27, p. 357-366, 2005.

CELIK, T.; MARAR, K. Effects of Crushed Stone Dust on Some Properties of Concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n.7, p. 1121-1130, 1996.

CHENGZI, Z.; AIQIN, W.; MINGSHU, T. The filling role of pozzolanic material. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 6, p. 943-947, 1996.

CHERIAF, M.; CAVALCANTE ROCHA, J.; PERA, J. Pozolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. *Cement Concrete Research Journal*, v.29, n. 9, p. 1387-1391, 1999.

ERDOGDU, K.; TÜRKER, P. Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 9, p. 1217-1222, 1999.

FOWLER, D.W.; CONSTANTINO, C. *International Research on Fines in Concrete*. In: Annual Symposium International Center for Aggregates Research, 5, 1997.

GUIMARÃES A.T.C. *Propriedades do concreto Fresco*. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p. 474-494

HELENE, P.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: Pini, 1982.

HELENE P. *Dosagem dos Concretos de Cimento Portland*. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p. 439-472

ISAIA, G.C. O Concreto: da Era Clássica à Contemporânea in *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p. 1 - 43.

ISAIA, G.C. *Retrospectiva do Concreto no Brasil*. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p.45-74

JACINTHO, A. E.; GIONGO, J.S. *Resistência Mecânica do Concreto*. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p.45-74

JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. *Concrete International*, v. 16, n. 5, p. 45-52, 1994.

McKEAGNEY, R. B. *Trend To Use More Stone Sand*. In: Conference on Crushed Stone for Road and Street Construction and Reconstruction, national Crushed stone association, 1984. 14-15.

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

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Centro de Tecnologia Mineral, CETEM. ALMEIDA, S.L.M.; SAMPAIO, J.A. *Obtenção de areia artificial com base em finos de pedreiras*. Rio de Janeiro, 2002.

NAM-SHIK, A.H.N. *An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate micro fines in portland cement concrete*, Austin: The University of Texas, 2000. Dissertation. The University of Texas, 2000.

NEVILLE, A. M. *Properties of concret*. 4.ed. New York: J. Wiley, 1996.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Concrete Technology*. London Scientific & Technical, 1987.

NEVILLE, A. M.; Tradução GIAMMUSSO S. E. *Propriedades do concreto*. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

OCHI, T., OKUBO, S., FUKUI, K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforced fiber. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, n. 6, p. 448-455, 2007.

OHASHI, T. *Maior planta de areia de britagem do Brasil*. In: II SUFFIB – Seminário: O uso da fração fina de britagem. Anais. 2005.

PAPAYIANNI, I.; TSOHOS, G.; OIKONOMOU, N.; MAVRIA, P. Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*. Amsterdam e Londres, v. 27, p. 217-222, 2005.

PAULON V.A. A Microestrutura do Concreto Convencional. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p. 583-604

PETRUCCI, E.G.R. *Concreto de cimento portland*. São Paulo: Globo, 1998.

RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The properties of recycled aggregate concrete. *Concrete International*, v.19, n.7, p.56-60, 1997.

SBRIGHI NETO, C. *Agregados para Concreto*. In: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. p. 323-343.

RECENA, A, P. Dosagem empírica e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland. EDIPUCRS, 2002, Porto Alegre, RS;

RAMACHANDRAN, V. S.; FELDMAN, R.F. Cement Science. In: ____ (Ed) *Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology*. New Jersey: Park Ridges, 1984. p. 1-53.

REIS R.J.P. *Influência do beneficiamento, por peneiramento, de areias de rio e artificiais, nas características mecânicas do concreto de cimento portland*. In: II SUFFIB – Seminário: O uso da fração fina de britagem. Anais. 2005.

VALLETTE, R. *Manuel de Composition des betons: methode expérimentale Vallette*. 3 ed. Paris: Eyrolles, 1963.

Legislação mineral brasileira. Disponível em:

<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=67> Acesso em: 12 dez. 2009.

Sumário Mineral Brasileiro, 2008. Disponível em: www.dnpm.gov.br Acesso em: 12 dez. 2009.

Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Disponível em: <http://www.ibama.gov.br> Acesso em: 15 ago. 2008.

ARAÚJO, Rodrigues e Freitas. Concreto de Cimento Portland. Materiais de Construção. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/dau/profs/edmund/Concreto%20simples.pdf> Acesso em 10 set. 2009.

VOTORANTIN CIMENTOS - www.votorantin-cimentos.com.br Acesso em 16 out. 2009.

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – LABTEC

http://www.ucs.br/ucs/extensao/servicos_tecnologicos/pesquisa_tecnologia/labtec/apresentação. Acesso em 10 jun. 2009.