

GILBERTO WALTER GOGOLA

CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS NO DESEMPENHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Coney Campiteli

CURITIBA


OUTUBRO 2003

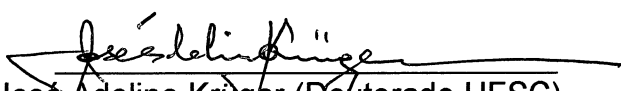
TERMO DE APROVAÇÃO

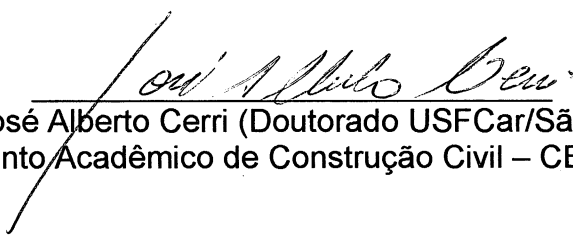
GILBERTO WALTER GOGOLA

“CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS AGREGADOS NO DESEMPENHO”

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


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


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


Prof. Dr. José Alberto Cerri (Doutorado USFCar/São Carlos)
Departamento Acadêmico de Construção Civil – CEFET/PR.

Curitiba, 16 de outubro de 2003.

À minha esposa Girley que esteve ao meu lado, motivando e apoiando nos momentos difíceis, por sua compreensão, carinho e amor.

Às minhas filhas Milena e Verônica pérolas da minha vida e fatores de minha formação e do meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu primeiro a vida, saúde e forças para empreender este trabalho.

Ao prof. Dr. Vicente Campiteli pela sua orientação e contribuições durante desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores José Adelino Krüger e José Alberto Cerri pelas valiosas contribuições no exame de defesa.

Ao prof. Martins Dagostim pelo discernimento, lucidez e segurança com que nos ajudou a estruturar a redação desta dissertação.

À Stone Comércio Pavimento e Indústria Ltda., pela gentileza na doação do agregado riolito utilizado na pesquisa e especialmente ao engenheiro Carlos Alberto Ribas pela disponibilidade em nos atender.

À Cia. De Cimento Portland Rio Branco – Votoran, pela doação do cimento utilizado nos experimentos com concreto, especialmente aos engenheiros Marcelo Lass e Cláudio P. Santiago.

Ao Sr. Jorge Cekulic pelo apoio, incentivo e informações sobre britagem de agregados por impacto.

Aos colegas e amigos Professores do Departamento de Construção Civil do CEFET/PR, José Brandi, Adauto P. Lima, Roberto L. Sprenger e Amacim M. Rodrigues pelo incentivo, apoio e ajuda na solução de problemas com os materiais utilizados.

Aos amigos Marcia, Ivan, Délcio, Ely, Karvat, Luciano, Ricardo e Paulo Adriano, pelo incentivo e apoio durante o desenvolvimento dos trabalhos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS E LISTA DE SIGLAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	5
1.3 OBJETIVO.....	6
1.3.1 Objetivo geral.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	8
2.1.1 Histórico da Construção.....	8
2.1.2 Tipos de Materiais de Construção Civil.....	10
2.2 A TECNOLOGIA DOS CONCRETOS.....	10
2.2.1 Seleção dos Materiais.....	12
2.2.2 Propriedades dos Concretos.....	14
2.2.3 Porosidade.....	16
2.2.4 Trabalhabilidade.....	17
2.2.5 Segregação.....	20
2.2.6 Durabilidade.....	21
2.2.7 Retração.....	23
2.3 AS PROPRIEDADES DO AGREGADO.....	24
2.3.1 Parâmetros Granulométricos.....	27
2.3.2 Forma dos Grãos.....	29
2.3.3 Arredondamento.....	33
2.3.4 Textura da Superfície dos Grãos.....	35

2.3.5 Empacotamento dos Grãos	36
2.4 AGREGADOS BRITADOS NOS CONCRETOS	42
2.4.1 Influência dos Agregados na Resistência dos Concretos	44
2.4.2 Agregados Miúdos Britados	45
2.4.3 Produção de Agregados	47
2.5 TENDÊNCIAS DO CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 AS ETAPAS DA INVESTIGAÇÃO	52
3.2 AMOSTRAGEM DOS AGREGADOS	56
3.2.1 Material Britado	56
3.2.2 Areia Natural quartzosa	58
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	58
3.3.1 Formação das Amostras do Material Britado de Forma não Lamelar	59
3.3.2 Formação dos Agregados com Granulometria Contínua	60
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO	63
3.5 CONSTITUIÇÃO DOS CONCRETOS	63
3.6 EQUIPAMENTOS, APARELHOS E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	64
3.6.1 Tipo de Betoneira	64
3.6.2 Demais Equipamentos, Ferramentas e Utensílios	65
3.6.3 Preparo dos Materiais	65
3.6.4 Procedimentos de Mistura	66
3.7 DOSAGEM DOS CONCRETOS	68
3.8 VERIFICAÇÕES E ENSAIOS NO CONCRETO	72
3.8.1 Verificações com o Concreto Fresco	72
3.8.2 Verificação e Procedimentos com o Concreto Endurecido	73
3.9 CÁLCULO DA ÁREA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	77
3.10 AS COMPARAÇÕES	77
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	79
4.2 INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	85
4.3 INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NO CONSUMO DE CIMENTO	88

4.4 INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO NA RESISTÊNCIA.....	90
4.5 INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS NA RESISTÊNCIA	94
4.6 COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS EM RELAÇÃO À ABSORÇÃO E A POROSIDADE.....	97
4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	100
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	102
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
5.2 CONCLUSÕES.....	102
5.3 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES.....	103
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CLASSES DE FORMAS DE GRÃOS.....	33
FIGURA 3.1 – AGREGADO BRITADO DE ROCHA RIOLITO.....	57
FIGURA 3.2 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EQUIPAMENTO PRENSA E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	75
FIGURA 3.3 – DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL EQUIPAMENTO- PRENSA E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	76
FIGURA 4.1 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE BRITA DIABÁSICA N.º 1 E BRITA DE RIOLITO N.º 1 E OS LIMITES GRANULOMÉTRICOS PRESCRITOS PELA NBR-7211/1983 (BRITA N.º 1).....	83
FIGURA 4.2 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDOS E OS LIMITES GRANULOMÉTRICOS PRESCRITOS PELA NBR 7211/1986 (AGREGADO MIÚDO ZONA 3).....	83
FIGURA 4.3 – INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NA RESISTÊNCIA DA COMPRESSÃO AXIAL.....	85
FIGURA 4.4 – INFLUÊNCIA DO AGREGADO NO TEOR DE AR INCORPORADO.....	86
FIGURA 4.5 – RELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE CIMENTO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETOS COM DIFERENTES AGREGADOS MIÚDOS.....	88
FIGURA 4.6 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA OS CONCRETOS M-1 E M-2.....	89
FIGURA 4.7 – DIAGRAMA DE DOSAGEM DOS CONCRETOS REFERÊNCIA E M-1.....	91
FIGURA 4.8 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS TOTAIS DOS CONCRETOS DE REFERÊNCIA E M-1.....	92
FIGURA 4.9 – DIAGRAMA DE DOSAGEM DOS CONCRETOS <i>IN NATURA</i> , M-1 E M-2.....	95
FIGURA 4.10 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA TOTAL DOS CONCRETOS <i>IN NATURA</i> , M-3 E M-4.....	96
FIGURA 4.11 – COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS EM RELAÇÃO À ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	98
FIGURA 4.12 – ABSORÇÃO RELATIVA DOS CONCRETOS.....	99
FIGURA 4.13 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS.....	101

LISTA DE QUADROS E TABELAS

TABELA 3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DO CIMENTO.....	63
TABELA 3.2 -	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO.....	63
QUADRO 3.3-	CONSTITUIÇÕES DOS CONCRETOS COM OS MATERIAIS INVESTIGADOS.....	64
TABELA 4.1 -	RESULTADOS DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS UTILIZADOS.....	81
TABELA 4.2 -	PARÂMETROS DOS ÍNDICES FÍSICOS E ÍNDICES QUALIDADE DOS AGREGADOS UTILIZADOS.....	82
TABELA 4.3 -	RESULTADOS DOS ENSAIOS, DAS PROPRIEDADES VERIFICADAS RELAÇÃO AOS MATERIAIS ESTUDADOS NOS CONCRETOS.....	84
TABELA 4.4 -	RESUMO DAS PROPRIEDADES DE ABSORÇÃO, POROSIDADE, MÓDULO DE FINURA, ÁREA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS, <i>IN NATURA</i> , M-3 E M-4.....	98
TABELA 4.5 -	VALORES DE MASSA UNITÁRIA, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS AGREGADOS.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
AE	Área específica
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
C	Consumo de cimento
CaO	Óxido de cálcio
CIB	INTERNATIONAL COUNCIL FOR BUILDING
CPII-F-32	Cimento portland composto com filler, com classe de resistência de 32 MPa
d	Dimensão da partícula considerada
d _{máx}	Dimensão máxima característica do agregado (mm)
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
m	Relação agregado total/cimento
ME	Massa específica
MF	Módulo de finura do agregado
MU	Massa unitária
M-1	Concreto confeccionado com agregado graúdo – brita nº 1 de riolito e agregado miúdo – areia natural
M-2	Concreto confeccionado com agregado graúdo – brita nº 1 de riolito e agregado miúdo – areia de riolito
M-3	Concreto confeccionado com agregado composto com granulometria contínua segundo modelo de Füller (1901) (q=0,37)
M-4	Concreto confeccionado com agregado composto com granulometria contínua segundo modelo de Füller (1901) (q=0,507)
NBR	NORMA BRASILEIRA REGISTRADA
NM	NORMA MERCOSUL

R. Ins.	Resíduo insolúvel
Sd	Desvio padrão de dosagem
SiO ₂	Óxido de silício
SO ₃	Óxido de enxofre

LISTA DE SÍMBOLOS

α	- teor de argamassa seca
a/c	- relação água/cimento
f_{cj}	- resistência à compressão j dias, (MPa)
f_{cm}	- resistência média à compressão, (MPa)
f_{c7}	- resistência à compressão aos sete dias de idade
f_{c28}	- resistência à compressão aos vinte e oito dias de idade
f_{tj}	- resistência à tração, (MPa)
f_{tm}	- resistência média à tração, (MPa)
f_{t28}	- resistência à tração aos vinte e oito dias de idade
H	-relação água/materiais secos
γ_{cf}	- massa específica do concreto no estado fresco, (kg/dm ³)
γ_s	- massa específica do concreto na condição seca, (kg/dm ³)
μm	- unidade de medida equivalente a 10 ⁻⁶ metros
#	- abertura das malhas quadradas das peneiras normalizadas da ABNT (mm)
Σ	- somatório
°C	- graus Célsius

RESUMO

Considerando que o esgotamento das jazidas de agregados naturais, como as areias, principalmente próximo aos grandes centros consumidores é fato inquestionável, desenvolveu-se um estudo teórico-experimental, a respeito da influência da substituição da areia natural e da pedra britada, comumente empregada na região de Curitiba/PR, pelos agregados britados por impacto em concretos de cimento portland. No estudo teórico explora-se a influência das propriedades físicas e geométricas dos grãos de agregados nas propriedades dos concretos. No desenvolvimento experimental analisam-se as alterações de comportamento dos concretos, devido às variações: da forma dos grãos do agregado miúdo e graúdo, da composição granulométrica do agregado total e dos parâmetros de massa unitária índice de vazios. Os resultados indicam que agregados britados por impacto e controlados granulometricamente contribuem positivamente para as propriedades mecânicas do concreto. Os concretos estudados apresentaram resultados superiores para a resistência à compressão e tração quando comparados aos concretos usuais em Curitiba, tomados como referência. Isto ocorreu principalmente devido ao arranjo granulométrico dos agregados, que favoreceu o empacotamento das partículas, e a forma arredondada dos agregados britados, que favoreceu a trabalhabilidade e o empacotamento.

Palavras-chaves: concreto, agregados britados, grãos não lamelares, otimização de empacotamento

ABSTRACT

The depauperation of natural aggregate lains such as sand, mainly near the great consuming centers, is an unquestionable fact. It was developed a theoretical-experimental study about the influence of the substitution of the natural sand by the crushed stone commonly used in the region of Curitiba/PR by the crushed aggregate by impact in portland concrete. In the theoretical study, the influence of the physical and geometrical properties of the grains of aggregate in the concrete properties were explored. In the experimental development, the alteration in the performance of the concrete was analysed due to the variation: of the shape of the grain of the small and big aggregate; of the grading composition of the total aggregate; of the parameters of unitary mass index of emptiness. The results indicate that crushed aggregate by impact and grading controled contribute positively to the mechanical properties of the concrete. The studied concrete shows superior results for the resistance to the compression and traction when compared to the usual concrete at Curitiba, taken as reference. This occurred mainly due to the grading arrangement of the aggregate, which favored the packing of the particles, and to the particles of the round grains of crushed aggregate, that favored workability and the packing.

Key-words: concrete, crushed aggregates, particles of the round grains,
grading optmizing.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As realizações humanas, dentre elas a construção, valendo-se dos avanços tecnológicos, passaram a utilizar elementos naturais de forma desorganizada e inconsciente, preocupando-se apenas com o bem-estar, dinheiro e poder, incapazes de antever o mal que estava sendo causado à natureza.

Voltando ao passado, é de supor que homens e animais competissem entre si na busca de abrigo natural, cavernas, para se protegerem das intempéries, enfim de tudo o que representasse perigo; não exploravam, portanto, a natureza para construir seu 'habitat' e muito menos a dilapidavam.

Contudo, mais tarde, com a vida nômade que passaram a praticar na procura de alimentos, como a caça que escassearia no local do abrigo, e mesmo o aumento populacional, os antepassados começaram a extrair materiais da natureza para construir suas moradias. Mesmo assim a natureza não sofria significativo risco de ser prejudicada, pois o extrativismo era praticado apenas para a sobrevivência e não para armazenar pensando num futuro.

Contudo, recentemente, com o aumento exacerbado da população mundial e a exploração exagerada dos recursos naturais, também implementada pelo desejo de dinheiro e poder, o planeta Terra começou a dar sinais de que está sendo destruído. Diante disso, surgiram grupos de ONG's, como é o caso do Green Peace, que se comprometem a trabalhar para administrar racionalmente água, fauna, flora, minerais, antes que se torne tarde e se deixe o caos para as gerações futuras.

Tal preocupação também se faz presente no campo da construção civil, onde alguns dos materiais básicos são extraídos abusivamente da natureza,

devastando e poluindo-a. Para atender a demanda crescente de moradia, a indústria da construção age com voracidade sobre os elementos naturais para transformá-los em residências, ou edifícios públicos, escolas, igrejas, teatros, túneis, rodovias, pontes, etc.

No entanto, embora quase tardiamente, parece que o homem está compreendendo que a destruição do seu meio ambiente representará a própria destruição.

Parece começar a valer-se dos avanços tecnológicos buscando, através de pesquisas, alternativas viáveis que ofereçam o mesmo ganho das atuais, ou até mais avançadas, mas, sobretudo de modo significativo, que não sejam prejudiciais à natureza.

Assim, buscar novas tecnologias em substituição àquelas que não apresentam resultados técnicos de desempenho, de custo ou, ainda, que são consideradas poluentes, tem sido uma maneira eficaz para apresentar soluções às exigências dos projetos e obras de engenharia. Neste processo desenvolvem-se ações que, desde a iniciação científica dos meios acadêmicos, passam pela pesquisa avançada dos centros de pesquisa, pelos fornecedores de matéria-prima, pelas construtoras de obras, chegando até ao estudo do destino final de resíduos gerados e o seu reaproveitamento, tudo isso dentro de uma visão de respeito ao ecossistema.

Atualmente identificam-se, na estrutura de produção da construção civil, ações e procedimentos que foram alterados em função da introdução de novas tecnologias e da demanda de recursos.

Sendo um macro-setor da economia, ele produz os bens de maiores dimensões físicas do planeta, sendo, desta forma, o maior consumidor de recursos naturais (JOHN, 2000).

No Brasil, por exemplo, observa-se que a evolução da produção média nacional de cimento atinge a marca de 33,9 milhões t/ano, segundo o Sindicato

Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) (2003), e considerando-se que a este cimento são adicionados agregados a uma proporção média de 1:6 em massa, pode-se estimar o montante de 203 milhões de toneladas de agregados consumidos na produção de argamassa e concreto.

Esta realidade teve início a partir do patenteamento do cimento portland, em 1824, na Inglaterra, feito por Joseph Aspdin (HELENE e TERZIAN, 1993), e, com a difusão da fabricação mundial, tornou-se o concreto o material de construção civil mais utilizado em todas as regiões do mundo.

A utilização deste material é muito antiga. Nos registros históricos, as primeiras aplicações do concreto indicam ser provenientes da civilização grega. Neste período as misturas dos componentes do concreto eram feitas empiricamente.

Segundo COUTINHO (1971), antes do século XIX os construtores já aplicavam o concreto como um material fabricado especialmente para cada construção por pessoas dotadas de especialização no assunto. As primeiras exigências, e tomadas como regras, eram de que a composição do concreto deveria incluir diferentes dimensões de material inerte, ter consistência plástica para ser moldada e ter a maior compacidade e estabilidade química possível para resistir às ações do intemperismo.

A partir do surgimento do cimento portland, os tecnólogos concentraram suas atenções no aperfeiçoamento do concreto como material de construção. Com recursos técnicos para cada época, aliados às pesquisas tecnológicas, foram difundidas universalmente as técnicas e procedimentos de projeto e aplicação do concreto (KERBER, 1994), possibilitando que os problemas e condições específicas decorrentes da diversidade geológica e climática fossem solucionados.

Comparado com o aço, o concreto tem características próprias inferiores, como resistência e tenacidade. Mesmo assim, estima-se atualmente que o consumo mundial de concreto é da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O concreto é atualmente empregado por se adaptar às mais diversas formas, constituído por materiais de baixo custo e disponíveis em quase todas as regiões do globo terrestre, e apresentando a capacidade de resistir melhor à ação das águas. Do exposto pode-se ainda justificar tamanha escala de consumo do concreto, considerando as obras de vulto como: Aqueduto de Segóvia (Espanha), Panteão (Itália), tubo pré-fabricado de concreto para conduto de água da Central Arizona (E U A), barragem de Itaipu (Brasil), entre outras (METHA & MONTEIRO, 1994).

Devido à grande extração de areias naturais ao longo dos cursos de rios ou de cavas de exploração, material utilizado no preparo do concreto, tem sido comprometida substancialmente a coexistência entre esta atividade e a manutenção do meio ambiente, devido à inexistência de uma responsável gestão ambiental nessas operações. Esta atividade tem provocado protestos dos cidadãos e principalmente dos ambientalistas, em manifestações a favor da construção de uma sociedade planetária ecologicamente sustentada.

No passado, a abundância e a facilidade de extração da areia natural era grande, mas seu consumo era pequeno se comparado com os dias atuais. Neste contexto não se priorizou um adequado plano de soluções tecnológicas e de conservação ambiental. Apesar do quadro polêmico desta atividade industrial, os agregados miúdos naturais são referência na literatura técnica quanto ao seu emprego. As intensas investigações realizadas com este material criaram afirmativas do tipo, "... os agregados devem ser usados como são" (AITCIN, 2000). Isto se justifica, pois, para atender a demanda do material concreto, necessita-se da matéria-prima agregado em abundância, com baixo custo e com bom desempenho.

Ainda é possível, em algumas regiões, a obtenção de areia natural em abundância, de boa qualidade e de preço acessível. Mas isso não ocorre nas regiões de grandes centros urbanos. Para alguns deles, como a cidade de São Paulo e outras grandes cidades, este material tornou-se escasso, pois as regiões

produtoras estão cada vez mais distantes destes centros consumidores. Isto ocorre devido a conflitos originados pela ocupação territorial, a pressões das entidades ligadas à preservação ambiental, às restrições de locais de concessão de novas jazidas e ao esgotamento gradual das atuais jazidas (SOARES *et al.*, 1997). Em consequência tem ocorrido aumento do preço das areias naturais e a indução de exploração de outros recursos materiais situados mais próximos.

1.2 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Dos materiais de construção de que a humanidade dispõe, ou daqueles que pode produzir, com características que atendam às necessidades de sua aplicação, o concreto de cimento portland é o material estrutural de construção mais difundido e usado nas obras de engenharia. As razões para isso são facilmente encontradas na literatura da área, e algumas delas são devido às suas propriedades, como resistência à água, facilidade de assumir diversas formas e tamanhos, além de ser o material facilmente disponível no canteiro de obras.

Dos constituintes do concreto, a fração ativa, no caso o cimento portland, representa uma parcela elevada no seu custo; por isso ele tem merecido intensas pesquisas, atingindo elevado grau de qualidade de produção e domínio tecnológico de utilização.

Quanto aos agregados, estes não têm merecido a mesma atenção. Em muitas das situações as suas características, que influenciam nas propriedades do concreto, não são levadas em consideração para uma dosagem racional do concreto, principalmente os métodos de dosagem utilizados no Brasil, (CARNEIRO *et al.*, 2002).

Considerando os métodos de que se dispõe para otimizar a distribuição granulométrica dos agregados para concreto de cimento portland, como é o caso do

modelo matemático de Füller (MINDESS & YOUNG, 1981)., pretende-se, com este trabalho, verificar o desempenho de concretos confeccionados com agregados compostos granulometricamente segundo o modelo citado, utilizando agregados britados por impacto, comparando os resultados com concreto confeccionado sem otimização granulométrica com agregados comuns.

Serão verificadas, neste trabalho a influência da distribuição granulométrica dos agregados e a influência da forma dos grãos no comportamento do concreto. A avaliação do comportamento ou a determinação da variação das propriedades, acima listadas, serão feitas em laboratório de materiais para a construção civil através dos resultados de experimentos baseados em métodos de ensaios.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

A pesquisa tem por objetivo verificar o desempenho de concretos com agregados britados miúdos e graúdos arredondados através de otimização granulométrica, comparado com agregados não otimizados e não arredondados.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho deve-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar os materiais necessários à realização das misturas;
- b) Determinar a partir do modelo de Füller a composição granulométrica dos agregados que apresentem maior compactidade;
- c) Verificar as variações das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, através de ensaios tecnológicos; e

- d) Comparar os resultados de ensaios de concretos com agregados otimizados granulometricamente, e não otimizados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, a saber: Introdução, Fundamentação Teórica, Materiais e Métodos, Apresentação Análise dos Resultados e Discussão, Conclusão e Recomendações .

O primeiro capítulo, Introdução, abrange, além de algumas considerações, a importância do trabalho e proposta de pesquisa, os objetivos e a sua estruturação.

O segundo capítulo, Fundamentação Teórica, contém o suporte bibliográfico, um breve histórico do concreto, e as propriedades tecnológicas dos concretos. Neste capítulo também são expostos os aspectos relacionados com a influência das características dos agregados no comportamento do concreto.

O terceiro capítulo, Materiais e Métodos, apresenta as características de todos os materiais utilizados na pesquisa. Também apresenta o método e as estratégias de desenvolvimento experimentais para obter os dados do desempenho dos agregados nos concretos.

O quarto capítulo, Apresentação e Análise dos Resultados, apresenta os resultados da pesquisa e as análises estabelecidas comparativamente com os dados obtidos.

O quinto capítulo, Conclusões e Recomendações, apresenta as conclusões obtidas através desta pesquisa e as sugestões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Sabe-se, desde há muito, a importância dos materiais de construção na área da construção civil. No passado, eles marcaram as idades da civilização, como a da Pedra, a do Bronze, e a do Ferro, conforme a predominância do emprego de um ou de outro material. Os materiais são parte da matéria do universo, participam do desenvolvimento natural da vida, desempenhando importante papel no o bem-estar da humanidade oferecendo-lhe abrigo e podendo proporcionar-lhe segurança.

Os materiais são substâncias cujas propriedades as tornam utilizáveis em estruturas, vedações, proteções, máquinas, dispositivos e demais produtos. Essas substâncias, os metais, os cerâmicos, os polímeros, os vidros, a madeira, as fibras, quando aplicadas às construções, prestam-se a desempenhar funções para atender às necessidades da humanidade.

2.1.1 Histórico da Construção

Nas civilizações primitivas, o homem utilizava os materiais da forma que os encontrava – não os trabalhava. Não demorou muito, porém, para que começasse a aprender a modelá-los e a adaptá-los às suas necessidades. Aos poucos foram aumentando as exigências e conseqüentemente os padrões requeridos. As civilizações passaram a demandar materiais de maior resistência, maior durabilidade e melhor aparência.

Assim, por exemplo, o caso do concreto armado. Durante muito tempo, para vencer os vãos e as cargas, só se utilizou a pedra. Contudo era necessário um

material substituível, de confecção e de moldagens fáceis, que fosse trabalhável como a argila e resistente como a pedra. Surgiu então o concreto simples. Posteriormente, com a difusão do emprego deste material, procurou-se aperfeiçoá-lo para que pudesse vencer grandes vãos, aparecendo então o concreto armado.

Como já se disse anteriormente, a utilização deste material é muito antiga, divergindo-se na data e local de origem; contudo as referências indicam os povos da Grécia antiga. A utilização deste material se deu em grandes obras públicas, como aquedutos, pontes e cais. Porém com a invenção e patenteamento do cimento portland, o concreto começou a ter um emprego mais diversificado.

O desenvolvimento decisivo para sua expansão foi a invenção do concreto armado em 1849 por Joseph-Louis Lambot, ao construir um barco. A partir desta data, inúmeras experiências e aplicações foram feitas com o concreto. Mais tarde, da experiência de R. Ferret em 1896 resultou a descoberta da relação entre a tensão de ruptura e a compacidade do concreto, afirmando este que tal tensão é função do quociente entre a quantidade de cimento e a soma dos volumes de água e de vazios.

Em 1907, baseados nos estudos de Ferret, os americanos Füller e Thompson propunham uma curva granulométrica para os sólidos do concreto que deveria conduzir a valores máximos de compacidade. Em 1918, Duff Abrams introduzia os conceitos de trabalhabilidade e do módulo de finura nas propriedades do concreto no estado fresco.

Assim seguiram-se inúmeras contribuições científico-tecnológicas ao concreto, de forma a torná-lo apto a atender às necessidades técnicas como material de construção.

2.1.2 Tipos de Materiais de Construção Civil

Os materiais utilizados na construção civil são divididos em três categorias: metais, orgânicos e materiais cerâmicos.

Os metais são extraídos de minérios naturais; são materiais caros devido ao seu processamento complexo. Apresentam propriedades características de serem bons condutores elétricos e de boa resistência mecânica, porém estão sujeitos à corrosão.

Os materiais orgânicos são constituídos quimicamente baseados no carbono, compreendendo a madeira, o papel, os asfaltos, os plásticos e as borrachas. Estes materiais foram aplicados em grande escala no século XX, com exceção da madeira.

Os materiais cerâmicos são as rochas, os minerais argilosos ou compostos por tais minerais. Como exemplo citam-se a areia, a pedra, o vidro, o cimento, o gesso, o concreto e a argamassa. Esses materiais, extraídos da superfície terrestre, são relativamente baratos quando comparados com outros materiais, metais e orgânicos. Os materiais cerâmicos são duráveis, rígidos e resistentes a esforços porém apresentam peso considerável e fragilidade quando submetidos a choques.

2.2 A TECNOLOGIA DOS CONCRETOS

O concreto de cimento Portland é um material composto, obtido por meio da ação de um aglomerante hidráulico no agrupamento de materiais pétreos ou não, capaz de formar corpos monolíticos empregados para uso nas obras de engenharia. Muitos pesquisadores propõem a separação em três partes: uma formada pelos agregados miúdo e graúdo, outra formada pela pasta de cimento e uma terceira constituída dos vazios dos corpos formados (KERBER e ROMAN 1994).

O processo de obtenção do concreto tem início com uma mistura plástica que endurece gradualmente, tornando-se um corpo sólido e resistente. As propriedades do concreto endurecido devem ser compatíveis com o fim a que se destina, dentro dos limites econômicos de cada situação. Isso implica que o produtor desse concreto de início deve, no preparo da mistura, na determinação das quantidades dos insumos, nos métodos e as técnicas apropriadas, aplicar todos os esforços para obter um produto com as características esperadas. Geralmente refere-se ao concreto como um material muito resistente, durável, impermeável à água e econômico.

Todas as qualidades anteriormente citadas serão possíveis desde que sejam seguidas as recomendações e as prescrições normativas ou as especificações técnicas dos estudos e investigações realizadas, considerando-se ainda que estes documentos descrevam, desde as premissas do projeto de dosagem do concreto, o adequado proporcionamento dos ingredientes da mistura, os cuidados no manejo e lançamento, o correto adensamento e a realização da cura do mesmo.

A PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1980) menciona que “os insumos básicos para ambos, bom e mau concreto, são os mesmos: cimento, água, e agregados”; ainda a citada instituição coloca algumas questões sobre a indústria e a tecnologia do concreto, entre elas:

- a) Onde a indústria tem atuado é de importância?
- b) Para onde ela está indo?
- c) As novas técnicas de aplicações para o concreto são desenvolvidas?
- d) A automação está eliminando as rotinas de trabalho neste campo?
- e) O avanço dos projetos estão suprindo as necessidades do homem?
- f) Quem tem o conhecimento do concreto pode pôr em prática este

conhecimento para servir à necessidade da indústria?

Numa simples análise pode-se dizer que, para cada tipo de aplicação, os concretos devem atender tecnicamente às solicitações e às exigências do uso por um determinado tempo. Com isso, os usuários, ou seja os ocupantes do prédio (obra) permanentes ou eventuais, humanos ou não, os proprietários, o público em geral e inclusive os construtores esperam que os concretos atendam seus requisitos.

De acordo com ISO 6241/1984 (*apud* SOUZA, 1983), “O desempenho de um produto é definido pelo seu comportamento em uso”. E a prática de “pensar em termos de desempenho é pensar em termos de objetivos que se pretende alcançar e não em termos de meios que serão utilizados” (BONIN 1987).

Segundo BONIN (1987), “Especificar um produto em termos de desempenho significa formular o que se espera deste produto durante a fase de uso, sem a descrição de como este produto ou processo deve ser”.

2.2.1 Seleção dos Materiais

A escolha dos constituintes dos concretos, bem como sua dosagem, deve vir ao encontro das características das mais variadas obras de engenharia, justificando desta forma um processo de busca para se determinar a melhor composição desses concretos, levando-se em conta as características dos materiais disponíveis, seu custo e viabilidade.

Considera-se que um traço adequado de concreto está condicionado, por um lado, a exigências de ordem tecnológicas, como trabalhabilidade, durabilidade, impermeabilidade e resistência mecânica, e, por outro, a condições econômicas que viabilizem a sua utilização.

Os agregados participam da composição do concreto em torno de 75 a 85 % do seu volume (BUCHER, 1986). Esses valores não são proporcionais à composição de custo do concreto, mas representam proporcionalmente os problemas de desempenho do concreto. Os vários métodos de dosagem do concreto buscam determinar as quantidades de cimento, agregados, água e eventualmente aditivos, para que forneçam condições favoráveis para se obter um material que atenda às propriedades requeridas, ao menor custo possível. Cabe então, para o caso específico dos agregados, realizar um exame detalhado de todas as suas características, principalmente daquelas que mais influenciam nas propriedades ou no desempenho do concreto.

Existe uma série de métodos de dosagem de concretos que são baseados nas experiências de muitos anos e em uma quantidade considerável de ensaios de laboratório, mas que não levam em conta as condições locais em que o concreto é empregado, não permitindo generalizar sua aplicação. Outro inconveniente da maioria das equações para o cálculo da resistência do concreto empregadas atualmente é não levar em conta a consistência da mistura de concreto, que na realidade é de grande importância.

A diversidade de tipos de rochas que formam a crosta terrestre e que são passíveis de exploração, constituem um grande número de possibilidades de tipos de agregados para a construção civil.

Como em muitas localidades não existem agregados de qualidade adequada, o método O'REILLY DÍAZ (1998) dedica-se ao estudo de sua influência nas propriedades físico-mecânicas das misturas de concreto fresco e endurecido.

Para GAMINO *et al.* (2001), após analisadas as características dos materiais empregados na produção de concreto em diversos países, a maior diferença em

relação aos requerimentos tecnológicos é representada pelo agregado, devido à sua forma desfavorável. Os autores: GAMINO *et al.* citam que a literatura técnica sobre o assunto pouco tem a apresentar para essa problemática, pois ao serem consideradas as conclusões de vários trabalhos na área, poucos são os pontos em comum.

O método O'REILLY DÍAZ (1998) privilegia a procura de uma mistura ideal de agregados que proporcione uma compacidade ótima, tendendo assim a oferecer concretos mais compactos e mais resistentes à difusão de elementos agressivos contidos em gases ou fluidos.

2.2.2 Propriedades dos Concretos

A estrutura de um material é caracterizada pelo tamanho, tipo, forma, quantidade e distribuição das fases que constituem o sólido.

O concreto tem uma estrutura muito heterogênea e complexa, decorrendo disto uma dificuldade em estabelecer modelos matemáticos exatos, a partir dos quais fosse possível fornecer as previsões de comportamento do material.

A macroestrutura do concreto apresenta duas fases distintas: a dos agregados com suas características e a fase do meio aglomerante (matriz de cimento).

A nível microscópico o concreto contém, além da fase do agregado e da fase da pasta de cimento, uma outra denominada de zona de transição. Esta fase está situada entre o agregado graúdo e a matriz de cimento. No concreto de resistência normal, a zona de transição apresenta uma espessura de 20 a 100 μm ao redor do agregado graúdo. Por apresentar uma microestrutura muito diferenciada da

macroestrutura do concreto, ela apresenta baixa resistência, comparada com as outras duas fases do concreto – pasta de cimento e agregado.

A zona de transição exerce uma influência muito intensa sobre o comportamento do concreto, comparado com sua espessura. Ela é constituída por materiais idênticos aos da pasta de cimento, porém com maior valor da relação água/cimento devido à ocorrência da exsudação interna, caracterizando um primeiro momento de formação. Com isso, a etringita e os hidróxidos de cálcio formados apresentam-se com cristais muito grandes que, junto à superfície do agregado, formam uma estrutura mais porosa do que a matriz de pasta de cimento. A zona de transição, num segundo momento, é formada pelo preenchimento parcial dos espaços que há entre os cristais grandes de hidróxido de cálcio e de etringita, pelo pequeno grau de cristalização do CSH no processo de hidratação de pequenos cristais de hidróxido de cálcio e etringita, resultando em maior porosidade do concreto (METHA E MONTEIRO, 1994).

A baixa resistência da zona de transição no concreto é também por causa da presença de microfissuras. O desenvolvimento dessas microfissuras ocorre num ambiente com grandes vazios capilares e com cristais orientados de hidróxido de cálcio, que depende da distribuição granulométrica e do tamanho do agregado, do teor de cimento, da relação água/cimento, do grau de adensamento do concreto, das condições de cura, da umidade ambiente e da história térmica do concreto (HELENE e TERZIAN, 1992).

2.2.3 Porosidade

O comportamento do concreto é caracterizado em um primeiro momento pela sua resistência mecânica característica, que depende da estrutura do material. Quando submetido à tensão até a ruptura, ocorre a separação de duas ou mais partes sobre a região mais fraca do sólido, ou seja, onde há concentração de vazios.

A porosidade do concreto depende da porosidade da pasta de cimento endurecida, da porosidade do agregado e da porosidade da zona de transição. Ainda pode ser resultante dos vazios capilares devido à exsudação, dos poros do gel (produtos de hidratação) e do ar aprisionado no concreto. Os vazios capilares representam o espaço não preenchido pelos sólidos da pasta de cimento e são originados pela movimentação da água de mistura em excesso que não participou das reações de hidratação. Portanto, a porosidade capilar será tanto maior quanto for a quantidade de água adicionada à mistura e quanto menor for o grau de hidratação. Os poros de gel são espaços vazios que existem entre os produtos de hidratação e também entre os grãos de cimento não hidratados, ocupando cerca de 26% do volume total do gel (MINDESS & YOUNG, 1981, *apud* CAMPITELI 1987).

A relação dos vazios do concreto com a redução da resistência é apresentada pela PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1980) e por NEVILLE (1997) com valores de 5 % de vazios em volume do concreto, acarretando neste uma redução de aproximadamente 29% da resistência, enquanto 2% de vazios podem reduzir menos de 10% da resistência.

2.2.4 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade de um concreto pode ser descrita como as características e condições que ele possui para ser adequadamente misturado, transportado, lançado e adensado de uma maneira fácil e sem perda de homogeneidade, para se obter um concreto com um mínimo de vazios.

A trabalhabilidade do concreto tem sido, de longa data, motivo de estudos. No passado os pesquisadores se empenhavam na realização de misturas trabalháveis, controlando somente as propriedades intrínsecas dos materiais envolvidos, bem como suas proporções. Atualmente os aditivos desempenham um papel bem mais significativo na obtenção da trabalhabilidade desejada.

Um dos objetivos da produção de um concreto de qualidade é obter um concreto compacto, denso. Para se conseguir essa característica, a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1980) indica que a mistura dos insumos do concreto deve promover uma adequada trabalhabilidade e que, quando adensado o concreto, a energia para densificá-lo seja razoável. Deste pressuposto a trabalhabilidade adequada do concreto fresco é fator essencial na obtenção da resistência e durabilidade.

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

Com relação aos fatores que podem alterar consideravelmente a trabalhabilidade das misturas, ANDRIOLO (1984) enumera os fatores controláveis, sendo eles:

- a) quantidade de água,
- b) quantidade e qualidade de aglomerante,
- c) temperatura,
- d) quantidade e qualidade de agregado,
- e) tipos e quantidade de aditivos.

A trabalhabilidade dos concretos é influenciada tanto pelos agregados miúdos quanto pelos graúdos, em sua quantidade e também pela qualidade. Agregados com grande quantidade de partículas chatas e alongadas produzem concreto com péssima trabalhabilidade. Areias com módulo de finura ao redor de 2,75 resultam em concretos trabalháveis (NEVILLE, 1997). Entretanto, areias com deficiência de material fino, produzem concretos áridos, difíceis de trabalhar.

Concretos com uma trabalhabilidade adequada possibilitam realizar a eliminação do ar incorporado, quando exigido que sua compacidade e impermeabilidade sejam as melhores possíveis (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1980). Entretanto, a incorporação de ar no concreto reduz o perigo da segregação (NEVILLE, 1997).

Sendo a trabalhabilidade uma das importantes propriedades do concreto no estado fresco, SOBRAL (1984) agrupa várias propriedades fundamentais do concreto fresco, a saber:

- a) Mantém-se bem misturado e homogêneo no tempo usualmente utilizado para a mistura;
- b) Não segrega ou exsuda durante o transporte;
- c) Apresenta pouca ou nenhuma segregação durante o manuseio e lançamento;
- d) Pode ser fácil e adequadamente compactado com os equipamentos disponíveis, preservando a homogeneidade da mistura; e

- e) Enche a forma completamente e envolve totalmente a armadura nela contida.

COUTINHO (1971) apresenta uma classificação das principais propriedades elementares que intervêm na trabalhabilidade do concreto, a seguir listadas:

- a) ângulo de atrito interno,
- b) coesão,
- c) viscosidade,
- d) massa volumétrica,
- e) segregação,
- f) exsudação.

Dentre os vários métodos de avaliação da trabalhabilidade, o ensaio de abatimento do cone de Abrams é o mais universalmente usado, pois permite avaliar variações acidentais da composição do concreto (COUTINHO, 1971), mas NEVILLE (1997) lamenta não existir um ensaio aceitável que determine diretamente a trabalhabilidade conforme suas diversas definições expressadas por instituições de renome.

Segundo NEVILLE (1997), o principal fator que influi na trabalhabilidade do concreto é o teor de água da mistura; entretanto recomenda que a granulometria e a relação água/cimento devem ser consideradas em conjunto. Ainda, o mesmo autor justifica que um agregado com determinada granulometria que produz um concreto trabalhável com certa relação água/cimento, pode não apresentar a mesma trabalhabilidade para outro valor dessa relação.

Através desta premissa, muitas são as propostas dos valores de consumo de água, em função do abatimento do tronco de cone e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nos procedimentos de dosagem dos concretos.

Outros parâmetros que influenciam a trabalhabilidade do concreto, dizem respeito às areias muito finas ou às areias de grãos angulosos, pois estas necessitarão de mais água para uma dada consistência. MEHTA & MONTEIRO (1994) apresenta como regra prática que, para uma consistência constante, o concreto deve ter 2 a 3 % a mais de areia por volume absoluto e de 5,9 a 8,9 kg a mais de água por metro cúbico de concreto, quando for utilizada areia de britagem de rocha, se comparada com areia natural.

2.2.5 Segregação

A segregação é a propriedade característica de uma mistura de concreto em que ocorre a separação de seus constituintes. Segundo SOBRAL (1984), isto acontece devido a fatores relacionados com os insumos, como tamanhos de partículas muito diferentes do conjunto dos grãos e da variação de massa específica entre seus constituintes. Ela é prejudicial, pois interfere no processo de obtenção do concreto, afetando a qualidade do produto final em relação à porosidade e às características de comportamento anisotrópico do material. Podem também surgir superfícies sem acabamento por falta de argamassa e ninhos de agregados graúdos localizados. Para METHA & MONTEIRO (1994) e NEVILLE (1997) é muito importante envidar esforços para se evitar que o fenômeno da segregação aconteça.

A ocorrência de segregação, segundo a PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1980), é devida, algumas vezes, a um manejo impróprio e a um inadequado proporcionamento da mistura. Misturas áridas, extremamente secas ou com baixa quantidade de argamassa podem segregar, apesar dos cuidados no lançamento. Também ocorre comumente a segregação em concretos devido a um

elevado abatimento no ensaio com o tronco de cone (NM-67/1996). Entretanto, concretos com abatimento entre 25 e 100 mm revelam serem os mais apropriados para a redução do perigo da segregação.

A PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1980) menciona que, quando ocorre a segregação no concreto é impossível realizar um adensamento adequado.

A segregação pode ser controlada por um proporcionamento adequado da mistura, por uma quantidade adequada de água para produzir determinada trabalhabilidade, com o uso de areias com grãos arredondados, bem graduada e com teor adequado de finos ($< 0,15$ mm). METHA & MONTEIRO (1994) salientam que a relação água/cimento depende das características da distribuição granulométrica e da dimensão máxima característica do agregado utilizado.

2.2.6 Durabilidade

A durabilidade do concreto tem sido a preocupação de muitos pesquisadores em todo o mundo. HELENE e TERZIAN (1992) consideram que esta característica resulta das ações coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo. Como a obtenção do concreto obrigatoriamente passa pela seleção dos materiais, passou a ser uma exigência a prática e a aplicação de critérios de escolha de insumos básicos do concreto. Como os agregados ocupam a maior parte do volume do concreto, se ocorrerem problemas de durabilidade do concreto há uma elevada probabilidade de que a origem destes esteja nos agregados.

Para DONZA *et al.* (2002), as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos contendo agregado miúdo britado dependem da composição e do volume da pasta, das características físicas dos grãos dos agregados e da natureza das

reações na interface pasta-agregado.

A PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (1980) refere-se à ação do intemperismo, salientando que uma das principais características que o concreto deve ter é a de resistir às variações climáticas, sendo que os agregados devem permanecer íntegros, evitando que o processo de deterioração avance.

A NBR 12696/1992 refere-se à verificação do comportamento do agregado mediante ciclagem artificial água-estufa. A investigação com base neste procedimento normativo permite verificar a presença de minerais expansivos, especialmente do grupo das montmorilonitas ou illitas, que são responsáveis por variações volumétricas quando submetidos à molhagem e à secagem.

Agregados contendo sílica ativa reagem com os álcalis do cimento. A reação tem como resultado uma expansão ilimitada; nesses locais uma alteração superficial do agregado provoca a destruição da aderência da pasta-agregado, podendo levar a uma fissuração do concreto. Para que ocorra este tipo de reação o concreto deve conter um certo teor relativo de umidade de 85% a 20° C (NEVILLE, 1997). A substância de reação pode ser encontrada em calcários silicosos, xistos opalinos ou calcedônias, andesitos, dacitos e filitos.

O tamanho dos grãos e a graduação dos agregados deve merecer especial atenção na escolha dos materiais. Segundo SILVA e PITTA (1993), argamassas em condições idênticas, com mesmo grau de hidratação e relação água/cimento, são menos permeáveis que os concretos.

Durante a produção do concreto ocorre a incorporação de ar e seu teor varia conforme o equipamento, o método de mistura e especificamente com as relações entre as quantidades dos insumos. Como este ar é eliminado parcialmente pelo processo do adensamento, ocorre que nesse concreto, quando endurecido,

permanecem os poros, situação em que o material apresenta a capacidade de absorção e permeabilidade, as quais afetam negativamente a durabilidade do concreto.

Concretos com certa quantidade de poros e canalículos interligados são os que apresentam as melhores condições para ocorrer a penetração de agentes agressivos do ambiente a que estão sujeitos. Estes, por sua vez, dissolvem ou reagem com os produtos de hidratação do cimento, tornando esse concreto mais poroso. As características de forma das partículas, dimensão máxima característica e a granulometria são alguns dos fatores apresentados por PAULON (1986), que afetam a permeabilidade e a porosidade dos concretos.

A forma aparentemente esférica e angulosa do agregado é favorável à aderência, desde que não sejam lamelares; esses parâmetros também têm sua parcela de influência no desempenho do concreto (METHA & MONTEIRO 1994).

Entretanto, agregados arredondados, como os seixos rolados, apresentam superfícies lisas e, portanto, com menor atrito, propiciando o deslocamento com mais facilidade. Esse comportamento, guardando as devidas proporções, é observado no estado fresco pela propriedade de trabalhabilidade, como no estado endurecido, quando sujeito a solicitações mecânicas. Estes fatores são mais prejudiciais à resistência à tração do que à resistência à compressão. Segundo NEVILLE (1997), agregados de origem marinha, contendo sal, oportunamente podem formar um depósito de sal branco na superfície do concreto, por lixiviação.

2.2.7 Retração

A propriedade de retração do concreto é minimizada, considerando somente

as influências dos agregados, quando os mesmos têm a dimensão máxima característica a maior possível e uma curva granulométrica adequada. As granulometrias contínuas têm sido amplamente adotadas para a obtenção de concretos bem dosados. Segundo SILVA e PITTA (2000), uma mistura com essas características exige menores quantidades de água e, portanto, menor retração.

2.3 AS PROPRIEDADES DO AGREGADO

Na constituição genérica dos concretos os agregados participam como material de enchimento. Frequentemente cita-se como importante propriedade dos agregados a sua inércia química, pois não entram em reações químicas complexas com a água. São usualmente tratados como um material de enchimento inerte, com ótimo desempenho mecânico e econômico.

Dentre as características do agregado que podem influenciar o desempenho do concreto estão a massa específica, a resistência ao esmagamento, a porosidade, a forma dos grãos e a textura, a absorção de água, a reatividade com os álcalis do cimento, as substâncias deletérias presentes e a composição granulométrica.

BUCHER (1986) amplia esses fatores e apresenta, enfocando em três grupos, as propriedades e características exigíveis dos agregados para atender às especificações técnicas dos concretos, a saber:

- a) Propriedades funcionais – massa específica aparente, dimensão máxima característica;
- b) Propriedades básicas – resistência mecânica, resistência à deformação, resistência química, resistência ao transporte de energia; e
- c) Propriedades secundárias – distribuição granulométrica, textura superficial, índice de forma e os contaminantes; materiais pulverulentos,

matéria orgânica, material leve, material argiloso e sais nocivos.

A obtenção da resistência mecânica do concreto é limitada pela resistência mecânica dos agregados. MEHTA & MONTEIRO (1994) e PICCOLI *et al.* (1999) salientaram a importância das propriedades dos agregados na resistência do concreto e destacaram que isto é devido, principalmente, aos agregados graúdos. Portanto, na escolha de determinados tipos de agregados deve-se optar por aqueles que a sua resistência mecânica seja superior à resistência da pasta.

Os agregados britados, portanto, devem possuir características físicas e mecânicas que atendam às necessidades tecnológicas. Para tanto é importante considerar as características da rocha a ser britada, como resistência, dureza, estrutura cristalográfica, planos de clivagem e o tipo de britador na produção de agregados britados (ROLLINGS & ROLLINGS JR, 1996).

Ocorre que, quando os agregados são utilizados em concretos, podem não contribuir de modo satisfatório para a melhoria do desempenho do mesmo, já que o módulo de deformação dos primeiros pode ser bastante superior ao da pasta, originando concentrações de tensão capazes de provocar fissuras e comprometer a aderência entre a pasta e o agregado.

Entretanto, os agregados são capazes de absorver uma parcela da carga originalmente destinada a ser suportada pela argamassa, parcela crescente com o módulo de deformação do agregado, a exemplo do que ocorre no concreto armado à compressão. A tensão no aço é maior que no concreto, pois o módulo de elasticidade do aço é muito maior.

Em contrapartida, os agregados mais fracos e de menor módulo de deformação favorecem o incremento da retração, mas podem conduzir a menores tensões de retração.

O limite de resistência do concreto nas primeiras idades é afetado significativamente por sua composição. As características de dois materiais constituintes dominantes são consideradas controladoras da resistência: o agregado graúdo e a pasta.

Especial cuidado deve ser dado à resistência à abrasão do concreto, pois, segundo NEVILLE (1997), esta propriedade não corresponde aos valores de resistência à abrasão dos agregados.

Para ROLLINGS & ROLLINGS JR (1996), algumas propriedades dos agregados dependem da rocha de origem. Assim a resistência, composição mineralógica, massa específica, estabilidade química e estrutura dos poros serão as mesmas para os agregados. No entanto, as características da forma e tamanho dos grãos e demais propriedades da superfície das partículas serão diferentes em relação à rocha de origem.

Os parâmetros importantes dos agregados graúdos são sua forma, textura e dimensão máxima característica. Por ser o agregado mais resistente do que a pasta de cimento em concretos de resistência normal, sua resistência não é um fator a ser considerado. Porém, nos concretos de alta resistência ou em concretos leves, a resistência dos agregados torna-se importante. A textura de superfície dos grãos e a sua mineralogia afetam sua aderência à pasta de cimento, como também podem provocar uma microfissuração. Além disso, a textura da superfície pode afetar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto.

Visto que os aumentos de resistência de aderência acontecem a uma taxa mais lenta que os da resistência à compressão, estes efeitos são mais intensos em concretos de alta resistência e de alto desempenho. As resistências à tração podem se apresentar muito sensíveis a pequenas diferenças de textura de superfície, bem

como dos valores da área específica do agregado. Estudos realizados por DONZA *et al.* (2002) indicaram acréscimo de resistência à compressão axial em concretos com agregado miúdo britado, quando comparados com concreto contendo areia natural. Os dois concretos apresentaram a mesma qualidade da pasta de cimento, mesma qualidade do agregado graúdo e não apresentaram possibilidades de haver reações químicas entre os agregados e a pasta de cimento. Atribuíram tal desempenho a uma interação de resistência entre a pasta e a interface do agregado miúdo e uma intrínseca resistência dos grânulos minerais do agregado.

2.3.1 Parâmetros Granulométricos

O estudo de composições granulométricas de agregados para concreto, buscando melhorias nas suas propriedades, remonta ao início do século XIX. FÜLLER (1901, *apud* CARNEIRO *et al.* 2002) publicou um estudo em que buscava a maior compacidade no concreto a partir da modificação da composição granulométrica do agregado empregado. Para ele, o aumento da compacidade da fração inerte no concreto diminui o volume de vazios aumentando a resistência mecânica, requerendo conseqüentemente menor quantidade de argamassa, além da mistura requerer menor quantidade de água para uma trabalhabilidade estipulada.

Essas propriedades, atualmente tão exploradas pelos produtores de concreto, resultaram dos estudos do autor acima. A curva de distribuição granulométrica do agregado apresenta-se de forma contínua. Esse tipo de curva proporciona uma mistura de concreto mais compacta e, devido ao arranjo granulométrico das partículas, há uma facilidade no rolamento das partículas entre si que proporciona a

redução da água de amassamento.

Esses estudos proporcionaram o desenvolvimento de modelos para obter uma curva de distribuição granulométrica ideal. O trabalho de FURNAS (1931) apresenta um estudo em que a composição granulométrica ideal para dosar um concreto pode ser obtida através da equação de uma progressão geométrica. Tanto o estudo de Fuller como o de Furnas vem demonstrar que a continuidade da distribuição granulométrica proporciona aumento da resistência mecânica devido à redução na demanda de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade desejada, em relação a outro concreto de mesmo consumo de cimento, mas com granulometria não contínua.

Este estudo foi realizado por analogia por CARNEIRO *et al.* (1997) que observou a influência direta das características dos agregados miúdos na resistência mecânica da argamassa, com redução do consumo de aglomerantes e da água de amassamento. Assim, pode-se interferir nas composições granulométricas dos agregados para concretos, a fim de atingirem a maior compacidade. Concretos produzidos com agregados assim compostos irão fornecer melhores propriedades mecânicas, com redução do consumo de aglomerantes e da água de amassamento.

O emprego de agregados de tamanhos máximos afeta de vários modos a resistência do concreto. Primeiro, porque, uma vez que os agregados de grãos maiores têm menor área específica, a força da ligação pasta-agregado é menor, devido ao efeito parede, que causa uma zona de enfraquecimento, resultando na redução da resistência do concreto. Em segundo lugar, um dado volume de concreto, em que é utilizado um agregado de grãos maiores resulta em um menor volume de pasta, fornecendo mais restrições para variações de volume. Isto pode provocar o surgimento de tensões adicionais à pasta, criando microfissuras antes da

aplicação de cargas, comprometendo o desempenho mecânico dos concretos sujeitos a altas solicitações. Por esta razão, é de consenso geral que, para produzir concretos de alta resistência, devem ser utilizados agregados de tamanho de grãos pequenos.

Uma variação no diâmetro máximo de um agregado, mesmo com uma distribuição granulométrica bem graduada, pode apresentar significativas mudanças sobre a resistência do concreto. SILVA e PITTA (2000), MEHTA & MONTEIRO (1994) afirmam que agregados, com maior dimensão máxima característica e com curva granulométrica contínua, exigem menor quantidade de água e, conseqüentemente apresentam menor retração e maior resistência mecânica.

FRANQUIN (1967) caracteriza um bom concreto como aquele constituído por agregados, cuja estrutura granulométrica resulte em atender aos requisitos de qualidade, com a menor quantidade de cimento.

2.3.2 Forma dos Grãos

Os grãos dos agregados, sejam os naturais ou os produzidos industrialmente, não apresentam forma definida. A importância da forma aumenta à medida em que o tamanho das partículas diminui. Por exemplo, ao se tomar uma porção de grãos de agregados, com a metade do diâmetro em relação a outro de determinado tamanho, de uma dada amostra, mantendo-se uma mesma quantia de massa entre as amostras e considerando que as partículas são esféricas, o agregado de menor diâmetro apresentar-se-á com o dobro da superfície específica.

A utilização de agregados contendo frações superiores a 15% de partículas lamelares e alongadas tornam o concreto muito áspero (ANDRIOLO, 1984). Nessas

situações, esses concretos exigem maior consumo de água e, para atingir uma determinada resistência e ou trabalhabilidade, um consumo maior de aglomerante.

Os agregados graúdos, que apresentam a forma equidimensional dos grãos, proporcionam ao concreto um comportamento isotrópico quando sujeito a solicitações físicas (NEVILLE, 1997). As propriedades do concreto fresco sofrem mais influências desfavoráveis que no estado endurecido, devido à forma das partículas. As formas que se afastam dos tipos esférico e arredondado exigem mais água para uma mesma consistência. SOBRAL (1990) argumenta que há uma estreita relação entre essas formas e a percentagem de vazios no agregado solto.

As características geométricas dos grãos dependem, no caso de agregado britado, da natureza do mineral que constitui a rocha de origem, do tipo de britador e da relação de redução na britagem do agregado.

PRENTICE (1990) argumenta que é extremamente difícil medir a forma das partículas nos grãos de areia, e que não são satisfatórios os métodos até então desenvolvidos. Contudo, admite que uma medida grosseira sob o microscópico seja possível, embora consuma muito tempo. Muitos métodos usados dependem de uma comparação visual. São reconhecidos que há dois distintos elementos na forma dos grãos: esfericidade e arredondamento (JANOO, 1998),.

Ainda, segundo JANOO (1998), a quantificação da forma, da angulosidade e da textura de superfície dos agregados é difícil, mas não impossível, pois existem vários métodos que envolvem medidas diretas e indiretas dessas propriedades dos agregados.

JANOO (1998) argumenta que os geólogos desenvolveram sistemas sofisticados de medidas físicas dos agregados; porém, os tecnologistas e os engenheiros de outras áreas desenvolveram métodos de classificação visual para a

caracterização da forma, de angularidade ou de índices de algumas propriedades de interesse. Porém, nenhum deles avalia a forma, a angularidade e a textura de superfície separadamente; normalmente são caracterizações feitas das irregularidades da superfície sob o ponto de vista geométrico.

Para KWAN *et al.* (2001), as características da forma das partículas e da distribuição granulométrica do agregado podem fornecer o índice de compacidade do material que pode variar de 55% a 85%, enquanto o correspondente índice de vazios pode variar de 45% a 15%. Isso estabelece a importância da propriedade na composição do concreto, pois os vazios entre as partículas dos agregados são totalmente preenchidos com pasta de cimento, resultando que o índice de vazios do agregado determina o mínimo volume de pasta de cimento necessário para produzir concreto com esse agregado.

Um melhor detalhamento é dado por PETRUCCI (1973) quanto à forma geométrica dos agregados graúdos envolvendo as três dimensões espaciais das partículas dos agregados, denominando de: grãos normais aqueles que apresentam todas as dimensões muito próximas, com qualquer relação entre as três dimensões menor que 2. Os grãos lamelares são aqueles que apresentam grande variação na ordem de grandeza das três dimensões e subdividem-se em três categorias:

- a) Os alongados ou em forma de agulha, quando o comprimento é muito maior que as outras dimensões, que por sua vez são muito próximas;
- b) Os discóides, quando a espessura é muito menor do que as outras dimensões, que por sua vez são muito próximas; e
- c) Os planos ou em forma de placa, quando as três dimensões diferem muito entre si.

A influência da forma e da textura de superfície dos agregados miúdos são

avaliadas em estudos realizados por DONZA *et al* (2002), que envolveram um tipo de agregado miúdo natural e um agregado miúdo britado. Os resultados mostraram que o concreto com agregado britado apresentou uma resistência maior que o concreto com agregado natural, chegando a ser mais resistente em torno de 10% na idade de um ano.

Intuitivamente a esfericidade dos grãos dos agregados é caracterizada como a proximidade de forma similar à da esfera e vários pesquisadores a descrevem em forma de relações entre as três dimensões dos grãos.

ZINGG (1935, em PRENTICE, 1990) propõe um sistema para a classificação da forma das partículas dos agregados baseado em dois níveis segundo a orientação tridimensional, na qual a caracterização da forma dos grãos é feita pelas relações segundo os eixos tridimensionais das partículas, conforme é a seguir apresentado na figura 2.1, que representa conhecidas quatro classes de formas de partículas.

Ainda PRENTICE (1990) indica a possibilidade de classificar as formas empregando limites matemáticos para cada uma delas e que muitos estudos feitos não foram além de fixar os grãos em uma categoria através de uma simples avaliação visual qualitativa, conforme classificação a seguir:

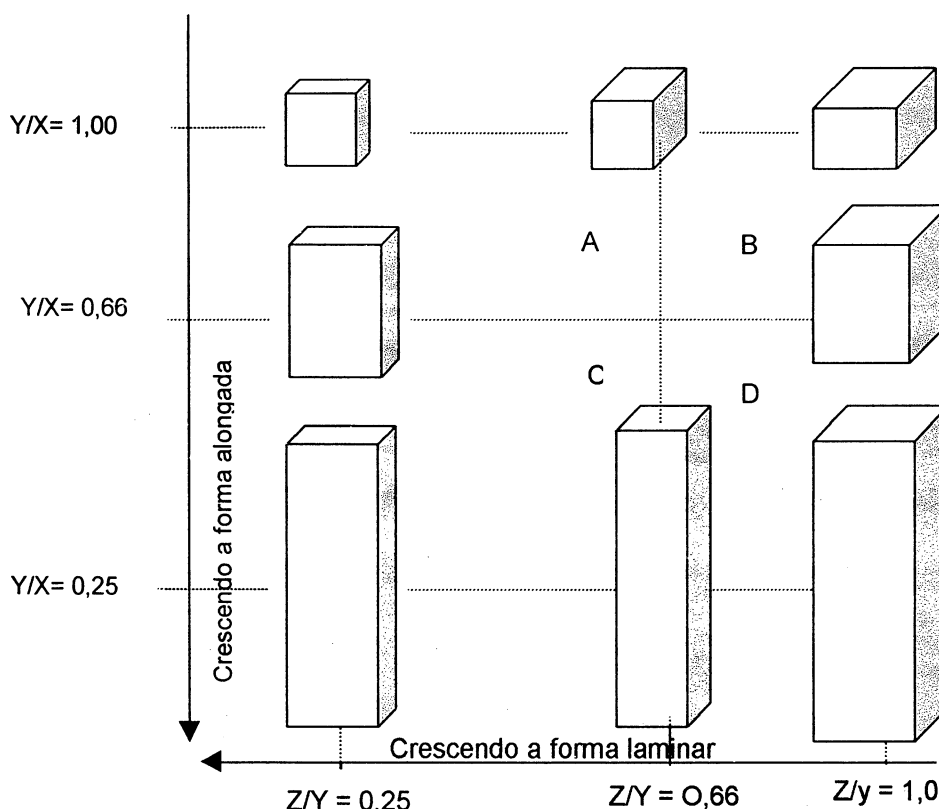
Classe "A" – partículas planas sem serem alongadas ($x=y>z$);

Classe "B" – representa a forma cúbica ou esférica da partícula, onde as três dimensões são aproximadamente iguais, muito diferente da forma alongada ou plana ($x=y=z$);

Classe "C" – são as partículas planas e alongadas ($x\neq y\neq z$); e

Classe "D" – representa as partículas na forma de agulhas; são alongadas e não planas ($x>y=z$).

FIGURA 2.1 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS CLASSES DE FORMAS DE GRÃOS



FONTE: Geology of Construction Materials, PRENTICE (1990)

2.3.3 Arredondamento

Estudos feitos para avaliar os efeitos do arredondamento e esfericidade dos grãos nas propriedades tecnológicas das areias têm sido feitos com muito cuidado, sendo que a forma da partícula influencia na densidade dos grãos, e que o tamanho da partícula tem intensa influência na resistência do concreto. Os grãos bem arredondados, como os das areias naturais, são conhecidos como aqueles que fornecem grande trabalhabilidade; porém, algumas vezes, podem reduzir a aderência entre a pasta de cimento e o agregado, diminuindo a resistência do concreto.

O grau de arredondamento da partícula é uma medida da graduação da

angulosidade dos grãos. Porém, a comparação visual com a projeção gráfica do grão é classificada como um método prático (PRENTICE, 1990). E, com base nisto, os grãos podem ser dispostos em seis categorias, sendo: muito angular, angular, subangular, subarredondado, arredondado e bem arredondado.

Estudo realizado por D'AGOSTINHO *et al.* (2001) em grãos de areias, utilizando um programa "QWIN" do equipamento marca LEICA, apresentou resultados do grau de arredondamento em cinco categorias: angular, subangular, subarredondado, arredondado e bem arredondado. A avaliação foi feita em função do perímetro e da área de cada grão, enquadrando dentro do intervalo de 0,1 a 1,0, sendo o valor 0,1 o grão mais anguloso.

JANOO (1998) indica que o processo para determinar o grau de arredondamento de uma partícula é muito complexo, pois envolve a projeção de uma imagem aumentada da partícula. Nela é determinado o raio de um círculo inscrito e também são determinados os raios dos cantos da partícula, que servem para indexar o grau de arredondamento do agregado. O autor resume que o grau de arredondamento "R" de uma partícula é uma medida média da curvatura dos seus cantos (vértices).

$$R = \frac{\sum \left(\frac{r}{r'} \right)}{N}$$

Onde: R = grau de arredondamento,

r = raio de curvatura do vértice,

r' = maior raio de um círculo inscrito na projeção da imagem da partícula, e

N = número de vértices.

2.3.4 Textura da Superfície dos Grãos

As características de superfície ou textura dos grãos apresentam diversos efeitos no comportamento dos agregados. TERZAGHI & PECK (1969) definiram a textura como o grau de delicadeza e uniformidade da superfície dos grãos e sugeriram as expressões como lisa, áspera e granulosa, para descrever os tipos de textura. A importância da rugosidade das partículas, na resistência de aderência entre a pasta de cimento e os agregados, é colocada por SOBRAL (1983). Uma superfície de elevada rugosidade possibilita melhor aderência à pasta de cimento, porque ocorre melhor embricamento da pasta na superfície do agregado.

WRIGHT (1955) desenvolveu um método para quantificar a textura da superfície de agregados para concretos. O estudo baseia-se em grãos de 19 mm de diâmetro, que foram embutidos em uma resina sintética endurecida. O conjunto foi, então, cortado em finas camadas com aproximadamente 0,025 mm de espessura. A seguir, estas finas camadas foram colocadas sob um microscópio com lente de aumento de 125 vezes. A diferença entre as medidas do perímetro da seção do contorno do grão e do comprimento dos vários segmentos de retas (cordas) ajustados a esse contorno foi definido como fator de aspereza. Como em outros métodos, para se obter resultados confiáveis necessita-se de várias determinações.

A determinação das características do agregado, principalmente a rugosidade ou aspereza de superfície e do fator de forma, tem sido feita usando análise de imagens geradas por programas de computadores (JANOO, 1998 ; TASONG *et al.*, 1998).

WILSON *et al.* (1995) desenvolveram uma técnica para quantificar a textura de superfícies de agregados. Baseia-se em coletar imagens de contorno dos grãos e

medir, com precisão de 0,001mm, as alturas dos cumes das rugosidades apresentadas pelo perfil e as distâncias entre elas.

2.3.5 Empacotamento dos Grãos

Normalmente, quando os agregados são resistentes e a pasta de cimento do concreto é de alta qualidade, resulta um esqueleto estrutural pétreo com uma quantidade de pasta de cimento que será necessária para ocupar os vazios entre as partículas do agregado e para uni-las entre si, obtendo-se um ótimo concreto com relação às suas propriedades físicas e mecânicas. Para PALBOL *et al.* (1994), os benefícios da concentração máxima de volume de agregados resultam em efeitos positivos nas propriedades do concreto, como contração, permeabilidade, resistência e características no estado plástico. O autor justifica atribuindo ao fato de a pasta de cimento endurecida constituir-se no elemento mais fraco para as propriedades anteriormente referidas.

A pasta de cimento recebe um elevado grau de atenção nos procedimentos de dosagem do concreto, por seu elevado custo dentro da produção de concreto. O contrário acontece com os agregados, pois são, usualmente, selecionados com regras muito simples, na medida em que os mesmos apresentam, dentre os constituintes, o menor preço na composição de custo do concreto. Ainda são pequenos os esforços para se aproveitar as características dos agregados e potencializar propriedades como a trabalhabilidade, diminuir o risco de segregação e de exsudação, bem como verificar o conteúdo mínimo de cimento necessário no concreto e conseqüentemente seu custo.

No passado, a acomodação de partículas em concretos deveria apresentar

um certo nível de equilíbrio dentro do concreto. De acordo com DRAFIN (1943, citado em HELENE e TERZIAN, 1992) seguindo no mesmo âmbito dos trabalhos que fundamentaram os métodos clássicos de dosagem, propõe a curva de referência (parabólica) para granulometria ideal, enquanto BOLOMEY (1925, *apud* HELENE, 1992) contribuiu com melhorias na curva de referência de Füller.

Atualmente, ainda em muitas construções se praticam métodos de dosagem do concreto de tal maneira que a água, os agregados e a quantidade de cimento se determinam por meio de tabelas, em função do tamanho máximo das partículas e dos tipos de agregados. Entretanto, o resultado da dosagem se obtém por meio de várias misturas para se determinar a trabalhabilidade e o conteúdo de ar incorporado.

CARNEIRO *et al* (2002) realizaram estudos sobre a otimização de misturas binárias de agregados para produção de concreto e concluíram que apenas a maior massa unitária pode não ser um bom indicativo sobre o desempenho da fração agregado do concreto, pois pode-se ter agregados com massa unitária baixa, mas com uma distribuição granulométrica contínua, o que é importante para que os agregados forneçam uma boa compacidade no concreto, além de contribuir para a redução da água de amassamento, e conseqüentemente na relação água/cimento (MEHTA & MONTEIRO 1994).

PALBOL *et al.* (1997) afirmam que necessariamente não é objetivo dos tecnólogos em concreto especificar as características dos agregados a serem empregados em determinados concretos, com relação a um teor mínimo de vazios. Entretanto, a satisfatória produção do concreto exige dos agregados baixos conteúdos de vazios. Se esse baixo índice de vazios não for possível de ser conseguido com os agregados disponíveis, deve-se buscar a otimização

granulométrica combinando-se frações de tamanhos, de maneira a reproduzir outras experiências bem sucedidas.

NEVILLE (1997) diz que um agregado, com uma distribuição granulométrica ideal dos tamanhos dos grãos, produzirá alta densidade de partículas. ROLLINGS & ROLLINGS JR (1996) propõem que a máxima densidade de agregados pode ser obtida por meio de composição granulométrica, determinada através da relação abaixo:

$$p = 100 \cdot \left(\frac{d}{D_{\text{máx}}} \right)^n$$

Onde: p = porcentagem de material menor que o tamanho considerado,

d = diâmetro dos grãos considerado,

$D_{\text{máx}}$ = o maior diâmetro dos grãos do material, e

n = expoente (0,45 – 0,50).

O autor propõe que o valor do expoente depende das características específicas das partículas, como angularidade e forma. Entretanto, ANDRIOLO (1984) utiliza os valores de 0,5 para agregados naturais arredondados e 0,8 para materiais britados.

Os efeitos da distribuição granulométrica sobre as diversas propriedades dos materiais são associados ao empacotamento das partículas que os constituem. Assim sendo, para materiais submetidos às severas exigências de desempenho mecânico, os empacotamentos densos são de interesse. Por outro lado, empacotamentos de baixa densidade são de interesse para a produção de materiais para revestimentos com propriedades isolantes térmicas e acústicas.

Um dos fatores que afetam o empacotamento de partículas é o da distribuição

granulométrica, pois a seqüência de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas, por uma composição granulométrica adequada do sistema, determina o aumento ou não da densidade do mesmo.

Outros fatores que influenciam a densidade de empacotamento, são: a morfologia, a porosidade, a densidade das partículas, o efeito de parede e a técnica de compactação. Quanto à forma das partículas, o formato esférico proporciona maior densidade de empacotamento de uma distribuição que o contenha. Por outro lado, formas e superfícies irregulares das partículas resultam em menor densidade de empacotamento, devido à maior área superficial específica.

OLIVEIRA *et al.* (2000) indicaram que não há na literatura regras que definam quantitativamente o efeito da morfologia das partículas sobre a densidade de empacotamento com exatidão, sendo esse efeito avaliado apenas qualitativamente. O comportamento da densidade de empacotamento é influenciado pelo tamanho dos grãos e pela composição granulométrica das partículas.

O mesmo autor referencia as experiências realizadas por German (1992) com partículas esféricas e partículas não esféricas, demonstrando que o comportamento em relação à densidade de empacotamento, é o mesmo. Composições feitas com misturas de partículas grossas e finas resultam em valores aproximados de máxima densidade, com a mesma proporção, independente do formato das mesmas. Partículas esféricas proporcionam, valores superiores de densidade de empacotamento aos valores não esféricos. No entanto, ocorre uma variação pronunciada dessa densidade quando se altera a fração do volume de partículas grossas nessa mistura.

O mesmo autor ainda salienta que ocorre o decréscimo de densidade de empacotamento em misturas, à medida em que se aumenta a concentração de

partículas não esféricas, porque é destruída a estrutura de empacotamento, e é aumentada a porosidade da mistura. Partículas com porosidade interna, também, afetam as condições de obtenção de elevada densidade de empacotamento. A presença de porosidade aberta nas partículas provoca alteração no empacotamento das mesmas, pois estas se apresentam com formato não esférico, além do que esse tipo de partículas tem maior índice de absorção de água através dos poros, demandando maior teor de água, resultando em uma mistura de maior porosidade e conseqüentemente com menores densidades de empacotamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

O efeito de parede é um importantíssimo fator, que deve ser considerado na obtenção de misturas com elevadas densidades de empacotamento, pois a porosidade na região próxima à superfície das partículas grossas ou da superfície da própria parede se apresenta com valores maiores que no restante do volume, devido à relação entre os diâmetros efetivos das partículas ser tal que permita a uma partícula fina considerar essa superfície de contato como uma parede plana. Ainda, segundo OLIVEIRA *et al.* (2000), para diminuir este efeito, o quociente entre os diâmetros das partículas grossas (parede) e as finas deve ser em torno de dez vezes.

Entretanto, a compactação de misturas, também, interfere no grau de densidade de empacotamento. Para que um sistema de partículas consiga atingir seu máximo empacotamento é necessário colocar as partículas em suas devidas posições. Assim, um conjunto de partículas com sua distribuição granulométrica ideal poderá produzir densidade de empacotamento muito aquém do que se espera, se essas partículas forem depositadas separadamente por tamanhos em um recipiente ou molde.

A vibração em concretos deve ser tal que resulte em máxima densificação dos mesmos. Cuidados devem ser dispensados para que a mistura não seja vibrada por período, ou com frequência/amplitude inadequadas. Se isto for praticado, pode ocorrer que esses concretos apresentem características de segregação por excesso de energia aplicada, como até elevados índices de porosidade devido à falta de energia de compactação.

OLIVEIRA *et al.* (2000), fazem a descrição do modelo de empacotamento ideal dos grãos, como aquele que segue a condição de similaridade para a definição da distribuição de partículas em termos de lei de potências. O modelo matemático utilizado nos experimentos realizados por ANDREASEN (1979, *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2000) na área de processamento cerâmico segue a estrutura matemática de Füller, de acordo com a expressão abaixo apresentada; no entanto, os resultados determinaram que, para maximizar o empacotamento, o expoente “q” da equação deveria estar entre 0,33 e 0,50.

$$p = \left(\frac{d}{D} \right)^q 100$$

onde: p= percentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro

considerado,

d= diâmetro da partícula,

D= diâmetro máximo característica da amostra, e

q= expoente.

Simulações computacionais feitas por FUNK & DINGER (1993) mostraram que a máxima densidade de empacotamento foi obtida com o expoente 0,37.

MINDESS *et al.* (1981) generaliza mostrando que, quando todos os tamanhos dos grãos dos agregados abaixo de D estão presentes, o conteúdo de vazios

depende somente de q , aproximando-se de zero quando q se aproxima de zero.

A bibliografia consultada, de densificação dos materiais pelos efeitos da distribuição granulométrica, indica que o modelo matemático proposto por Fuller em DRAFIN (1943, *apud* HELENE, 1992) é a base de todas as referências, diferindo entretanto, quanto ao expoente da expressão.

Dentre os pesquisados tem-se:

- DRAFIN (1943, *apud* HELENE e TERZIAN, 1992) → expoente 0,5;
- ROLLINGS & ROLLINGS JR(1996) → expoente 0,45 a 0,5;
- ANDREASEN (1979, *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2000) → expoente 0,37

2.4 AGREGADOS BRITADOS NOS CONCRETOS

Os vários métodos de dosagem do concreto buscam determinar as quantidades de cimento, agregados, água e eventualmente aditivos, para proporcionarem condições favoráveis à obtenção de um material que atenda às propriedades requeridas ao menor custo possível. Como nos concretos, os agregados participam de sua composição com boa parte do seu volume, valores esses não proporcionais à composição de custo do concreto, mas que representam proporcionalmente o potencial de problemas para o desempenho do concreto.

A qualidade e o desempenho dos materiais compostos, como é o caso dos concretos, dependem, em princípio, das características dos materiais simples que os compõem (cimento e agregados) e das forças internas entre cada uma das partículas.

Sendo o concreto obtido através de uma série de operações controladas com o objetivo de obter, a partir dos materiais constituintes, um material com

propriedades requeridas, compete aos que produzem concreto selecionar, conforme convier, as qualidades e características desses constituintes. Portanto, as propriedades requeridas dependem logicamente das propriedades dos insumos utilizados e das proporções da mistura.

Seu comportamento sob a ação de esforços mecânicos, em particular a resistência à compressão, foi no passado a preocupação dos tecnologistas, pois, se essa propriedade for atendida, outros requisitos serão naturalmente atendidos pelas características inerentes ao material. Porém, para certas aplicações do concreto, outras propriedades podem assumir maior importância, devendo estas, então, merecer um exame mais pormenorizado.

Vários são os fatores que podem influir na resistência mecânica do concreto, tais como: tipo e teor de cimento, relação água/cimento, grau de hidratação do cimento, aderência pasta-agregado, dimensão, forma, distribuição granulométrica, resistência e módulo de deformação do agregado, idade, condições de ensaio e cura do concreto.

O comportamento dos concretos, em relação à resistência à compressão, tem sido motivo de muitas pesquisas. Para AMPARANO *et al.* (2000), os estudos realizados foram feitos sob vários pontos de vista. De início, concluiu-se que as propriedades da matriz e das inclusões em um material composto têm efeitos dominantes nas propriedades efetivas dessa combinação. Num segundo momento, foram estudados o comportamento da aderência na interface entre a matriz e o agregado, revelando que este efeito tem considerável importância sobre as propriedades das composições, uma vez que a efetividade da resistência da adição de partículas depende das interações na interface dos agregados. Em terceiro momento, destacam-se a distribuição de tamanhos dos grãos, o volume ocupado

dos grãos e a forma das partículas, que apresenta um efeito considerável em algumas propriedades dos materiais compostos como o concreto. Considera-se que a trabalhabilidade e a resistência à ruptura são devidas ao fato de que o tamanho, a forma e o volume dos grãos controlam predominantemente as características morfológicas da estrutura interna da composição.

2.4.1 A Influência dos Agregados na Resistência dos Concretos

Os códigos de construção e os padrões normativos referentes aos agregados para concreto, especificam que os mesmos devem atender aos requisitos, tais que sejam capazes de produzir um concreto com homogeneidade, trabalhabilidade, durabilidade e adequada resistência.

Os procedimentos inerentes à qualificação dos agregados para concreto convencionais passam pela verificação às exigências prescritas nas normas NBR 7211/1983 e NBR 12654/1992.

Segundo KERBER e ROMAN (1994), um dos requisitos para se obter concretos de alta resistência, com características de melhor desempenho com propriedades de resistência, impermeabilidade, porosidade e durabilidade, está em optar pelo emprego de agregados com a granulometria otimizada, buscando teores de vazios extremamente baixos, de forma a empregar a menor quantidade de água, buscando a efetiva e potencializada ação do aglomerante.

DE LARRARD *et al.* (2001) apresentam a fórmula de Bolomey como um método para produzir concretos na França. Ela permite obter a estimativa de resistência à compressão aos 28 dias de idade, através da seguinte relação:

$$f_{c28} = G \cdot \sigma_{28} \left(\frac{c}{e} - 0.50 \right)$$

onde: f_{c28} = estimativa de resistência à compressão aos 28 dias (MPa),

G = coeficiente de qualidade granular,

σ_{28} = resistência à compressão do cimento empregado (MPa),

c = consumo de cimento (kg/m^3), e

e = consumo de água (kg/m^3).

Na relação acima não estão sendo considerados o volume de vazios e as características da estrutura granulométrica como distribuição dos tamanhos, as proporções volumétricas das diversas graduações, a forma das partículas, bem como as propriedades de resistência e aderência.

2.4.2 Agregados Miúdos Britados

A taxa de crescimento anual do consumo de agregado miúdo, no estado do Paraná, atingiu a ordem de 38% em 1998, segundo levantamento da MINEROPAR (2003). A produção de areia na região metropolitana de Curitiba, compreendendo os municípios de São José dos Pinhais, Fazenda Rio Grande, Pinhais e Araucária, atinge 1 milhão de m^3 / mês. Este quadro induz os produtores de areias naturais a explorarem suas jazidas ao máximo, correndo o risco de causarem ao material produzido uma perda da qualidade, pois na maioria dos casos há uma tendência de incluir no material os contaminantes existentes na própria jazida, maximizando a exploração.

Os agregados miúdos britados, oriundos dos processos de britagem de rocha, têm sido objeto de muitas investigações para sua utilização em misturas com cimento. Alguns trabalhos se dedicaram à verificação de seu desempenho nas

argamassas, outros para o concreto. Para D'AGOSTINHO *et al.* (2001), o estudo do emprego de finos de pedra na produção de argamassas e concretos foi motivado pela grande procura e emprego de areia aluvionar na construção civil, gerando o seu esgotamento, o autor também considerou que os trabalhos de cominuição das rochas geram cerca de 10% de finos do total de brita produzida, tornando este material de grande interesse às investigações quanto ao emprego na construção civil.

NUGENT (1979) menciona a constatação, através da literatura técnica, de que há considerações do comitê do Civil Engineers Institute da Inglaterra, quanto ao emprego de areia artificial, em estruturas de concreto armado construídas desde o ano de 1908.

Historicamente a utilização de finos de britagem no concreto nos grandes centros urbanos do Brasil, como a Grande São Paulo, aconteceu em meados dos anos 90, devido ao incremento acentuado no custo final do concreto representado pela areia natural. Embora este material contivesse uma composição granulométrica estável, apresentava um alto índice de material pulverulento, atingindo até 20% (TERRA, 2000), embora não nocivo, pois sua origem é de beneficiamento de rochas. Esta característica resultava em alto consumo de cimento, devido à necessidade de adição de água necessária para lubrificar a grande área de superfície das partículas finas, a fim de manter a trabalhabilidade do concreto.

Tentativas foram feitas com o objetivo de reduzir a quantidade de material pulverulento em finos de britagem, resultando no desenvolvimento de sistemas de lavagem e classificação. O material resultante apresentava conteúdo de material pulverulento de 6%, com granulometria média estável, mas ainda necessitava de adição de areias naturais para apresentar desempenho satisfatório quanto ao

consumo de cimento. A razão principal da necessidade desta adição deve-se à forma angulosa da areia produzida, que dificulta a trabalhabilidade do concreto.

A adição de areia natural no material de finos de pedreira é uma prática bastante difundida entre as empresas concreteiras, situadas em regiões onde há possibilidade desta prática. Porém, em outras regiões com falta desses insumos estudos têm sido desenvolvidos para melhorar as características do agregado miúdo, visando utilizá-lo integralmente sem adições de outras areias. Estes estudos levaram aos primeiros testes com equipamentos de cominuição de agregados, as chamadas “Máquinas de Impacto”, que, ao tratarem os materiais antes dos estágios finais de classificação, têm mostrado uma melhoria efetiva da forma dos grãos do agregado miúdo. A granulometria não se altera significativamente, mas os resultados finais para o concreto, quanto ao consumo de cimento e a trabalhabilidade, são sensivelmente percebidos.

2.4.3 Produção de Agregados

No passado a indústria dos agregados foi eminentemente extrativa de material sedimentar. No entanto, a atual extração como processamento dos agregados apresenta complexidade de exploração para a obtenção de agregados. BUCHER (1986) enfoca que os procedimentos de beneficiamento dos agregados consomem menos que 1,0 KWh/t e que os investimentos são relativamente modestos para as instalações de classificação hidráulica, lavagem e peneiramento.

As atuais instalações de produção industrial de agregados britados estão aptas a produzir agregados tanto graúdos quanto miúdos, com características granulométricas e geométricas que atendam a exigências técnicas e econômicas

para utilização em concretos.

Sendo os agregados britados produtos de atividade industrial e sujeitos a controles de qualidade, não apresentarão variação das características que comprometam o desempenho dos concretos.

A produção de agregados miúdos a partir da cominuição de rocha não apenas pode reduzir as distâncias de transporte, com a conseqüente redução no consumo de energia, mas também proporcionar uma redução no consumo de cimento pela otimização das características dos agregados, os quais devem ser considerados nos procedimentos de dosagem dos concretos.

A busca do aprimoramento na obtenção de materiais converge para a necessidade básica do controle de qualidade, de maneira a praticar a produção com os menores desvios possíveis. Isto agrega ao produto características tecnológicas, contribuindo para a diminuição dos custos e a confiabilidade das propriedades requeridas do concreto.

2.5 TENDÊNCIAS DO CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

A expectativa de ocorrer a urbanização, em várias cidades ou lugares do mundo todo, certamente irá acontecer (MEHTA & MONTEIRO, 1994), sendo o concreto o material de construção que ocupa o primeiro lugar dentre os demais materiais para a construção civil mais utilizados, conforme justificativas citadas anteriormente. As necessidades então, decorrentes desta urbanização, podem ser atendidas pelo concreto, pois, para atender a demanda do crescimento populacional, necessita-se de estruturas robustas de múltiplos andares abrigando conjuntos comerciais e residenciais, do aprimoramento de sistemas de trânsito e sua

expansão, bem como da implantação de estruturas subterrâneas e fundações profundas com grandes volumes de concreto.

Inclui-se ainda neste contexto que, em várias partes do mundo, conta-se com estruturas deterioradas, construções consideradas inadequadas à atual utilização e que devem ser demolidas e reconstruídas.

Considerando ainda o crescimento populacional, principalmente dos países em desenvolvimento, surge a necessidade da implantação de sistemas de tratamento e distribuição de água e a coleta de esgoto.

Sendo o consumo médio de energia para o transporte de cargas por rodovias de 1,4 MJ/tkm (BUCHER, 1986), isto permite estimar a energia gasta no transporte entre o porto, depósito ou jazida do agregado e a obra. Considerando o consumo de agregados nas regiões de alta densidade populacional, e que para algumas delas, literalmente não se dispõe mais de agregados naturais, será necessário importá-los de lugares distantes. Deve-se, dentro deste contexto, situar uma análise para empreender esforços para a produção e utilização de agregados britados com características técnicas favoráveis à produção de concretos com características de durabilidade, de melhor desempenho de resistência mecânica.

Dentro deste contexto surge o horizonte para o desenvolvimento de pesquisas que resultarão, para o futuro, em um concreto ainda melhor. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1984), essas melhorias devem acontecer no módulo de elasticidade, na impermeabilidade, na resistência à compressão, à tração, à flexão e ao impacto. Estas propriedades dependem das características da estrutura interna do concreto, na qual, por existir grande quantidade de vazios, heterogeneidade do compósito e as microfissuras internas do concreto, que devem ser minimizadas ou eliminadas.

Considera-se, também, que os insumos básicos para a produção do concreto, para os programas de construção das diversas partes do mundo, estarão também disponíveis em todos esses lugares. Soma-se a isto o resultado de análises custo/benefício com relação ao conteúdo de energia durante a manufatura do material. Muitos estudos têm mostrado que as estruturas de concreto consomem menos energia que as estruturas de aço, pois, dependendo do consumo de cimento, a quantidade de energia para produzir 1 m³ de concreto armado com 250 a 380 kg de cimento e com 50 a 150 kg de aço varia de 3000 a 8500 MJ/m³.

Comparada esta energia com seus concorrentes estruturais, o aço de construção necessita de 47000 MJ/m³. Isto conduz para a principal vantagem do concreto como material de construção (BUCHER, 1984).

Fazendo-se uma análise técnica econômica e ecológica do concreto armado, o conteúdo total de energia, como anteriormente citado, é da ordem de 8500 MJ/m³ de concreto. O gasto de energia relativo ao transporte desde o produtor até a obra de cada um dos componentes do concreto armado não foi considerado. Como a maior parcela de unidade de massa do concreto é representada pelos agregados (de 75% a 85% do total), a energia gasta para seu transporte pode exercer uma significativa influência nesta análise.

Ainda pode-se acrescentar, nas considerações anteriores, a tendência que os usuários, além de considerarem as propriedades dos materiais que influenciam na saúde do homem, levarão em conta as propriedades ecológicas. O concreto apresenta a alternativa de abrigar as milhões de toneladas de subprodutos como escória de alto forno, as cinzas volantes, os resíduos da atividade metalúrgica e química, os materiais poluentes poliméricos como borracha vulcanizada e outros, pois a energia para produzir estes materiais (resíduos) não acarreta custos no

concreto.

A partir destas considerações, percebe-se na comunidade tecnico-científica a preocupação em aprofundar estudos para aproveitar todo o potencial dos agregados, para a melhoria da qualidade e do desempenho dos concretos de cimento portland.

CARNEIRO *et al.* (2002) apresentam, na conclusão de seus estudos sobre as propriedades de concretos produzidos com agregados de composição granulométrica otimizada, a relevante importância do tema, pois ocorre aumento de resistência à compressão do concreto com a redução do consumo de aglomerante.

DE LARRARD *et al.* (2001) fazem uma análise do desempenho de *software* utilizado para compor a granulometria não otimizada de agregados para concreto, correlacionando esses resultados com outros obtidos de concretos produzidos a partir das regras feitas por Boloney. Tal *software* é uma ferramenta para a otimização de mistura de agregados de diferentes características, com o objetivo de tornar os concretos mais densos, econômicos e duráveis.

DONZA *et al.* (2002) apresentam estudo de desempenho dos agregados miúdos britados em concretos de alta resistência, concluindo existir a paridade de desempenho comparado com agregados naturais. Finalmente, para KWAN *et al.* (2001) há necessidade de realizar muitas pesquisas no campo da composição granulométrica dos agregados com menor índice de vazios, das quais resultarão concretos mais densos, mais resistentes e mais duráveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa experimental foi desenvolvida em duas etapas. A primeira consistiu na caracterização dos materiais utilizados. A segunda na dosagem de concreto, na qual foram feitos ajustes experimentais na composição dos mesmos devido, à influência das características de granulometria dos diversos materiais

3.1 AS ETAPAS DA INVESTIGAÇÃO

Inicialmente há que se considerar o problema sobre a influência dos agregados britados em concretos de cimento portland

E para investigar tal fato, foi proposto desenvolver, em laboratório de ensaios de materiais para construção civil investigações experimentais do comportamento e desempenho do concreto constituído com agregados britados. O método experimental de pesquisa, aqui aplicado, justifica-se, pois. Como o concreto apresenta uma estrutura complexa na sua constituição, no contexto de seu desempenho o número de variáveis envolvidas é grande, de forma tal que, controlando e manipulando alguns fatores de influência pertinentes, ou seja, as variáveis independentes, verifique-se o comportamento das variáveis dependentes relativas ao seu desempenho tecnológico.

Assim sendo, o método proposto compreende as seguintes etapas de desenvolvimento deste trabalho:

- a) Tomada de consciência a respeito da substituição das areias naturais na produção de concretos de cimento portland por um material alternativo, com igual ou melhor desempenho; a partir do desenvolvimento de uma análise teórica do problema foram realizadas investigações no comportamento de seis misturas de concreto, sendo que uma delas foi tomada como referência, constituída com agregados

comumente empregados na produção de concretos na região de Curitiba; as demais misturas são constituídas de materiais com características de forma das partículas e distribuição granulométrica diferenciadas em relação aos materiais da mistura de referência;

- b) Definição das variáveis de resposta (variáveis dependentes) de um grupo de ensaios tecnológicos do concreto;
- c) Definição das variáveis controláveis (variáveis independentes);
- d) Quantificação e coleta de amostras dos materiais necessários à pesquisa;
- e) Realização de ensaios de caracterização dos materiais envolvidos no experimento;
- f) Execução da dosagem e ajustes de composição dos insumos nas misturas, para atingir uma determinada consistência do concreto;
- g) Execução dos ensaios no estado fresco do concreto;
- h) Moldagem de corpos de prova para ensaios do concreto endurecido;
- i) Ensaios do concreto endurecido;
- j) Coleta e armazenamento de dados e obtenção dos resultados das variáveis resposta; e
- k) Análise dos resultados;

As variáveis de resposta (variáveis dependentes) dos concretos produzidos, são as seguintes:

- a) Composição dos concretos - traço;
- b) Teor de ar incorporado;
- c) Massa específica fresca do concreto;
- d) Relação água/cimento;
- e) Relação agregado/ cimento;
- f) Consumo de cimento;
- g) Resistência à compressão axial ;

- h) Resistência à tração ;
- i) Absorção de água; e
- j) Porosidade .

Para possibilitar a obtenção das variáveis acima descritas, ficou estabelecido o controle de alguns parâmetros do concreto, como as variáveis controláveis (variáveis independentes), as quais interferem no comportamento das variáveis dependentes, a saber:

- a) Distribuição granulométrica dos agregados, aplicada sobre o material de britagem de rocha com partículas não lamelares, constituindo de agregados com granulometria contínua e melhor fator de empacotamento de partículas, obtidas a partir do modelo de Füller;
- b) Os parâmetros granulométricos – dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados;
- c) Para cada situação de análise, a confecção de três composições com igual trabalhabilidade (consistência e coesão), com teor de argamassa que possibilite fácil acabamento de superfície e diferentes relações água/cimento caracterizados como traço pobre, traço piloto e traço rico;
- d) Consistência do concreto medida pelo ensaio NM 67/1998 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone;
- e) Os demais procedimentos de manejo dos concretos, envolvendo os cuidados com os materiais, as condições ambientais, a mistura, a manutenção da aparelhagem, inclusive os cuidados com as leituras dos ensaios, devem ser constantes.

A distribuição granulométrica dos agregados sendo uma variável controlada, foi definida da seguinte maneira para as composições estudadas:

- a) Agregados para o concreto referência – sem qualquer alteração na composição granulométrica dos mesmos, somente a caracterização dos materiais fornecidos pelo mercado de materiais de construção, sendo a

brita diabásica e a areia natural;

- b) Agregados para o concreto M-1, em que a brita 1 (NBR 7211/1983) foi obtida por britagem de impacto da rocha riolito e a areia natural ;
- c) Agregados para concreto M-2, para o agregado graúdo – mesma composição granulométrica da mistura M-1, para o agregado miúdo – areia obtida por britagem de impacto com diâmetro máximo menor do que 4,8 mm, com forma dos grãos não lamelar, obtida pelo fracionamento do material retirado do fluxo da máquina de britagem por impacto sem qualquer modificação da composição granulométrica;
- d) Agregados para concreto M-3, obtidos de britagem por impacto compostos granulometricamente segundo o modelo de FÜLLER (1901) com o expoente 0,37 da expressão da página 42; e
- e) Agregados para concreto M-4, obtidos de britagem por impacto compostos granulometricamente segundo o modelo de FÜLLER (1901) porém com o expoente de 0,507.

Para desenvolver as etapas anteriormente citadas e atender aos objetivos propostos no capítulo 1, elencou-se uma série de ensaios tecnológicos que permitissem obter os resultados para a realização da análise, bem como da verificação da confiabilidade de sua execução.

HELENE e TERZIAN (1992) enfatizam que quando é realizada a dosagem dos concretos, o tecnologista deve verificar se todas as propriedades esperadas são atendidas, através do ajuste dos materiais nas amassadas experimentais em laboratório, obtendo-se o traço do concreto. Os autores ainda salientam que, devido à impossibilidade de reproduzir concretos a partir de modelos matemáticos, justifica-se a necessidade destes ajustes experimentais, nos quais é considerada a influência de todas as características dos materiais utilizados.

O método de pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho tem, na etapa de dosagem de concreto, o ponto principal em que ocorre a caracterização

das misturas, ou seja, a definição final de constituição dos traços dos concretos. As mensurações das variáveis dependentes, anteriormente citadas, foram feitas nas composições de concretos que apresentassem uma consistência medida pelo método de ensaio do abatimento do tronco de cone de 80 ± 10 mm, com qualitativo grau de coesão e teor de argamassa da mistura.

As amostras dos insumos, materiais utilizados na pesquisa, estão caracterizadas, nas tabelas 4.1 e 4.2.

Todas as etapas, desde a coleta das amostras dos materiais envolvidos, até a fase de obtenção de dados de ensaios, devem passar pela análise da aceitabilidade dos resultados de ensaios, conforme as prescrições normativas.

3.2 AMOSTRAGEM DOS AGREGADOS

A coleta da amostra foi feita com base na norma NBR NM 26/2001, que descreve o procedimento e as exigências de realização de amostragem de agregados em campo.

3.2.1 Material Britado

Para a realização desta pesquisa procurou-se obter duas amostras de agregados britados:

- Uma que representasse a de maior produção e consumo de material utilizado em concreto na região de Curitiba; e
- Outra que representasse aquela que contivesse as melhores características quanto à forma das partículas.

Foram escolhidas duas pedreiras para a realização da coleta de agregados britados; a primeira localizada no município de Rio Branco do Sul, por ser o material de grande consumo nas obras e nas centrais de concreto. Este material é oriundo da retirada de inserções de diabásio e variantes, na exploração da jazida de calcário da

mina de Saivá de propriedade da Companhia de Cimento Portland Rio Branco. A segunda pedreira escolhida foi a que produz material brita de rocha riolito por possuir um processo de cominuição de rochas que resulta em particulares não lamelares. A figura 3.1, a seguir apresenta o aspecto do agregado britado por impacto.

FIGURA 3.1 AGREGADO BRITADO DE ROCHA RIOLITO



A coleta do agregado de grãos não lamelares, riolito, foi feita na frente de descarga do material, no fluxo de saída do equipamento de fragmentação da rocha.

No laboratório de ensaios, a amostra foi secada ao ar e dividida em três partes:

- A primeira para a obtenção de brita 1, “brita de riolito”, e para a obtenção de agregado miúdo, “areia de riolito”;
- A segunda para a separação de todas as frações granulométricas, destinadas à composição granulométrica contínua dos agregados M-3 e M-4, no modelo de Füller;
- A terceira para a utilização como agregado no estado *in natura*, sem modificações na composição granulométrica.

A obtenção de pedra britada a partir do material britado, riolito, foi feita após separação do material por peneiramento com peneiras normalizadas pela ABNT–NBR-5734/1980, seguida de determinação das quantidades das frações em função das percentagens retidas de cada fração da graduação brita 1 segundo a NBR 7211/1983 e da quantidade total de agregado desejado, neste caso 300 kg. A composição final do material foi feita reunindo as frações dos diversos tamanhos de grãos.

3.2.2 Areia Natural Quartzosa

De acordo com o planejamento do experimento, foi coletado também um agregado miúdo que é utilizado em grande escala na produção de concretos convencionais, a areia natural, oriunda de jazida localizada na bacia do rio Iguaçu, próxima da cidade de Curitiba e denominada Areal Costa.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A natureza mineralógica dos agregados miúdos e graúdos, utilizados neste estudo, é de natureza quartzosa.

As amostras coletadas foram secadas ao ar, identificadas, acondicionadas em sacos plásticos abrigados da umidade e de contaminantes.

A realização dos ensaios de determinação da composição granulométrica dos materiais, utilizados no experimento, seguiu às prescrições contidas na NM 248/2001.

Os resultados das análises granulométricas dos agregados utilizados nesta pesquisa constam da tabela 4.1, na página 84.

Os ensaios de determinação dos índices físicos e de qualidade dos materiais também se basearam nos procedimentos de ensaios das seguintes normas:

- a) Agregados – Redução de amostras de campo para ensaios de laboratório NBR NM 27/2001;
- b) Agregado miúdo - Determinação da absorção de água NBR NM 30/2001;
- c) Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas NBR NM 49/2001;
- d) Determinação do inchamento do agregado miúdo NBR 6467/1987;
- e) Agregado para concreto NBR 7211/1983;
- f) Agregados – Determinação do teor de argila e materiais friáveis NBR 7218/1987;
- g) Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos NBR 7219/1987;
- h) Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária NBR 7251/1982;
- i) Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro NBR 7809/1983;
- j) Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman NBR 9776/1987; e
- k) Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo NBR 9937/1987.

Os resultados dos ensaios de caracterização, dos índices físicos e dos índices de qualidade dos agregados, utilizados nesta pesquisa, são apresentados na tabela 4.2, à página 83.

3.3.1 Formação das Amostras do Material Britado de Forma Não Lamelar

A formação de amostras para os agregados utilizados na pesquisa, como a brita de riolito e a areia de riolito, foi obtida a partir do material britado não lamelar,

coletado do fluxo de descarga do equipamento de britagem e que passou pelas seguintes operações:

- Para a brita: uma separação dos grãos maiores do que 4,8 mm por peneiramento com peneiras normalizadas NBR – 5734/1980, seguida da mistura das frações dos grãos em proporções tais que atendessem a composição granulométrica para os limites da brita de graduação 1, especificados pela, NBR 7211/1983;

- Dos grãos menores do que 4,8 mm, do material restante, sem qualquer outra inferência na composição granulométrica deste material, resultou “areia de riolito”;

3.3.2 Formação dos Agregados com Granulometria Contínua

O material coletado do fluxo de produção de agregados de rocha de riolito, depois de recebido em laboratório, foi secado ao ar. Deste, uma quantidade necessária para a produção das misturas sofreu um peneiramento mecânico, através de peneiras de malhas quadradas normalizadas pela NBR – 5734/1980.

De acordo com a proposta feita por OLIVEIRA *et al.* (2000), que fundamenta os estudos de empacotamento de partículas, com base nas considerações feitas por especialistas no assunto, adotou-se, então, o modelo de distribuição granulométrica de Füller, com o objetivo de buscar a melhor compacidade dos agregados, com a finalidade de obter concretos com maior resistência mecânica.

Diante do exposto, foi determinada a composição granulométrica total das misturas de concretos, através da expressão de Füller, empregadas para os concretos M-3 e M-4, a saber:

$$Y = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^q$$

onde: Y = material passante na peneira considerada;

d = é o diâmetro da partícula considerada (mm);

D = dimensão máxima característica do agregado maior (mm); e

q = expoente.

Num primeiro momento da pesquisa experimental, analisou-se o comportamento do concreto com uma composição granulométrica dos agregados, baseada na equação de Füller na qual foi adotado o valor de $q = 0,37$, para o concreto M-3.

Esse primeiro valor de $q = 0,37$ foi função de:

- Obter concreto um pouco mais argamassado (maior teor de finos);
- Obter o máximo de empacotamento de partículas valor proposto por OLIVEIRA *et al.* (2000).

No segundo momento da pesquisa procurou-se, após analisar os resultados dos cinco concretos produzidos com diferentes composições, e estabelecer para o concreto de melhor desempenho quanto à resistência à compressão, o módulo de finura do agregado total desta mistura, neste caso o valor obtido foi de $MF=5,236$ para o concreto M-2. Este valor característico foi uma referência para a determinação de uma segunda composição granulométrica de agregados com granulometria contínua, em que foi realizada uma mistura de concreto M-4. O concreto produzido foi, então, submetido às mesmas investigações pelas quais passaram os outros concretos pesquisados.

Para determinação da composição granulométrica de M-4 foram feitas as seguintes considerações:

- a) ANDRIOLO (1984) menciona estudos feitos pelo Corps Engineers, recomendando que para agregados naturais arredondados seja adotado o expoente de 0,5;
- b) Denominou-se M um projeto de mistura de um concreto de composição granulométrica baseada no modelo Füller com expoente

0,5; e

- c) Como o agregado de riolito, em estudo nesta pesquisa, apresenta forma arredondada, foi adotado o valor do expoente na equação de Füller de 0,5 em função da forma dos grãos que compõem os agregados.

A primeira mistura produzida com granulometria contínua foi a mistura M-3, com expoente $q=0,37$, que tem um módulo de finura igual a 4,512.

Adotando o expoente $q=0,5$ no modelo matemático de Füller, calculou-se o módulo de finura de uma composição granulométrica dos agregados da mistura M. O módulo de finura determinado a partir desta distribuição granulométrica com expoente 0,5 foi de 5,203.

Relacionando então a mistura M-3 que tem um $q=0,37$ e $MF=4,512$, com a composição granulométrica M (concreto trabalhável) com $q=0,5$ e $MF=5,203$, obter-se-á um novo índice q com $MF=5,236$ (da M-2), uma nova composição granulométrica para M-4, ou seja:

M-3 - $q=0,37$	→	MF=4,512
M - $q=0,50$	→	MF=5,203
M-4 - $q=$	←	MF=5,236

Portando, o valor de q , procurado na composição granulométrica M-4 pretendida, foi de $q=0,507$.

Os resultados das análises das composições granulométricas desses agregados, utilizados nesta pesquisa, encontram-se à página 82, na tabela 4.1.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

O tipo de cimento escolhido para a pesquisa foi o CP II F-32, por ser o tipo mais comumente produzido pelas cimenteiras da região.

A amostra foi coletada de uma única vez, tendo sido embalada com filme hermético de polietileno, seguida de armazenamento em local seco no laboratório de ensaios.

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os teores médios dos componentes químicos do cimento e os valores médios das suas características físicas respectivamente.

TABELA 3.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DO CIMENTO.

	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	FeO ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	PF %	R. Ins. %
Média	4,49	17,51	2,72	60,12	5,98	3,32	4,86	1,37
Desvio Padrão	0,15	0,23	0,04	0,37	0,12	0,08	0,37	0,19

TABELA 3.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO.

Propriedades	Exp. quente	Tempo de pega		Água cons. normal	Blaine	# 200	# 325	Massa espec.	Resistência à compressão (MPa)	
	mm	Início	Final	%	cm ² /g	%	%	(kg/dm ³)	7 dias	28 dias
Média	0,29	4h27	5h39	26,76	3556	2,78	15,5	2,98	33,11	39,55
Desvio Padrão	0,4	0h25	0h27	0,17	136	0,32	1,03	1,04	1,00	1,14

3.5 CONSTITUIÇÃO DOS CONCRETOS

Para se verificar a variação de comportamento das características do concreto, como a resistência à compressão, o consumo de cimento, o teor de vazios, a massa específica, a absorção e a resistência à tração, em função das alterações das variáveis controláveis no processo, foram produzidos concretos constituídos por

combinações de distintos materiais, caracterizados nos itens anteriores deste capítulo, os quais formaram misturas em seis situações, conforme quadro 3.3, a seguir que apresenta a composição de cada concreto estudado.

QUADRO 3.3 CONSTITUIÇÃO DOS CONCRETOS COM OS MATERIAIS INVESTIGADOS.

DENOMINAÇÃO/MATERIAIS	AGLOMERANTE	AGREGADO MIÚDO	AGREGADO GRAÚDO
REFERÊNCIA	CIMENTO PORTLAND COMPOSTO CP II - 32	AREIA NATURAL	BRITA DIABÁSICA Nº-1
IN NATURA		RIOLITO BICA CORRIDA	
M - 1		AREIA NATURAL	BRITA RIOLITO Nº-1
M - 2		AREIA DE RIOLITO	
M - 3		RIOLITO GRANULOMETRIA CONTÍNUA (q = 0,37)	
M - 4		RIOLITO GRANULOMETRIA CONTÍNUA (q = 0,507)	

3.6 EQUIPAMENTOS, APARELHOS E PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

Os equipamentos e os aparelhos utilizados no experimento estão a seguir caracterizados. A descrição das operações de preparação dos materiais, e a seqüência das operações, são também a seguir detalhadas, de forma a propiciar a reprodução do experimento.

3.6.1 Tipo de Betoneira.

A mistura e a homogeneização dos componentes do concreto foram realizadas em betoneira com cuba giratória e inclinável, com 35 rotações por minuto e capacidade de 320 litros. Para assegurar condições idênticas para as quantidades dos insumos na mistura, a betoneira foi utilizada sempre na condição seca, ou seja, sem a aplicação de algum tipo de imprimação.

3.6.2 Demais Equipamentos, Ferramentas e Utensílios

Os equipamentos, ferramentas e utensílios empregados neste experimento atendem aos requisitos da NBR12821/93 – Preparação de concreto em laboratório, bem como demais exigências específicas contidas em cada norma de ensaio realizado.

3.6.3 Preparo dos Materiais

Para cada preparação de concreto foram utilizadas quantidades de insumos que produzissem um volume de 50 litros de concreto, ou seja, com uma massa específica média do concreto fresco de $2,35 \text{ kg/dm}^3$, tem-se 118 kg de concreto fresco. Os materiais utilizados (cimento e agregados) foram medidos em massa em balança com sensibilidade de 50 gramas. A água foi medida em volume com resolução da proveta de 10 ml. A temperatura durante a execução dessas operações foi mantida entre $19,5^\circ \text{C}$ e $26,0^\circ \text{C}$.

3.6.3.1 Aglomerante

O cimento foi armazenado em local seco, protegido da umidade por sacos de polietileno sobre a sacaria original. A quantidade para a mistura de concreto foi separada momentos antes e acondicionada em sacos plásticos.

3.6.3.2 Agregados

Todos os agregados empregados estavam na condição seca-ambiente. Como preparação prévia, os agregados de riolito sofreram separações granulométricas, atendendo o plano ao experimento. As porções obtidas foram acondicionadas em sacos plásticos e identificadas. Outros agregados, como a areia natural, a brita diabásica e parte do material britado riolito, foram divididos em

porções representativas da amostra inicial na quantidade necessária, evitando-se a segregação do material. As porções separadas foram identificadas e acondicionadas, também, em sacos plásticos.

3.6.3.3 Água

A água de amassamento utilizada proveio da rede de distribuição interna das instalações do CEFET-PR, retirada de poço artesiano.

3.6.4 Procedimentos de Mistura

O número de corpos de prova estabelecido para este experimento foi definido com base nos seguintes parâmetros:

- A grande quantidade de insumos utilizados no experimento, tendo em vista as verificações (ensaios) programadas a serem realizadas;
- O espaço de armazenamento das amostras e condições do local de realização dos ensaios dentro do período programado;

Com base nestas considerações foram definidas as seguintes quantidades de corpos de prova de concreto a serem moldados neste experimento para cada composição dos concretos, conforme o quadro 3.3; página 65

- para a determinação da resistência à compressão para ruptura aos sete e aos vinte e oito dias de idade: doze corpos-de-prova cilíndricos de 100 x 200 mm;
- para determinação da resistência à tração por compressão diametral, ruptura aos vinte e oito dias de idade: três corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm; e
- para ensaios de determinação da massa específica, índice de vazios absorção e porosidade aos vinte e oito dias de idade: três corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm

A colocação dos materiais no interior da betoneira para produção de concreto com materiais convencionais, obedeceu à seguinte ordem:

- a) Colocou-se todo o agregado graúdo e 70% da água;
- b) Foi acionada a betoneira;
- c) Adicionou-se o cimento; e
- d) Acrescentou-se o agregado miúdo e o restante da água.

O tempo de mistura foi de três minutos, contados após o término de colocação dos materiais, seguidos de três minutos de descanso e mais dois minutos de mistura final, com a inclinação do eixo de rotação da cuba em $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ em relação à horizontal.

Quando foi realizada a mistura para concreto com material britado, riolito, na condição *in natura*, foram adicionados os materiais na betoneira na seguinte ordem:

- a) Colocou-se cinquenta por cento do agregado *in natura* e 70% da água;
- b) Após acionar-se a betoneira, adicionou-se o cimento, o restante do agregado graúdo e o restante da água.

Quanto à mistura de concreto com frações granulométricas contínuas, a seqüência de colocação foi a mesma considerada para agregados graúdos e miúdos. Isto foi possível porque cada fração granulométrica foi separada individualmente.

A descarga do concreto da betoneira foi feita removendo-se todo o material (argamassa) possível do interior da cuba, e depositando-o em uma bandeja metálica. O concreto foi então remisturado, manualmente, por meio de pás.

3.7 DOSAGEM DOS CONCRETOS

Uma vez caracterizados os insumos necessários à realização do experimento, foi realizado o cálculo da resistência de dosagem, cujo valor foi obtido a partir da seguinte equação:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 * Sd$$

onde: f_{cmj} = resistência média à compressão do concreto para j dias de idade;

f_{ckj} = resistência característica do concreto à compressão a j dias de idade;

Sd = desvio padrão.

Adotou-se o valor de $f_{ckj} = 20,0$ MPa e de 4,0 MPa como desvio padrão de dosagem do concreto em função de que os materiais, cimento, agregados e água são medidos em massa, e os agregados estão todos secos. O valor de 26,6 MPa foi obtido como parâmetro de resistência de dosagem, utilizando-se a equação acima.

A relação água/cimento de 0,55 para um traço inicial do concreto denominado 'piloto' foi determinada com o auxílio de uma tabela proposta por TANGO (1999), considerando-se o valor de resistência de dosagem e a classe de cimento utilizados no experimento.

Uma estimativa inicial da relação água/materiais secos H foi feita adotando-se um valor fornecido por tabelas que consideram um concreto de consistência plástica, em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e o tipo de adensamento utilizado.

Com a adoção de $H=9,5$, proposta por PETRUCCI (1973), e de α teor de argamassa seca de 52%, proposta pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, e empregando a expressão a seguir, proposta por CAMPITELI (1993), foi feita a determinação da composição da relação entre os materiais para uma mistura inicial do concreto, denominada traço piloto, como segue:

$$c : a : p : a/c.$$

onde: c = a quantidade de cimento em relação aos demais elementos empregados na mistura do concreto geralmente expressa com a unidade;

a = a quantidade de areia em relação aos demais elementos, empregada na mistura do concreto;

p = a quantidade de brita em relação aos demais elementos, empregada na mistura do concreto;

a/c = relação entre a quantidade de água e a quantidade cimento empregada na mistura do concreto ou seja:

$$1 : \left(\alpha \cdot \frac{a/c}{H} - 1 \right) : \left(\frac{a/c}{H} \cdot (100 - \alpha) \right) : a/c$$

onde: α = teor de argamassa da mistura,

a/c = relação água/cimento, e

H = relação água/materiais secos.

O teor de argamassa foi determinado pela expressão:

$$\alpha = \frac{(c + a)}{(c + a + p)}$$

Os teores de "H" foram obtidos pela expressão:

$$H = \frac{(a/c)}{(c + a + p)}$$

Substituindo na expressão acima em que se obtém o traço do concreto, os valores anteriormente descritos, tem-se:

$$1 : \left(\frac{52 \cdot 0,55}{9,5} - 1 \right) : \left(\frac{0,55}{9,5} \cdot (100 - 52) \right) : 0,55$$

resultando no traço piloto de:

1 : 2,177 : 2,933 : 0,55

A partir deste traço foi elaborada uma mistura inicial de concreto seguindo o procedimento descrito no item 3.6.4, página 65 seguida da determinação da consistência do concreto produzido pelo ensaio da NM - 67/1998 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Como no desenvolvimento de todo o experimento, a variável consistência dos concretos foi controlada pelo ensaio do abatimento do tronco de cone. Caso o valor do abatimento se apresentasse fora do intervalo anteriormente especificado, eram realizadas, na própria mistura adições de cimento e de agregados (miúdo e graúdo) em proporções tais que ajustassem o valor do abatimento do tronco de cone ao intervalo desejado. Ainda com a mistura fresca de concreto, realizou-se a verificação qualitativa do argamassamento do concreto.

Esta verificação foi feita pela avaliação visual do aspecto da superfície do concreto, após manejo e alisamento da mesma com a colher de pedreiro, no mesmo instante da avaliação do abatimento do concreto. O critério, para a definição do teor de argamassa seca do concreto, foi pela verificação do acabamento liso e plano da superfície do concreto sem vazios e imperfeições.

Quanto à coesão, a verificação foi feita através de inserções da haste de socamento na lateral do tronco cone de concreto moldado, quando da realização do ensaio de consistência.

Os concretos que não evidenciassem as condições preestabelecidas de abatimento, de argamassamento e de coesão da mistura fresca, foram ajustados às relações dos materiais no traço do concreto através de acréscimos de materiais à mistura. As quantidades destes acréscimos de materiais são obtidas pela diferença da quantidade dos mesmos, entre as quantidades do traço calculado para novos valores de α e de H e as quantidades do traço anterior empregando-se a expressão de CAMPITELI (2003).

Os acréscimos de materiais ao concreto foram executados em número suficiente que atendesse às condições preestabelecidas.

Para cada conjunto de agregados estudados, conforme quadro 3.3 à página 65 foram compostas três misturas de concreto que foram chamadas de mistura pobre, mistura piloto e mistura rica, as quais apresentaram a mesma trabalhabilidade (consistência e coesão) e diferentes relações água/cimento, para proporcionar verificações na resistência mecânica, porosidade, absorção, relação agregado/cimento e consumo de cimento por m³ de concreto.

A definição do traço de concreto para estas misturas foi feita com base nas relações sugeridas por CAMPITELI (2003).

Para quantificação dos traços pobre e rico utilizou-se das expressões a seguir:

- Para o traço mais rico

$$1 : \left(a - \frac{\alpha}{100} \right) : \left[p - \left(\frac{\alpha}{100} \right) \right] : \left(a / c - \frac{H}{100} \right)$$

- Para o traço mais pobre

$$1 : \left(a + \frac{\alpha}{100} \right) : \left[p + \left(\frac{\alpha}{100} \right) \right] : \left(a / c + \frac{H}{100} \right)$$

Como resultado final dos ajustes realizados nas misturas dos materiais para atender às condições preestabelecidas de teor de argamassa seca suficiente, valor do abatimento do tronco de cone em 80 ± 10 mm e uma mistura coesa, na tabela 4.3, à página 84, estão as composições das misturas dos materiais, bem como a relação agregado/cimento e o módulo de finura para cada uma das situações.

3.8 VERIFICAÇÕES E ENSAIOS NO CONCRETO

As verificações realizadas se basearam em procedimentos normativos das normas da ABNT, sendo que foram mantidas as mesmas condições de ensaio durante todo o experimento.

3.8.1 Verificações com Concreto Fresco

A coleta de amostra do concreto foi feita logo após a descarga e remistura manual do mesmo. Em seguida, na determinação da consistência do concreto, caso o valor obtido do abatimento estivesse no intervalo entre 70 e 90 mm, prosseguia-se com as demais determinações programadas.

- Ensaio de Consistência

O método utilizado foi do abatimento de tronco de cone, preconizado pela NM 67/1998, sendo este método restrito a concretos com abatimentos no intervalo de 10 a 150 mm, com agregado graúdo com dimensão máxima de 37,5 mm. Nesta pesquisa, o abatimento estipulado foi de 80 ± 10 mm, e manteve-se fixo para todas as misturas produzidas.

- Ensaio de Massa Específica

Os procedimentos realizados nestas determinações foram baseados na prescrições da NBR 9833/1987. A amostra para execução deste ensaio foi coletada após:

- a) Realizar a descarga da betoneira e remistura manual; e
- b) Verificar a consistência.

As camadas adensadas com o vibrador de imersão foram controladas pelo tempo de adensamento, situando-se entre 25 e 35 segundos, e pela condição de superfície plana e brilhante do concreto.

- Determinação do Teor de Ar Incorporado

Os procedimentos, a coleta de dados e os cálculos para a determinação do

teor de ar incorporado foram realizados considerando os valores da massa dos materiais empregados na mistura do concreto, conforme as prescrições da NBR 9833/1987.

- Moldagem dos Corpos de Prova

Foram moldados dois grupos de corpos-de-prova de concreto, um para avaliação da resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade e outro para avaliação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica e resistência à tração aos 28 dias de idade. Os corpos de prova para a determinação da resistência à compressão foram cilíndricos de 100 x 200 mm. Para a avaliação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, os corpos de prova foram também cilíndricos de 150 x 300 mm, adotando-se para ambos o processo manual de adensamento, moldados segundo a recomendação da NBR 5738/1994.

3.8.2 Verificações e Procedimentos com o Concreto Endurecido

As operações realizadas com o concreto endurecido foram realizadas nos corpos de prova, identificados individualmente através de etiquetas próprias que continham o número do corpo de prova, a data da moldagem, a mistura de concreto, e o ensaio a ser realizado.

- Cura Inicial

Os corpos de prova, após serem moldados, permaneceram no interior do laboratório, individualmente cobertos com placas de material plástico, por um período de 24 horas.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram identificados e levados à câmara úmida, onde permaneceram até 2 horas antes do ensaio de determinação da resistência à compressão ou de determinação da massa específica. As condições

do ambiente da câmara úmida foram controladas e apresentaram como intervalos de valores médios mensais de:

- umidade relativa do ar, de 94,4% a 97,4%; e

- temperatura de 22,4 °C a 24,8 °C, (anexo A apresenta os registros feitos durante o experimento).

- Preparação dos Topos dos Corpos de Prova

Os corpos de prova, após retirados da câmara úmida, tiveram os seus topos enxugados com pano seco e permaneceram em média 50 minutos expostos ao ar antes de receberem capeamento em ambos os topos, com camada de enxofre derretido, conforme prescrições contidas na NM 77/1996 e NBR 5738/1994. Foi utilizado um capeador para a definição dos planos das camadas de arremate dos topos. Este dispositivo foi calibrado quanto à ortogonalidade entre o eixo de geratriz do cilindro e o plano de arremate dos topos.

Verificações foram feitas após o rompimento à compressão dos corpos de prova quanto à integridade da camada retificadora nos topos dos mesmos. Constataram-se dois momentos em que tal camada se apresentava com fendas próximas à borda cilíndrica. Os resultados destes corpos de prova ficaram dentro do intervalo dos demais da série.

- Determinação da Resistência à Compressão Axial dos Corpos de Prova

Após a preparação dos topos e até 2 duas horas após a saída da câmara úmida, os corpos de prova foram ensaiados à compressão. A máquina de ensaio utilizada foi do tipo prensa hidráulica, de fabricação EMIC PC/200, em conjunto com o sistema de aquisição de dados gerenciados por um software M TEST, versão 3.0. A capacidade da prensa é de 200 toneladas-força, com leituras na célula de carga na ordem kgf, aferida em 20/11/2002. O sistema registrou os valores máximos de

tensão atingidos pelos corpos de prova, em relatórios de ensaios.

Os corpos de prova foram medidos em sua dimensão diametral em mm. Para o cálculo da sua seção transversal, os valores adotados foram a média de três determinações em pontos equidistantes ao longo da superfície cilíndrica.

A velocidade de aplicação da carga sobre o corpo de prova foi dentro do intervalo, ou seja entre 0,5 e 0,8 MPa/s. Os demais procedimentos de ensaio foram executados em conformidade com a NBR 5739/1994, com a utilização do equipamento ilustrado na figura 3.2, a seguir.

FIGURA – 3.2 PRENSA E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.



- Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral

Aos vinte e oito dias de idade, os corpos de prova de dimensões 150 x 300 mm foram submetidos à avaliação da resistência à tração por compressão diametral, com base nas prescrições contidas na NBR 7222/1994. Foi utilizada a mesma prensa e sistema de aquisição de dados, conforme ilustração da figura 3.3, a seguir. Os pratos da prensa foram acionados durante o ensaio para que se atingisse a

velocidade de tensão de tração de 0,04 a 0,07 MPa/s.

FIGURA – 3.3 PRENSA E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL



- Determinação da Absorção de Água por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica Seca.

Os corpos de prova cilíndricos 150 x 300 mm, após serem retirados da câmara úmida, permaneceram durante 4 horas expostos ao ar; depois foram mantidos em estufa à temperatura de $110 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pelo tempo de 72 horas. As massas dos corpos de prova devem estar nas condições de:

- seca em estufa,
- saturada em água à temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ com superfície seca,
- saturado e imerso, e
- fervura em água com superfície seca e depois com imersão.

As massas foram realizadas em balança com precisão de 1,0 grama. As condições acima listadas foram realizadas e seguiram às prescrições da NBR 9778/1987.

3.9 CÁLCULO DA ÁREA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Para determinar a área da superfície dos grãos dos agregados empregados, considerou-se o grão do agregado em estudo como sendo uma esfera, cujo diâmetro estatístico é tomado como sendo o valor médio entre a abertura da peneira onde o grão fica retido e a abertura da peneira por onde o grão passa, quando do peneiramento. O procedimento é executado tendo-se, em mãos, os resultados das massas retidas nas peneiras determinadas no ensaio de peneiramento da análise granulométrica e da massa específica do agregado em estudo. A equação a seguir foi utilizada para a determinação da área específica dos agregados

$$AE = \frac{6}{ME \times Mt} \times \sum_{\#1}^k \frac{M_{\#}}{\phi_{\#}}$$

onde: AE = área específica do agregado (cm²/g),

ME = Massa específica (g/cm³),

Mt = Massa total de agregado (g),

M_# = Massa retida na peneira considerada (g), e

φ_# = diâmetro médio das partículas retidas na peneira (cm)

3.10 AS COMPARAÇÕES

No capítulo 4 serão apresentados os resultados de desempenho dos concretos produzidos, seguidos de discussão dos fatores que interferem nas propriedades examinadas, com os seguintes aspectos:

- a) A influência do tipo de agregado miúdo na resistência do concreto: serão comparados os concretos M-1 e M-2, porque são constituídos com o mesmo agregado graúdo e com diferentes agregados miúdos;
- b) A influência do agregado miúdo no consumo de cimento: serão comparados os concretos M-1 e M-2, porque são constituídos com o

mesmo agregado graúdo e com diferentes agregados miúdos;

- c) A influência do agregado graúdo na resistência: serão comparados os concretos referência e M-1, pois estes concretos são compostos com mesmo agregado miúdo e diferentes agregados graúdos;
- d) A influência da granulometria dos agregados na resistência: os concretos *in natura* M-3 e m-4 são constituídos com o mesmo agregado, sendo dois deles com granulometria contínua, M-3 e M-4, e o terceiro agregado *in natura* que não sofreu nenhum tratamento com respeito à granulometria. Os concretos M-3 e M-4 foram compostos granulometricamente a partir dos modelos de Füller, com expoentes de 0,37 e 0,507 respectivamente. Neste aspecto será discutida a influência do empacotamento dos grãos na mistura dos concretos; e
- e) A influência das características físicas dos agregados e concretos no comportamento dos concretos em relação à porosidade e à resistência à compressão: serão apresentados os resultados dos concretos pesquisados e discutidos os fatores influentes nessas propriedades.

4. RESULTADOS

Inicialmente são apresentados os resultados obtidos pelas investigações realizadas, da caracterização dos materiais utilizados. Em um segundo momento, são apresentadas as características dos concretos pesquisados, com as análises de comparação de desempenho dos distintos grupos de concreto.

4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo está estruturado em duas partes: a primeira com a apresentação dos resultados, e com uma segunda com a análise e discussão dos mesmos onde estão os comentários relativos à influência das variáveis investigadas e de outros fatores que atuam sobre o comportamento do concreto nas diferentes propriedades estudadas.

Sendo um dos objetivos deste trabalho avaliar o desempenho de agregados britados e otimizados granulometricamente em concretos de cimento portland, foram caracterizados os agregados quanto à granulometria cujos resultados estão ilustrados na tabela 4.1 página 81. Na tabela 4.2, página 82, estão registrados os parâmetros físicos e de qualidade dos agregados. Os resultados assim dispostos permitem associar as características dos mesmos e a sua influência no desempenho dos concretos.

Na tabela 4.3, página 84, constam os resultados da caracterização de cada concreto produzido, permitindo analisar individualmente o desempenho de cada um deles em relação às suas diferentes composições.

Os resultados das verificações, agrupados desta forma, possibilitam analisar o desempenho de cada composição de concreto quanto à influência dos agregados miúdos, dos agregados graúdos e da distribuição granulométrica total dos agregados na resistência dos concretos.

A figura 4.1 página 83, ilustra a curva da distribuição granulométrica dos agregados graúdos utilizados no experimento, a brita diabásica número 1 e brita de

riolito número 1. Na mesma figura estão representados os limites granulométricos prescritos pela NBR - 7211/1983 relativos à brita de graduação 1.

A distribuição granulométrica dos agregados miúdos está representado pelas curvas na figura 4.2, página 83; nela também constam os limites granulométricos prescritos pela NBR 7211/1983 do agregado miúdo de graduação 3 (média).

A influência do agregado miúdo na resistência à compressão axial do concreto é ilustrada através figura 4.3, página 83, na qual são apresentadas as possíveis características dos agregados miúdos que influem na resistência dos concretos. A figura 4.4, página 85 ilustra as relações entre o teor de ar incorporado dos concretos em análise com os diferentes teores de agregados totais utilizados no experimento.

O diagrama de dosagem dos concretos M-1 e M-2 é apresentado através da figura 4.5, página 87, junto do qual estão apresentados mais alguns pontos das características de dois concretos.

A figura 4.6, página 88 é apresenta uma relação entre a resistência à compressão e o consumo de cimento para os concretos M-1 e M-2.

A distribuição granulométrica dos agregados totais dos concretos de referência e M-1 está ilustrada na figura 4.7, página 90

A figura 4.8, página 91, ilustra através do diagrama de dosagem dos concretos, de referência e M-1, as suas características e diferenças próprias.

A figura 4.9, página 94, apresenta o diagrama de dosagem dos concretos *in natura*, M-1 e M-2, o qual focaliza o desempenho dos concretos com agregados britados por impacto, sendo que M-3 e M-4 são controlados granulometricamente.

TABELA 4.1 – RESULTADOS DAS COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS UTILIZADOS.

Peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada (%)						
	Brita diabásica	Areia natural	Areia riolito	“in natura”	Brita 1 riolito	(1)Riolito q= 0,37	(2)Riolito q= 0,507
38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,00	0,0
19	3,3	0,0	0,0	6,6	5,0	9,7	13,4
12,5	57,7	0,0	0,0	22,3	39,0	22,6	30,5
9,5	85,9	0,0	0,0	32,3	80,2	30,1	39,8
6,3	96,9	0,6	0,0	47,7	95,6	40,0	51,4
4,8	97,3	4,1	0,0	63,9	97,6	45,7	57,9
2,4	97,3	12,3	45,5	79,5	97,6	58,0	70,7
1,2	97,3	30,7	65,5	86,7	97,6	67,5	79,6
0,6	97,3	50,1	79,3	91,6	97,6	74,8	85,8
0,3	97,3	71,6	86,7	94,3	97,6	80,5	90,1
0,15	97,3	91,2	92,2	96,3	97,6	84,9	93,1
0,074	97,3*	91,2*	92,2*	96,3*	97,6*	88,4	95,3
Fundo	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0

*valores não determinados experimentalmente.

(1) Agregado composto granulometricamente conforme modelo de Füller $y = 100 \left(1 - \frac{d}{D} \right)^q$ sendo q=0,37.

(2) Agregado composto granulometricamente conforme modelo de Füller $y = 100 \left(1 - \frac{d}{D} \right)^q$ sendo q=0,507.

TABELA 4.2 – PARÂMETROS DOS ÍNDICES FÍSICOS E ÍNDICES DE QUALIDADE DOS AGREGADOS UTILIZADOS.

MATERIAIS	TIPOS DE AGREGADOS UTILIZADOS						
	AREIA NATURAL	BRITA DIABÁSICA	BRITA RIOLITO	AREIA RIOLITO	Q=0,37	Q=0,507	RIOLITO "IN NATURA"
Classificação	zona 3	brita 1	brita 1	nd	nd	nd	nd
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	19,0	19,0	4,8	25,0	25,0	25,0
Módulo de finura	2,61	6,73	6,81	3,52	4,51	5,31	5,51
Teor de torrões de argila (%)	0,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Teor de material pulverulento (%)	4,5	1,6	2,8	11,7	15,7	6,9	3,4
Índice de forma	nd	2,85	1,85	nd	1,85	1,85	1,85
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,73	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
Massa unitária (g/cm ³)	1,44	1,51	1,61	1,58	1,71	1,69	1,69
Absorção de água (%)	0,4	1,2	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78

nd = não determinado

FIGURA 4.1 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DE "BRITA DIABÁSICA" N⁰⁻¹ E "BRITA" DE RIOLITO N⁰⁻¹ OS LIMITES GRANULOMÉTRICOS PRESCRITOS PELA NBR - 7211/1983 (BRITA N⁰⁻¹)

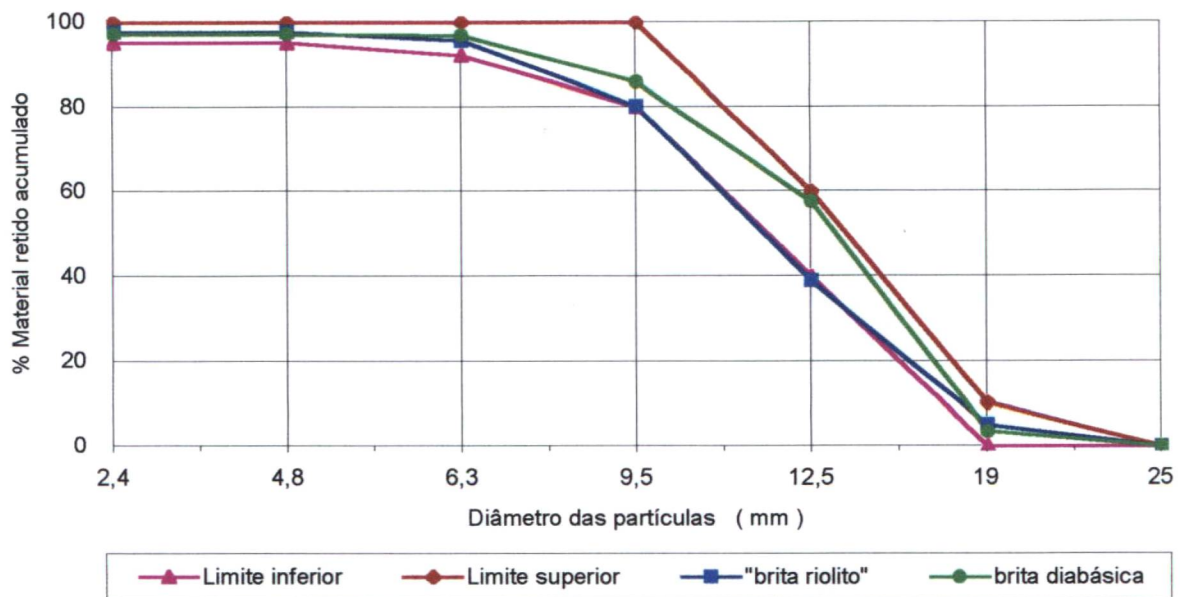


FIGURA 4.2 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDOS E OS LIMITES GRANULOMÉTRICOS PRESCRITOS PELA NBR 7211/1983 (AGREGADO MIÚDO ZONA 3)

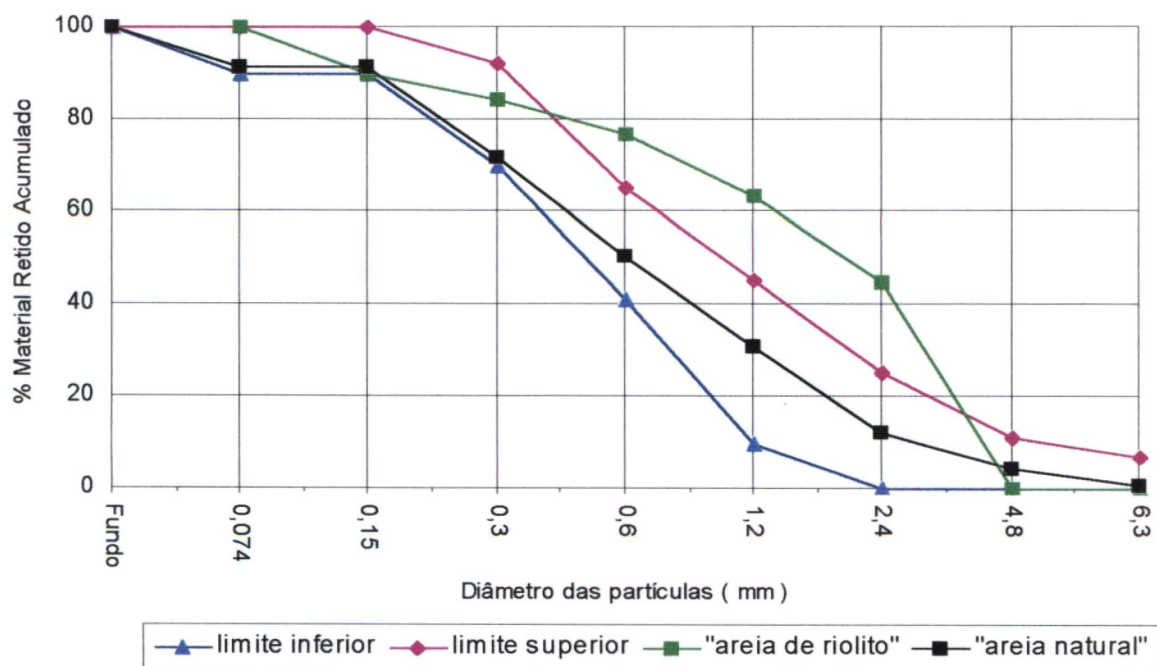


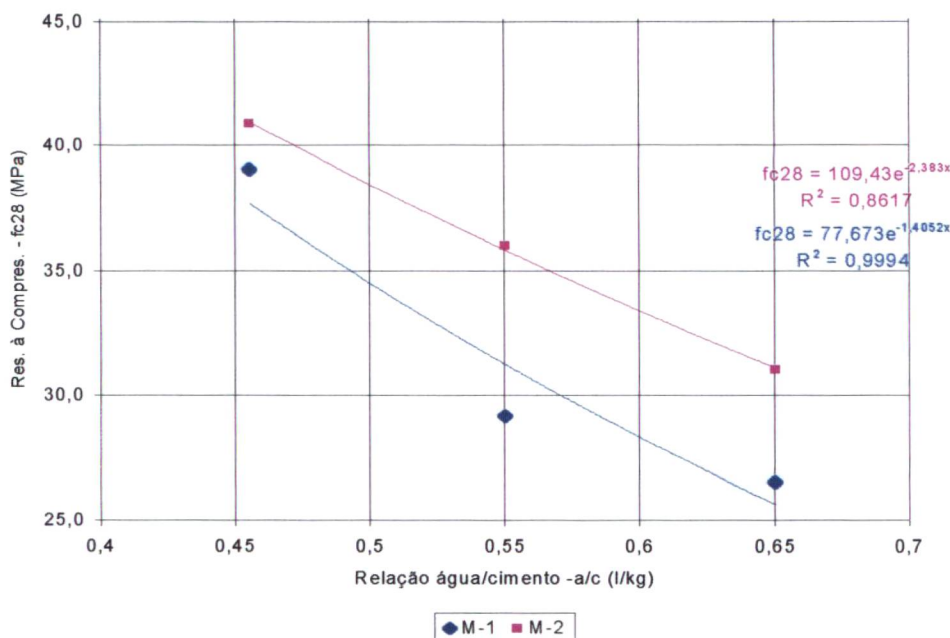
TABELA 4.3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS, DAS PROPRIEDADES VERIFICADAS EM RELAÇÃO AOS MATERIAIS ESTUDADOS NOS CONCRETOS

Misturas	Agregado Total		Concreto Fresco										Concreto Endurecido					
	MF (agr total)	AE (cm ² /g)	a (kg)	p (kg)	a/c (l/kg)	H (%)	α (%)	m (kg) (kg)	C (kg/m ³)	Ar incorp. (%)	Absorção (%)	ME (kg/dm ³)	Poros. (%)	Fc7 (MPa)	Fc28 (MPa)	Ft28 (MPa)		
Referência	Pobre	4,628	38,28	2,317	2,825	0,65	10,6	54	5,142	345,7	0,41	7,3	2,389	19,6	22	25,3	2,97	
	Piloto	4,428	39,12	2,416	2,373	0,55	9,5	59	4,789	375,0	0,366	8,5	2,404	17,6	22,8	28,2	3,09	
	Rico	4,184	38,99	2,161	1,628	0,455	9,5	66	3,789	454,9	0,27	8,4	2,379	15,1	30,6	36,8	3,31	
In natura	Pobre	5,510	34,39	2,212	2,93	0,596	9,7	52,3	5,142	346,5	1,091	5,8	2,351	15,7	25	27	3,01	
	Piloto	5,510	34,39	2,17	2,44	0,54	9,6	56,5	4,61	380,5	0,851	4,6	2,366	13	27,1	28,1	3,15	
	Rico	5,510	34,39	1,654	1,867	0,519	11,5	58,7	3,521	455,9	0,475	5,1	2,354	9,7	30,2	32,7	3,25	
M-1	Pobre	4,893	31,20	2,049	2,815	0,65	9,5	56	5,789	314,6	1,784	6,2	2,343	15,6	24,5	26,6	3,12	
	Piloto	4,828	31,02	1,97	2,53	0,55	9,5	54	4,793	369,9	1,441	5,9	2,374	15,1	26,5	29,2	3,22	
	Rico	4,867	29,66	1,426	1,907	0,455	10,0	54	3,55	467,7	0,708	5,5	2,375	14,4	33,9	39,1	3,62	
M-2	Pobre	5,264	36,34	2,666	3,123	0,65	11,0	56	4,858	353,4	0,668	5,6	2,342	18	27,3	31,1	3,05	
	Piloto	5,236	35,87	2,242	2,547	0,55	10,0	56	4,500	385,1	0,458	5,5	2,374	15,6	31,9	36,0	3,09	
	Rico	5,492	31,97	1,639	1,911	0,455	10,5	54	3,330	485,9	0,335	5,3	2,367	12,6	34,5	40,1	3,62	
M-3	Pobre	4,740	61,67	2,279	2,966	0,61	9,8	52,5	5,245	340,1	1,721	5,5	2,335	14	25,8	29,1	3,18	
	Piloto	4,740	61,67	2,367	2,733	0,58	9,5	55,2	5,100	350,3	1,443	5,2	2,351	13,6	28,4	31,9	3,34	
	Rico	4,740	61,67	1,869	1,921	0,455	9,5	59,9	3,790	448,1	1,033	5,1	2,366	13	34,1	38,2	3,62	
M-4	Pobre	5,234	46,22	2,271	2,974	0,675	10,8	52,4	5,245	332,8	1,768	6,2	2,393	13,7	24,2	28,1	3,29	
	Piloto	5,234	46,22	1,979	2,592	0,575	10,3	53,5	4,571	377,6	1,593	5,9	2,414	9,8	28,6	38,5	3,76	
	Rico	5,234	46,22	1,562	2,045	0,465	10,1	55,6	3,607	460,4	1,471	6,5	2,403	14,5	35,4	43,0	4,39	

4.2 INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Para verificar a influência do agregado miúdo na resistência à compressão axial, foram agrupadas as misturas de concreto M -1 e M-2, pois é a situação que permite realizar considerações e análises. A figura 4.3, a seguir, ilustra os valores obtidos de resistência à compressão axial dos corpos de prova para os concretos com agregado miúdo natural M-1 e concreto com agregado miúdo M-2 de britagem de rocha riolito, utilizados nas várias relações água/cimento.

FIGURA 4.3– INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.



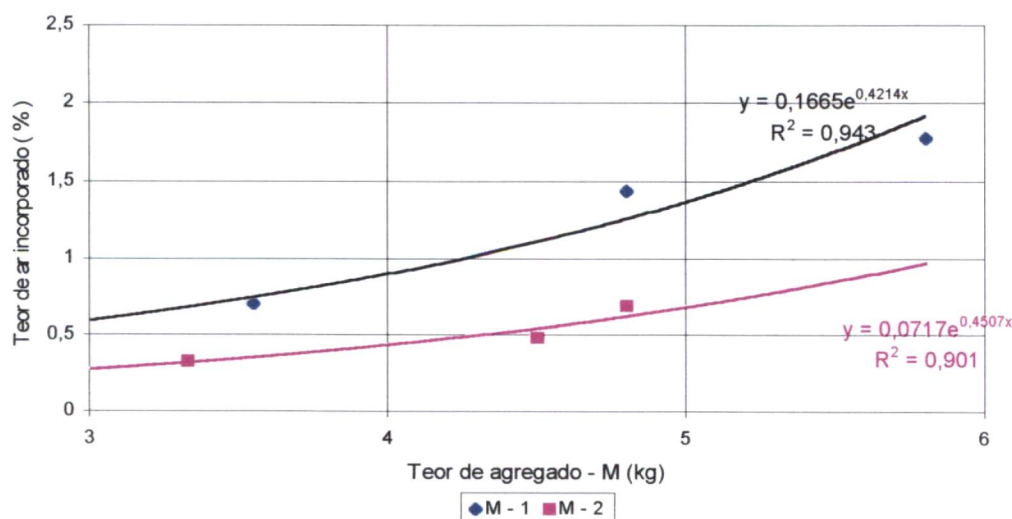
Para os concretos em questão, tanto M-1 quanto M-2 têm o mesmo agregado graúdo. A distribuição granulométrica dos agregados miúdos desses concretos apresentam valores próximos de teor de finos ($\phi < 0,15$ mm), o que permite realizar uma análise de outros fatores de influência neste concreto. Verificando a figura 4.2, página 83, onde são apresentadas as curvas de distribuição granulométricas dos agregados miúdos utilizados nesta pesquisa, a areia natural se

enquadra nos limites especificados pela NBR 7211/1983, na graduação zona 3. Porém, a areia de riolito apresenta uma curva granulométrica além dos limites especificados, com elevada concentração de grãos grossos.

Conforme valores da tabela 4.3, página 84, observa-se que a área específica dos agregados totais que compõem o concreto M-2, é maior que a do concreto M-1. Segundo NEVILLE (1997), agregados com maior área específica exigem maior quantidade de água, necessária à molhagem dos sólidos para uma dada trabalhabilidade, aumentando a relação água/cimento e conseqüentemente, baixando a resistência. Contrapondo-se a isso, com base nos resultados obtidos, a figura 4.3, página 85, ilustra tal evidência, onde se verifica que a resistência à compressão axial do concreto M-2 apresenta o melhor desempenho .

O melhor desempenho do concreto M-2, também pode estar associado à característica de conter menor teor de ar aprisionado. A figura 4.4 a seguir ilustra o comportamento dessa característica em função da relação agregado/cimento. A resistência apresentada pelo concreto M-2 pode também estar associada ao melhor empacotamento das partículas da mistura, ou seja, a areia de riolito apresenta menor índice de vazios comparada com a areia natural, uma vez que todos os concretos produzidos receberam a mesma energia de adensamento.

FIGURA 4.4 - INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGREGADO NO TEOR DE AR INCORPORADO.



Outro parâmetro de análise das características dos concretos é o módulo de finura total dos agregados. A determinação desse módulo foi feita a partir da constituição ponderada dos insumos dos concretos, através do seguinte modelo:

$$MF_{(M-2)} = \%Areia \cdot MF_{(Areia)} + \%Brita \cdot MF_{(brita)}$$

- Para o concreto M-2 traço piloto $MF_{(M-2)}$

$$MF_{(M-2)} = 46,2\% \cdot 3,52 + 53,8\% \cdot 6,71 \therefore$$

$$MF_{(M-2)} = 5,24$$

- Para o concreto M-1 traço piloto $MF_{(M-1)}$

$$MF_{(M-1)} = 44,4\% \cdot 2,61 + 55,6\% \cdot 6,71$$

$$MF_{(M-1)} = 4,83$$

O agregado miúdo de riolito M-2 permite a obtenção de concretos trabalháveis com teor de argamassa de 56%, valor obtido na dosagem do concreto, conforme tabela 4.3, à página 84, porém com consumo de cimento menor do que o concreto M-1 e com mesmo desempenho em relação à resistência à compressão axial, comparado ao concreto com areia natural M-1. Portanto, a areia de riolito evidencia desempenho tecnicamente viável, conforme ilustrado na figura 4.5, página 88 e no diagrama de dosagem na figura 4.6, página 89.

NUGENT (1979) apresenta um série de estudos de desempenho de concretos utilizando areias provenientes de britagem de rochas. Neles constatou-se um alto teor de finos quando comparados com as areias naturais, as quais não apresentam efeitos nocivos às propriedades do concreto.

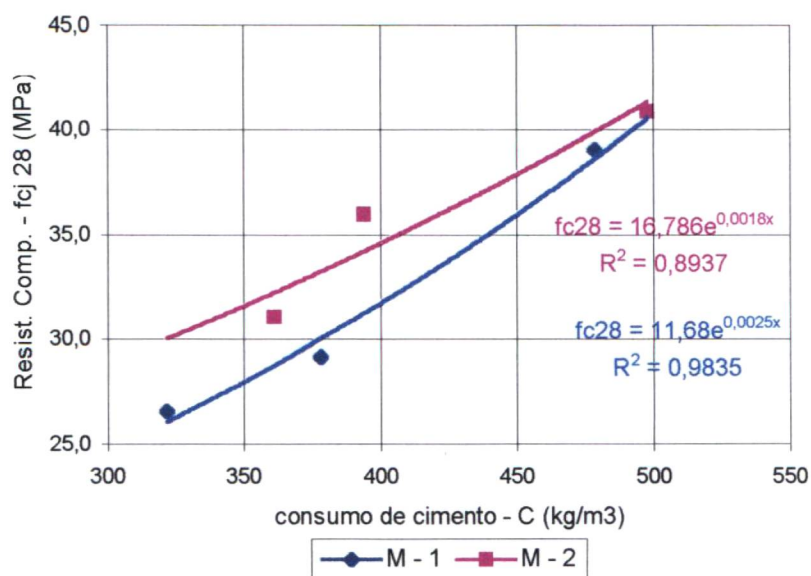
Com base nos comportamentos destes concretos, em relação aos dois agregados miúdos, pode-se afirmar que a utilização da areia de riolito como agregado miúdo é tecnicamente viável. As características granulométricas da areia de riolito, mostradas na tabela 4.1, página 83, são inerentes a uma fração de agregados menores do que 4,8 mm, a qual foi retirada da amostra de agregados colhidos na saída do fluxo de produção do equipamento de cominuição por impactos, portanto não sofreram nenhum beneficiamento, separação ou tratamento

de composição granulométrica.

4.3 INFLUÊNCIA DO AGREGADO MIÚDO NO CONSUMO DE CIMENTO

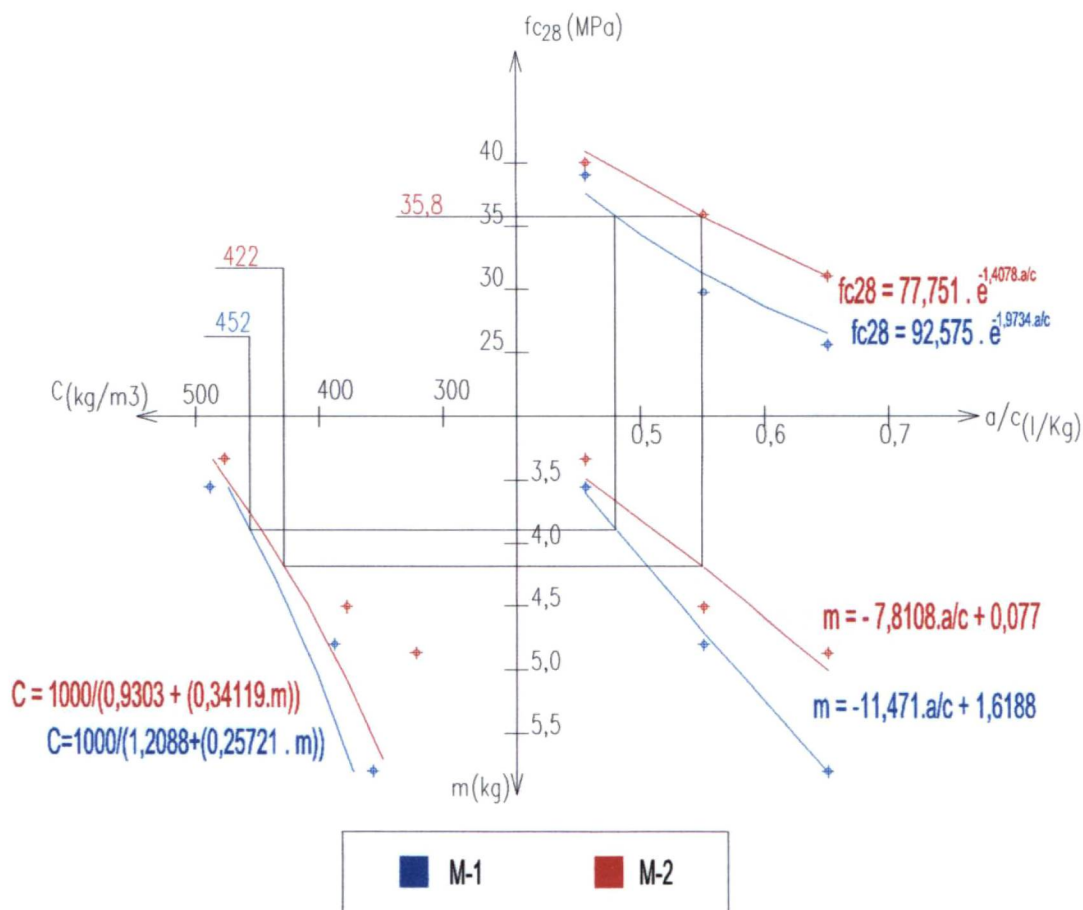
Analisando os concretos M-1 e M-2, a influência do agregado miúdo no consumo de cimento, em relação à resistência à compressão axial, é observada através da figura 4.5, a seguir, sendo que, para um determinado consumo de cimento, o concreto M-2 apresenta maior resistência, comparado com o concreto M-1.

FIGURA 4.5 – RELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE CIMENTO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE CONCRETOS COM DIFERENTES AGREGADOS MIÚDOS.



Com o auxílio do diagrama de dosagem, na figura 4.6, a seguir para os dois concretos em análise, pode-se verificar que, para um determinado valor de resistência à compressão, a relação água/cimento para o concreto M-2 se apresenta maior devido à maior área específica comparado com M-1.

FIGURA 4.6 – DIAGRAMA DE DOSAGEM PARA OS CONCRETOS M-1 E M-2.



Analisando o diagrama da figura 4.6, verifica-se que, como a consistência do concreto é constante para todo o experimento, o concreto M-2 exige maior incrementos na relação água/cimento quando ocorrem aumentos da relação agregado/cimento (m).

Apesar da composição granulométrica do agregado miúdo do concreto M-2 se apresentar fora dos limites granulométricos da NBR 7211/1983, produz um concreto com resistências à compressão axial mais elevadas que o concreto M-1, porém, com consumo de cimento menor em aproximadamente 30 kg/m^3 .

4.4 INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO NA RESISTÊNCIA

A análise deste enfoque será feita nos concretos referência e M-1, pois ambos contêm o mesmo agregado miúdo, porém com diferentes agregados graúdos.

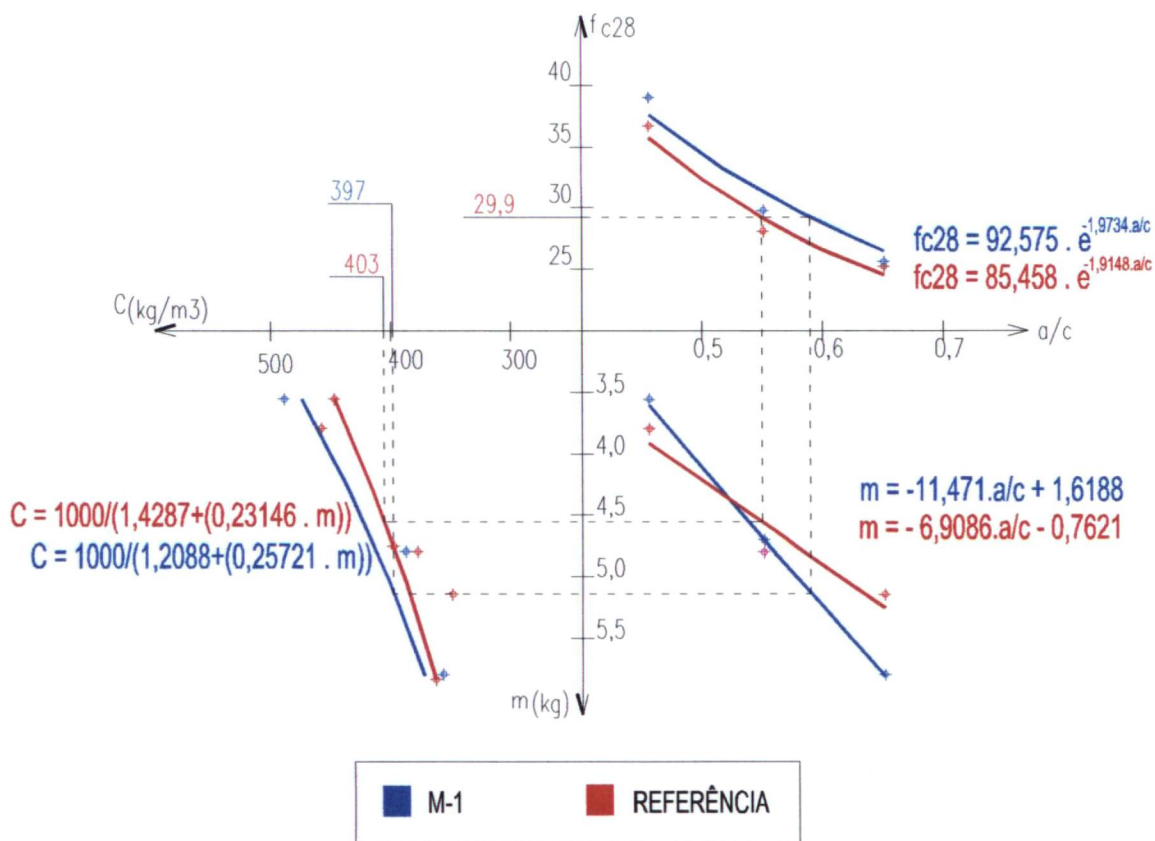
O concreto referência foi constituído por brita diabásica, e o concreto M-1 com brita de riolito. O diâmetro máximo dos agregados graúdos foi o mesmo para os dois concretos. O desempenho tecnológico dos dois concretos está ilustrado no diagrama de dosagem na figura 4.7, página 91.

A mistura M-1, composta de brita de riolito de forma não lamelar e areia natural, evidenciou o melhor comportamento, com melhor valor de resistência à compressão, se comparada com o concreto de referência composto por brita diabásica. O melhor desempenho do concreto M-1 se deve à forma da brita utilizada. A forma das partículas da brita diabásica, empregada no traço de referência, é do tipo lamelar, com valor do índice de forma de 2,85, enquanto na brita de riolito o índice de forma é de 1,85. Esta característica deve ter contribuído para que essa mistura exigisse os maiores teores de argamassa, que foi de 59% para um abatimento de 80 mm na relação água-cimento de 0,55. Assim sendo, este elevado teor de argamassa resultou em maior porosidade no concreto de referência, e a resistência à compressão axial apresentou-se como a mais baixa em relação ao concreto M-1.

Para NEVILLE (1997) e METHA & MONTEIRO (1994), o potencial de resistência dos concretos é determinado pelas propriedades dos agregados, pois geralmente eles são mais resistentes que a pasta de cimento que os envolve. Para ALMEIDA (1994), esta resistência deverá ser muito maior que a classe do concreto que se pretende obter.

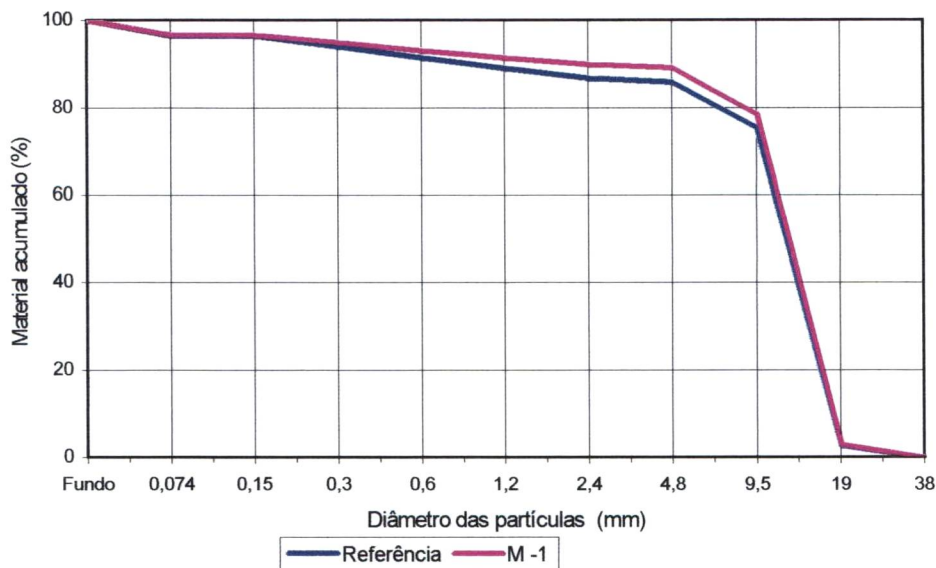
É consenso de que a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, o diâmetro máximo/módulo de finura, a natureza mineralógica, a forma das partículas e a textura superficial dos agregados são os fatores que mais influenciam no comportamento mecânico dos concretos.

FIGURA 4.7– DIAGRAMA DE DOSAGEM DOS CONCRETOS REFERÊNCIA E M-1.



Os agregados totais dos concretos, referência e M-1, conforme ilustrado no gráfico da figura 4.8, página 92, em relação à quantidade total de agregados, apresentam poucos finos em suas composições granulométricas. Isto pode proporcionar condições de alojamento de vazios entre os grãos grossos, reduzindo as propriedades mecânicas, sendo agravados quando a mistura contém grãos lamelares como a mistura referência.

FIGURA 4.8 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS TOTAIS DOS CONCRETOS DE REFERÊNCIA E M-1.



Uma moderada manifestação de exsudação foi observada na mistura referência. Isto pode ter contribuído para que os vazios existentes sob as partículas do agregado, fossem preenchidos com água exsudada e onde podem ter se concentrado grandes quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, segundo NEVILLE (1997).

Nestes locais, denominados de interface entre a pasta e o agregado, e principalmente no agregado graúdo, onde se concentram as tensões resultantes da diferença de módulos de elasticidade e de coeficientes de Poisson dos dois materiais, pode-se localizar um ponto fraco de ruptura do concreto.

Consideração deve ser feita quanto à superfície de ruptura dos corpos de prova feita nas idades de vinte e oito dias. Nas misturas que continham o agregado não lamelar (riolito), percebia-se com grande frequência a superfície de aderência entre o agregado e a pasta de cimento; porém, no concreto com brita diabásica, foram observados vários grãos rompidos segundo a superfície de ruptura do corpo-de-prova.

Isto se contrapõem ao que foi mencionado anteriormente, de que os agregados devem ser mais resistentes que a pasta de cimento. Nesta análise há

dois pontos a considerar: O primeiro, um corpo de prova quando sujeito a um estado de tensão, a propagação da superfície de ruptura tende a seguir para as regiões mais fracas, podendo ocorrer, por, deficiência de aderência com a pasta, que as primeiras fissuras contornem os grãos dos agregados. Neste caso, a textura e a angularidade de superfície, e a natureza mineralógica dos grãos são os fatores que mais contribuem para o desempenho mecânico do concreto.

Segundo refere-se à forma dos grãos dos agregados. Em um material composto, como é o caso do concreto, se a disposição dos grãos e especificamente os grãos lamelares favorecerem (posição da partícula em relação ao plano de tensões de ruptura), pode ocorrer a ruptura dos grãos, pois as tensões sobre os grãos encontraram pouca resistência, isto é, pouca área transversal no sentido da ruptura. Ou seja, o plano de ruptura do grão lamelar acontece ortogonalmente segundo sua espessura. Considerando que os grãos dos agregados são mais resistentes que a pasta de cimento, a ruptura dos grãos com forma não lamelar tem menores possibilidades de ocorrer, pois os, grãos assemelhando-se a cubos ou a esferas de materiais de mesma características mineralógicas apresentam maior dificuldade para se romper.

SOBRAL (1983) menciona que ensaios têm mostrado que concretos feitos com pedra britada revelaram melhor aderência que concretos preparados com seixo rolado, principalmente com relação água-cimento igual a 0,40. Os concretos com pedra britada apresentaram aumento de até 30% na resistência. Porém, este efeito pode, ser anulado com relação água-cimento maior que 0,65.

TASONG *et al.* (1998) encontraram diferenças significativas de comportamento mecânico em concretos, com diferentes tipos de textura de superfície, salientando que a resistência de aderência entre a pasta e o agregado é função também da estrutura mineralógica e resistência da rocha matriz.

No diagrama de dosagem dos concretos de referência e M-1, observa-se que, para o valor de resistência à compressão de 29,9 MPa, a relação água/cimento

para o concreto M-1 é maior, pois com a mesma consistência apresentam o mesmo consumo de cimento, e o concreto M-1 apresenta maior capacidade de incorporar agregados com menor incremento da relação água/cimento

Como em todo o experimento, a consistência dos concretos foi controlada e permaneceu constante. Verifica-se que para baixos valores da relação água/cimento, o concreto M-1 consome maior quantidade de cimento, e que para valores de água/cimento maiores que 0,60 ocorre o inverso.

4.5 INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS NA RESISTÊNCIA

Além das verificações da influência do agregado graúdo e do agregado miúdo na resistência do concreto, o estudo da verificação da influência dos efeitos da composição granulométrica dos agregados são apresentados na figura 4.9, página 95. Para a análise destes efeitos, os concretos *in natura*, M-3 e M-4 são constituídos com agregados totais com as mesmas características físicas, porém com distribuições granulométricas distintas.

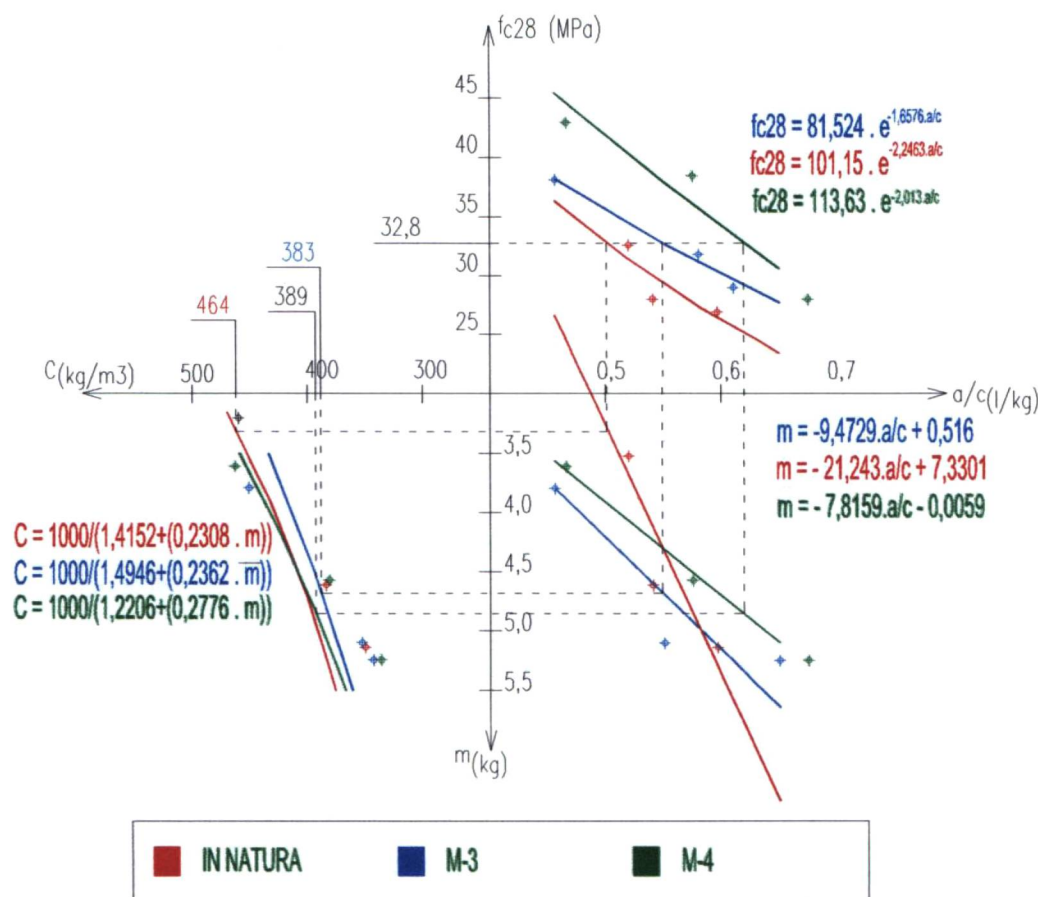
Pode-se verificar que o concreto M-4 é o que melhor apresenta desempenho de resistência à compressão.

No experimento realizado, a consistência da mistura foi controlada e permaneceu fixa, resultando que, em todos os concretos, o desempenho relativo à resistência à compressão será em função da variação da relação água/cimento e das características das composições granulométricas de cada concreto.

Uma vez que a granulometria dos agregados tem, também, uma forte influência na trabalhabilidade da mistura, e que as três composições granulométricas dos concretos ora referidos se apresentam com características próprias, ilustradas na figura 4.10, página 96, isto resulta em variações nos índices físicos dos agregados, conforme apresentado na tabela 4.3, página 85 considerando ainda que a forma dos grãos é a mesma para todos os agregados envolvidos nesta análise. As

diferenças de valores da resistência à compressão dos três concretos resultaram da influência dos parâmetros: módulo de finura total do agregado e área específica dos agregados utilizados em cada concreto.

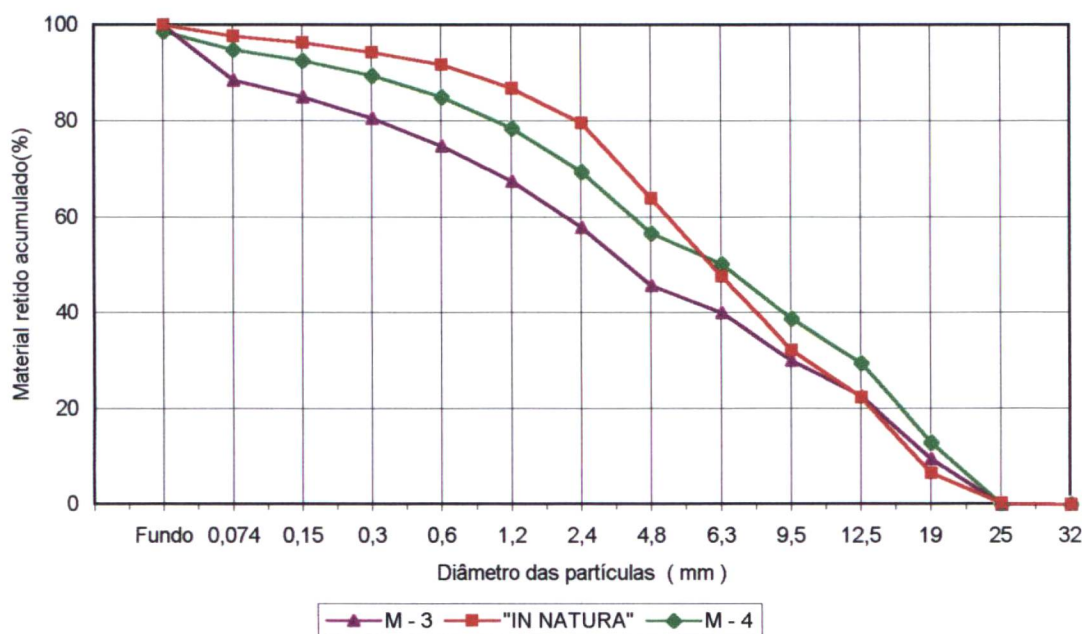
FIGURA 4.9 – DIAGRAMA DE DOSAGEM DOS CONCRETOS *IN NATURA*, M-1 E M-2.



Verifica-se que, no diagrama anterior, os concretos com as composições granulométricas *in natura*, M-3 e M-4, respectivamente, apresentam níveis crescentes de resistência à compressão. Como as misturas foram produzidas, controladas e ajustadas para a mesma consistência, através do abatimento do tronco de cone, percebe-se que, para cada valor da relação agregado/cimento, tem-se o correspondente consumo de cimento, destacando que a mistura M-3 apresentou o menor consumo.

Observa-se também que a resistência à compressão do concreto no estudo não atinge valores altos (na faixa de 25,0 a 45,0 MPa) se comparada com concretos de alto desempenho. Pode-se, então, considerar que o agregado utilizado é muito mais resistente do que a pasta de cimento. No diagrama de dosagem da figura 4.9, página 95, analisando as relações agregado/cimento e água/cimento, das mais baixas às mais elevadas, para as misturas M-3 e M-4, verifica-se um afastamento das duas linhas, que representam o comportamento das relações citadas. Isto indica uma capacidade maior de incorporar agregado para a mistura M-3, e uma menor capacidade para a mistura M-4.

FIGURA 4.10 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA TOTAL DOS CONCRETOS *IN NATURA*, M-3 E M-4.



AMPARANO *et al.* (2000) explicam o fenômeno estudado, quando verificaram em seu experimento que, mantendo fixa a relação água/cimento, os aumentos da relação agregado/cimento introduzem e evidenciam a zona de transição de interface no concreto, que é uma zona fraca situada na interface entre o agregado e a pasta de cimento circundante, tendo um efeito muito importante em todas as propriedades do concreto.

4.6 – COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS EM RELAÇÃO À ABSORÇÃO E A POROSIDADE

Neste ítem são analisados todos os concretos produzidos. A tabela 4.3, página 84, apresenta os valores de absorção e a porosidade dos corpos de prova de concretos, obtidos com as diversas composições. Nesta tabela, ainda, pode-se verificar que a propriedade de absorção dos concretos, realmente, apresenta variação comparada com a porosidade.

A tabela 4.3, página 84, também apresenta os valores das propriedades de análise. Com o auxílio das figuras 4.11, página 98, e da figura 4.12, página 99, verifica-se que os concretos *in natura*, M-2 e M-3, são os que apresentaram as menores taxas de porosidade.

Reunindo as características do módulo de finura e área específica das misturas dos concretos em análise na tabela 4.4, página 98, são feitas as seguintes considerações:

- a) Os três concretos apresentam valores de absorção muito próximos;
- b) O concreto M-2 evidencia a melhor resistência à compressão, em relação aos outros dois concretos;
- c) Os concretos *in natura* e M-2 também apresentam valores muito próximos para os módulos de finura e para as áreas específicas, porém o concreto M-2 é mais resistente e um pouco mais poroso;
- d) Para o concreto *in natura*, sua fraca resistência à compressão, em relação aos concretos desta análise, indica ser devido à sua porosidade; e
- e) O concreto M-3 apresentou o menor módulo de finura, a maior área específica, porém a menor porosidade com resistência à compressão um pouco abaixo de M-2.

O concreto M-3 é composto por agregados com uma distribuição

granulométrica, segundo o modelo de Füller. Apesar de conter os maiores teores de finos na composição granulométrica, apresentou a melhor característica de desempenho de resistência mecânica, pois a sua massa unitária foi a maior dos demais agregados.

TABELA 4.4 –RESUMO DAS PROPRIEDADES DE ABSORÇÃO, POROSIDADE, MÓDULO DE FINURA , ÁREA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS , *IN NATURA*, M-3 E M-4.

CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS						
Misturas		Módulo de finura	Área específica (cm ² /g)	Absorção (%)	Porosidade (%)	FC ₂₈ (MPa)
<i>in natura</i>	Pobre	5,510	34,39	5,8	15,7	27,0
	Piloto	5,510	34,39	4,6	13	28,1
	Rico	5,510	34,39	5,1	9,7	32,7
M-2	Pobre	5,264	36,34	5,6	18	31,1
	Piloto	5,236	35,87	5,5	15,6	36,0
	Rico	5,492	31,97	5,3	12,6	40,1
M-3	Pobre	4,740	61,67	5,5	14	29,1
	Piloto	4,740	61,67	5,2	13,6	31,9
	Rico	4,740	61,67	5,1	13	38,2

FIGURA 4.11 – COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS EM RELAÇÃO À ABSORÇÃO DE ÁGUA.

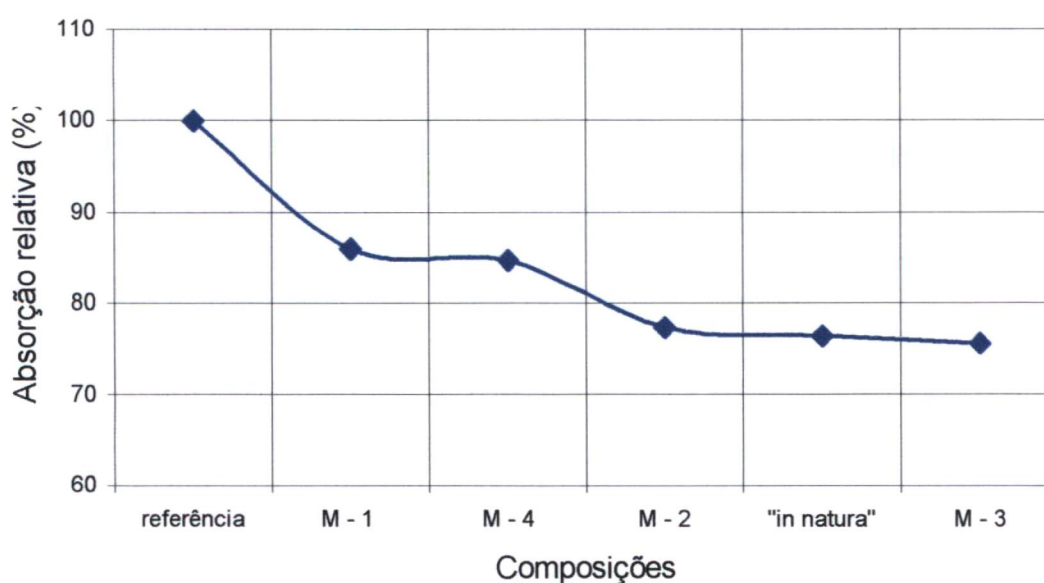
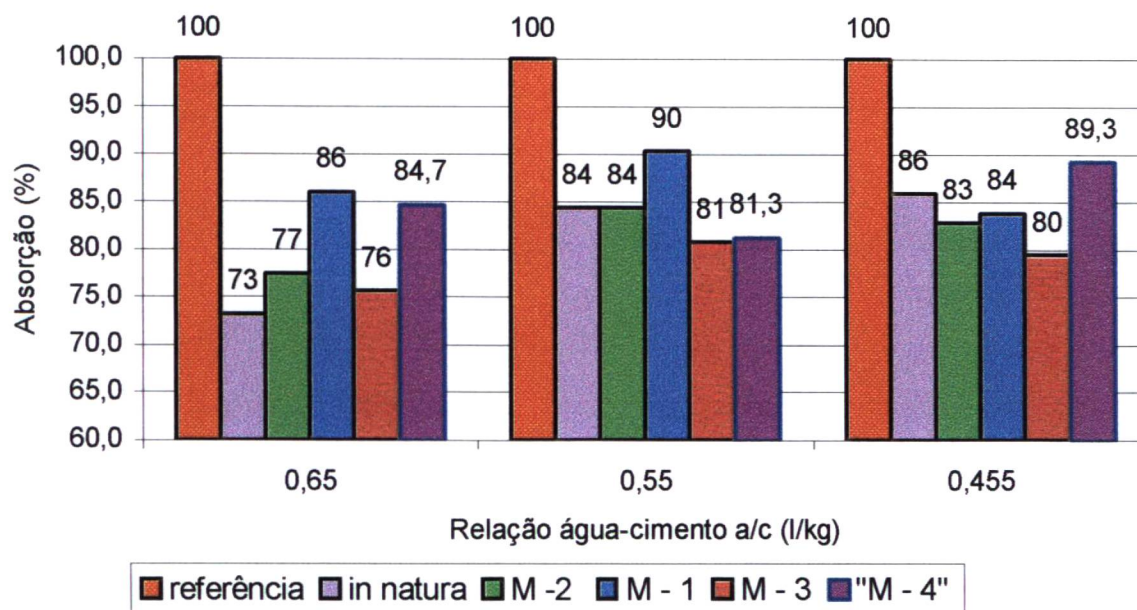


FIGURA 4.12 – ABSORÇÃO RELATIVA DOS CONCRETOS.



Utilizando os valores obtidos dos ensaios realizados com os agregados, da tabela 4.2, página 83 e empregada a relação:

$$v = 1 - \left(\frac{MU}{\gamma} \right)$$

onde: v = índice de vazios,

MU = massa unitária do agregado em (g/cm^3), e

γ = massa específica do agregado em (g/cm^3),

determina-se o índice de vazios para cada agregado utilizado na pesquisa, donde se verifica, conforme a tabela 4.5, página 100, que a composição do concreto M-3 apresenta o menor índice de vazios. Como, nesta análise, a massa unitária apresenta um comportamento inversamente proporcional ao índice de vazios, fica evidente a influência da distribuição de tamanhos dos grãos dos agregados.

Para o concreto M-3, que tem o menor índice de vazios do agregado, existem menos vazios a serem preenchidos pela pasta de cimento. Como o agregado utilizado neste concreto (M-3) apresenta uma distribuição granulométrica

com a característica da maior área específica do que os demais agregados, a mistura requer uma quantidade de pasta de cimento para fornecer a trabalhabilidade necessária. A determinação da área específica foi feita analiticamente e os resultados estão apresentados na tabela 4.3, página 84.

Entretanto, o concreto M-3 apresenta indícios de uma mistura com o maior grau de empacotamento de partículas, caracterizando um concreto denso e durável.

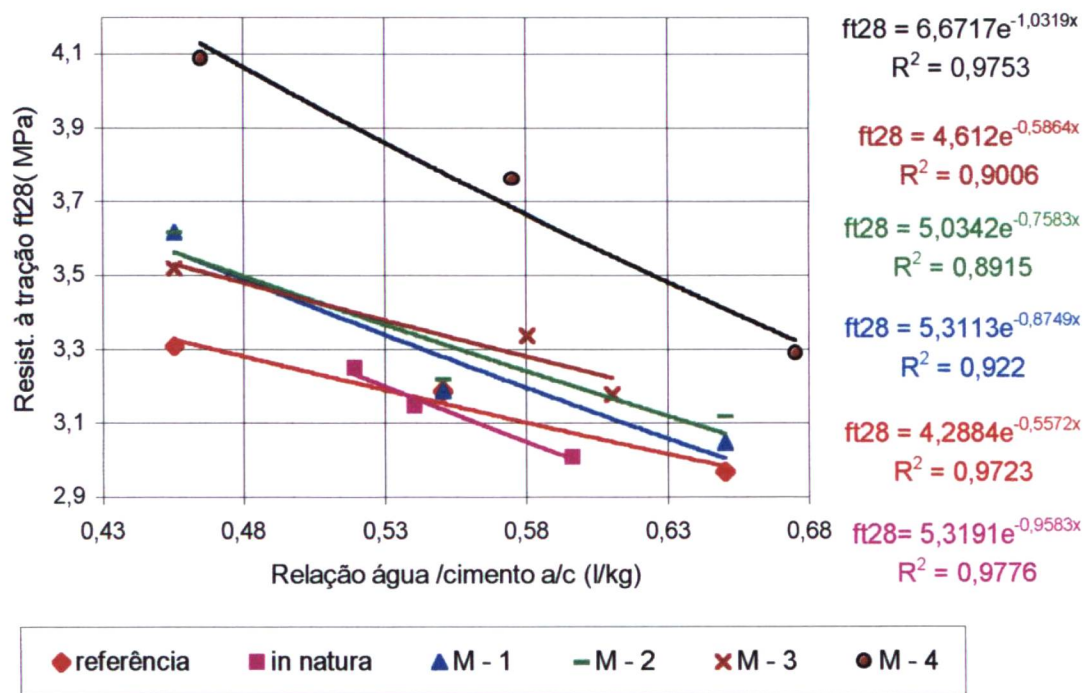
TABELA 4.5 – VALORES DE MASSA UNITÁRIA, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS DOS AGREGADOS.

VALORES DOS ÍNDICES FÍSICOS DOS AGREGADOS							
materiais	areia natural	brita diabásica	brita riolito	areia riolito	q=0,37	q=0,507	riolito "in natura"
massa específica (g/cm ³)	2,64	2,73	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64
massa unitária (g/cm ³)	1,44	1,51	1,61	1,58	1,71	1,69	1,69
índice de vazios	0,455	0,446	0,390	0,402	0,352	0,360	0,360

4.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados dos ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral se encontram na tabela 4.3, página 84. Observa-se que os valores são proporcionais à resistência à compressão axial, o que acontece com frequência. Verifica-se também que os concretos feitos com composição granulométrica controlada, no caso das misturas M-3 e M-4, apresentaram melhores índices de resistência. A figura 4.13, a seguir, ilustra o comportamento de todas as composições dos concretos estudados.

FIGURA 4.13 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS.



5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Parece que os avanços tecnológicos se direcionam mais no sentido de gerar e aperfeiçoar produtos para o homem, sem contudo preocupar-se muito com o ecossistema.

Contudo, seria mais interessante se o homem utilizasse essa mesma tecnologia para criar produtos que, se não dispensassem inteiramente o extrativismo valendo-se de matéria-prima que sacrifica o ecossistema, ao menos fizesse uso de quantidades menores, e aproveitasse o máximo possível dos resíduos.

No caso dos insumos do concreto, o cimento já recebe em sua produção resíduos industriais como a escória de alto forno das siderúrgicas. As adições, como a micro-sílica e o metacaulim, têm favorecido a obtenção de elevadas resistências em concretos.

Os agregados têm sido substituídos, também, quando compatíveis por resíduos das indústrias de vários setores de produção.

5.2 CONCLUSÕES

Constatou-se a viabilidade técnica e econômica da produção de concretos utilizando agregados miúdos britados em substituição às areias naturais.

Agregados britados por impacto, com grãos arredondados e compostos granulometricamente segundo o modelo de Füller, apresentam baixos índices de vazios.

Concretos produzidos com agregados graúdos com grãos de forma arredondada (riolito), nas mesmas condições da relação a/c, dimensão máxima característica e composição granulométrica, apresentam níveis de resistência à

compressão superiores aos de concretos produzidos com agregados graúdo de forma lamelar.

A utilização do material agregado britado riolito, no estado *in natura* em concreto de cimento portland, resulta em valores de resistência mecânica muito próximo do concreto de referência.

A resistência à compressão e à tração de concretos compostos por agregados britados de forma arredondada com granulometria contínua, baseada no modelo de Füller, foi melhorada. Isto pode ser explicado porque as composições granulométricas estudadas apresentam o melhor grau de empacotamento verificado pela maior massa unitária e baixos índices de vazios.

5.3 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa desenvolveu estudos sobre a importância do fato de que as características físicas e geométricas dos agregados alteram o comportamento e desempenho dos concretos de cimento portland. Neste estudo verificou-se que o grau de arredondamento e a distribuição granulométrica total dos agregados influem em níveis elevados no desempenho quanto à resistência mecânica dos concretos. Entretanto, há muitos pontos que poderão ser estudados em trabalhos futuros. Em virtude disso, são, sugeridas algumas linhas de pesquisas:

- Verificar as melhorias nas propriedades físicas e mecânicas do concreto com agregados britados por impacto e otimizados granulometricamente, quando se adicionam diferentes teores de produtos cimentantes como o metacaulim e a microsílica, e dos diversos aditivos que alteram o consumo de água.

- Avaliar os custos diretos e indiretos envolvidos na produção de agregados britados por impacto compostos granulometricamente.

- Verificar a influência dos agregados britados por impacto no módulo de elasticidade dos concretos comuns e de alta resistência, comparando a concretos

com areia natural e pedra britada por outros métodos de cominuição de grãos.

- Estudar da micro-estrutura de concreto com otimização granulométrica dos agregados, verificando diferenças encontradas na zona de transição pasta/agregado, em relação a concretos com agregados miúdos naturais e pedra britada não otimizados granulometricamente.

- Verificar a impermeabilidade do concreto produzido com agregados britados otimizados granulometricamente com grãos arredondados.

Parece que com a realização deste trabalho, o tema abre novos horizontes a serem investigados. Apontando para estudos de racionalizar e otimizar os materiais extraídos da natureza, de forma que possam produzir materiais de construção que causem menor agressão à natureza e sejam úteis à humanidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN, Cimento Portland e outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica, **NM 23, Rio de Janeiro, 2000.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregados – Amostragem, **NBR NM 26, Rio de Janeiro, 2001.**

_____, Agregados – Redução de amostras de campo para ensaios de laboratório, **NBR NM 27 Rio de Janeiro, 2001.**

_____, Agregado miúdo - Determinação da absorção de água, **NBR NM 30, Rio de Janeiro, 2001.**

_____, – Concreto- determinação de consistência pelo abatimento do tronco de cone, **NM 67, Rio de Janeiro, 1996.**

_____, – Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaio de compressão, **NM 77, RIO DE JANEIRO 1996.**

_____, Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas, **NBR NM 49, Rio de Janeiro, 2001.**

_____, Agregado – Determinação da composição Granulométrica, **NM 248, Rio de Janeiro, 2001.**

_____, Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico, **NBR 5734, Rio de Janeiro, 1980.**

_____, Modelagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto, **NBR 5738, Rio de Janeiro, 1994.**

_____, Concreto - ensaio de compressão da corpos de prova cilíndricos, **NBR 5739, Rio de Janeiro, 1994.**

_____, Determinação do inchamento do agregado miúdo, **NBR 6467, Rio de Janeiro, 1987.**

_____, Agregado para concreto **NBR 7211, Rio de Janeiro, 1983.**

_____, Agregados – Determinação do teor de argila e materiais friáveis, **NBR 7218, Rio de Janeiro, 1987.**

_____, Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos, **NBR 7219, Rio de Janeiro 1987.**

_____, argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, **NBR 7222, Rio de Janeiro, 1994.**

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro, **NBR 7809, Rio de Janeiro, 1983.**

_____, Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, **NBR 9776, Rio de Janeiro, 1987.**

_____, Argamassa e concretos endurecidos- determinação da absorção de água por imersão índice de vazios e de massa específica. **NBR 9778, Rio de Janeiro, 1987.**

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

_____, Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo, **NBR 9937, Rio de Janeiro, 1987.**

_____, Preparação de concreto em laboratório, **NBR 12821, RIO DE JANEIRO, 1993.**

_____, Controle tecnológico de materiais componentes do concreto – procedimento, **NBR 12654, Rio de Janeiro, 1992.**

_____, Agregados- verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa, **NBR 12696 Rio de Janeiro, 1992.**

ANDRIOLO, F. R.; Construções de Concreto – Manual de práticas para controle e execução, **São Paulo, Editora Pini, 1984.**

ALMEIDA, IVam R.; Influência dos agregados na qualidade dos concretos de alto desempenho, *revista Ibracon, ano IV, n. 09, 1994.*

AMPARANO, F. E.; YUNPING, X.; YOUNG-SOOK R.; Experimental study on the effect of aggregate content on fracture behavior of concrete. **Engineering Fracture Mechanics. v. 11, n. 67, p. 65-84, september, 2000.**

BONIN, L.C.; A abordagem sistêmica da produção de edificações, **Porto Aiegre CPGEC/UFRGS, 1987, 107p (Dissert. Mestrado).**

BUCHER, Hans R. E.; Agregados para Concreto, **Anais do I Simpósio Nacional de Agregados, EP USP, 1986.**

CAMPITELLI, V. C.; Porosidade do Concreto, **Boletim Técnico São Paulo – BT 09/87 EP ,USP, 1987.**

CAMPITELLI, V. C.; Alterações Controladas dos Concretos Durante o Andamento da Obra. **ENTAC, V, São Paulo, anais, EPUSP, 1993.**

CAMPITELLI, V. C.; Ajuste do Traço Piloto de concretos em laboratório, notas de aulas, **Apostila Tecnologia do Concreto – Aspectos Práticos, Ponta Grossa, UEPG, 2003.**

CARNEIRO, Arnaldo M. P.; CINCOTTO, Maria A.; JOHN, Vanderley M.; A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassas. **AMBIENTE CONSTRUÍDO – Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, nº. 2. p. 37 – 44, 1997. ISSN 1415-8876.**

CARNEIRO, Arnaldo M. P.; BARATA, M. S.; LIMA, Jefferson M. QUARESMA; Gabdulo L.; Otimização de Misturas Binárias de Agregados para Produção de Concreto, **44^o Congresso Brasileiro do Concreto, 2002. Anais, IBRACON 2002**

COUTINHO, A. S.; Fabrico e Propriedades do Betão, vol. 1, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1971.

D'AGOSTINHO, Lis Zanchetta; SOARES, Lindlofo; Preparo de argamassas com emprego de finos de pedreira, **IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, São Paulo, 2001.**

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRRASAR, E.F.; High-strength concrete with different fine aggregate, **Cement and Concrete Reserarch, May, 2002.**

FRANQUIN, Jean; Utilizacion de los aridos en el hormigon, **Editores Técnicos Asociados S. A. Barcelona, 1967.**

FUNK, J. E.; DINGER, D. R.; Particle. Part IV; computer modelling of particle packing phenomena. **Inteceram, v. 42, n.3, 1993.**

FURNAS, C. C.; Grading Aggregates, I- Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 23, n. 9; September, 1931. P. 1052-1058.**

GAMINO, André Luís; Barbosa, Mônica Pinto; Salles, Flávio Moreira; Consumo de cimento e permeabilidade do concreto: Análise Comparativa do Método INT e Vitervo, **43^o Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu, 2001.**

HELENE, Paulo R. L.; TERZIAN Paulo; Manual de Dosagem e Controle do Concreto **Editora PINI, Brasília, 1992.**

JOHN, Vanderley M.; Reciclagem de Resíduos na Construção Civil Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. **São Paulo, EP USP, 2000 Tese de Livre Docência.**

JANOO, VINCENT C.; Quantification of Shape, Angularity, and Surface Texture of Base Course Materials Special Report 98-1, **Cold Regions Research & Engineering Laboratory , US Army Corps of Engineers®, 1998.**

KERBER, J. A. ; ROMAN, H. R.; O Encontro dos concreto: Concretos de alta resistência x concreto de baixa resistência materiais diferentes. **Revista IBRACON ano V n. 9 agosto/ setembro, 1994.**

KWAN, A. K. H.; MORA, C. F.; Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles, **Magazine of Concrete Research , April, 2001.**

DE LARRARD, François; LECOMTE André; MECHLING, Jean-Michel; Compressive strength of hidraulic concretes with a non-optimized granular matrix, **Estudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussés, 2001.**

METHA, Provindar K.; MONTEIRO, P. J. M.; Concreto: estrutura, propriedades e materiais, São Paulo, Ed. Pini, 1994.

MINDESS, S., Young; J. FRANCIS; Concrete. New Jersey, Prentice Hall, 1981.

MINERAIS DO PARANÁ – MINEROPAR, Curitiba, maio 2003. Disponível em: <http://www.celepar.7.pr.gov.br/mineropar/index.htm>.

NEVILLE, A. M.; Propriedades do Concreto Tradução Salvador Giammusso, São Paulo, Editora PINI, 1997.

NUGENT, F. R.; Ensaio com areia artificial – como melhorar seu concreto, Colóquio sobre Agregados para Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 1979.

OLIVEIRA, Ivone R. ; PANDOLFELLI, Victor C. ; PILEGGI, Rafael R. ; Dispersão e Empacotamento de Partículas – Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico, Fazendo Arte Editorial, São Paulo, 2000.

O'REILLY DÍAZ, V. – Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho, São Paulo, PINI, 1998.

PALBOL, L.; GOLTERMANN, P.; JOHANSEN, V.; Optimización de los agregados para concreto, revis .Construcción y Tecnología, 1994.

_____ ; Packing of Aggregates: Na Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix, **ACI Materials Journal** september-october, 1997.

PAULON, V. A.; Execução de Concretos Duráveis, São Paulo, Estudo Técnico – 84 ABCP, 1986

PETRUCCI, Eládio G.; Concreto de Cimento Portland, Porto Alegre, Editora Globo, 1973.

PICOLLI, G. M.; RODRIGUES, G. L. A.; ALMEIDA, I. R.; CRUZ, O. M.; SADER, R. R.; Influência da dosagem de materiais cimentícios na resistência à compressão do concreto de alto desempenho. 39^a Reunião Anual do IBRACON 1999.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, Principles of quality concrete, Chicago, John Wiley & Sons, inc., 1980.

PRENTICE, John E.; Geology of Construction Materials, London, Ed. Chapman and hall, 1990.

ROLLINGS, M. P., ROLLINGS Jr, R. S.; Geotechnical Materials in Construction, New York, McGraw-Hill, ISBN 0-07-053665-1, 1996.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO – SNIC. Relatório mensal, maio/2003, <http://www.sinic.org.br/numerospag/prod-reg-2001.html>.

SOARES L. ; FUJIMURA, F. ; BLASQUES JUNIOR, M. ; RACHEL, R. M. & BRAGA, J. M. S.; Areias naturais : material de construção cada vez mais escasso na Região Metropolitana da grande São Paulo. In Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, anais ABM, 1997.

SOBRAL, S. H.; Reologia e trabalhabilidade dos concretos, São Paulo, ABCP, 1990.

_____ ; Propriedades do Concreto Fresco , São Paulo, ABCP, 1984.

_____ ; Resistência Mecânica e deformações do concreto, **São Paulo, ABCP, 1983.**

SOUZA, Roberto; Avaliação de desempenho aplicada a novos componentes e sistemas construtivos para habitação, **São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas , 1988.**

P-C. AITCIN, S. L. SARKAR, AND P. LAPLANTE; Characteristics of a Very High Strength Concrete. *Concrete International: Design and Construction*, Jan, Vol.12, No. 1, pp. 40-44, 2000.

LEMING, M. L. ; Comparison of Mechanical Properties of High- Strength Concrete Made with Different Raw Materials. *Transportation Research Record*, No. 1284, pp. 23-30, 1990.

TASONG, W. A.; LYNSDALE, C. J.; CRIPPS, J.C.; Aggregate-cement paste interface, II: Influence of aggregate physical properties, *Cement and Concrete Research*, vol.28, n. 10 p. 1453 -1465, 1998.

TERRA, L. E. Moraes; Finos de pedra para confecção de concreto estrutural – práticas recomendadas; III **Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Práticas Recomendadas, 2000.**

WILSON, J.D.; L.D. KLOTZ; AND C. NAGARAJ; Auto-mated measurement of aggregate indices of shape. *Federal Highway Administration Report FHWA-RD-95-116* 1995.

WRIGHT, P.J.F; A method of measuring the surface texture of aggregate, *Magazine of Concrete Magazine of Concrete Research*, 7(21): 151–160,1955.