

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

***Utilização do pó de pedra basáltica em  
substituição à areia natural do concreto***

**Eng<sup>o</sup> Rômulo Tadeu Menossi**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP,  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: **Prof. Dr. Jefferson Sidney Camacho**

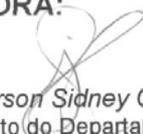
ILHA SOLTEIRA – SP  
Março 2004

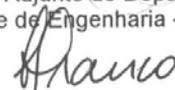
# **Utilização do Pó de Pedra Basáltica em Substituição a Areia Natural do Concreto**

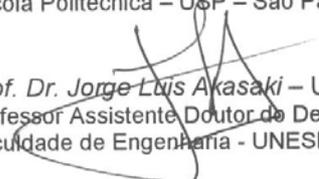
**Rômulo Tadeu Menossi**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DO  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

## **COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
*Prof. Dr. Jefferson Sidney Camacho* – UNESP/Ilha Solteira  
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira

  
*Prof. Dr. Luiz Sergio Franco* – USP/São Paulo  
Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia de Construção Civil  
Escola Politécnica – USP – São Paulo/SP

  
*Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki* – UNESP/Ilha Solteira  
Professor Assistente Doutor do Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira

Ilha Solteira/SP, março de 2004.

*Dedico este trabalho aos meus pais João Menossi e Edileuza Borges Menossi.*

# Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida.

Ao meu orientador, Prof.Dr. Jefferson Sidney Camacho, pela zelosa orientação e pela amizade que muito me honra.

Ao Eng. Flávio Moreira Salles, por suas valiosas sugestões para a execução deste trabalho.

À Mineração Noroeste Paulista Ltda., por investir em pesquisas tecnológicas, financiando uma bolsa de mestrado pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP e pela doação do pó de pedra utilizado.

À CESP, por permitir a realização de grande parte dos ensaios em seus laboratórios.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela realização dos ensaios de perda de massa ao fogo e difração de raios-x.

Ao Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges, pelas sugestões apresentadas com relação ao texto final desta dissertação.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil da FEIS-UNESP e do Laboratório de Engenharia Civil da CESP, pela dedicação e pela cuidadosa atenção dadas aos ensaios realizados.

A todos que participaram direta ou indiretamente da realização deste trabalho.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1    Generalidades .....	1
1.2    Objetivo .....	3
1.3    Justificativa.....	3
<b>2. PÓ DE PEDRA .....</b>	<b>6</b>
2.1    Generalidades .....	6
2.2    Propriedades e classificação de agregados miúdos para o concreto.....	9
2.2.1    Granulometria.....	10
2.2.2    Massa Específica .....	13
2.2.3    Massa Específica Aparente.....	13
2.2.4    Massa Especifica Absoluta.....	13
2.2.5    Materiais Nocivos ao Concreto .....	13
2.2.6    Durabilidade .....	14
2.2.7    Pozolanicidade.....	16
2.2.8    Reatividade Potencial Álcali-Agregado .....	18
2.2.9    Composição Química por Difração de Raios X .....	19
<b>3. MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO .....</b>	<b>22</b>
3.1    Introdução.....	22
3.2    Método do CIENTEC.....	23
3.3    Método do INT .....	24

3.4	Método da ABCP .....	25
3.5	Método do IPT/EPUSP .....	26
3.5.1	Lei de Abrams .....	27
3.5.2	Lei de Lyse .....	28
3.5.3	Lei de Molinari .....	28
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
4.1	Introdução .....	29
4.2	Primeiro Programa de Ensaio – Caracterizações .....	31
4.2.1	Areia .....	31
4.2.2	Pó de pedra .....	31
4.2.3	Brita .....	33
4.3	Segundo Programa de Ensaio – Verificação do Abatimento .....	34
4.3.1	Definição dos Traços de Concreto a serem Estudados .....	34
4.3.2	Confecção dos Traços e Verificação do Abatimento .....	34
4.3.3	Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova .....	36
4.4	Terceiro Programa de Ensaio – Verificação da relação a/c .....	39
4.4.1	Ensaio de Perda de Abatimento .....	40
4.4.2	Determinação do Consumo de Cimento .....	41
4.5	Quarto Programa de Ensaio – Dosagem e Incorporação de Aditivos .....	43
4.5.1	Método de Dosagem Adotado .....	43
4.5.2	Aditivo .....	48
4.6	Quinto Programa de Ensaio - Ensaio de Durabilidade .....	49
4.6.1	Índice de atividade pozzolânica com cimento .....	49
4.6.2	Índice de atividade pozzolânica com cal .....	51
4.6.3	Retração por secagem .....	52
4.6.4	Reatividade com álcalis do cimento .....	54
4.6.5	Reatividade potencial álcali-agregado .....	55
<b>5.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
5.1	Caracterização dos Materiais .....	57
5.1.1	Caracterização do agregado miúdo .....	57
5.1.2	Caracterização granulométrica do agregado graúdo .....	62
5.2	Resultados de resistência à compressão e abatimento com relação a/c constante .....	63
5.3	Resultados das relações a/c e resistência à compressão com abatimento fixo .....	67
5.4	Resultado dos concretos dosados com teor ideal de argamassa .....	73
5.4.1	Concreto dosado com pó de pedra .....	73
5.4.2	Concreto dosado com areia natural .....	76
5.4.3	Concreto dosado com uso de aditivo plastificante e pó de pedra .....	80

5.5	Resultado dos ensaios de durabilidade .....	86
5.5.1	Resultado do ensaio de pozolanicidade da fração fina do pó de pedra .....	86
5.5.2	Resultado do ensaio de reatividade potencial álcali-agregado .....	87
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>90</b>
6.1	Conclusões.....	90
6.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	92
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Pó de pedra: enormes volumes estocados no pátio da pedreira.....	4
Figura 2. 1 – Limites impostos pela NBR 7211 para zona 3.....	12
Figura 2. 2 – Representação da Geometria $\theta - 2\theta$ .....	20
Figura 2. 3 – Representação geométrica da lei de Bragg.....	21
Figura 4. 1 - Pastilha compactada para amostragem no raio-x.....	32
Figura 4. 2 - Detalhe dos materiais sendo depositados na betoneira.....	36
Figura 4. 3 - Corpos-de-prova com a película de plástico.....	37
Figura 4. 4 - Detalhe da sala de capeamento.....	38
Figura 4. 5 - Corpos-de-prova capeados com enxofre.....	38
Figura 4. 6 - Medição do abatimento.....	41
Figura 4. 7 – Retirada do material usado para imprimir betoneira.....	45
Figura 4. 8 – Pesagem dos materiais utilizando balança digital.....	45
Figura 4. 9 – Porções de areia e cimento a serem adicionadas na betoneira.....	46
Figura 4. 10 – Argamassa sendo misturada com auxílio de argamassadeira elétrica.....	50
Figura 4. 11 – Argamassa sendo preparada para medição do índice de consistência.....	50
Figura 4. 12 – Medição do índice de consistência.....	51
Figura 4. 13 – Moldagem dos corpos-de-prova.....	51
Figura 4. 14 – Fôrma e barra de argamassa.....	53
Figura 4. 15 – Moldagem das barras de argamassa.....	53
Figura 4. 16 – Equipamento para medição das barras de argamassa.....	54
Figura 4. 17 – Recipiente de estocagem das barras.....	56
Figura 5. 1 – Distribuição Granulométrica da Areia Natural.....	58
Figura 5. 2 – Distribuição Granulométrica do Pó de Pedra.....	59
Figura 5. 3 – Resistência à Compressão aos 7, 28 e 91 dias.....	64
Figura 5. 4 – Abatimentos Obtidos e Seus Respetivos Traço.....	64
Figura 5. 5 – Comparação entre Resistências aos 7, 28 e 91 dias.....	66
Figura 5. 6 – Comparação entre as Diferente Relações a/c.....	67
Figura 5. 7 – Perda de Trabalhabilidade com Tempo.....	69
Figura 5. 8 – Resistência a Compressão aos 07, 28 e 91 dias.....	71
Figura 5. 9 - Comparação entre as Resistências aos 7 e 28 dias.....	72
Figura 5. 10 – Valores das resistências aos 7, 28 e 91 dias para o concreto com pó de pedra.....	74

---

Figura 5. 11 – Relações a/c obtidas no concreto dosado com pó de pedra .....	75
Figura 5. 12 – Diagrama de dosagem para o concreto amassado com pó de pedra .....	76
Figura 5. 13 – Valores agrupados das resistências aos 7, 28 e 91 dias para o concreto com areia natural .....	77
Figura 5. 14 – Relações a/c obtidas no concreto com areia natural.....	78
Figura 5. 15 – Diagrama de dosagem para o concreto amassado com areia natural.....	80
Figura 5. 16 – Valores agrupados das resistências aos 7, 28 e 91 dias para o concreto aditivado com pó de pedra.....	81
Figura 5. 17 – Relações a/c obtidas no concreto com pó de pedra e aditivo.....	82
Figura 5. 18 – Diagrama de dosagem para o concreto amassado com aditivo plastificante e pó de pedra .....	83
Figura 5. 19 – Reatividade potencial pelo método acelerado NBRI (Sul-Africano).....	88

## Lista de tabelas

Tabela 2. 1 - Propriedades do Concreto Influenciadas pelas Características do Agregado .....	7
Tabela 2. 2 – Agregados miúdos (NBR 7211) .....	11
Tabela 2. 3– Limites do módulo de finura segundo NBR 7211 .....	11
Tabela 2. 4 - Limites da NBR 7211 para substâncias nocivas para agregados .....	14
Tabela 2. 5 – Exigências químicas .....	17
Tabela 2. 6 – Exigências físicas .....	17
Tabela 2. 7 – Requisitos facultativos.....	18
Tabela 4. 1 - Mostra a relação dos traços confeccionados. ....	35
Tabela 4. 2 - Classificação das consistências do concreto .....	39
Tabela 4. 3 - Abatimentos recomendados .....	40
Tabela 4. 4 - Relação dos traços confeccionados com abatimento $6 \pm 0,5$ cm .....	40
Tabela 4. 5 – Quantidade do vidro pyrex utilizada.....	54
Tabela 5. 1 – Composição Granulométrica da Areia Natural.....	57
Tabela 5. 2 – Composição Granulométrica do Pó de pedra .....	59
Tabela 5. 3 – Resultado das caracterizações realizadas na areia e no pó de pedra.....	60
Tabela 5. 4 – Composição Química do Pó de Pedra por Difração de Raios-X.....	61
Tabela 5. 5 – Composição Granulométrica do Agregado Graúdo .....	62
Tabela 5. 6 – Características Físicas do Agregado Graúdo.....	63
Tabela 5. 7 – Valores de Resistência a Compressão aos 07, 28 e 91 dias.....	63
Tabela 5. 8 – Crescimento da Resistência em Relação ao Traço 1 .....	65
Tabela 5. 9 – Comparação entre as resistências obtidas.....	67
Tabela 5. 10 – Perda de Abatimento com o Tempo .....	68
Tabela 5. 11 – Valores de Resistência à Compressão aos 07, 28 .....	70
Tabela 5. 12 – Crescimento da Resistência em Relação ao Traço 1* .....	71
Tabela 5. 13 – Consumo relativo de cimento por $m^3$ .....	72
Tabela 5. 14 – Resistência à compressão axial do concreto dosado com pó de pedra.....	73
Tabela 5. 15 – Porcentagens de resistência à compressão alcançadas aos 7 e 91 dias, em relação aos 28 dias.....	74
Tabela 5. 16 – Consumo de cimento, massa específica e módulo de deformação.....	75
Tabela 5. 17 – Resistência à compressão axial do concreto dosado com areia natural.....	77

---

Tabela 5. 18 - Porcentagens de resistência à compressão alcançadas aos 7 e 91 dias, em relação aos 28 dias.....	78
Tabela 5. 19 – Resultado das resistência e relação a/c do concreto sem finos.....	79
Tabela 5. 20 – Consumo de cimento, massa específica e módulo de deformação do.....	79
Tabela 5. 21 – Resistência à compressão axial do concreto com pó de pedra e aditivo .....	81
Tabela 5. 22 – Consumo de cimento e massa específica do concreto com aditivo e com pó de pedra .....	83
Tabela 5. 23 – Comparativo entre os concretos com resistência fixada em 20MPa .....	84
Tabela 5. 24 – Resultado da resistência e relação a/c do concreto redosado .....	85
Tabela 5. 25 – Resultados dos ensaios de pozolanicidade e exigências da NBR 12653.....	86

## Resumo

MENOSSE, RÔMULO T. (2004). *Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto*. Ilha Solteira, 97p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

O presente trabalho faz um estudo da substituição da areia natural existente no concreto por um material alternativo: o pó de pedra.

O pó de pedra é o rejeito da exploração de pedreiras e seu diâmetro máximo é inferior a 4,8 mm. Em função de sua curva granulométrica, pode-se caracterizá-lo como sendo uma areia média. Atualmente, o pó de pedra não possui valor comercial de mercado, sendo considerado um “material marginal”, que não possui uma destinação definida, permanecendo estocado nos pátios das pedreiras, formando enormes pilhas que provocam vários impactos ambientais.

A primeira etapa do trabalho consistiu em caracterizar os materiais que compuseram o concreto estudado. Após essa fase, foram confeccionados corpos-de-prova de concreto, utilizando-se cinco traços diferentes, de modo que a areia natural foi gradualmente substituída pelo pó de pedra, nas proporções de 25%, 50%, 75%, e 100%. Para cada traço, foram quantificados o seu abatimento e a resistência à compressão axial.

Para caracterizar o pó de pedra, foram realizados os seguintes ensaios: granulometria, materiais pulverulentos, perda ao fogo, difração por raios X, massa específica, reatividade potencial álcali-agregado e pozolanicidade da fração fina passante na peneira #200.

Como método de dosagem, foi utilizado o método do IPT/EPUSP. Por meio deste método, determinou-se um teor ideal de argamassa, que serviu de base para a elaboração de traços ricos (1:3,2) e de traços mais pobres (1:8,5), que, por sua vez, auxiliaram na construção dos diagramas de dosagem para cada uma das diferentes faixas de resistência do concreto.

Considera-se que o objetivo principal desta pesquisa foi plenamente alcançado, uma vez que foi comprovada a viabilidade da completa substituição da areia pelo pó de pedra, em concretos com finalidade estrutural.

## Abstract

MENOSSE, RÔMULO T. (2004). *Use of the basaltic stone powder in substitution to the natural sand of the concrete*. Ilha Solteira, 97p. Dissertation (Mastering). Ilha Solteira Engineering College, São Paulo State University.

The present work makes a study of the substitution of the existent natural sand in the concrete for an alternative material: the stone powder.

The stone powder is a reject of the exploration of quarries and its maximum diameter is less than 4,8 mm. In function of the granulometric curve, it can be characterized as it being a medium sand. Nowadays, the stone powder doesn't possess commercial value of market, being considered a "marginal material", that it doesn't possess a defined destination, and that it stays stocked at the patios of the quarries, forming enormous piles that can cause several environmental impacts.

The first stage of the work consisted of characterizing the materials that compose the concrete to be studied. After that phase, five different mixtures were used, so that the natural sand was substituted gradually by the stone powder, in the proportions of 25%, 50%, 75%, and 100%. For each mixture, the slump was measured and so the concrete axial compression resistance, by 100 mm x 200 mm cylinders.

To characterize the stone powder, the following tests were accomplished: granulometric curve, powdery materials, loss to the fire, diffraction for X-rays, specific mass, reactivity potential alkali-attaché and pozolanicity of the fraction that pass in the sieve #200.

It was used, as dosage method, the IPT/EPUSP method. Through this method, it can be determined an ideal tenor of mortar, that it served as base for the elaboration of rich mixtures (1:3,2) and of poorer mixtures (1:8,5), that aided in the construction of the dosage diagrams for each the different levels of resistance of the concrete.

The main objective of this research was fully reached, once it was proven the viability of the complete substitution of the sand for the stone powder, in concretes with structural purpose.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Generalidades

Em todos os ramos da atividade humana, qualidade é a palavra-chave. Na construção civil, esta constatação não poderia fugir à regra. O primeiro beneficiado pela qualidade é, sem dúvida, o consumidor. No entanto, o consumidor não busca apenas qualidade, mas também segurança. A segurança de uma obra, na maioria dos casos, está diretamente relacionada à sua estrutura. As estruturas de concreto armado são as mais empregadas em Engenharia Civil e a vida de milhões de seres humanos depende da estabilidade dessas estruturas, seja em um estádio de futebol, em uma usina hidrelétrica ou até mesmo numa simples residência. Atualmente, é fato que grande número de estruturas de concreto armado apresenta sinais de deterioração prematuros, muito antes de esgotada a vida útil inicialmente prevista.

Sabe-se que o concreto é um material que apresenta muitas variáveis envolvidas na determinação de suas propriedades. Sua qualidade está diretamente relacionada ao nível de controle utilizado em todas as suas etapas de produção, desde a escolha das matérias-primas até a cura e sua desfôrma.

Uma das maiores preocupações que existe hoje em relação à qualidade do concreto está associada à qualidade dos agregados empregados, em especial o agregado miúdo, mais especificamente a areia natural. Com o crescente aumento da demanda de areia natural no mercado nacional e a exaustão dessas reservas, principalmente próximas às grandes metrópoles e, considerando-se ainda o incremento dos custos de transporte, limites de peso transportados por eixo e aumento das distâncias de carga, a utilização deste insumo tem impactado, de maneira crescente, os custos do concreto. O segmento concreteiro tem se mostrado bastante especializado, modernizando-se por meio da constante busca por equipamentos e sistemas automatizados, que permitam dosagens em centrais. Entretanto, apesar desta evolução, a variação na qualidade dos insumos componentes do concreto é preocupação constante das empresas do setor, mesmo daquelas que dispõem de fornecimento próprio de agregados.

Atualmente, grande quantidade dos concretos estruturais tem sido confeccionada com agregados naturais. Porém, a constante preocupação com a preservação do meio ambiente tem incentivado a busca de diversas alternativas para a substituição destes agregados naturais e também para a incorporação de certos rejeitos industriais na confecção de argamassas e concretos. Neste contexto, o aproveitamento do rejeito da britagem das rochas (*pó de pedra*) como substituição ao agregado miúdo utilizado na confecção do concreto é uma alternativa interessante.

O aproveitamento dos finos gerados pelos processos de britagem não é um assunto inovador. Conforme NUGENT (1979), esse material já era utilizado desde séculos passados em diversos países, tendo-se, como exemplos, os Estados Unidos e o Canadá. Nos dias atuais, esses finos podem ser utilizados na confecção de concretos com finalidade estrutural, na produção de blocos de concreto, de camadas de sub-base asfáltica e de camadas de concreto compactado a rolo (CCR). Destaca-se que o descarte de sua fração granulométrica (abaixo de 0,075 mm) pode ocasionar uma série de impactos ambientais.

Pela inexistência de uma norma técnica que apresente especificações gerais, os finos possuem diversas denominações nos meios técnico e comercial. Diante de seus produtores e de seus consumidores, a nomenclatura mais utilizada é ainda pó de pedra. Esta nomenclatura não está de acordo com a nomenclatura utilizada pela NBR 7225 da ABNT (1993), que define “pó de pedra” como sendo um material proveniente do britamento de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075 mm. Existem ainda outras denominações tais como “areia artificial” e “areia de brita”; no entanto, estes termos também podem gerar confusão, uma vez que, nesses casos, ora se descarta a fração fina abaixo de 0,075 mm por meio de processos de lavagem, ora rebitam-se os finos através da cominuição por impacto, utilizando-se de rebritadores autógenos (tipo Barmac), com a finalidade de arredondar suas partículas e melhorar sua distribuição granulométrica. Para que o uso do termo técnico não gere confusão, tanto para o mercado comercial quanto para fins acadêmicos, estabeleceu-se que, nesta pesquisa, esses finos serão chamados pelo seu nome de mercado, ou seja, pó de pedra.

Com o intuito de se reduzir ao máximo os impactos ambientais gerados pelos rejeitos das pedreiras, será utilizado, neste trabalho, o pó de pedra sem o descarte da sua fração inferior correspondente a 0,075mm, ou seja, este material será utilizado na forma em que se encontra no pátio da pedreira.

No presente trabalho, foram elaborados concretos com diferentes porcentagens de substituição de agregados miúdos naturais por pó de pedra, visando comparar o desempenho do concreto frente a esta substituição. Deste modo, procurou-se buscar uma otimização da utilização do pó de pedra na confecção de concretos por meio de um estudo das dosagens realizadas.

## **1.2 Objetivo**

O principal objetivo deste estudo experimental é mostrar a viabilidade de se substituir, em até 100%, a areia natural por pó de pedra na mistura do concreto.

São objetivos específicos deste trabalho:

- ensaios de caracterização em todos os materiais envolvidos;
- avaliar a resistência à compressão axial do concreto aos 7, 28 e 91 dias;
- avaliar sua consistência pelo abatimento do tronco de cone “abatimento”;
- avaliar a existência de atividade pozzolânica da porção inferior à 0,075mm;
- avaliar a reatividade do pó de pedra com álcalis do cimento;
- avaliar a perda de abatimento nos instantes iniciais dos concretos produzidos com pó de pedra;
- avaliar o módulo de deformação.

## **1.3 Justificativa**

Atualmente, o meio ambiente vem sofrendo vários danos causados pela exploração do homem. O concreto, por ser um produto consumido em grande escala e que se necessita de matéria-prima encontrada diretamente na natureza, contribui em grande parte com esses danos.

A quantidade de areia consumida anualmente na construção civil brasileira é de 320 milhões de m<sup>3</sup>. Este volume daria para construir 7100 estádios como o Maracanã. Quase todo esse material é retirado das baixadas e dos leitos dos rios. A retirada de areia de um rio agride sua calha natural, leva a um aumento da vazão de água e acelera o ritmo de erosão das margens.

A extração em baixadas provoca cavas que resultam em lagos propícios à proliferação do mosquito da dengue. Além disso, retiram a cobertura vegetal dessas áreas e deixam o solo estéril (Reportagem, 2003).

A escassez de areia natural é um fato que, hoje em dia, preocupa as indústrias do meio concretoiro, que buscam, cada vez mais, uma melhor qualidade associada à produtividade.

O pó de pedra, conforme já mencionado, é considerado um rejeito de pedreiras, que fica estocado nos pátios das mesmas, formando enormes volumes, causando, deste modo, vários danos ambientais. A figura 1 mostra o pó de pedra sendo estocado ao ar livre, no pátio de uma pedreira.



**Figura 1.1 – Pó de pedra: enormes volumes estocados no pátio da pedreira.**

As propriedades físicas e químicas dos agregados e das misturas ligantes são essenciais para a vida útil das estruturas (obras) em que são usados. São inúmeros os exemplos de colapso estrutural nos quais é possível chegar à conclusão de que as causas principais do problema foi a seleção e uso inadequados dos agregados, o que torna o pó de pedra uma boa alternativa, por possuir uma maior uniformidade de suas propriedades.

Com a utilização do pó de pedra em grande escala, podem ser mencionadas as seguintes vantagens que beneficiarão, não só as próprias pedreiras e concreteiras, como também o próprio consumidor:

- aproveitamento integral das pedreiras sem descarte de efluentes;
- obtenção de uma “areia” com características físicas e químicas constantes;
- menor consumo de cimento na preparação do concreto;
- solução de problemas ambientais;
- custo final reduzido do concreto.

## 2. PÓ DE PEDRA

### 2.1 Generalidades

Os impactos ambientais são características marcantes do mundo industrializado. A substituição da areia natural pelo pó de pedra pode ser uma solução para alguns desses impactos. Nos países mais desenvolvidos, essa substituição iniciou-se nos anos setenta, uma década após a produção em série dos primeiros equipamentos especiais usados para britagem do material fino. Assim, viabilizou-se industrialmente a idéia de se produzir pó de pedra em escala comercial (ALMEIDA e SAMPAIO, 2002).

Considerado como produto básico da indústria da construção civil, o concreto à base de cimento portland utiliza, em média, por metro cúbico, 42% de agregado graúdo (brita), 40% de areia, 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos. Pode-se observar que aproximadamente 70% do concreto é constituído por agregados. Decorre daí a importância do uso de agregados com especificações técnicas adequadas. Na Tabela 1, SBRIGHI relaciona algumas das características dos agregados às principais propriedades do concreto.

Tabela 2. 1 - Propriedades do Concreto Influenciadas pelas Características do Agregado

<b><i>Propriedades do Concreto Influenciadas pelas Características do Agregado</i></b>	
<b>Propriedades do Concreto</b>	<b>Características Relevantes do Agregado</b>
<i>Resistência Mecânica</i>	<i>Resistência mecânica Textura superficial Limpeza Forma dos grãos Dimensão máxima</i>
<i>Retração</i>	<i>Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Limpeza Dimensão máxima</i>
<i>Massa unitária</i>	<i>Massa específica Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima</i>
<i>Economia</i>	<i>Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade</i>

A NBR 7211 fornece quais são as características exigíveis para a recepção e produção de agregados miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultante da britagem de rochas. Ela define areia ou agregado miúdo como sendo areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, podendo também ser uma mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. No entanto, o pó de pedra possui material pulverulento passante na peneira #200, que é considerado uma substância deletéria para o concreto, quando em quantidades superiores às especificadas pela NBR 7211: 3% para concreto submetido a desgaste superficial e 5% para concreto protegido do desgaste superficial.

Por outro lado, estudos mostram que pós de pedras que apresentam porcentagem de material pulverulento variando de 7% a 20%, dependendo da litologia, podem ser utilizados pois colaboram na melhoria da aglomeração das partículas maiores do concreto (Reportagem, 2000).

A utilização do pó de pedra como agregado miúdo no concreto, quer por motivos económicos, quer por aspectos relacionados à durabilidade, vem sendo analisada e tem gerado grande interesse, não só pelos aspectos ambientais, mas também pelos aspectos económicos, uma vez que as pedreiras poderão comercializar um produto oriundo de rejeito que não tinha valor algum, que causava transtornos no que diz respeito à estocagem e ao meio ambiente, e que passou a ser um produto com um valor final mais acessível.

Um fator que contribui para a substituição da areia natural por pó de pedra é a disponibilidade no mercado de novos equipamentos de britagem, como o impactador de eixo vertical, tipo BARMAC, que supera a principal restrição apresentada pela areia artificial: a dificuldade de trabalhabilidade do concreto, provocada pelo formato inadequado dos grãos, que geralmente se apresentam na forma lamelar ou alongados. Esse tipo de britador proporciona a fragmentação por meio de impacto, rocha contra rocha, utiliza um rotor de alta velocidade que lança um fluxo contínuo de pedras numa câmara de britagem recoberta pelo mesmo material que é britado. A velocidade de saída das partículas do britador varia de 50 a 150 m/s. Esse britador é adequado para a produção de pó de pedra quando se trabalha com alimentação (20 a 10 mm), onde o produto final (pó de pedra) é constituído por partículas equidimensionais (ALMEIDA e SAMPAIO, 2002).

O formato que os grãos possuem tem influência direta na trabalhabilidade e, conseqüentemente, na resistência à compressão do concreto. A resistência à compressão do concreto é um parâmetro do projeto estrutural e é indispensável que ela seja comprovada, de modo a se poder avaliar a segurança estrutural. A NBR 6118:2003 estabelece o conceito de resistência característica ( $f_{ck}$ ), que incorpora técnicas de estatística ao dimensionamento e ao controle da qualidade do concreto.

Portanto, um concreto com um agregado muito lamelar vai apresentar menor trabalhabilidade, o que já não acontece com um agregado mais cúbico ou “arredondado”; este faz com que o concreto fique mais trabalhável, pois seus grãos irão ter melhor interação, e, conseqüentemente, apresentarão menor porcentagem de vazios no concreto.

A conseqüência desse fenômeno é que as pilhas de areia natural têm um ângulo de repouso da ordem de  $37^\circ$  enquanto que as pilhas de britas e de areia de britagem (pó de pedra) alcançam mais de  $45^\circ$ .

FERREIRA et al, (2002) realizaram estudos cujo objetivo foi a substituição parcial do agregado miúdo por pó de pedra, analisando as características da argamassa ou do concreto, preparados com porcentagens em sua composição variando de 5% à 30%.

Segundo BONAVETTI et al, (1994), resultados de ensaios experimentais demonstraram que a demanda de água cresce com a proporção de pó de pedra, em consequência do aumento da superfície a ser umedecida, acarretando uma redução na trabalhabilidade. Para argamassas com 5% de pó de pedra, o acréscimo de demanda de água foi insignificante, sendo este menor que 2%; no entanto, esta demanda cresceu rapidamente quando mais de 10% de pó de pedra foi adicionado. Para 20% de pó de pedra, o acréscimo de água chegou a 17%.

## **2.2 Propriedades e classificação de agregados miúdos para o concreto**

Segundo GIAMMUSSO (1985), qualquer material mineral natural ou artificial, que seja quimicamente inerte em relação ao cimento, pode ser usado como agregado para concreto. Mesmo utilizando aqueles que podem reagir, segundo o referido pesquisador, pode-se recorrer a formas de neutralizar os efeitos dessa reatividade.

Os agregados destinados ao preparo do concreto poderão ser classificados pela origem, dimensões das partículas e peso específico aparente. Classificados pela origem, os agregados podem ser naturais ou industrializados. Os naturais são aqueles que já se encontram em forma particulada na natureza: areia e cascalho. Os industrializados são aqueles que têm sua composição particulada obtida através de processos industriais; nestes casos, a matéria-prima pode ser: rocha, escória de alto-forno e argila. Classificados quanto às dimensões das partículas, podem ser miúdos ou graúdos. Os miúdos são as areias e os graúdos são os cascalhos e as britas. Classificados quanto ao peso específico aparente, os agregados podem ser leves, médios ou pesados. Os que são leves possuem densidade aparente média entre 0,30 e 1,0; os que são médios, entre 1,4 e 1,7 e os que são pesados, entre 2,9 e 3,3.

Várias são as rochas aptas a serem exploradas para a produção de agregados industrializados. Como exemplos, têm-se o granito, o basalto, o gnaiss, o calcário, o arenito, a hematita. No presente trabalho, a rocha que dá origem ao pó de pedra explorado é o basalto, sendo este uma rocha vulcânica básica, com aproximadamente 50% de sílica, de cor cinza escura.

### 2.2.1 Granulometria

A granulometria é o parâmetro físico mais analisado dos agregados, pois influencia a compactidade e a resistência aos esforços mecânicos. Nas primeiras análises sobre a granulometria ótima, pensou-se que ela estaria ligada à máxima compactidade, porém Feret (apud BASÍLIO, 1995) demonstrou que a máxima compactidade era conseguida com uma granulometria descontínua (grãos finos e grossos desprovidos dos médios) o que, segundo BASÍLIO (1995), gerou problemas de trabalhabilidade, exigindo maior energia de vibração para um adensamento adequado. Fuller (apud BASÍLIO, 1995) mostrou que a granulometria ótima corresponderia a uma granulometria contínua e Lobo Carneiro (apud BASÍLIO, 1995), por sua vez, afirmou que ela variava com a proporção cimento/agregado. BASÍLIO (1995) concluiu que a granulometria ótima será aquela que, para uma mesma consistência e a mesma relação água/cimento, gere um consumo mínimo de cimento.

Segundo BASÍLIO (1995), "... é especialmente na fração fina do agregado que se tem que atuar para se obter um concreto mais econômico e de melhor qualidade". RODRIGUES (1984) afirma que, devido à sua elevada área específica, qualquer alteração do teor de areia no concreto irá provocar alterações significativas no consumo de água e, conseqüentemente, no de cimento. Concluindo, CARNEIRO e CINCOTTO (1997) afirmam que, de uma forma geral, a heterogeneidade granulométrica da areia é altamente positiva, pois permite o preenchimento completo de vazios e a conseqüente economia de cimento.

Para se caracterizar um agregado é necessário conhecer quais as parcelas constituídas de grãos de cada diâmetro, expressas em função da massa total do agregado. A composição granulométrica, isto é, a proporção relativa expressa em forma de porcentagem (%) em que se encontram os grãos de um certo agregado, tem importante influência sobre a qualidade dos concretos, agindo na compactidade e resistência. Dentro do ensaio de granulometria além de se obter a curva granulométrica, obtém-se também o módulo de finura e o diâmetro máximo do agregado. Segundo a NBR 7217, define-se módulo de finura de um agregado como sendo a soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras de série normal, dividida por 100.

A NBR 7211, que trata de agregados para o concreto, classifica as areias em quatro faixas, denominadas muito fina, fina, média e grossa. Essas faixas de classificação se diversificam pelas diferentes porcentagens de tamanhos dos grãos.

Para o uso em concreto, a NBR 7211 estabelece que a curva granulométrica se desenvolva entre os limites inferior e superior mostrados na tabela 2.2. São esses limites que definem os fusos granulométricos.

Os módulos de finura para areia bem graduada, enquadrando-se na NBR 7211, variam entre os seguintes limites:

**Tabela 2. 2 – Agregados miúdos (NBR 7211)**

<i>PENEIRA (mm)</i>	<i>PORCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS</i>			
	<i>FAIXA 1</i>	<i>FAIXA 2</i>	<i>FAIXA 3</i>	<i>FAIXA 4</i>
	<i>(muito fina)</i>	<i>(fina)</i>	<i>(média)</i>	<i>(grossa)</i>
6,3	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8	0 a 5	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4	0 a 5	0 a 15	0 a 25	5 a 40
1,2	0 a 10	0 a 25	10 a 45	30 a 70
0,6	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3	50 a 85	60 a 88	70 a 92	80 a 95
0,15	85 <sup>(A)</sup> a 100	90 <sup>(A)</sup> a 100	90 <sup>(A)</sup> a 100	90 <sup>(A)</sup> a 100

Observação: (A) Para agregado miúdo resultante de britamento, este limite poderá ser de 80.

**Tabela 2. 3– Limites do módulo de finura segundo NBR 7211**

Muito fina	Faixa 1	1,35 a 2,25
Fina	Faixa 2	1,71 a 2,85
Média	Faixa 3	2,11 a 3,38
Grossa	Faixa 4	2,71 a 4,02
Areia de praia *	-	1,39

\* Amostra da praia de Bertioiga, SP.

Para uso geral em concretos, a faixa granulométrica de agregado miúdo mais usada é a faixa 3, que classifica o agregado miúdo como médio. O agregado deve respeitar certos limites, para que sua granulometria e seu módulo de finura estejam compatíveis.

No presente trabalho, a faixa granulométrica 3 será usada como referência, assim como suas especificações, pois o objetivo principal do trabalho é verificar a possibilidade da substituição total da areia natural média por pó de pedra. A figura 2.1 mostra os limites impostos pela NBR 7211 para agregados miúdos com granulometria média.

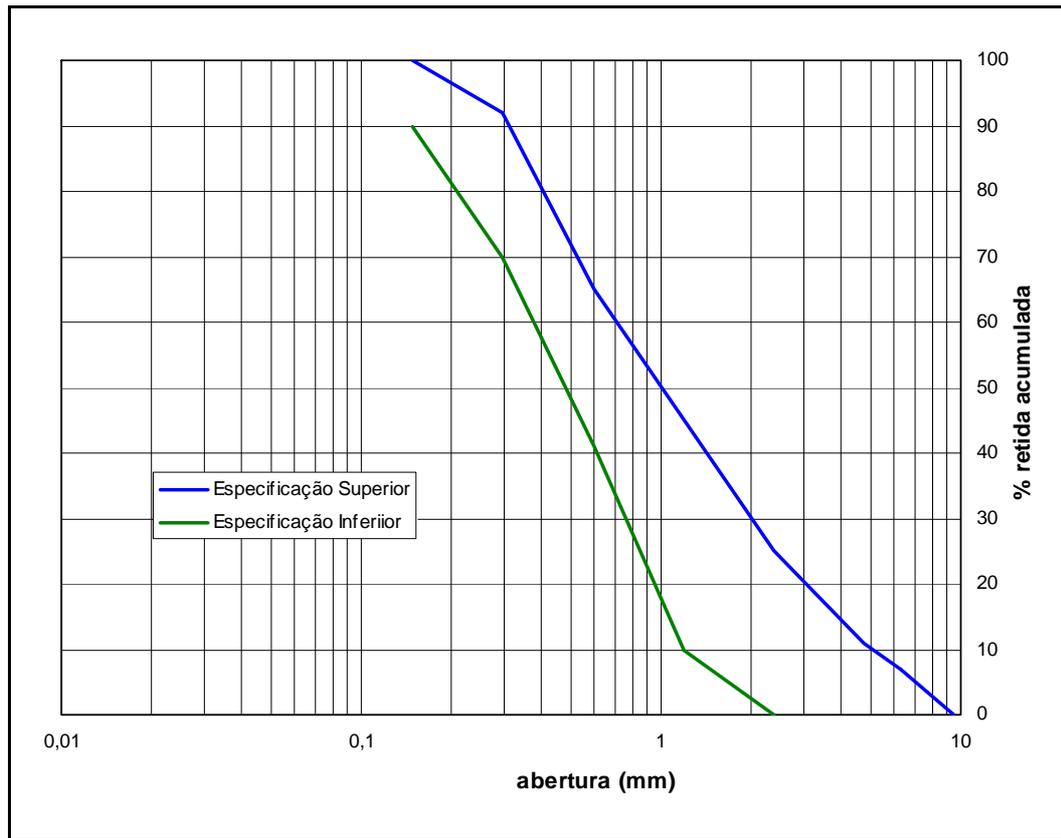


Figura 2.1 – Limites impostos pela NBR 7211 para zona 3

A distribuição granulométrica tem influência direta na trabalhabilidade do concreto fresco, pois uma alta porcentagem de material fino ( $\sim 0,15\text{mm}$ ) exige aumento de água de amassamento e, conseqüentemente de cimento, o que torna o concreto mais oneroso. O material ainda mais fino, inferior a  $0,075\text{mm}$ , com finura da ordem do cimento, torna o concreto ainda mais oneroso porque os grãos desse material misturam-se com os do cimento, criando descontinuidade na argamassa e reduzindo a resistência do concreto. A grande superfície específica desse material requer muita água de molhagem e, para que se tenha a mesma trabalhabilidade e fator água/cimento, necessita-se de maior quantidade de cimento, aumentando a retração e permeabilidade do concreto.

Além disso, esse material impalpável pode eventualmente criar sobre os grãos do agregado gráudo uma camada de material pulverulento, que viria a prejudicar a aderência da argamassa, e que afetaria o desempenho do concreto com relação à sua resistência.

Por outro lado, concretos sem a presença de finos (sem a fração  $0,075/2,4$ ) são pouco trabalháveis, sujeitos a maior exudação, com grande permeabilidade e muito sujeitos à agentes agressivos.

### **2.2.2 Massa Específica**

A massa específica de um agregado miúdo é dividida em massa específica aparente ou unitária e massa específica absoluta, comumente chamada pelo próprio nome, ou seja, massa específica.

### **2.2.3 Massa Específica Aparente**

Também chamada de massa unitária ou de massa barimétrica, é a massa da unidade de volume do agregado, ou seja, é a relação entre a massa total de um certo volume de agregados e esse volume, considerando os vazios existentes entre os grãos do agregado. É por meio da massa unitária que são feitas as transformações de massa para volume e vice-versa, conforme a NBR 7251.

### **2.2.4 Massa Especifica Absoluta**

É a massa da unidade de volume do material que constitui os grãos do agregado. A determinação da massa específica do agregado miúdo é feita, conforme estabelece a NBR 9776, com o auxílio do frasco especial, denominado frasco de Chapmam, que permite medir o volume total ocupado pelos grãos da amostra de agregado, cuja massa é previamente medida em estado seco.

### **2.2.5 Materiais Nocivos ao Concreto**

A NBR 7211 fornece qual o percentual de substâncias nocivas que se pode ter para uma determinada quantidade de agregado, sejam elas compostas por torrões de argila (NBR 7218), material pulverulento (NBR 7219) ou materiais carbonosos, sendo, neste caso, definidos pela “American Society for Testing and Materials-ASTM” (C123).

Tabela 2. 4 - Limites da NBR 7211 para substâncias nocivas presentes nos agregados

IMPUREZA	AGREGADO	TIPO DE CONCRETO	% MÁXIMA
Torrões de argila	Miúdo	Todos	1,5
	Graúdo	Normal	3,0
		Possível desgaste superficial	2,0
		Aparente	1,0
Material Pulverulento (pó) <sup>(1)</sup>	Miúdo	Normal	5,0
		Possível desgaste superficial	3,0
	Graúdo	Todos	1,0
Material Carbonoso	Todos	Normal	1,0
		Aparente	0,5

<sup>(1)</sup>: a NBR 7211 (ABNT, 1983) prevê que caso o material que passe pela peneira # 200 seja constituído totalmente de pó de pedra, o limite para os agregados miúdos poderão ser aumentados de 5,0% e 3,0% para 7,0 % e 5,0 %, respectivamente.

### 2.2.6 Durabilidade

Fazendo uma interpretação da definição de durabilidade do Comitê 201 do ACI, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente. Contudo, a partir do ponto em que a sua utilização for considerada insegura ou antieconômica, pode-se dizer que a estrutura atingiu o fim da sua vida útil.

Hoje em dia, ainda é comum a especificação de um concreto tomando-se como critério de durabilidade a resistência mecânica do mesmo. Contudo, a realidade tem mostrado a deterioração precoce de muitas estruturas, invalidando o critério mencionado. Portanto, critérios de durabilidade também devem levar em conta os processos de deterioração, além da resistência mecânica. O concreto armado pode ter a sua vida útil comprometida em função de diversas causas que o conduzam à uma deterioração, sendo que estas podem ter origens internas ou externas ao concreto.

As diferentes formas de ação podem ser mecânicas ou químicas. As ações mecânicas referem-se a impactos, abrasão, erosão, cavitação e fissuração; elas podem ser devidas à pressão de cristalização de sais, gradientes normais de temperatura e umidade, carga estrutural, temperaturas extremas e corrosão de armaduras. As tensões internas geram fissuras no

concreto, tornando-o mais permeável e facilitando o ingresso dos agentes agressivos no seu interior.

As reações químicas com os componentes do concreto aumentam a porosidade e a permeabilidade, podendo ter origem nos próprios componentes do concreto, assim como a partir do ingresso de agentes deletérios no interior deste. Devido ao fato do concreto ser um material poroso, invariavelmente existirá água no interior do mesmo. Esta, por ser constituída de moléculas de dimensões muito reduzidas, são capazes de penetrar nas cavidades ou poros do concreto, servindo de meio condutor para outras substâncias que nela se dissolvam, propiciando que íons e gases penetrem no seu interior e promovam a decomposição química de materiais sólidos.

Acrescenta-se ainda que a água pode causar danos ao concreto em função de sua simples movimentação ou de mudanças da sua estrutura molecular. O congelamento causa o aumento de volume da água, assim como a secagem causa tensões de tração. A pressão osmótica, devido à diferença de concentração iônica, também pode causar altas tensões internas em um sólido úmido.

A durabilidade do concreto é função de uma série de fatores, iniciando pela concepção e projeto das estruturas, passando pelos materiais empregados e a qualidade de execução, chegando-se até seu uso e manutenção. Por outro lado, o seu processo de deterioração está diretamente relacionado à facilidade de penetração dos agentes agressivos no concreto de cobertura das armaduras, ou seja, é função da sua porosidade.

É de consenso que a durabilidade de um concreto ou de uma argamassa está diretamente ligada ao comportamento da rede de poros do seu interior, embora explicitamente entenda-se que outras variantes têm que estar esclarecidas. Sob o ponto de vista da porosidade, o que realmente interessa para que um concreto seja durável, é a avaliação da intercomunicabilidade e a distribuição dos diâmetros e tamanhos dos poros. GRIGOLI e HELENE (2002) afirmam que entre as vantagens do uso de adições minerais no concreto, a redução da porosidade é a maior responsável pela proteção das armaduras contra a ação da corrosão. Os autores mencionam ainda que o uso de adições tem sido incrementado, não só por aspectos técnico-econômicos, mas também por aspectos ecológicos.

A durabilidade das estruturas de concreto tem uma íntima relação com o movimento de líquidos, gases e íons por sua estrutura porosa, principalmente através de mecanismos conhecidos como absorção e permeabilidade. A intensidade, a magnitude, a velocidade e a frequência de ocorrência de alguns dos principais processos de deterioração que atuam nas estruturas são determinadas pela relativa facilidade com que os agentes agressivos penetram e movimentam-se pela rede de poros do material.

### **2.2.7 Pozolanicidade**

A adição de pozolanas ao concreto, principalmente aquelas oriundas de subprodutos industriais, tem sido tema de muitos trabalhos que visam avaliar a sua influência nos aspectos relacionados à resistência mecânica e à durabilidade de concretos e de argamassas.

O efeito pozolânico está relacionado com a atividade pozolânica, ou seja, com a capacidade de reação da pozolana com a cal. NEVILLE (1982) afirma que a pozolanicidade ainda não foi perfeitamente compreendida, pois tanto a área superficial específica como a composição química têm um papel importante e estão relacionadas entre si, o que torna o problema mais complexo. WOLF (1991) ratifica tal afirmação salientando que o termo atividade pozolânica pode ser visto em sentido mais amplo, onde, além da reatividade química da pozolana, são consideradas também a morfologia das partículas, finura e resistência mecânica dos produtos da reação da pozolana com a cal ou cimento.

A NBR 12653 define pozolana como sendo um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. O termo reação pozolânica é empregado para designar a reação sílica-cal nos sistemas cimentícios.

Materiais pozolânicos normalmente são utilizados em concreto massa, devido aos benefícios que trazem para o concreto, melhorando a trabalhabilidade, reduzindo a temperatura e conseqüentemente aliviando os riscos de fissuração, reduzindo expansões, aumentando a resistência do concreto contra águas ou solos agressivos, etc. Algumas das desvantagens que podem ocorrer com o emprego de materiais pozolânicos no concreto são: aumento da água

requerida para uma mesma trabalhabilidade, aumento da retração por secagem e redução da resistência à compressão nas primeiras idades.

No decorrer do presente trabalho observou-se algumas características que evidenciavam a presença de pozolana na mistura, como, por exemplo, alto ganho de resistência mecânica com idades elevadas. Devido a esse fato, foi realizada uma investigação na fração inferior a 0,075 mm do pó de pedra (fração fina), buscando evidenciar a característica pozolânica nesta fração.

A NBR 12653, por meio das tabelas 2.5 e 2.6, estabelece, respectivamente, as exigências químicas e físicas para que um material possa ser considerado pozolânico.

**Tabela 2.5 – Exigências químicas**

<b>Propriedades</b>	<b>Material Pozolânico</b>
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% min.)	70,0
SO <sub>3</sub> (% máx.)	4,0
Teor de umidade (% máx.)	3,0
Perda ao Fogo (% máx.)	10,0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O (%máx.)	1,5

**Tabela 2.6 – Exigências físicas**

<b>Propriedades</b>	<b>Material Pozolânico</b>
Material retido na peneira 45µm (% máx.)	34
Índice de atividade pozolânica:	
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (% min.)	75
- com a cal aos 7 dias, em MPa (min.)	6,0
- água requerida (% máx.)	115

A NBR 12653 indica também outros requisitos facultativos para que um material possa ser considerado pozolânico, conforme mostra tabela 2.7.

Tabela 2. 7 – Requisitos facultativos

Propriedades	Material Pozolânico
Aumento na retração por secagem de barras a 28 dias (% máx.)	0,05
Reatividade com álcalis do cimento:	
- redução da expansão da argamassa a 14 dias (% mín.)	75
- expansão da argamassa a 14 dias (% máx.)	0,020

### 2.2.8 Reatividade Potencial Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado (RAA) é um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto envolvendo os hidróxidos alcalinos, provenientes principalmente do cimento, com alguns minerais reativos presentes nos agregados utilizados. Como resultado desta reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e conseqüentemente um comprometimento das estruturas afetadas. A utilização de adições minerais em concretos submetidos a este tipo de reação tem sido apontada como uma alternativa eficaz na redução da expansão.

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é um dos fatores que podem causar a deterioração de estruturas de concreto e foi identificada pela primeira vez no início da década de 40, por Stanton. Ela já foi detectada em vários países, em estruturas as mais diversas (ANDRADE et al, 1997).

Os efeitos desta reação, caracterizada pela ocorrência de fissuração em mosaico, exudação de gel e expansões volumétricas, podem levar décadas para serem percebidos, uma vez que a RAA desenvolve-se de forma lenta. As barragens, por exemplo, são estruturas extremamente suscetíveis de apresentar patologias provocadas pela RAA, as quais podem, a longo prazo, chegar a comprometer a durabilidade, o funcionamento e até mesmo a segurança deste tipo de estrutura.

São inúmeros os exemplos que ilustram a necessidade e a importância da completa compreensão, por parte do engenheiro, dos principais agentes causadores da deterioração do concreto. O crescimento dos trabalhos de recuperação e a constatação de falhas prematuras

em estruturas de concreto, nas últimas décadas, vêm servindo de alerta ao meio técnico no controle dos fatores responsáveis pela falta de durabilidade. Embora apresente uma longa vida útil, na maioria dos ambientes naturais ou industriais em que se insere, quando adequadamente dosado, curado e executado, o concreto é um material vulnerável à ação de processos físicos e químicos de deterioração.

Há registros de casos em que a expansão causada por RAA tenha alterado a forma dos componentes estruturais de barragens, obrigando a que fossem tomadas medidas reparadoras emergenciais. As dificuldades encontradas até os dias de hoje para evitar ou minimizar os efeitos desta reação, além do esforço despendido na recuperação de estruturas atingidas, justificam os estudos que vêm se desenvolvendo em todo o mundo, visando a esclarecer este aspecto do comportamento do concreto.

A RAA depende da presença simultânea de: agregados reativos, alcalinos encontrados no cimento e água. De acordo com a composição mineralógica do agregado adotado, classifica-se a reação em três tipos, segundo a definição de ANDRADE et al, (1997):

- ✓ reação álcali-sílica;
- ✓ reação álcali-silicato;
- ✓ reação álcali-carbonato.

Embora os três tipos de RAA provoquem efeitos semelhantes sobre o concreto, desenvolvem-se segundo mecanismos próprios e bastante complexos.

### **2.2.9 Composição Química por Difração de Raios X**

Esta técnica tem sido utilizada para identificar e quantificar fases de compósitos, ou seja, por meio da difração de raios x em uma amostra, obtém-se todos os seus componentes químicos.

Ela consiste na emissão de raios X de comprimento de onda ( $\lambda$ ) conhecido, que incide sobre a amostra do material a ser estudado. Varia-se o ângulo de incidência do feixe de raios X sobre a superfície da amostra, que se difratam em diferentes direções. Há um detetor de raios X que gira junto com a amostra para captar os raios que difratam num ângulo igual ao ângulo de incidência. À medida que a amostra gira  $\theta$ , o detetor gira  $2\theta$ , isto é, para um ângulo de

incidência  $\theta_1$ , o detetor posiciona-se em um ângulo  $2\theta_1$  em relação ao feixe de raios X emitidos, conforme figura 2.2.

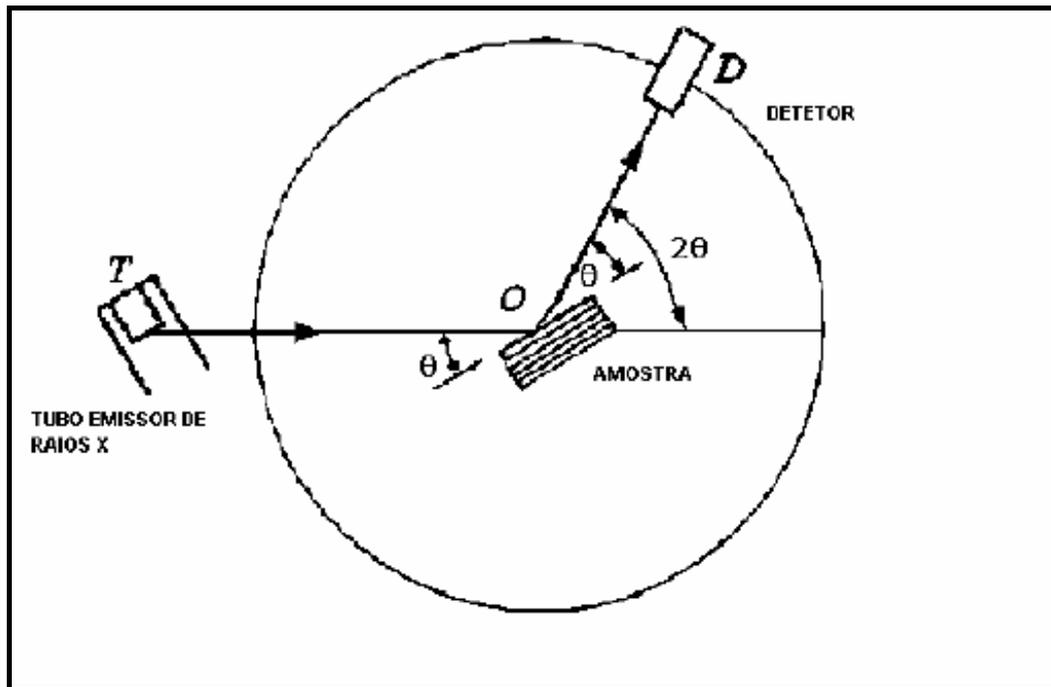


Figura 2. 2 – Representação da Geometria  $\theta - 2 \theta$

Um feixe de raios X, em uma determinada frequência, incide sobre um átomo. Este átomo se comporta como um centro de espalhamento e vibra na mesma frequência do feixe incidente, espalhando-o para todas as direções. Quando os átomos estão organizados num reticulado, esse feixe incidente sofrerá interferência construtiva em certas direções e destrutiva em outras. A interferência construtiva da radiação espalhada ocorre quando a diferença de percurso do feixe espalhado por planos sucessivos for igual a um número inteiro de  $\lambda$ . A lei de Bragg é uma interpretação geométrica do fenômeno de difração num reticulado organizado de átomos, conforme está representado na figura 2.3. Essa lei é uma consequência da periodicidade da rede e não está associada a cada átomo em particular, ou a diferentes números atômicos. A condição para haver difração, segundo Bragg, é:

$$n \lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Onde:

$n$  = número inteiro de comprimento de onda;

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação incidente;

$d$  = distância interplanar dos sucessivos planos do cristal;

$\theta$  = ângulo entre o plano atômico e os feixes incidente e refletido.

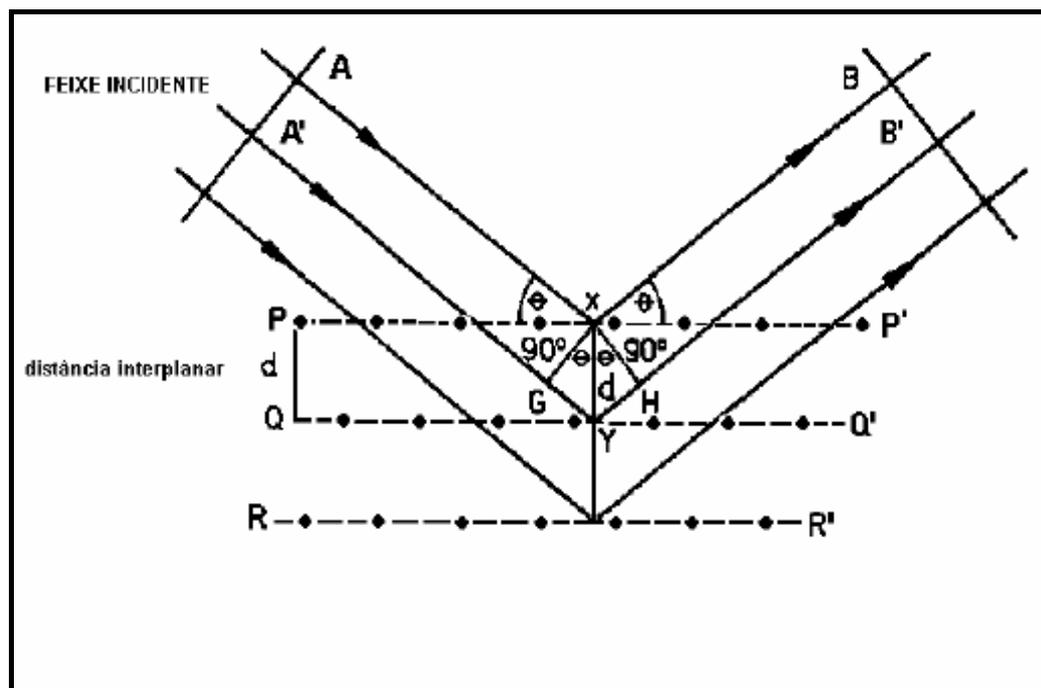


Figura 2.3 – Representação geométrica da lei de Bragg.

## 3. MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO

### 3.1 Introdução

Dosar os materiais para a execução de concreto é uma tarefa de muita responsabilidade. O concreto é um dos elementos fundamentais das estruturas, e, por esse motivo, necessita ser adequadamente dosado para garantir estruturas seguras e duráveis.

A heterogeneidade dos materiais que compõem o concreto, bem como a complexidade de seu comportamento, tanto no estado fresco como no estado endurecido, representam sempre um desafio aos técnicos responsáveis pela fabricação e emprego dos concretos.

Em princípio, cada concretagem implica em uma dosagem própria, pois depende de vários fatores que variam em cada circunstância, tendo-se, como exemplos:

- ✓ tamanho das peças a concretar;
- ✓ resistência desejada;
- ✓ trabalhabilidade adequada;
- ✓ equipamento disponível;
- ✓ tipo, marca, classe e idade do cimento a empregar;
- ✓ características dos agregados;
- ✓ umidade da areia;
- ✓ condições do ambiente onde será empregado o concreto.

Para que se pudesse adotar um método de dosagem seguro, econômico e que se adequasse bem às características do pó de pedra, foram estudados alguns métodos experimentais, tais como: Método do CIENTEC, Método do INT, Método da ABCP e o Método do IPT-EPUSP.

### 3.2 Método do CIENTEC

Em princípio, o Método do CIENTEC vale-se da determinação, em laboratório, da relação água/materiais secos e da relação água/cimento (VERÇOZA, 1995). Obtidos esses dois dados, consegue-se fazer a dosagem através de cálculos e interpolações complementares.

A primeira etapa do método consiste em caracterizar todos os materiais que serão utilizados no concreto. A seguir, deve-se fixar o Índice de Remoldagem de Powers, adequado para a obra. A fase seguinte é a fixação dos traços experimentais para a determinação do teor ótimo de areia e da porcentagem de água recomendada.

Adota-se então, um valor  $m$  (soma dos traços dos agregados) que se sabe, por experiências anteriores, ser próximo do definitivo. Normalmente utiliza-se  $m=5$ . A seguir, calculam-se os traços secos com proporções variadas de areia, mantendo-se sempre  $m=5$ . Para concretos executados com brita, adotam-se 25%, 30%, 35%, 40% e 45% de areia; já os executados com seixo, adotam-se 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de areia.

Determinam-se três quantidades de água, a serem adicionadas a cada traço. Para concretos cujo agregado graúdo é a brita, recomenda-se adotar 8%, 9% e 10% de água; quando o agregado é o seixo adota-se 7,5%; 8,5% e 9,5% de água.

Determinados os Índices de Remoldagem para cada um dos diferentes traços, traçam-se gráficos interpolando os índices com as porcentagens de areia correspondentes; a seguir, unem-se pontos de igual porcentagem de areia formando curvas, sendo que, as melhores proporções correspondem à zona onde as curvas são mais baixas. Através desse ensaio, obtém-se o teor ótimo de argamassa.

O próximo passo é a construção da Curva de Abrams, através de ensaios de compressão. Devem ser adotados 4 traços, em massa, mantendo-se constante a proporção de argamassa já determinada e a porcentagem de água escolhida. Moldam-se corpos-de-prova que deverão ser rompidos aos 28 dias. Com os resultados obtidos através da ruptura dos corpos-de-prova, traça-se a Curva de Abrams e, por intermédio da mesma, pode-se obter a relação água/cimento para a resistência desejada (GIAMMUSSO, 1992). Conhecendo-se a relação

água/cimento e a porcentagem de areia pode-se, através de operações matemáticas simples, obter o traço definitivo.

### 3.3 Método do INT

É o método de dosagem de concreto adotado pelo Instituto Nacional de Tecnologia, com orientação de Lobo Carneiro. Uma das características desse método é que a dosagem pode ser feita com um mínimo de ensaios de laboratório; bastam ensaios de granulometria dos agregados, e, até mesmo estes podem ser dispensados quando se conhecem as composições médias na localidade. Outra característica é que sua seqüência é muito didática (VERÇOZA, 1995).

Primeiramente, deve-se estabelecer a relação água/cimento através de fórmula matemática proposta por Abrams:

$$f = \left( \frac{A}{B^x} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A e B: coeficientes que dependem do cimento empregado;

x: relação água/cimento.

A Equação 1 demonstra um dos parâmetros mais conhecidos no concreto: quanto maior a relação água/cimento, menor a resistência alcançada. Para os valores A e B da Equação 1, que dependem do cimento, são adotados valores médios, pois ensaios demonstraram que as variações são relativamente pequenas para cimentos do mesmo tipo, dentro das dosagens usuais. As diferenças se tornam grandes entre cimentos de tipos diferentes. Para facilitar a adoção desses valores, Abrams propôs curvas médias para os cimentos CP I, CP I S, CP II, CP III e CP IV (VERÇOZA, 1995).

Após a adoção de um fator água/cimento provisório, que é justamente a relação máxima aceitável para se obter um concreto com a resistência desejada, deve-se classificar a peça a ser concretada quanto às suas condições de exposição (protegida, moderada, severa e extrema). Tal classificação fornece um fator água/cimento adequado para o tipo de construção.

A próxima etapa é a definição do fator água/cimento para as condições de durabilidade no meio ambiente. O fator água/cimento definitivo, que possa garantir, simultaneamente, resistência e durabilidade, é o menor dos três. Fixadas as condições de resistência e durabilidade, o método passa a resolver o problema da trabalhabilidade, iniciando pela fixação da relação água/sólidos, através da Lei de Lyse.

Lobo Carneiro propôs uma tabela, fundamentada na Lei de Lyse, que interpola o diâmetro máximo do agregado e o adensamento a ser utilizado, denotando assim, a relação água/mistura seca (VERÇOZA, 1995).

A etapa seguinte é a determinação da relação cimento/agregados (1:m). Por meio de gráficos ou cálculos, é possível obter o consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Através de curvas ideais elaboradas por Lobo Carneiro, pode-se determinar a porcentagem de agregado graúdo. A porcentagem de areia pode, então, ser facilmente obtida, subtraindo-se a porcentagem de agregado graúdo de m (obtido da relação cimento/agregados).

### **3.4 Método da ABCP**

Este é um método bastante simples, onde se conjugam tabelas prévias e ensaios de verificação. Caracteriza-se por obter a dosagem em função da resistência desejada e das massas específicas dos agregados disponíveis.

Primeiramente é estabelecida a relação água/cimento, adotando-se a menor entre a relação recomendada para a resistência desejada e para as condições de exposição da obra (VERÇOZA, 1995).

Com esse valor, com o diâmetro máximo do agregado disponível e com as condições de vibração do concreto é estabelecida uma relação cimento/agregados (1:m), de acordo com uma tabela de valores aproximados definida através de ensaios realizados pela ABCP.

Utilizando-se a equação a seguir, pode-se determinar a quantidade de cada agregado.

$$A = \frac{p}{\gamma_g} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

*A*: coeficiente;

*p*: traço em peso do agregado graúdo;

$\gamma_g$ : massa específica real do agregado graúdo.

Com o valor de *A* obtém-se, através de outra tabela de valores aproximados, a quantidade de agregado graúdo necessária. Facilmente pode-se encontrar o valor de agregado miúdo através de *m*. Com o traço e o fator água/cimento prepara-se uma mistura experimental, para verificar a trabalhabilidade. Se, por exemplo, o concreto ficar muito seco, deve-se diminuir o valor de *m*.

### 3.5 Método do IPT/EPUSP

O Método do IPT/EPUSP, conforme HELENE (1993), é muito simples, pois baseia-se na experiência do profissional. O método consiste, primeiramente, na caracterização de todos os materiais que serão empregados na concretagem.

Definida a resistência à compressão e relação água/cimento, pode-se obter o traço. O início do estudo experimental parte da avaliação preliminar, com mistura em betoneira do traço 1:5 (cimento/agregados secos totais, em massa). Baseado nas informações obtidas desta mistura, confeccionam-se mais duas, com os traços definidos em 1:3,5 (traço rico) e em 1:6,5 (traço pobre).

Uma das fases mais importante do estudo de dosagem é a determinação do teor ideal de argamassa, através de tentativas e observações práticas. A falta de argamassa na mistura acarreta porosidade no concreto ou falhas de concretagem. O excesso proporciona um concreto de melhor aparência mas aumenta o custo por metro cúbico, como também o risco de fissuração por origem térmica e por retração por secagem.

Após a primeira betonada retira-se todo o material aderido às pás e superfície interna, passa-se a colher de pedreiro sobre o concreto fresco e introduz-se a colher dentro da massa para verificar se a superfície exposta está com vazios, indicando falta de argamassa.

Acrescenta-se areia e cimento à mistura, até que se obtenham concretos sem vazios e sem desprendimento de agregados, ou seja, uma massa homogênea e compacta. Somente neste momento deve-se realizar o ensaio de abatimento do concreto.

A última etapa da dosagem experimental é a nova realização da mistura com teor de argamassa definitivo, determinando-se todas as características do concreto fresco, tais como: relação água/cimento necessária para se obter a resistência desejada, consumo de cimento por metro cúbico de concreto, consumo de água por metro cúbico de concreto e o abatimento da mistura. A seguir, moldam-se corpos-de-prova que devem ser rompidos nas idades de 3, 7, 28, 63 e 91 dias.

A etapa seguinte do estudo de dosagem é produzir mais dois traços auxiliares (1:3,5 e 1:6,5), para possibilitar a montagem de um diagrama de dosagem que correlacione as 3 leis básicas para dosagens: Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinari.

### 3.5.1 Lei de Abrams

A curva de Abrams é a relação entre as resistências à compressão e as respectivas relações água/cimento. É de grande importância o formato dessa curva, pois ela pode indicar tendências e ser utilizada para futuras dosagens de concreto. A Lei de Abrams admite que a resistência de um concreto é inversamente proporcional à sua relação água/cimento, segundo a fórmula:

$$f = \left( \frac{A}{B^x} \right)$$

Onde:

$f$  = resistência;

$x$  = relação água/cimento;

$A$  e  $B$  = constantes empíricas.

### **3.5.2 Lei de Lyse**

A Lei de Lyse, utilizada no Brasil, enuncia que a consistência de um concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone (slump), permanece constante independentemente da riqueza da mistura caso sejam mantidos constantes o tipo e a graduação dos agregados, o teor de argamassa e a relação água / materiais secos (H). A partir desta consideração, o método admite que a relação entre a variação do traço (m) em função da relação água/cimento é linear, apresentando uma reta para cada valor de H.

### **3.5.3 Lei de Molinari**

A Lei de Molinari relaciona o consumo de cimento por metro cúbico com o traço utilizado para os concretos.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Introdução

Este capítulo é de suma importância para a análise experimental, pois aqui se encontra toda a descrição do trabalho realizado, que envolve a descrição dos métodos de ensaios adotados, assim como a especificação das normas, equipamentos utilizados, procedimentos adotados e a caracterização dos materiais envolvidos.

Para melhor organização das atividades experimentais, foram definidos cinco programas de ensaios, como segue:

O primeiro programa de ensaios refere-se à caracterização completa dos materiais envolvidos, que são a pedra, a areia, o pó de pedra e o cimento. Através dessa caracterização, pretende-se obter dados que servirão de base para toda a pesquisa.

O segundo programa de ensaios refere-se à investigação do comportamento do concreto no que diz respeito à trabalhabilidade. Depois de determinado um certo traço para a confecção do concreto e de seus respectivos corpos-de-prova, fixou-se uma determinada relação água/cimento ( $a/c$ ), a qual foi mantida constante durante todo o programa de ensaio. Com base no traço padrão, variou-se o teor da areia natural, substituindo-a nas porcentagens de 25%, 50%, 75% e 100% em massa, obtendo-se, assim, 5 traços, onde foram verificadas suas resistências à compressão e trabalhabilidade.

O terceiro programa de ensaios refere-se à investigação do comportamento do concreto no que diz respeito ao consumo de água, ou seja, com relação ao fator  $a/c$ . Ao contrário do programa anterior, onde foi fixada uma relação  $a/c$  e medido o abatimento para cada traço, adotou-se, para este programa, um determinado abatimento e mediu-se a relação  $a/c$ . Ainda dentro deste programa de ensaios, foi verificada a resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados para cada traço e também a perda de trabalhabilidade com o tempo, onde foram medidos os abatimentos a cada 15 minutos, durante 60 minutos.

O quarto programa de ensaio se refere-se à incorporação de aditivos no concreto, visando obter uma melhor trabalhabilidade para uma relação a/c mais baixa. Nesta etapa, definiu-se um método de dosagem para concretos com 100% de substituição de pó de pedra. Foram definidos três traços em massa: 1:3,5 (Rico), 1:5 (Normal) e 1:6,5 (Pobre), obtendo-se, assim, subsídios para a construção do diagrama de dosagem.

O quinto e último programa de ensaios refere-se à investigação da fração fina do pó de pedra, passante na #200. Foram realizados ensaios para determinar a possibilidade deste material ser ou não pozolânico, além de caracterizar a sua reatividade potencial álcali-agregado.

## **PRIMEIRO PROGRAMA DE ENSAIOS**

### **4.2 Primeiro Programa de Ensaio – Caracterizações**

#### **4.2.1 Areia**

A areia utilizada nos traços é proveniente do município de Castilho (SP). Para poder caracterizá-la, ela foi secada no pátio do laboratório de Engenharia Civil da CESP, à temperatura ambiente e exposta ao sol; seu resfriamento foi feito à temperatura ambiente, dentro de tambores isolados de umidade e de fontes de calor.

Já com os materiais secos e prontos para serem utilizados, foram realizados os seguintes ensaios: granulometria, que seguiu os procedimentos da NBR 7217 – “Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio”, que prescreve o método para análise granulométrica de agregados para concreto; massa específica absoluta, cujo ensaio é preconizado pela NBR 9776 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos – Método de Ensaio”; massa específica aparente, cujo ensaio é preconizado pela NBR-7251 – “Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária”; material pulverulento, cujo ensaio é preconizado pela NBR-7219 – “Determinação do teor da materiais pulverulentos nos agregados”.

#### **4.2.2 Pó de pedra**

O pó de pedra utilizado é proveniente da Mineração Noroeste Paulista, localizada no município de Monções, estado de São Paulo. Por se tratar de um agregado candidato à substituição da areia natural, foram adotados, para o pó de pedra, os mesmos procedimentos de preparo das amostras e de caracterização realizados para a areia natural.

#### 4.2.2.1 Perda ao fogo

O ensaio de perda de massa ao fogo tem como objetivo verificar existência de matéria orgânica na amostra. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis. Este ensaio é dividido em duas partes. Na primeira, uma determinada quantidade de amostra de pó de pedra é levada a uma mulha, permanecendo, por um período de tempo de 60 minutos, a uma temperatura de 600°C. Na segunda parte do ensaio, eleva-se a temperatura a 900°C e amostra permanece na mulha por um período de tempo de 20 minutos.

#### 4.2.2.2 Difração de Raios-X

O ensaio de difração de raios-x foi realizado também no Laboratório de Engenharia Civil da UFSC, em Florianópolis.

Para caracterização de fases dos compostos contidos no pó de pedra, foram utilizadas amostras em pó, com granulometria inferior a 150  $\mu\text{m}$ , que, para chegarem a essa granulometria, foram moídas e compactadas num porta-amostra. A seguir a figura 4.1 mostra a pastilha que foi compactada para ser levada ao aparelho de raios-X.



Figura 4. 1 - Pastilha compactada para amostragem no raio-x

Foram realizados 3 ensaios de difração de raios-x: um com o pó de pedra em seu estado natural, outro com o pó de pedra depois da queima a 600°C e um terceiro com o pó de pedra depois da queima a 900°C. Optou-se por realizar esses três ensaios, não só para comprovar a veracidade do ensaio de perda de massa ao fogo, mas também para determinar como ficaria a composição do material após a queima.

#### **4.2.3 Brita**

A brita utilizada tem a mesma origem do pó de pedra e a sua caracterização foi composta dos seguintes ensaios: granulometria verificado pela NBR-7217, massa específica verificado pela NBR-9937, material pulverulento verificado pela NBR-7219.

## SEGUNDO PROGRAMA DE ENSAIOS

### 4.3 Segundo Programa de Ensaio – Verificação do Abatimento

#### 4.3.1 Definição dos Traços de Concreto a serem Estudados

Um dos objetivos do presente trabalho é a verificação do desempenho de diferentes traços de concreto utilizando pó de pedra em substituição à areia natural. O objetivo desta etapa do trabalho foi quantificar a variabilidade do abatimento com a variação dos teores de areia, tendo sido adotado um traço de 1:3:3 em massa. Foram adotados os seguintes teores de substituição em massa de areia natural por pó de pedra: 25%, 50%, 75% e 100%.

Decidiu-se pela utilização de agregados e de um tipo de cimento que fossem de uso corrente para a produção de concretos na região noroeste do estado de São Paulo, com materiais de fácil obtenção. Por isso, utilizou-se areia média, brita 16 mm e cimento CII-F 32.

#### 4.3.2 Confeção dos Traços e Verificação do Abatimento

Para a realização desta etapa do trabalho fez-se uma investigação para definir qual seria a relação a/c a ser utilizada na elaboração dos traços, pois, se fosse estimada uma relação a/c muito baixa para o primeiro traço, que é o traço padrão sem adição de pó de pedra, provavelmente não seria possível obter um valor adequado para o abatimento do quinto traço, que é o traço com 100% de substituição de areia por pó de pedra.

Após as investigações chegou-se à conclusão de que, para uma relação a/c de 0,70, foi possível obter abatimentos em todos os traços. A tabela 4.1 mostra a relação dos traços que foram confeccionados.

Tabela 4. 1 - Mostra a relação dos traços confeccionados.

Traço	Cimento	a/c	Areia (%)	Pó-de-pedra (%)	Brita 16mm
1	constante	constante	100	0	constante
2	constante	constante	75	25	constante
3	constante	constante	50	50	constante
4	constante	constante	25	75	constante
5	constante	constante	0	100	constante

Depois de definidos os traços a serem estudados, foi discutido como seria feita a mistura dos materiais. Todos os traços foram confeccionados no Laboratório de Engenharia Civil da CESP e a mistura dos mesmos seguiu a metodologia utilizada pela CESP.

Para a realização da mistura dos materiais na betoneira, utilizou-se a seguinte seqüência: primeiramente adicionou-se o agregado graúdo, agregado miúdo e 50% da água; a mistura foi batida na betoneira por 1 minuto; em seguida, adicionou-se o cimento e o restante da água, batendo-se a mistura por 3 minutos. Passados os 3 minutos, a betoneira foi desligada e o concreto permaneceu em repouso por mais 3 minutos; em seguida, tornou-se a ligar a betoneira por mais 2 minutos, totalizando um tempo total de 9 minutos, para que, deste modo, pudesse ser medido o abatimento da mistura e serem moldados os corpos-de-prova. A figura 4.2 mostra o detalhe dos materiais sendo depositados na betoneira.



**Figura 4.2 - Detalhe dos materiais sendo depositados na betoneira**

### **4.3.3 Moldagem e Cura dos Corpos-de-prova**

A moldagem e a cura dos corpos-de-prova de concreto foram realizadas de acordo com a NBR 5738 – “Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Procedimentos”. Foram moldados, para cada traço de concreto estudado, 15 corpos-de-prova, sendo 5 por idade, em fôrmas cilíndricas de PVC de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Logo após a moldagem dos corpos-de-prova, colocou-se, sobre eles, uma película de plástico para evitar a perda de água por secagem antes da desfôrma, que é realizada depois de 24 horas após a moldagem. Após desformados, os corpos-de-prova foram identificados um a um e levados à câmara úmida, onde permaneceram até suas idades de ruptura, que foram aos 7, 28 e 91 dias. A figura 4.3 mostra os corpos-de-prova já moldados e com as películas de plástico.



**Figura 4.3 - Corpos-de-prova com a película de plástico**

Atendida a idade de ruptura, os corpos-de-prova, devidamente identificados, foram retirados da câmara úmida e foi realizada toda a preparação para suas rupturas. A preparação foi composta de uma limpeza dos mesmos, e, em seguida fez-se o capeamento para regularizar as suas faces.

O capeamento foi feito com enxofre, tendo sido realizado no Laboratório de Engenharia Civil da CESP, o qual possui uma sala própria para capeamento, diminuindo, assim, os males que esta substância faz ao organismo humano. A figura 4.4 mostra um detalhe da sala de capeamento do laboratório da CESP.



**Figura 4. 4 - Detalhe da sala de capeamento**

Após capeados, os corpos-de-prova estavam prontos para serem ensaiados à compressão axial, na prensa hidráulica do Laboratório de Engenharia Civil da CESP. Esta prensa possui acionamento elétrico, capacidade de carga para 100 toneladas e controle de carga manual. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5739, “Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio”. A figura 4.5 mostra os corpos-de-prova já capeados prontos para o ensaio de ruptura.



**Figura 4. 5 - Corpos-de-prova capeados com enxofre**

## TERCEIRO PROGRAMA DE ENSAIOS

### 4.4 Terceiro Programa de Ensaio – Verificação da relação a/c

Na etapa anterior, foram determinados os traços a serem estudados, fixando-se uma relação a/c e verificando-se o abatimento para cada traço. Também foi realizado um ensaio que mostrou a perda do abatimento em relação ao tempo. Por fim, foi feita uma estimativa do consumo de cimento para cada traço.

Nesta etapa do trabalho, foi feito o contrário da etapa anterior, ou seja, fixou-se um determinado abatimento e mediu-se a variação da relação a/c. Para determinar o abatimento padrão levou-se em conta alguns fatores, como, por exemplo, o abatimento mais usado em obras correntes.

A tabela 4.2 mostra a classificação da consistência do concreto segundo o ensaio do abatimento.

**Tabela 4. 2 - Classificação das consistências do concreto**

<b>Consistência</b>	<b>Abatimento (cm)</b>
Seca	0 a 2
Firme	2 a 5
Média	5 a 12
Mole	12 a 18
Fluida	18 a 25

Considerando-se obras usuais, a tabela 4.3 fornece as faixas de abatimento dadas em função do tipo de elemento estrutural que será concretado (ANDOLFATO, 2002).

Tabela 4.3 - Abatimentos recomendados

Tipo de Construção	Abatimento (cm)
Fundações, Tubulões e Parede Grossas	3 a 10
Vigas, Lajes e Paredes Finas	5 a 10
Pavimentos	3 a 5
Obras Maciças	2 a 5

Com base nos dados mostrados na tabela 4.3, foi determinado um abatimento médio de  $6 \pm 0,5$  cm, para todos os 5 traços em estudo. A tabela 4.4 mostra um resumo do que foi feito nesta etapa do trabalho.

Tabela 4.4 - Relação dos traços confeccionados com abatimento  $6 \pm 0,5$  cm

Traço	Cimento	a/c	Areia (%)	Pó-de-pedra (%)	Brita 16mm
1*	constante	variável	100	0	constante
2*	constante	variável	75	25	constante
3*	constante	variável	50	50	constante
4*	constante	variável	25	75	constante
5*	constante	variável	0	100	constante

#### 4.4.1 Ensaio de Perda de Abatimento

A realização deste ensaio foi motivada pela suspeita de que pudesse haver uma perda de consistência muito rápida para o concreto com pó de pedra, decorrente da alta absorção de água pelos finos presentes neste material. Este fato poderia inviabilizar a utilização de tais agregados para a produção de concretos. Por esta razão, o ensaio foi realizado para os cinco traços pré-definidos, de acordo com a NBR 10342 - “Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio”.

Para cumprir com todas as condições exigidas para este ensaio, seria necessária a utilização de uma câmara climatizada, visto que as condições de temperatura e umidade relativa do ar têm

uma forte influência nos resultados. A norma NBR 10342 prescreve que, para efeitos comparativos, a temperatura ambiente não deve apresentar variações superiores a 2°C e a umidade relativa do ar não deve apresentar variações superiores a 5%. Em virtude da falta de uma câmara climatizada à disposição, realizou-se este ensaio com temperatura ambiente e umidade relativa do ar ambiente. A análise de seus resultados deve, portanto, ser feita com cautela, considerando-se as condições climáticas existentes no momento do ensaio. Após o acerto da consistência pré-determinada de cada concreto, de acordo com a NBR 7223 - “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio”, e feita a primeira leitura de abatimento, foram efetuadas medições a cada 15 minutos, durante o período de 1 hora.

Foram medidas, durante o intervalo de tempo mencionado, por meio de um termômetro com sensibilidade de  $\pm 0,10^{\circ}\text{C}$ , as temperaturas e os respectivos abatimentos das misturas. Destaca-se que as medições foram feitas próximas à betoneira. A figura 4.6 mostra o momento de medição do abatimento.



Figura 4. 6 - Medição do abatimento

#### 4.4.2 Determinação do Consumo de Cimento

O consumo de cimento foi calculado através da seguinte fórmula: 
$$C = \frac{1000}{\frac{1}{dc} + \frac{a}{da} + \frac{p}{dp} + a/c}$$

Onde:

$a$  = kg de agregado miúdo por kg de cimento;

$p$  = kg de agregado graúdo por kg de cimento;

$a/c$  = relação água/cimento;

$d_c$  = massa específica do cimento;

$d_a$  = massa específica do agregado miúdo;

$d_p$  = massa específica do agregado graúdo.

Optou-se por realizar esse cálculo para poder comparar, posteriormente, as resistências com relações  $a/c$  diferentes.

## QUARTO PROGRAMA DE ENSAIOS

### 4.5 Quarto Programa de Ensaio – Dosagem e Incorporação de Aditivos

Esta etapa do trabalho trata da incorporação de aditivos no concreto. O pó de pedra absorve a água, diminuindo assim a trabalhabilidade. Essa diminuição da trabalhabilidade não só acontece instantaneamente, mas também com o decorrer do tempo, conforme constatação feita através do ensaio de perda de abatimento com o tempo.

Para a incorporação e investigação do aditivo a ser usado, primeiramente foi definido o método de dosagem a ser utilizado no concreto com pó de pedra. Com o teor ideal de argamassa, elaboraram-se traços para a construção dos diagramas de dosagens para concretos sem pó de pedra, ou seja, somente com areia natural, para concretos com pó de pedra e sem adição de aditivos e, por fim, para concretos com pó de pedra com adição de aditivos. Com esses dados é possível uma estimativa da economia no consumo de cimento do concreto com pó de pedra em relação ao concreto com areia natural.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos que foram submetidos à ruptura aos 7, 28 e 91 dias. Além disso, foram medidos os módulos de deformação aos 28 dias para os mesmos traços.

#### 4.5.1 Método de Dosagem Adotado

Dentre os métodos apresentados no capítulo 3, o que melhor se enquadrou para a dosagem utilizando o pó de pedra é o Método IPT/EPUSP.

O pó de pedra, por ser um material diferente da areia natural usada no concreto, poderia não se ajustar a nenhum dos métodos citados anteriormente, com exceção do Método IPT/EPUSP, que, por ser um método que utiliza critérios visuais, como no exemplo da determinação do teor de argamassa, foi considerado o mais indicado para o presente estudo.

#### 4.5.1.1 Determinação do teor ideal de argamassa para o traço 1:5

HELENE e TERZIAN (1995) afirmam que essa é uma das fases mais importantes do estudo de dosagem, pois é a que determina a adequabilidade do concreto quando lançado na fôrma.

O teor de argamassa é dado pela seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m}$$

Onde:

$\alpha$  = teor de argamassa seca;

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

$m$  = relação agregados secos/cimento em massa kg/kg

Para a determinação do teor ideal de argamassa deve-se seguir uma seqüência de atividades que serão descritas a seguir. O procedimento a seguir é proposto para betoneiras de aproximadamente 200 litros.

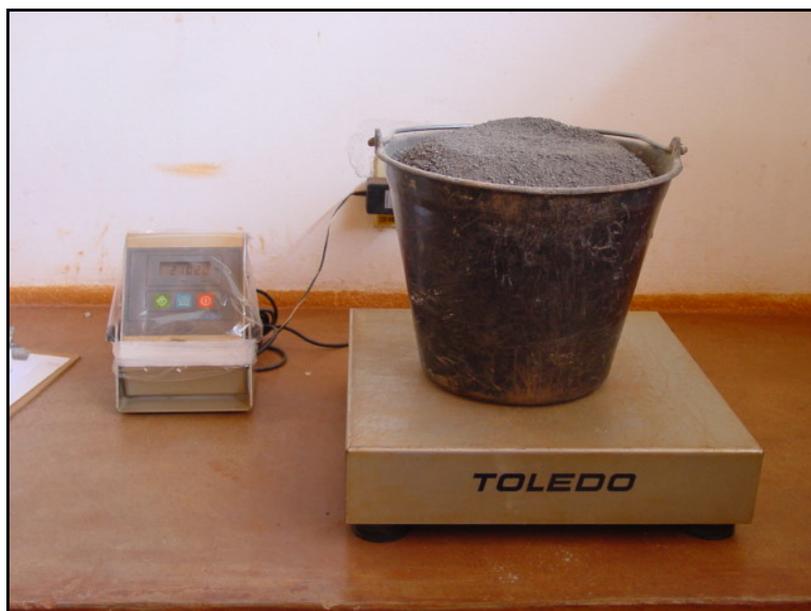
Seqüência de atividades:

1) Imprimir a betoneira com uma porção de concreto ( $\geq 6$ kg), com o traço 1:2:3, a/c =0,65. Deixar o material excedente cair livremente, quando a betoneira estiver com a abertura para baixo e em movimento. A figura 4.7 mostra a retirada do concreto utilizado para imprimir a betoneira.



**Figura 4. 7 – Retirada do material usado para imprimir betoneira**

2) Após pesar e lançar os primeiros materiais na betoneira, deve-se misturá-los durante 5 minutos, com uma parada intermediária para limpeza das pás da betoneira. Ao final, verificar se é possível efetuar o abatimento do tronco de cone, ou seja, se há, na mistura, coesão e plasticidade adequada. A figura 4.8 mostra a pesagem dos materiais utilizando-se uma balança de precisão.



**Figura 4. 8 – Pesagem dos materiais utilizando balança digital**

3) Para a introdução dos materiais de modo individual dentro da betoneira, deve-se obedecer a seguinte ordem: água (80%); agregado graúdo (100%); agregado miúdo (100%); cimento (100%), restante da água.

4) Após este procedimento, são realizados os acréscimos sucessivos de argamassa na mistura, através do lançamento de cimento e areia. A quantidade de agregado graúdo na mistura não é alterada. A figura 4.9, mostra os acréscimos a serem utilizados previamente pesados e identificados.



Figura 4.9 – Porções de areia e cimento a serem adicionadas na betoneira

5) Para a definição do teor ideal de argamassa deve-se realizar o procedimento baseado em observações práticas e descrito a seguir para cada teor de argamassa:

- a) com a betoneira desligada, retirar todo material aderido nas pás e superfície interna;
- b) com uma colher de pedreiro, trazer todo material para a região inferior da cuba da betoneira, introduzindo os agregados soltos no interior da mistura;
- c) passar a colher de pedreiro sobre a superfície do concreto fresco, introduzir dentro da massa e levantar no sentido vertical. Verificar se a superfície exposta está com vazios, indicando falta de argamassa;
- d) introduzir novamente a colher de pedreiro no concreto e retirar uma parte do mesmo, levantando-o até a região superior da cuba da betoneira. Com o material nesta posição,

verificar se há desprendimento de agregado graúdo da massa, o que indica falta de argamassa na mistura. Após esta observação, soltar a porção de concreto que está sobre a colher e verificar se a mesma cai de modo compacto e homogêneo, o que indica teor de argamassa ideal;

e) para as misturas que se apresentarem adequadas, com base no procedimento descrito no item anterior, ou seja, para misturas sem vazios na superfície, sem desprendimento de agregados e queda do concreto de modo homogêneo e compacto, determina-se o abatimento de tronco de cone. Caso o mesmo não atinja a faixa estabelecida, deve-se acrescentar a quantidade de água suficiente para tal;

f) após o ensaio de abatimento, estando ainda o concreto com formato de tronco de cone, deve-se bater suavemente na lateral inferior do mesmo, com o auxílio de uma haste de socamento, com o objetivo de verificar sua queda. Se a mesma se realizar de modo homogêneo, sem desprendimento de porções, indica que o concreto está com o teor de argamassa considerado bom;

h) outra observação a ser realizada é verificar se, ao redor da base do concreto com formato de tronco de cone, aparece uma camada de água oriunda da mistura. Esta ocorrência indica que há tendência de exudação de água na mistura por falta de finos, que pode ser corrigida com uma mudança na granulometria da areia ou aumentando-se o teor de argamassa;

i) o teor final depende ainda de um fator externo que é a possibilidade de perda de argamassa no processo de transporte e lançamento. Este valor, em processos usuais, pode ser estimado em 2% a 4% de perdas.

6) O teor de argamassa no concreto é o definido nos itens anteriores, acrescido da estimativa de perdas.

7) Realizar uma nova mistura com o traço 1:5,0, com o teor de argamassa definitivo e determinar todas as características do concreto fresco,

- relação água/cimento, necessária para obter a consistência desejada;
- consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
- consumo de água por metro cúbico de concreto;
- massa específica do concreto fresco;
- abatimento do tronco de cone.

8) Moldar corpos-de-prova cilíndricos para romper às idades de : 3, 7, 28, 63 e 91 dias.

Determinado o teor ideal de argamassa, deu-se procedimento à confecção dos concretos. Foram produzidos 3 tipos de concretos: o primeiro utilizando como agregado miúdo a areia natural, um segundo utilizando o pó de pedra no lugar da areia e um terceiro utilizando novamente o pó de pedra mas com o uso de aditivo plastificante.

#### **4.5.2 Aditivo**

O aditivo utilizado na pesquisa foi um aditivo multi-funcional. A escolha desse aditivo foi feita com base em pesquisa feita em campo, ou seja, nas concreteiras da região. Constatou-se que grande parte das concreteiras utiliza o aditivo mencionado.

A aditivo é fabricado pela Rheotec e sua especificação, segundo a empresa, é TEC-MULT 420.

O TEC-MULT 420 é um aditivo líquido pronto para uso, isento de cloretos e destinado a plastificar o concreto. Ele proporciona ao concreto os seguintes benefícios:

- ✓ reduz os picos térmicos;
- ✓ manutenção da plasticidade por períodos mais longos;
- ✓ melhora o bombeamento;
- ✓ aumento das resistências finais;
- ✓ melhora a impermeabilidade;
- ✓ aumento da durabilidade.

O TEC-MULT 420 é recomendado pelo fabricante quando se deseja fornecer características de maior plasticidade à mistura e proporcionar essa plasticidade por um período de tempo mais longo.

## QUINTO PROGRAMA DE ENSAIOS

### 4.6 Quinto Programa de Ensaio - Ensaio de Durabilidade

Esta é a última etapa do trabalho e consistiu em buscar características de durabilidade no pó de pedra, em especial na fração fina do pó de pedra, passante na #200.

Nesta etapa foram realizados os seguintes ensaios:

- ✓ índice de atividade pozolânica com o cimento, preconizado pela NBR-5752;
- ✓ índice de atividade pozolânica com a cal, preconizado pela NBR-5751;
- ✓ retração por secagem; preconizado pela NBR-12650;
- ✓ reatividade com álcalis do cimento, preconizado pela NBR-12651;
- ✓ reatividade potencial álcali-agregado, preconizado pela ASTM C-1260.

#### 4.6.1 Índice de atividade pozolânica com cimento

As normas brasileiras e internacionais que permitem a avaliação do índice de atividade pozolânica usam a propriedade das pastas ou argamassas de resistirem ao esforço de compressão. A NBR 5752 – “Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento” define o índice de atividade pozolânica com cimento Portland por:

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100(\%)$$

Onde:

$f_{cB}$  = Resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozolânico (argamassa B).

$f_{cA}$  = Resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento (argamassa A - Controle).

Para obtenção das resistências à compressão são moldados corpos-de-prova cilíndricos de 5cm x 10cm, com um traço em massa de 1:3. A argamassa A é a argamassa de controle e a argamassa B é a argamassa com 35% de substituição, em volume absoluto, do cimento por pó de pedra (fração fina). As argamassas têm que possuir um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm.

As figuras 4.10 a 4.13 mostram os procedimentos utilizados no índice de consistência e na moldagem dos corpos-de-prova.



**Figura 4. 10 – Argamassa sendo misturada com auxílio de argamassadeira elétrica**



**Figura 4. 11 – Argamassa sendo preparada para medição do índice de consistência**



Figura 4. 12 –Medição do índice de consistência



Figura 4. 13 – Moldagem dos corpos-de-prova

#### 4.6.2 Índice de atividade pozolânica com cal

Este ensaio consiste em avaliar a resistência mecânica aos 7 dias da argamassa confeccionada com o traço de 1 cal : 9 areia : 2 material pozolânico, em **volume**.

A argamassa em questão deve possuir um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm. O índice de atividade pozolânica com cal será a média das resistências dos corpos-de-prova à compressão, aos 7 dias.

#### 4.6.3 Retração por secagem

Este ensaio mostra a variação de retração por secagem através da medição de barras de argamassa prismáticas. A argamassa utilizada no ensaio possui um traço em massa de 1:2,75. Foram produzidas duas argamassas: uma delas para servir de controle e a outra com 9% de substituição da areia por pó de pedra (fração fina).

Após moldadas, as barras vão para cura em câmara úmida durante 07 dias, e no sétimo dia é realizada a primeira medição do comprimento das barras, que será denominada leitura inicial. Uma segunda leitura é realizada aos 28 dias, que será a leitura final.

Os cálculos são efetuados da seguinte maneira:

- 1) Retração do Controle =  $[(\text{Leitura Inicial} - \text{Leitura Final}) / \text{Leitura Inicial}] \times 100$
- 2) Retração do Ensaio(com 9%) =  $[(\text{Leitura Inicial} - \text{Leitura Final}) / \text{Leitura Inicial}] \times 100$
- 3) Variação da Retração por Secagem = Retração do Controle - Retração do Ensaio(com 9%).

As figuras 4.14 à 4.16 mostram a moldagem das barras de argamassa e a medição das mesmas.

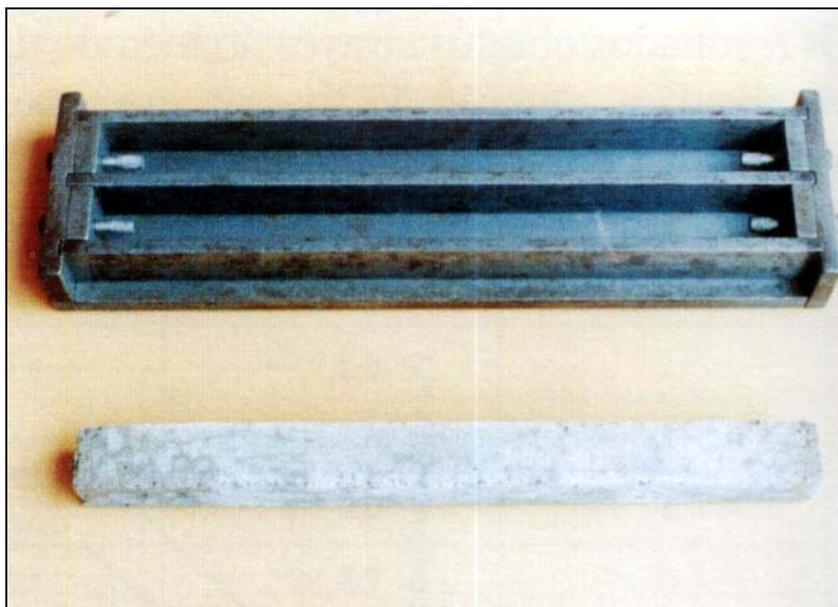


Figura 4. 14 – Fôrma e barra de argamassa

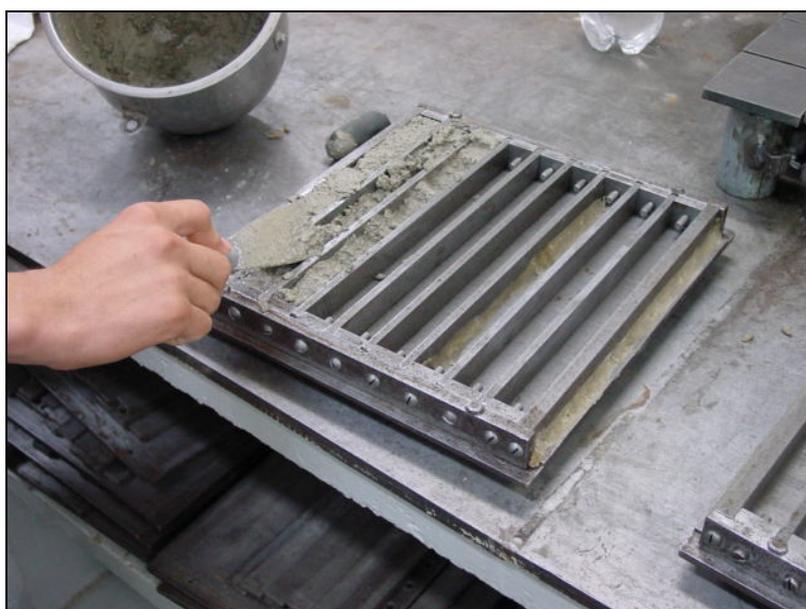


Figura 4. 15 – Moldagem das barras de argamassa

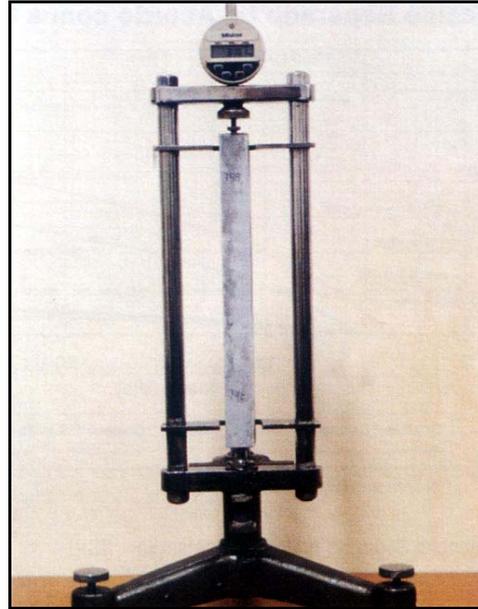


Figura 4. 16 – Equipamento para medição das barras de argamassa

#### 4.6.4 Reatividade com álcalis do cimento

O ensaio de reatividade com álcalis do cimento está baseado na medição do comprimento de barras de argamassa e deve ser realizado aos 14 dias. Este ensaio visa obter a expansão ou a redução dessas barras.

Primeiramente é produzida uma argamassa com o traço em massa de 1:2,25 (cimento : vidro pyrex), que será argamassa de controle; em seguida, produz-se uma outra argamassa, com 25% de substituição do cimento por pó de pedra, em volume absoluto.

A granulometria do vidro pyrex utilizado no ensaio deve estar dentro das especificações mostradas na tabela 4.5.

Tabela 4. 5 – Quantidade de vidro pyrex utilizada

PENEIRAS	%
8	10
16	25
30	25
50	25
100	15

Os procedimentos para a obtenção dos resultados são os seguintes:

- 1) Expansão = [(Leitura Inicial – Leitura Final) / Leitura Inicial] x 100
- 2) Redução de Exp. = [(Exp. do Controle – Exp. do Ensaio 25% subst.) x 100] / Exp. do Controle

#### **4.6.5 Reatividade potencial álcali-agregado**

São vários os métodos usados para se medir a reatividade potencial álcali-agregado. O método utilizado na presente pesquisa foi o Método Acelerado NBRI (Sul-Africano). A escolha por esse tipo de método foi devido ao tempo de ensaio, que são 28 dias, enquanto que outros métodos levam meses ou até anos.

Adotado como procedimento de ensaio pelo National Building Research Institute (NBRI) da África do Sul e normatizado como ASTM C-1260, este método torna possível, em curto prazo, a análise do comportamento dos agregados em face da reatividade potencial, e o estudo para combater uma eventual expansibilidade.

O método consiste basicamente em submeter barras prismáticas moldadas com cimento e com o agregado em análise, por determinado período de tempo, em uma solução a 80°C, de hidróxido de sódio de concentração 1N.

As barras são moldadas com um traço fixo de 1:2,25 (cimento e agregado em frações granulométricas definidas pela NBR 9773), e relação água/cimento igual 0,47 em massa.

As medidas das expansões das barras foram feitas em intervalos de tempo regulares, sendo que a primeira medida, que serve como referência para a determinação dos valores de expansão, é realizada após 24 horas de imersão em água a 80°C. Após essa medição, as barras são imersas em solução de hidróxido de sódio 1N a 80°C, para medições posteriores, que serão realizadas diariamente durante 28 dias consecutivos. Os resultados são expressos em porcentagem de expansão.

A figura 4.17 mostra o recipiente de estocagem contendo a solução de hidróxido de sódio 1N, a 80°C.



**Figura 4. 17 – Recipiente de estocagem das barras**

A norma estabelece que expansões inferiores a 0,1%, aos 16 dias, indicam um comportamento inócuo; expansões superiores a 0,2%, aos 16 dias, indicam expansões potencialmente deletérias. As expansões ocorridas entre os dois limites, aos 16 dias, indicam a possibilidade da presença de agregados que podem ter comportamento inócuo ou deletério.

Nesta etapa do trabalho, além de verificar a reatividade do basalto em estudo, também foi verificado o quanto a fração fina do pó de pedra pode inibir a reação. Para isso, utilizou-se, como um parâmetro de comparação, um basalto já conhecido que apresenta uma reatividade muito grande. Foram feitos os seguintes ensaios:

- 1) Basalto Reativo 100%;
- 2) Basalto Reativo 90% + Finos do pó de pedra 10% ;
- 3) Basalto Reativo 85% + Finos do pó de pedra 15% ;
- 4) Basalto em Estudo 100%;
- 5) Basalto em Estudo 90% + Finos do pó de pedra 10%;
- 6) Basalto em Estudo 85% + Finos do pó de pedra 15%.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios dos materiais utilizados e os resultados de desempenho dos concretos produzidos.

### 5.1 Caracterização dos Materiais

#### 5.1.1 Caracterização do agregado miúdo

A tabela 5.1 mostra os resultados da composição granulométrica da areia natural utilizada em toda a pesquisa.

Tabela 5. 1 – Composição Granulométrica da Areia Natural

PENEIRAS		Abert. mm	Peso Retido (kg)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.					
3"	-	76,1		0,00	0	
-	2 1/2"	64		0,00		0
-	2"	50,8		0,00		0,00
1 1/2"	-	38,1		0,00	0,00	
-	1"	25,4		0,00		0,00
3/4"	-	19		0,00	0,00	
-	1/2"	12,7		0,00		0,00
3/8"	-	9,51		0,00	0,00	
-	1/4"	6,3	0,015	1,13		1,13
N.º 4	-	4,76	0,01	0,75	1,88	
N.º 8	-	2,38	0,054	4,07	5,95	
N.º 16	-	1,19	0,096	7,23	13,18	
N.º 30	-	0,595	0,236	17,77	30,95	
N.º 50	-	0,297	0,628	47,29	78,24	
N.º 100	-	0,149	0,262	19,73	97,97	
fundo	-	0,075	0,027	2,03		100,00
Total			1,328	100		

A figura 5.1 mostra a distribuição granulométrica da areia natural, respeitando as especificações da NBR 7211 para a faixa granulométrica da zona 3.

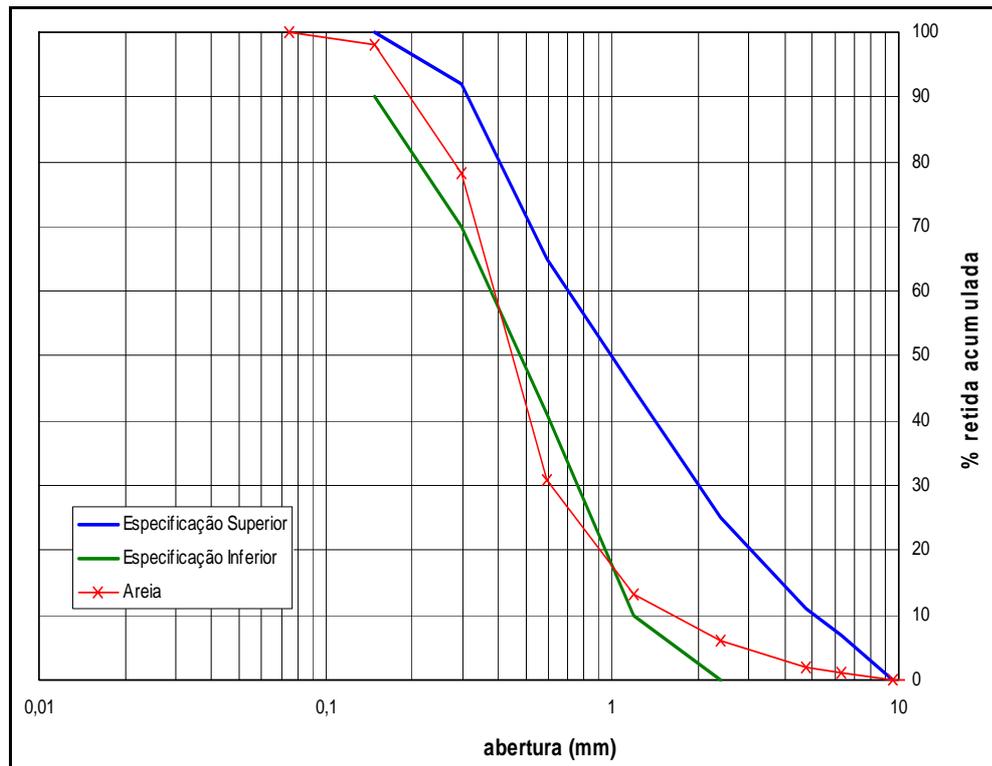


Figura 5. 1 – Distribuição Granulométrica da Areia Natural

De acordo com os limites da NBR 7211, pode-se classificar a areia utilizada como sendo uma areia média (zona 3 de classificação).

A tabela 5.2 mostra os resultados da composição granulométrica do pó de pedra utilizado em toda a pesquisa.

Tabela 5.2 – Composição Granulométrica do Pó de pedra

PENEIRAS		Abert. mm	Peso Retido (kg)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.					
3"	-	76,1		0,00	0	
-	2 1/2"	64		0,00		0
-	2"	50,8		0,00		0,00
1 1/2"	-	38,1		0,00	0,00	
-	1"	25,4		0,00		0,00
3/4"	-	19		0,00	0,00	
-	1/2"	12,7		0,00		0,00
3/8"	-	9,51		0,00	0,00	
-	1/4"	6,3		0,00		0,00
N.º 4	-	4,76		0,00	0,00	
N.º 8	-	2,38	0,04	3,23	3,23	
N.º 16	-	1,19	0,331	26,74	29,97	
N.º 30	-	0,595	0,332	26,82	56,79	
N.º 50	-	0,297	0,21	16,96	73,75	
N.º 100	-	0,149	0,129	10,42	84,17	
fundo	-	0,075	0,196	15,83		100,00
Total			1,238	100		

A figura 5.2 mostra a distribuição granulométrica do pó de pedra, que respeitou as especificações da NBR 7211 para a faixa granulométrica da zona 3.

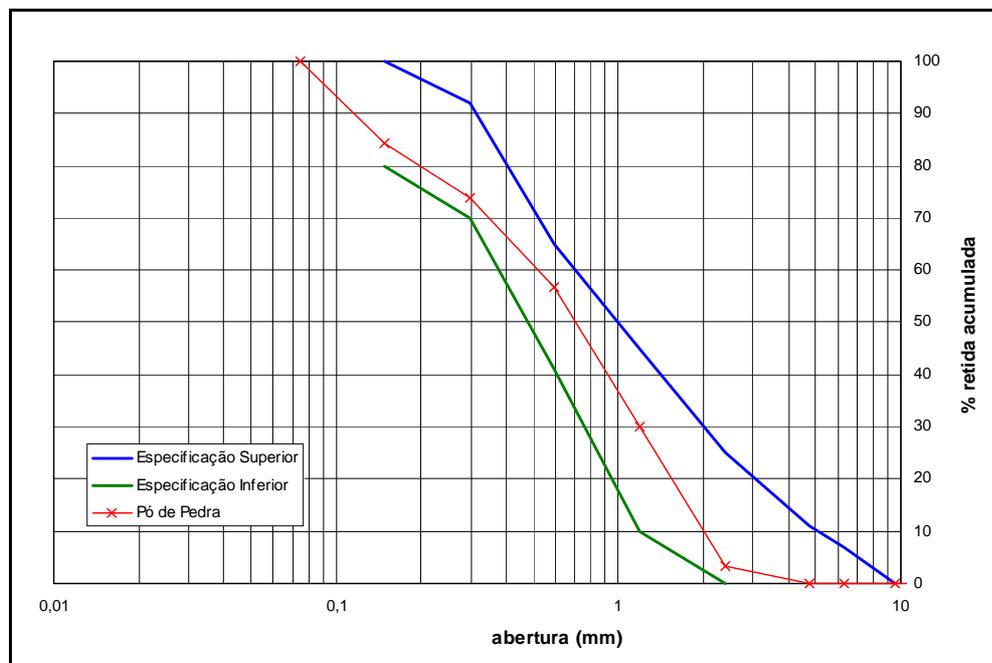


Figura 5.2 – Distribuição Granulométrica do Pó de Pedra

Como se pode observar nas tabelas e nos gráficos apresentados, o pó de pedra possui uma granulometria adequada para o concreto, estando dentro dos limites impostos pela NBR 7211 para zona 3, podendo ser classificado como uma areia média.

Também fizeram parte da caracterização os seguintes ensaios: de massa específica, de material pulverulento, de módulo de finura e de absorção, cujos resultados estão mostrados na tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Resultado das caracterizações realizadas na areia e no pó de pedra**

ENSAIOS	AREIA NATURAL	PÓ DE PEDRA
<b>Diâmetro Máximo (mm)</b>	4,76	2,38
<b>Módulo de Finura</b>	2,29	2,48
<b>Massa Específica s.s.s. (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,655	2,787
<b>Massa Específica Absoluta (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,644	2,751
<b>Massa Específica Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,520	1,491
<b>Pulverulento (%)</b>	0,29	13,60
<b>Absorção (%)</b>	0,39	2,71
<b>Matéria Orgânica</b>	isento	isento

Os resultados apresentados na tabela 5.3 mostram as características físicas tanto da areia como do pó de pedra, e, como esperado, existiram algumas diferenças entre estes materiais. O teor de material pulverulento do pó de pedra mostrou-se acima do permitido pela NBR 7219 - “Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados – Método de Ensaio”, que fixa os valores máximos de material passante na peneira 0,075mm em 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e em 5% para os demais concretos. Estudos realizados mostram que, para o pó de pedra, esse limite pode chegar até 20%, pois estaria aumentando a compactidade e, conseqüentemente, a durabilidade do concreto.

Por se tratar de um material proveniente de britamento e também levando em conta a questão da diminuição do impacto ambiental, aproveitando todo o rejeito sem o descarte da fração inferior a 0,075 mm, optou-se por trabalhar com os 13,60 % de material pulverulento presente no pó de pedra.

Outro fator que o difere da areia é a absorção de água: enquanto a areia natural apresenta uma absorção de 0,29%, o pó de pedra apresenta uma absorção de 2,71%, o que explica a perda de trabalhabilidade devido à presença dos finos.

Com base nos dados apresentados na tabela 5.3, detectou-se a presença de matéria orgânica na areia e no pó de pedra em quantidades inferiores à máxima permitida pela NBR 7220, ou seja, 300ppm.

Outro ensaio de caracterização realizado com o pó de pedra foi o de perda de massa ao fogo, que apresentou uma perda de aproximadamente 2,50%, tanto para a temperatura de 600°C como para 900°C, confirmando, assim, a inexistência de matéria orgânica no material.

Por fim, foi realizado um ensaio que visa obter os componentes químicos existentes no pó de pedra através da difração por raios-x. A tabela 5.4 mostra os componentes químicos presentes na amostra de pó de pedra.

**Tabela 5. 4 – Composição Química do Pó de Pedra por Difração de Raios-X**

Componentes Químicos	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	46,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,80
CaO	12,62
MgO	3,24
Na <sub>2</sub> O	2,70
K <sub>2</sub> O	2,33
TiO <sub>2</sub>	2,28
MnO	0,24
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12
SrO	0,08
RuO <sub>2</sub>	0,05
ZrO <sub>2</sub>	0,03
ZnO	0,02

### 5.1.2 Caracterização granulométrica do agregado graúdo

A tabela 5.5 mostra os resultados da composição granulométrica da brita utilizada em toda a pesquisa. A brita utilizada tem a mesma origem do pó de pedra.

**Tabela 5.5 – Composição Granulométrica do Agregado Graúdo**

PENEIRAS		Abert.	Peso Retido	%	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.	mm	(kg)	Retida		
3"	-	76,1		0	0	
-	2 1/2"	64		0		0
-	2"	50,8		0		0,00
1 1/2"	-	38,1		0	0,00	
-	1"	25,4		0		0,00
3/4"	-	19		0	0,00	
-	1/2"	12,7	4,2	21		21,37
3/8"	-	9,51	6,625	34	55,09	
-	1/4"	6,3	6,3	32		87,15
N.º 4	-	4,76	2,075	11	98,00	
N.º 8	-	2,38	0,45	2	100,00	
N.º 16	-	1,19		0	100,00	
N.º 30	-	0,595		0	100,00	
N.º 50	-	0,297		0	100,00	
N.º 100	-	0,149		0	100,00	
Total			19,65	100		

A brita utilizada em todos os ensaios foi a brita de diâmetro máximo 16 mm, que não aparece na tabela 5.5 por não ter sido usado a peneira referente a essa malha. Pode-se perceber que, na peneira com abertura de 12,7 mm, a porcentagem retida acumulada é bem grande, ou seja, de 21%; já na peneira com abertura de 19 mm não é retido nada, o que mostra que a brita possui um diâmetro máximo de 16 mm.

A tabela 5.6 mostra as características físicas do agregado graúdo utilizado.

Tabela 5. 6 – Características Físicas do Agregado Graúdo

ENSAIOS	AGREGADO GRAÚDO
Diâmetro Máximo (mm)	16
Módulo de Finura	6,53
Massa Específica s.s.s. (g/cm <sup>3</sup> )	2,789
Massa Específica Absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	2,745
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,551
Pulverulento (%)	0,29
Absorção (%)	1,90

## 5.2 Resultados de resistência à compressão e abatimento com relação a/c constante

A tabela 5.7 mostra os valores de resistência à compressão axial alcançados pelos corpos-de-prova aos 7, 28 e 91 dias, bem como o teor de substituição referente à segunda etapa do trabalho, na qual se manteve constante a relação a/c igual a 0,70.

Tabela 5. 7 – Valores de Resistência a Compressão aos 07, 28 e 91 dias

Traço	Teor de Substituição	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Resistência aos 91 dias (MPa)
1	0 %	16,80	18,80	22,00
2	25 %	20,10	21,70	29,10
3	50 %	20,80	24,00	33,10
4	75 %	20,70	28,90	32,30
5	100 %	22,00	31,20	37,40

Para uma melhor visualização e entendimento dos valores explícitos na tabela 5.7, a figura 5.3 mostra os valores agrupados, onde é visível o crescimento de resistência ao longo do tempo.

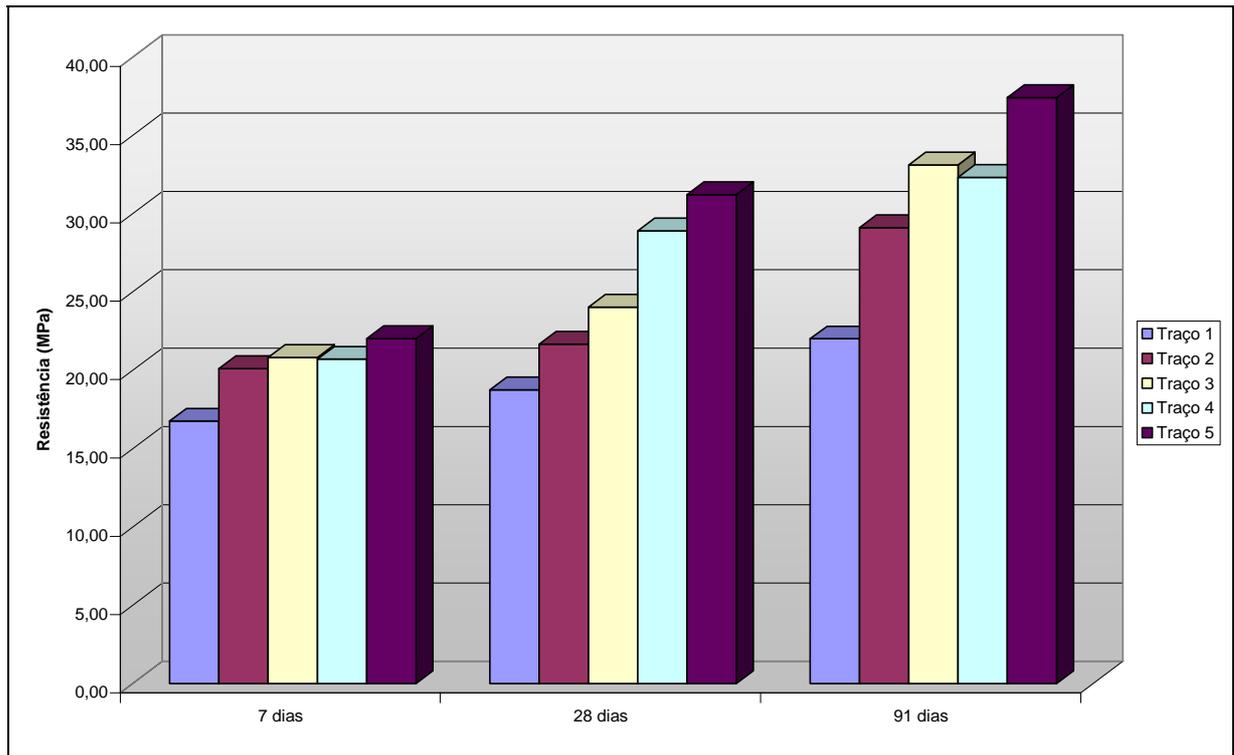


Figura 5.3 – Resistência à Compressão aos 7, 28 e 91 dias.

A figura 5.4 mostra os abatimentos medidos para cada traço, com a relação a/c constante e igual à 0,70.

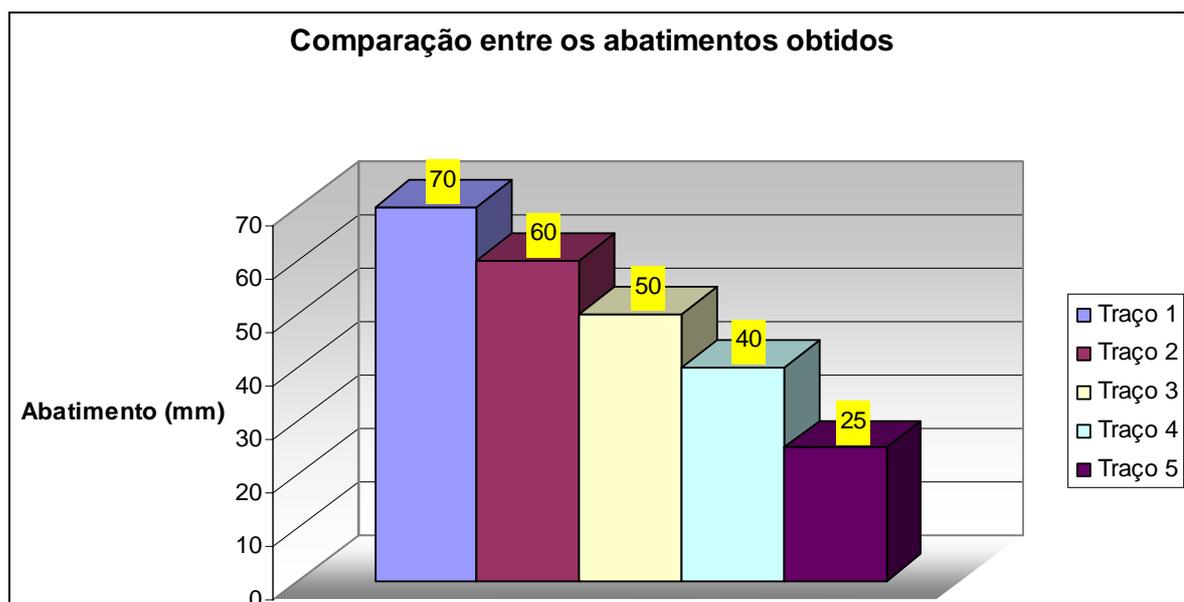


Figura 5.4 – Abatimentos Obtidos e Seus Respectivos Traço

Com base nos dados mostrados acima, observa-se que o traço 5, com 100% de pó de pedra, apresentou, em todas idades, a maior resistência; em contra partida, apresentou um abatimento muito baixo. Essa alta resistência não está associada somente a um abatimento baixo, mas também com a presença dos finos, que proporcionam uma maior compacidade no concreto, diminuindo assim sua porosidade, que o torna mais resistente. O concreto com adição de pó de pedra apresentou um ganho de resistência em todos os traços como mostra a tabela 5.8.

**Tabela 5.8 – Crescimento da Resistência em Relação ao Traço 1**

TRAÇO	07 DIAS	28 DIAS	91 DIAS
1 (Referência)	16,80	18,80	22,00
2	20,10 – Aumento de 19,6 %	21,70 – Aumento de 15,4 %	29,10 – Aumento de 32,1 %
3	20,80 – Aumento de 23,8 %	24,00 – Aumento de 27,6 %	33,10 – Aumento de 50,4 %
4	20,70 – Aumento de 23,20 %	28,90 – Aumento de 53,7 %	35,10 – Aumento de 59,5 %
5	22,00 – Aumento de 30,9 %	31,20 – Aumento de 66,0 %	37,40 – Aumento de 70,0 %

Um fato que se destacou nesta etapa do trabalho foi o alto ganho de resistência com o tempo. Comparando-se o traço 1, que é o traço de referência, ao traço 5, que possui 100% de adição de pó de pedra, percebe-se que a diferença de resistência dos 7 para os 28 dias é significativa. Aos 7 dias, essa diferença está na ordem de 30,9%, aos 28 dias está em 66% e com 91 dias está em 70,0%. Este é um acréscimo relativamente alto, uma vez que foram mantidos constantes o cimento, água e a proporção de argamassa.

A figura 5.5 mostra o desempenho desse acréscimo de resistência, fazendo um comparativo entre as idades de 7, 28 e 91 dias.

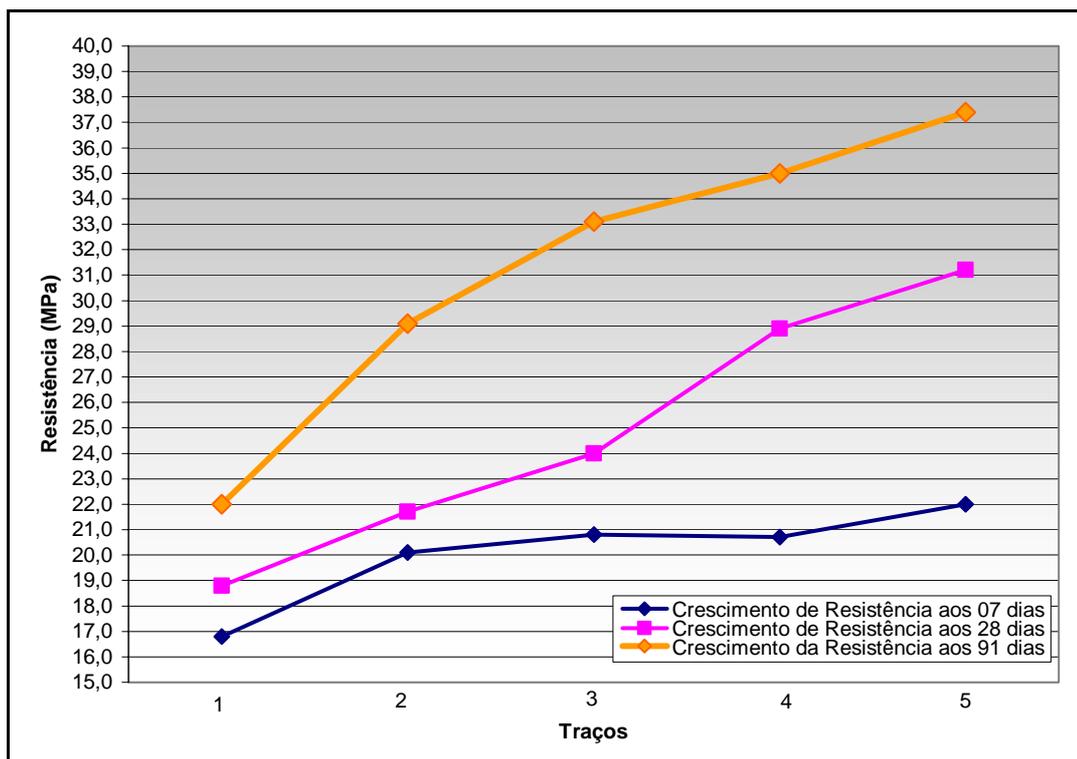


Figura 5.5 – Comparação entre Resistências aos 7, 28 e 91 dias

Como dito anteriormente, a presença de finos no pó de pedra é um fator de grande relevância no que diz respeito à compacidade e conseqüentemente à resistência. Analisando-se a figura 5.5, observa-se claramente que os traços 1, 2 e 3, que possuem 0%, 25% e 50% de substituição de areia por pó de pedra, respectivamente, tiveram um acréscimo de resistência proporcional dos 7 para os 28 dias, enquanto que os traços 4 e 5, que possuem 75% e 100% de substituição, respectivamente, tiveram um ganho maior de resistência aos 28 dias. Esse ganho significativo de resistência do traço 5 aos 28 dias mostra um indício de que a porção inferior a 0,075mm no pó de pedra pode possuir atividade pozolânica, pois um material que apresenta esse tipo de propriedade tem uma perda de resistência aos primeiros dias, aumentando o ganho de resistência com idades superiores. A pozolanicidade da fração fina do pó de pedra foi investigada na quinta etapa deste trabalho.

Para melhor investigação sobre o uso de pó de pedra, foi feito um ensaio de cura ao tempo, onde ficaram expostos ao ar livre e ao sol, sem qualquer proteção, corpos-de-prova referentes ao traço 1 e ao traço 5, que foram moldados conjuntamente com os analisados nesta etapa.

A tabela 5.9 mostra as resistências obtidas dos corpos-de-prova com cura em câmara úmida e com cura ao ar livre aos 28 dias.

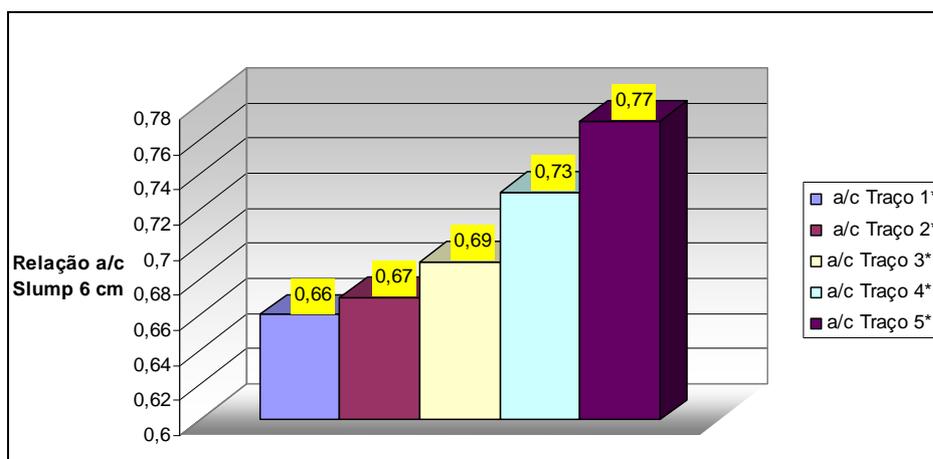
**Tabela 5.9 – Comparação entre as resistências obtidas**

TRAÇO	Resistência (MPa)	
	Câmara Úmida	Ao Ar Livre
1	18,80	16,50
5	31,20	23,80

Nota-se na tabela 5.9 que o traço 5 mesmo curado ao ar livre, ou seja, sem qualquer tipo de cura específica, apresentou resistência superior ao traço 1, curado em câmara úmida. Esse fato é de grande importância, pois, no Brasil, a maioria das pequenas obras não possui qualquer tipo de controle de cura para o concreto, ficando o pedreiro, quando muito, responsável em molhar a superfície desses concretos algumas vezes ao dia. Logo, o concreto com pó de pedra mostra mais uma vantagem, que é alcançar resistências superiores mesmo sem receber qualquer tipo de cura.

### 5.3 Resultados das relações a/c e resistência à compressão com abatimento fixo

A figura 5.6 mostra os valores das relações a/c obtidas com o abatimento pré-fixado em  $6,0 \pm 0,50$ cm.



**Figura 5.6 – Comparação entre as Diferente Relações a/c**

Com base na figura 5.6, observa-se o que já era esperado, ou seja, um aumento na relação a/c com o aumento da proporção de pó de pedra no concreto. Um detalhe que chamou a atenção é que, na etapa anterior, o traço 2, com 25% de substituição e relação a/c constante em 0,70, obteve um abatimento de 6 cm; já nessa segunda etapa, ele apresentou, para o mesmo abatimento de 6 cm, um fator a/c de 0,67. Esse fato deve-se às condições ambientais, que não foram as mesmas nos dois ensaios, uma vez que esses concretos não foram fabricados em salas com controle de temperatura e de umidade, o que pode levar a grandes variações na consistência do concreto.

A tabela 5.10 mostra a perda de abatimento com o tempo, bem como suas respectivas relações a/c.

**Tabela 5. 10 – Perda de Abatimento com o Tempo**

a/c	Perda com o tempo	
	Tempo (min)	Abatimento (cm)
<b>0,66 (traço1*)</b>	0	5,5
	15	5,5
	30	5
	45	4,5
	60	4
<b>0,67 (traço2*)</b>	0	6,0
	15	5,5
	30	4
	45	3
	60	2,5
<b>0,69 (traço3*)</b>	0	6
	15	6
	30	5
	45	4
	60	3
<b>0,73 (traço4*)</b>	0	6,5
	15	6
	30	5
	45	4
	60	3
<b>0,77 (traço5*)</b>	0	6
	15	5,5
	30	4
	45	3
	60	2

A figura 5.7 mostra uma comparação da perda de trabalhabilidade entre os cinco traços analisados.

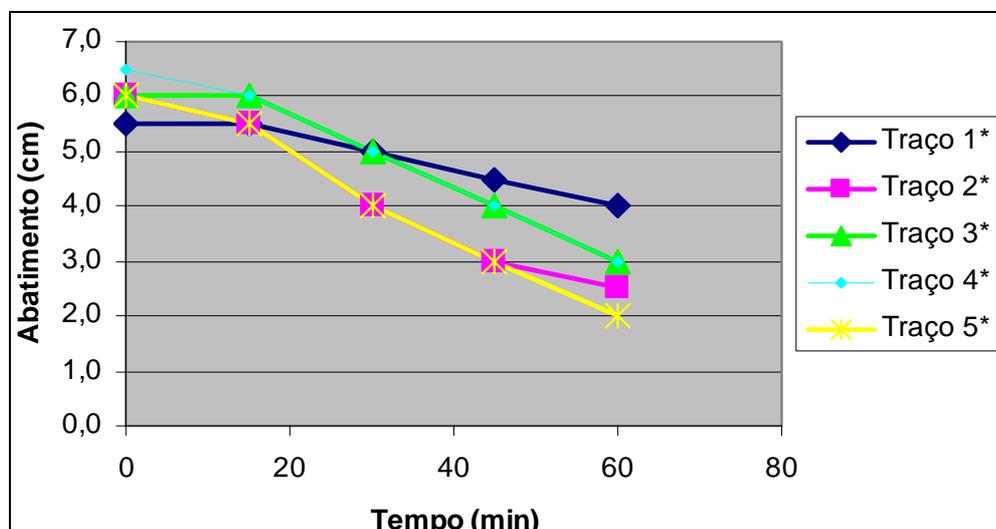


Figura 5. 7 – Perda de Trabalhabilidade com Tempo

De acordo com a figura 5.7, nota-se que o traço 1\*, que é o traço referência, apresentou em sessenta minutos, uma perda de abatimento de 1,5 cm, que equivale a 27,0%; já o traço 5\*, que é o traço com 100% de substituição, apresentou uma perda de abatimento de 4,0 cm, equivalente a 66,0%.

Vale ressaltar que não houve controle de umidade relativa do ar e de temperatura. Por outro lado, os ensaios foram realizados em curto intervalo de tempo, onde as variações, tanto da umidade quanto da temperatura, mantiveram-se próximas, facilitando as comparações dos resultados.

Considerando-se que as perdas de abatimento dependem da temperatura dos materiais e, indiretamente, da temperatura ambiente, além da umidade relativa do ar, supõe-se que os altos valores de umidade que são característicos na região de Ilha Solteira, bem como as temperaturas, em torno de 30°C, também comuns para a região, contribuam para a ocorrência de altos valores de perda de abatimento nos concretos.

Como medida de precaução, considera-se prudente produzir, no caso de concretos pré-misturados com pó de pedra, concretos com abatimentos iniciais mais altos do que os

necessários para a concretagem, a fim de se prevenir contra qualquer tipo de perda de trabalhabilidade significativa.

MEHTA e MONTEIRO (1994) citam ainda a precaução quanto à utilização de cimentos com altos teores de C3A, pois este composto tem pega instantânea e desenvolve altíssimo calor de hidratação.

Além do cuidado que se deve ter com os cimentos que possuem elevados teores de C3S e com os que apresentam alta resistência inicial, deve-se também tomar cuidado com a utilização de aditivos aceleradores de pega.

A tabela 5.11 mostra os valores de resistência à compressão axial alcançados pelos corpos-de-prova aos 7 e 28 dias, bem como o teor de substituição referentes à terceira etapa do trabalho, na qual se manteve constante o abatimento em 6,0cm.

**Tabela 5. 11 – Valores de Resistência à Compressão aos 07, 28 e 91 dias**

<b>Traço</b>	<b>Teor de Substituição</b>	<b>Resistência aos 7 dias (MPa)</b>	<b>Resistência aos 28 dias (MPa)</b>	<b>Resistência aos 91 dias (MPa)</b>
1*	0 %	16,70	22,80	25,10
2*	25 %	18,20	25,90	28,80
3*	50 %	20,40	31,10	34,50
4*	75 %	19,20	28,50	33,30
5*	100 %	19,50	28,60	31,70

Para uma melhor visualização e entendimento dos valores mostrados na tabela 5.11, a figura 5.8 mostra os valores agrupados, onde é visível o crescimento de resistência ao longo do tempo.

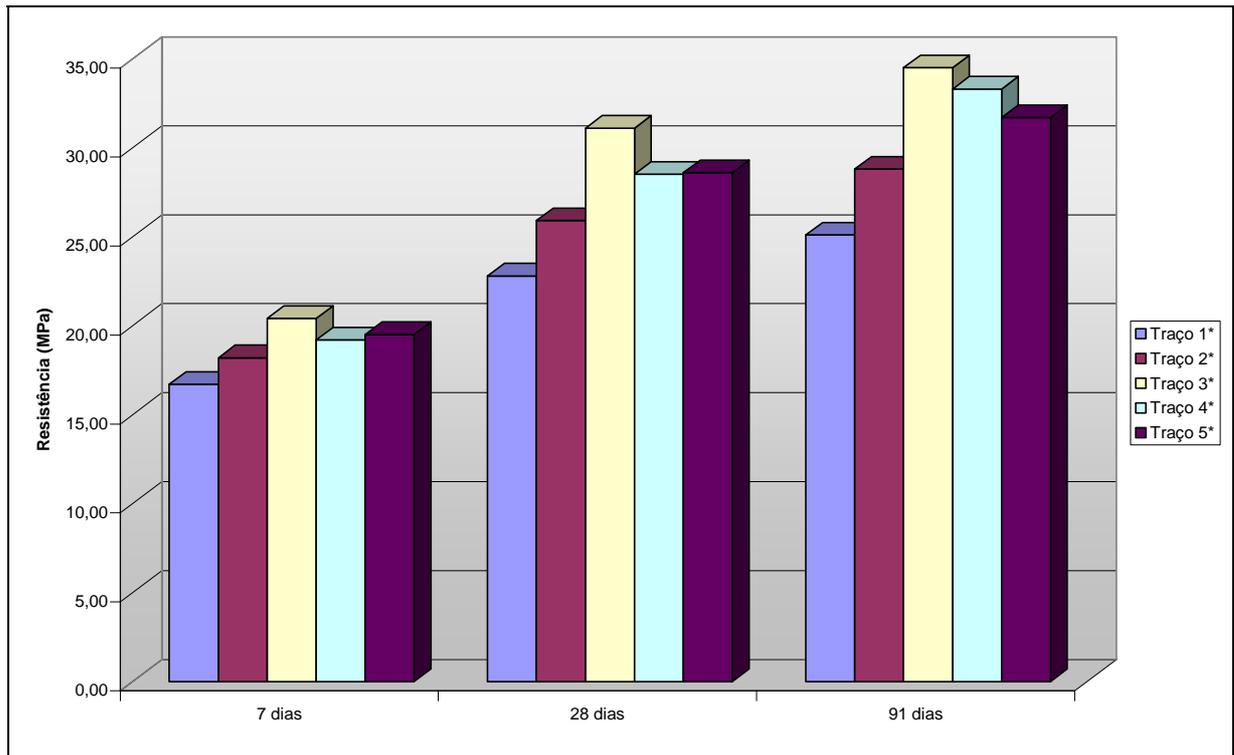


Figura 5. 8 – Resistência a Compressão aos 07, 28 e 91 dias

Tabela 5. 12 – Crescimento da Resistência em Relação ao Traço 1\*

TRAÇO	07 DIAS	28 DIAS	91 DIAS
1* (Referência)	16,70	22,80	25,10
2*	18,20 – Aumento de 9,0 %	25,90 – Aumento de 13,6 %	28,80 – Aumento de 14,8%
3*	20,40 – Aumento de 22,1 %	31,10 – Aumento de 36,4 %	34,50 – Aumento de 37,4 %
4*	19,20 – Aumento de 15,0 %	28,50 – Aumento de 25,0 %	33,30 – Aumento de 32,7 %
5*	19,50 – Aumento de 16,7 %	28,60 – Aumento de 25,4 %	31,70 – Aumento de 26,3 %

Novamente, pode-se observar que os concretos com pó de pedra apresentaram um alto ganho de resistência com o tempo. Mesmo para o traço 5\*, que apresentou uma relação a/c maior que a relação a/c relativa ao traço 1\*, observou-se um acréscimo de resistência maior. Este aumento de resistência com o tempo pode estar indicando que o pó de pedra fornece ao concreto maior compacidade e também pode indicar que os finos presentes neste material podem possuir propriedades pozolânicas.

A figura 5.9 mostra o ganho de resistência com o tempo para os traços analisados.

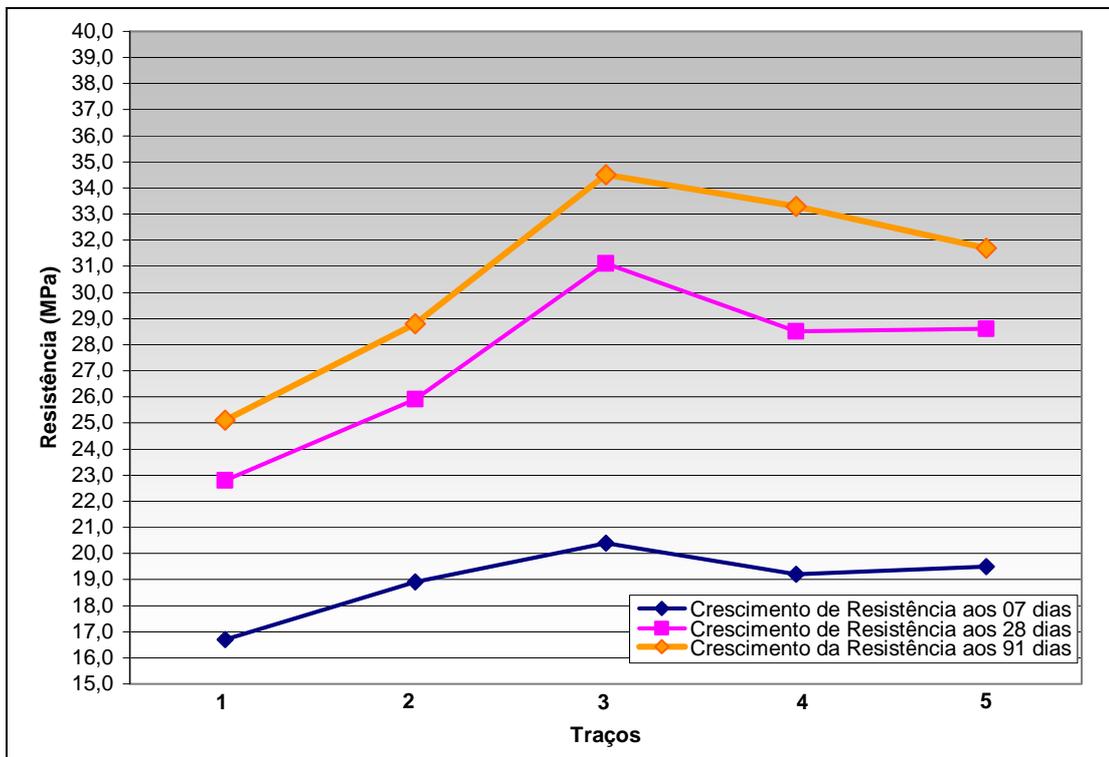


Figura 5. 9 - Comparação entre as Resistências aos 7 e 28 dias

A tabela 5.13 mostra o consumo de cimento dos traços com abatimentos definidos em  $6\pm 0,50$  cm.

Tabela 5. 13 – Consumo relativo de cimento por  $m^3$

Traços	1*	2*	3*	4*	5*
Consumo (kg)	307	309	310	311	312

Com os dados da tabela 5.13, nota-se que o consumo de cimento cresce de maneira linear com aumento da porcentagem de substituição da areia por pó de pedra. Este fato se deve à necessidade de uma maior demanda de água para os concretos com pó de pedra, para se possa obter uma melhor trabalhabilidade, ocorrendo, assim, um aumento da relação a/c de 0,66 do traço 1\* para 0,77 do traço 5\*.

#### 5.4 Resultado dos concretos dosados com teor ideal de argamassa

Depois de efetuada toda a sistemática imposta pelo método de dosagem IPT/EPUSP para a determinação do teor ideal de argamassa, obteve-se um teor ótimo de argamassa para o concreto produzido com pó de pedra de 55%. O concreto obtido com esse teor de argamassa estava com uma ótima coesão e sem desprendimento dos agregados graúdos, o que indica que 55% é o teor de argamassa ideal para esse tipo de concreto. A partir desse valor e com o abatimento de tronco de cone fixo em  $7\pm 1$  cm, foram elaborados os traços de concreto para os quais foram montados os diagramas de dosagem.

##### 5.4.1 Concreto dosado com pó de pedra

Para a obtenção do diagrama de dosagem foram realizados 4 traços: 1:3,5 (:Traço Rico), 1:5 (Traço Normal), 1:6,5 (Traço Pobre) e 1:8,5 (Traço Auxiliar). O traço auxiliar, como o próprio nome diz, foi um traço elaborado para auxiliar na construção do diagrama de dosagem, uma vez que se entende, por traço pobre (1:6,5), aqueles que proporcionem resistências da ordem de 15 MPa. No entanto, como o traço pobre, feito com pó de pedra, apresentou resistência da ordem de 22 MPa, bem superior a 15 MPa, optou-se por se fazer mais um outro traço que atingisse uma resistência de aproximadamente 15MPa. Deste modo, com os resultados obtidos, ter-se-iam resistências desde 15MPa até aproximadamente 40MPa, que são as resistências mais usuais no meio concreteiro.

A tabela 5.14 mostra os valores das resistências aos 7, 28 e 91 dias do concreto dosado com 100% de pó de pedra e com teor de argamassa de 55%.

**Tabela 5. 14 – Resistência à compressão axial do concreto dosado com pó de pedra**

Traço	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Resistência aos 91 dias (MPa)
1:3,5	29,60	36,30	39,30
1:5,0	22,10	25,90	30,60
1:6,5	15,90	22,60	28,10
1:8,5	9,30	13,60	16,30

A figura 5.10 mostra os resultados da tabela 5.14 agrupados em forma de colunas.

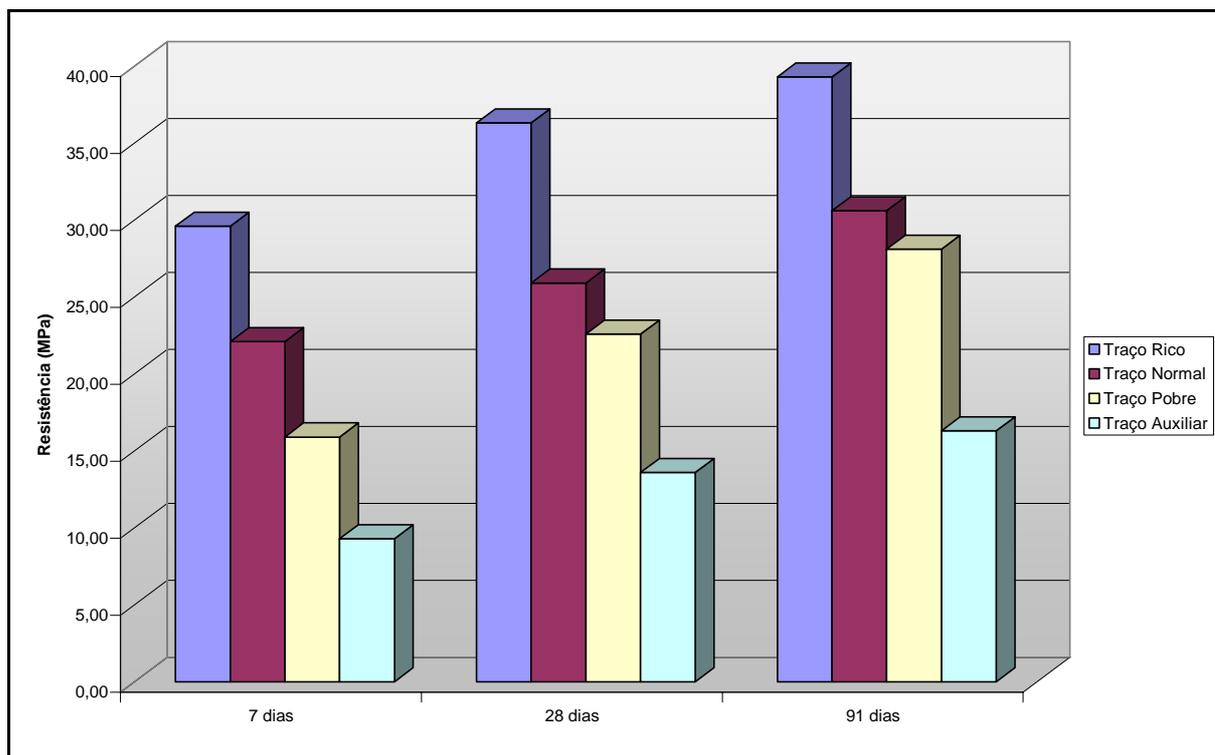


Figura 5.10 – Valores das resistências aos 7, 28 e 91 dias para o concreto com pó de pedra

A tabela 5.15 mostra um dado muito interessante, que foi o alto ganho de resistência dos traços mais pobres, 1:6,5 e 1:8,5, em relação aos traços mais ricos, com relação à idade.

Tabela 5.15 – Porcentagens de resistência à compressão alcançadas aos 7 e 91 dias, em relação aos 28 dias

Traço	Idade (Dias)	Resistência Média (MPa)	Porcentagem de resistência em relação à 28 dias (%)
1:3,5	7	29,60	81,5
	28	36,30	100
	91	39,30	108,2
1:5,0	7	22,10	85,3
	28	25,90	100
	91	30,60	118,1
1:6,5	7	15,90	70,3
	28	22,60	100
	91	28,10	124,3
1:8,5	7	9,30	68,4
	28	13,60	100
	91	16,30	119,8

Como se pode observar, o concreto dosado com pó de pedra apresentou um crescimento significativo de resistência dos 7 dias para os 28 dias, nos traços mais pobres, sendo da ordem de 31,6% para o traço 1:8,5.

A figura 5.11 mostra as relações a/c obtidas na confecção do concreto dosado com pó de pedra, com um abatimento fixo em  $6\pm 1$  cm.

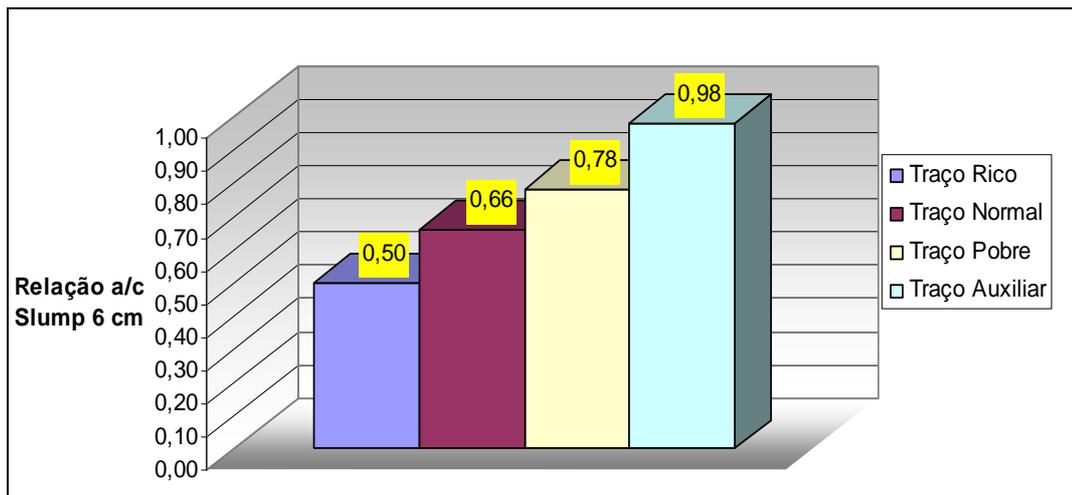


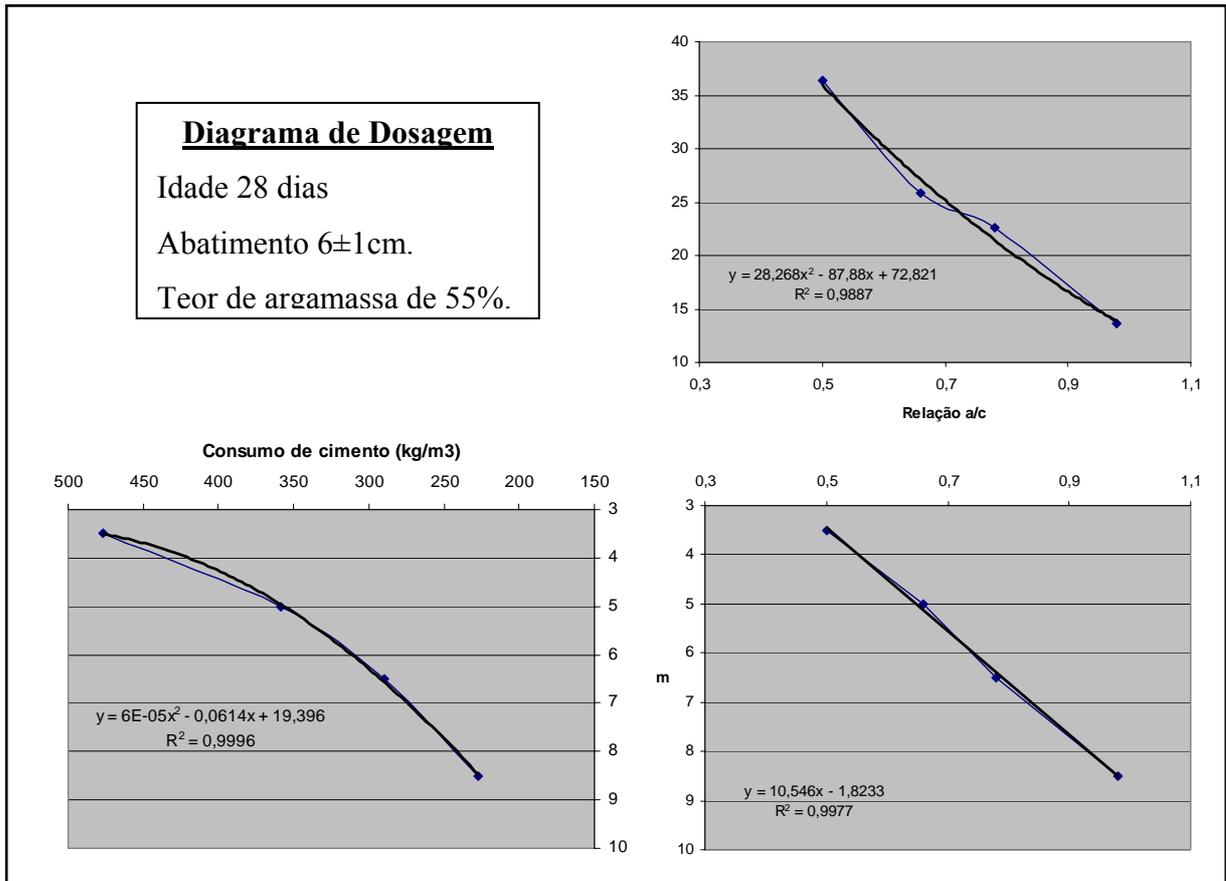
Figura 5. 11 – Relações a/c obtidas no concreto dosado com pó de pedra

Os consumos de cimento por  $m^3$  e a massa específica de cada traço do concreto, dosado com pó de pedra, e seus respectivos módulos de deformação são mostrados na tabela 5.16.

Tabela 5. 16 – Consumo de cimento, massa específica e módulo de deformação do concreto com pó de pedra

Traço	Consumo de Cimento ( $kg/m^3$ )	Massa Específica ( $kg/m^3$ )	Módulo de Deformação (MPa)
1:3,5	477,10	2385,5	33847
1:5,0	358,50	2387,7	32704
1:6,5	289,67	2398,5	31752
1:8,5	227,50	2417,7	28511

Com os dados de resistência aos 28 dias, relação água/cimento e consumo de cimento por  $m^3$ , deu-se procedimento à construção do diagrama de dosagem, que é composto pela curva de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinari.



**Figura 5.12 – Diagrama de dosagem para o concreto amassado com pó de pedra**

Com base no diagrama de dosagem da figura 5.12, pode-se obter traços de concretos com resistências variando desde aproximadamente 14 a 36 MPa, para concretos dosados com pó de pedra. Ao final do capítulo está mostrado um exemplo numérico onde se pré determinou uma resistência e obteve-se um traço para cada tipo de dosagem, sendo uma feita com pó de pedra, outra com areia natural e uma última com pó de pedra adicionando-se aditivo plastificante.

#### 5.4.2 Concreto dosado com areia natural

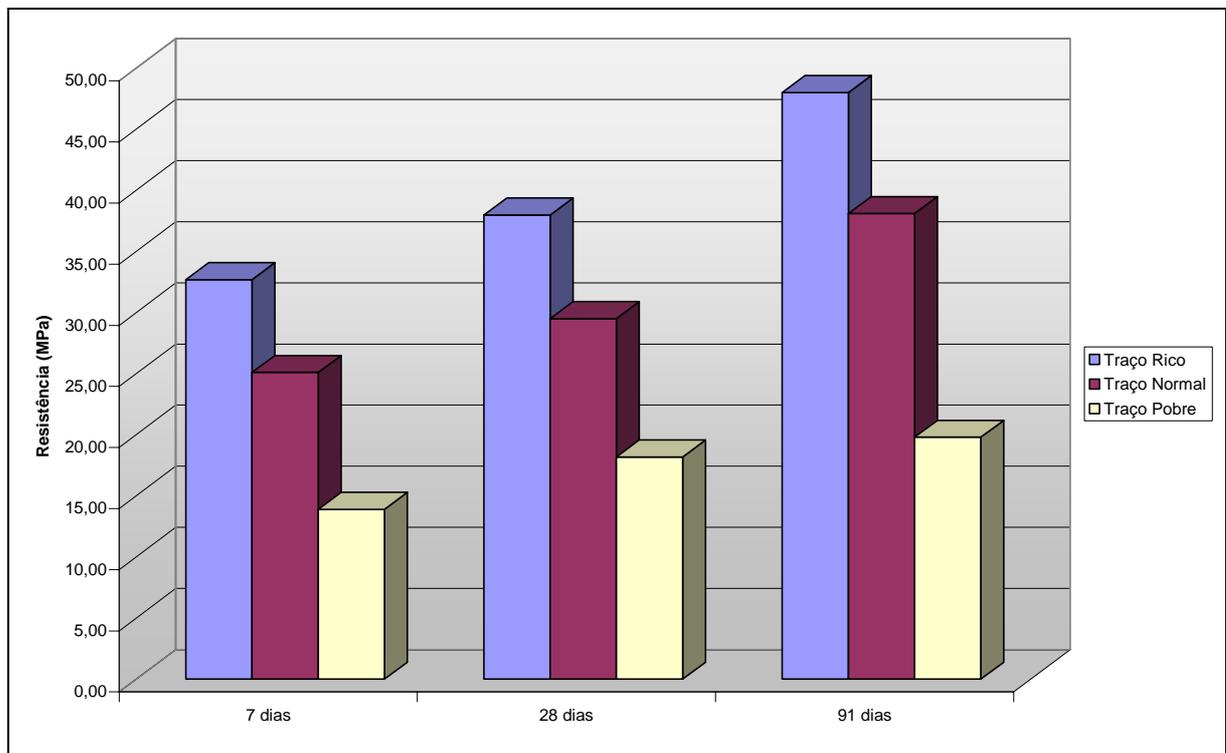
Para o concreto dosado com areia natural, também se utilizou um teor de argamassa de 55%, tendo-se, como objetivo, poder compará-lo com o concreto dosado com pó de pedra. Foram realizados 3 traços para a confecção das curvas do diagrama de dosagem, sendo estes: 1:3,5 (Traço Rico), 1:5 (Traço Normal), 1:6,5 (Traço Pobre). Não foi necessário realizar um traço

auxiliar porque o traço 1:6,5 apresentou uma resistência próxima de 15 MPa, como mostra a tabela 5.17.

**Tabela 5.17 – Resistência à compressão axial do concreto dosado com areia natural**

Traço	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Resistência aos 91 dias (MPa)
1:3,5	13,90	18,20	19,80
1:5,0	25,10	29,50	38,10
1:6,5	32,70	38,00	48,00

A figura 5.13 mostra os valores da tabela 5.17, agrupados em forma de colunas.



**Figura 5.13 – Valores agrupados das resistências aos 7, 28 e 91 dias para o concreto com areia natural**

A figura 5.14 mostra as relações a/c do concreto dosado com areia natural.

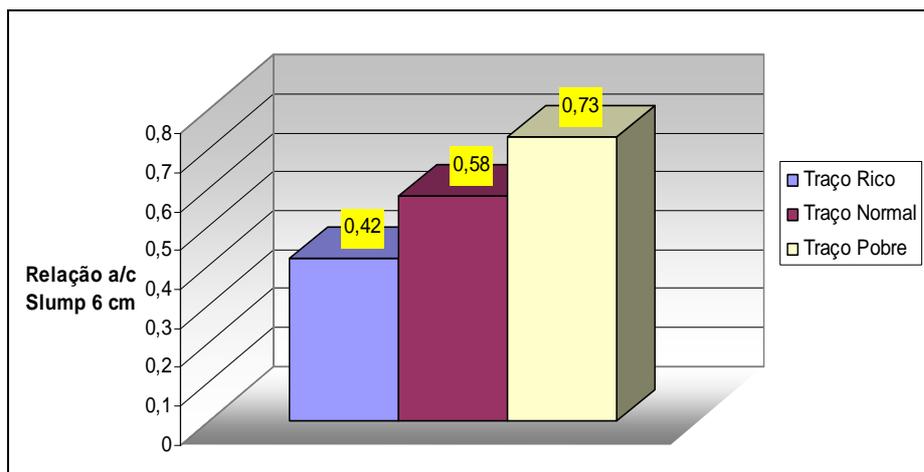


Figura 5. 14 – Relações a/c obtidas no concreto com areia natural

Para que se possa realizar uma analogia entre os ganhos de resistência do concreto dosado com pó de pedra e o concreto dosado com areia natural, a tabela 5.18 mostra as porcentagens de resistências em relação aos 28 dias do concreto dosado com areia natural.

Tabela 5. 18 - Porcentagens de resistência à compressão alcançadas aos 7 e 91 dias, em relação aos 28 dias

Traço	Idade (Dias)	Resistência Média (MPa)	Porcentagem de resistência em relação à 28 dias (%)
1:3,5	7	32,70	86,0
	28	38,00	100
	91	48,00	126,3
1:5,0	7	25,10	85,0
	28	29,50	100
	91	38,10	129,1
1:6,5	7	13,90	76,40
	28	18,20	100
	91	19,80	108,8

Com base nos dados apresentados na tabela 5.18, pode-se concluir que, para os traços mais pobres, o pó de pedra mostrou-se mais eficiente que a areia natural; por exemplo, para o traço 1:6,5, o concreto dosado com areia natural apresentou, aos 7 dias, uma resistência equivalente a 76,40% daquela que seria obtida aos 28 dias; já o pó de pedra apresentou, para o mesmo traço, aos 7 dias, uma resistência equivalente a 70,30%. Para idades mais avançadas, como, por exemplo, 91 dias, o concreto com pó de pedra apresentou um ganho bem maior que o concreto com areia, sendo este da ordem de 8% e aquele da ordem de 24%, em relação aos 28

dias. Esses dados mostram que a fração fina do pó de pedra que atua na mistura pode ter propriedades pozolânicas.

Para se ter uma comprovação mais eficiente da função dos finos em relação à resistência dos concretos dosados com pó de pedra, foi realizado um traço com pó de pedra, mas sem a presença da fração fina corresponde à peneira #200, retirada por meio de peneiramento. A tabela 5.19 mostra os resultados obtidos para o concreto dosado sem a presença de finos.

**Tabela 5. 19 – Resultado das resistência e relação a/c do concreto sem finos**

Traço	Relação a/c	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Resistência aos 91 dias (MPa)
1:6,5	0,87	13,90	18,20	19,80

Como se pode observar, o concreto produzido sem a presença de finos apresentou resistências inferiores em relação ao concreto produzido com finos. No concreto sem finos, a resistência aos 7 dias foi equivalente a 76,4% em relação aos 28 dias e a resistência aos 91 dias teve um crescimento de apenas 8%, que é o equivalente ao crescimento obtido para a areia natural. Outro fato que mostrou a eficiência da presença de finos foi a relação a/c, que foi da ordem de 0,87, enquanto que o concreto com finos apresentou uma relação a/c de 0,78, que é 10,4% menor, demonstrando assim que a fração fina aumenta a trabalhabilidade e a coesão do concreto.

A tabela 5.20 mostra os valores do consumo de cimento por m<sup>3</sup>, massa específica e módulo de deformação dos concretos dosados com areia natural.

**Tabela 5. 20 – Consumo de cimento, massa específica e módulo de deformação do concreto com areia natural**

Traço	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Deformação (MPa)
1:3,5	490,80	2394,0	41912
1:5,0	362,30	2379,8	36301
1:6,5	288,90	2345,5	29258

Com os dados das resistências à compressão, relações a/c e consumos de cimento, montaram-se as curvas características do diagrama de dosagem para o concreto dosado com areia natural.

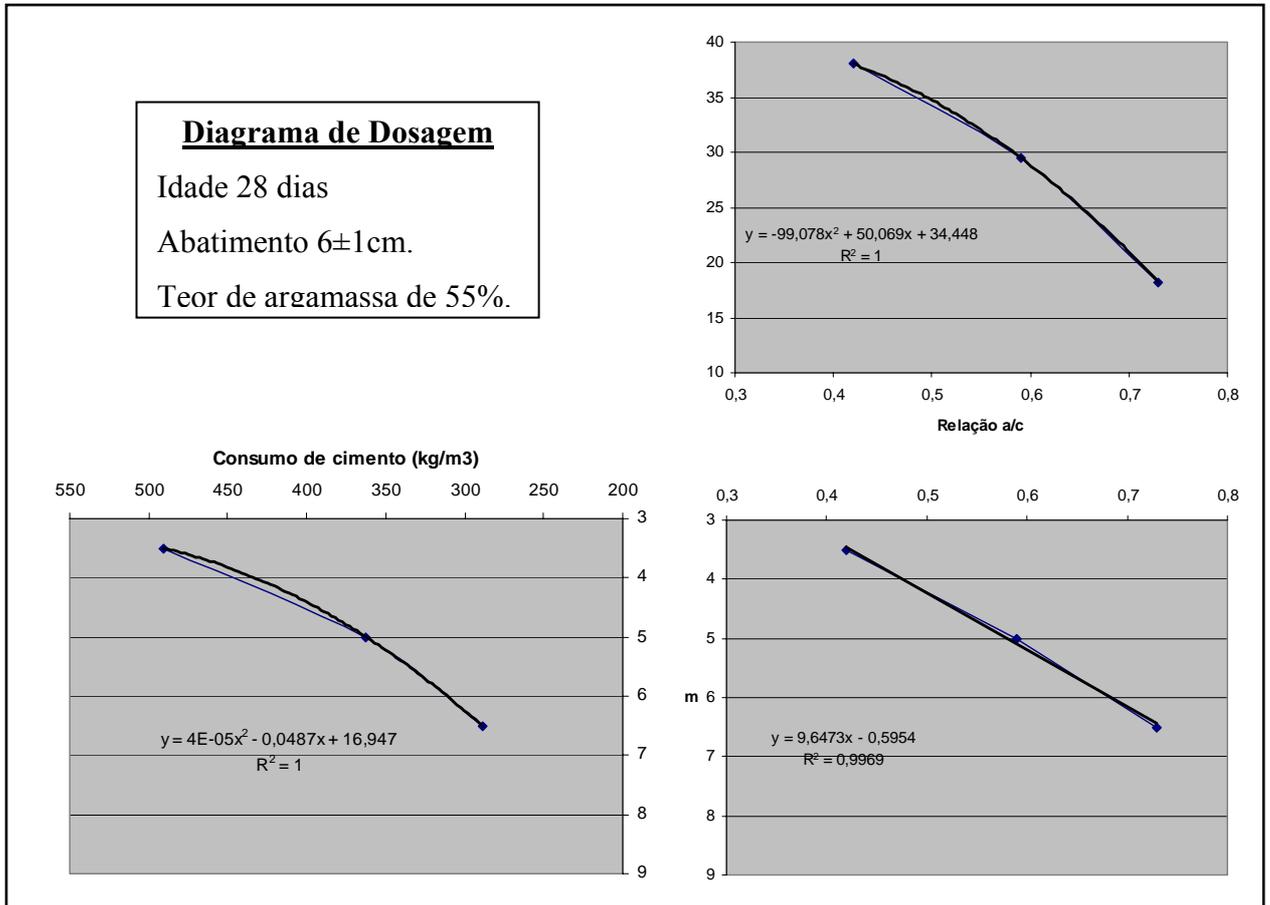


Figura 5. 15 – Diagrama de dosagem para o concreto amassado com areia natural

### 5.4.3 Concreto dosado com uso de aditivo plastificante e pó de pedra

Para a obtenção do diagrama de dosagem do concreto com aditivo plastificante e pó de pedra, utilizaram-se 4 traços: 1:3,5 (:Traço Rico), 1:5 (Traço Normal), 1:6,5 (Traço Pobre) e 1:8,5(Traço Auxiliar).

A tabela 5.21 mostra os valores das resistências aos 7, 28 e 91 dias do concreto dosado com aditivo plastificante e pó de pedra, com teor de argamassa de 55%.

Tabela 5. 21 – Resistência à compressão axial do concreto com pó de pedra e aditivo

Traço	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Resistência aos 91 dias (MPa)
1:3,5	34,50	41,70	46,70
1:5,0	24,60	29,80	34,80
1:6,5	18,20	25,60	31,70
1:8,5	12,30	19,00	22,90

A figura 5.16 mostra os valores da tabela 5.21 agrupados em forma de coluna para uma melhor visualização.

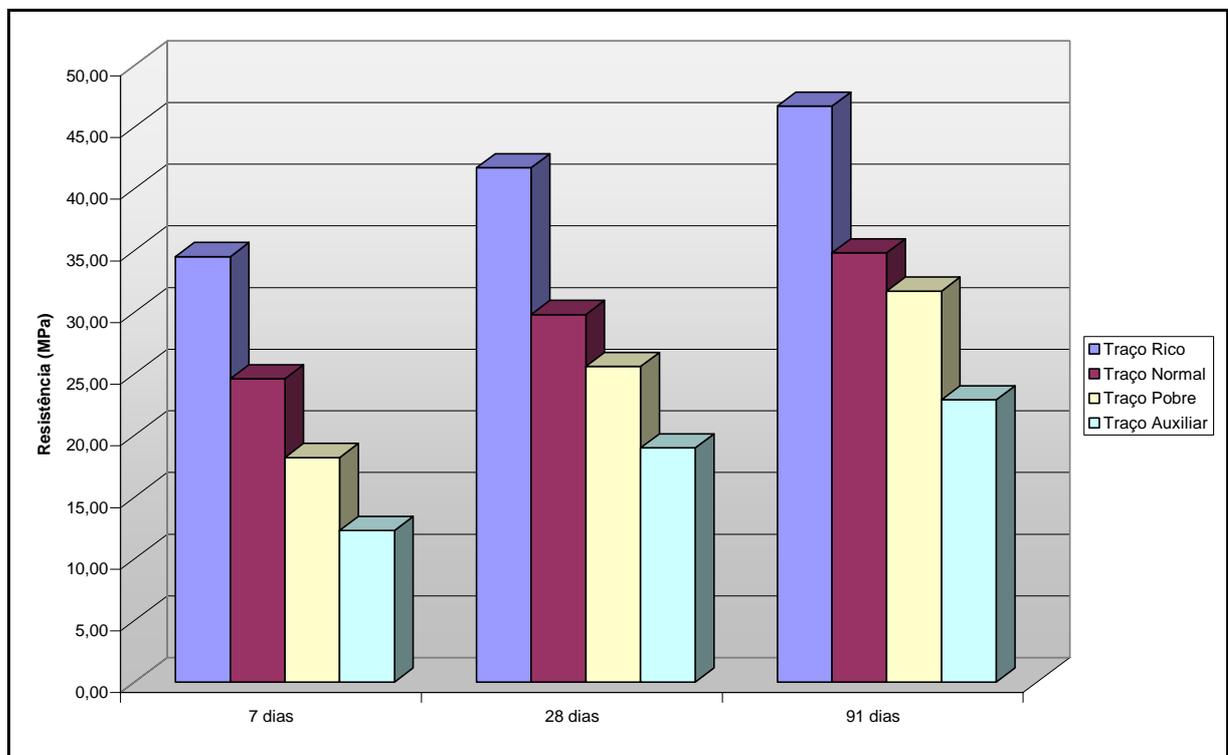


Figura 5. 16 – Valores agrupados das resistências aos 7, 28 e 91 dias para o concreto aditivado com pó de pedra

A figura 5.17 mostra as relações a/c obtidas do concreto dosado com aditivo plastificante e pó de pedra.

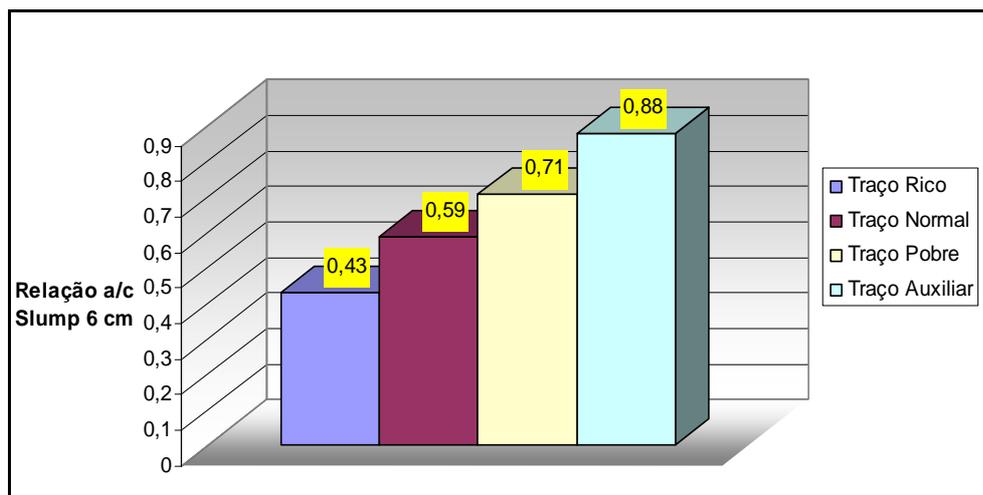


Figura 5. 17 – Relações a/c obtidas no concreto com pó de pedra e aditivo

O comportamento do concreto dosado com o auxílio de aditivo plastificante foi praticamente o mesmo que no concreto sem a utilização do mesmo, como mostra a tabela 5.22.

Traço	Idade (Dias)	Resistência Média (MPa)	Porcentagem de resistência em relação à 28 dias (%)
1:3,5	7	34,50	82,70
	28	41,70	100
	91	46,70	111,0
1:5,0	7	24,60	82,50
	28	29,80	100
	91	34,80	116,7
1:6,5	7	18,20	71,0
	28	25,60	100
	91	31,70	123,8
1:8,5	7	12,30	64,7
	28	19,00	100
	91	22,90	120,5

Com a utilização do aditivo plastificante foi possível reduzir a quantidade de água de amassamento do concreto em aproximadamente 14%, para todos os traços. Com isso, observou-se um ganho de resistência de aproximadamente 15 %, exceto para o traço 1:8,5 que teve um ganho de resistência em torno de 38%.

A tabela 5.22 mostra o consumo de cimento bem como a massa específica do concreto dosado com aditivo plastificante.

Tabela 5. 22 – Consumo de cimento e massa específica do concreto com aditivo e com pó de pedra

Traço	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
1:3,5	493,70	2399,3
1:5,0	366,13	2401,1
1:6,5	294,4	2431,0
1:8,5	232,84	2429,7

A figura 5.18 mostra as curvas de Abrams, Lyse e Molinari que compõem o diagrama de dosagem do concreto dosado com aditivo plastificante e pó de pedra.

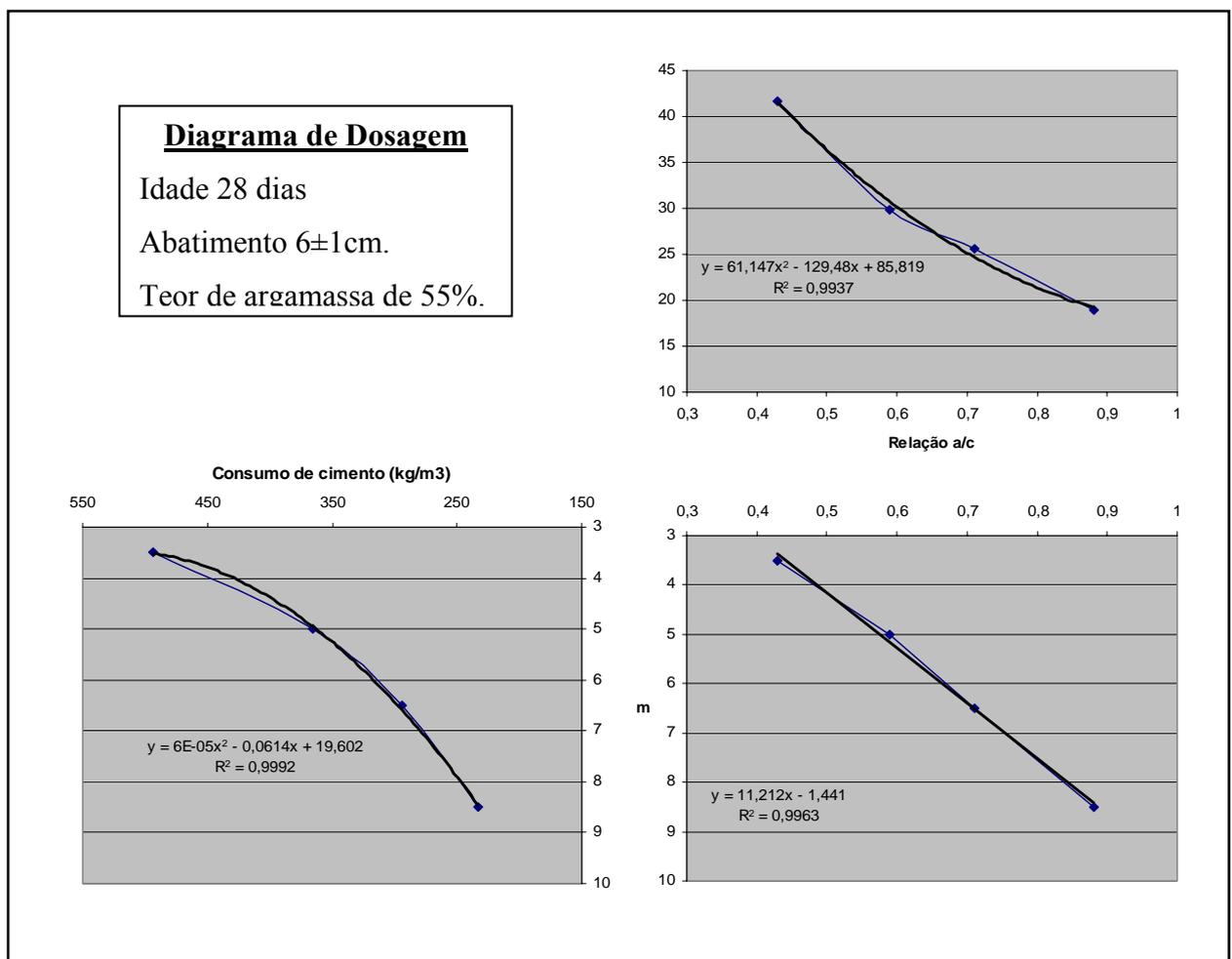


Figura 5. 18 – Diagrama de dosagem para o concreto amassado com aditivo plastificante e pó de pedra

O principal objetivo de um diagrama de dosagem é facilitar a obtenção de um traço para uma determinada resistência, desde que esta se enquadre dentro da faixa de resistências determinadas pelo mesmo. No presente trabalho, optou-se pela obtenção de um diagrama de dosagem que englobasse resistências que variassem de aproximadamente 15 MPa até em torno de 40 MPa. Esta faixa de resistência é a mais utilizada comercialmente em todo o país.

Como exemplo, pode-se fazer uma analogia entre os diagramas de dosagem para os três tipos de concretos produzidos. Para se fazer essa analogia, determinou-se uma resistência de 20 MPa e calculou-se o traço teórico, com seu respectivo consumo de cimento. Destaca-se, no entanto, que para se ter a comprovação do mesmo, seria necessário produzi-lo e analisar suas características, sendo, necessário, às vezes, um pequeno ajuste.

Para uma resistência de 20MPa, foram obtidos os resultados mostrados na tabela 5.23.

**Tabela 5. 23 – Comparativo entre os concretos com resistência fixada em 20MPa**

<b>Concretos</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Agregado (m)</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Areia natural	0,71	6,3	300
Pó de pedra	0,82	6,8	280
Aditivado com pó de pedra	0,85	8,2	235

Como se pode notar na tabela 5.23, o concreto dosado com pó de pedra apresentou uma economia no consumo de cimento, para uma resistência de 20 MPa, de aproximadamente 20 kg de cimento, o que equivale, em termos percentuais, a uma redução de 7%. Já para o concreto produzido com a utilização de aditivo plastificante, a redução foi ainda mais significativa, chegando a 65 kg, que, em termos percentuais, representa uma redução de 22%.

Nota-se que o concreto dosado com pó de pedra apresenta resultados satisfatórios para concretos com um teor de agregados acima de 6, ou seja, concretos pobres em consumo de cimento.

Conforme os dados já apresentados na tabela 5.10, o concreto com pó de pedra apresenta uma perda de trabalhabilidade com o tempo. Em virtude desse fato, foi realizado, para o traço 1:8,5, referente ao concreto com aditivo plastificante, um teste que visou obter a perda de abatimento com o tempo. Constatou-se, neste teste, uma perda significativa de trabalhabilidade. Em duas horas, o concreto dosado com o aditivo plastificante possuía um abatimento de 1,5 cm. Adicionou-se água até que o abatimento voltasse ao valor inicial de  $6\pm 1$  cm. A tabela 5.24 mostra os valores obtidos na redosagem do concreto.

**Tabela 5. 24 – Resultado da resistência e relação a/c do concreto redosado**

<b>Traço</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Resistência 28 dias (MPa)</b>
1:8,5	0,98	17,50

Baseado na tabela 5.24, observa-se que o concreto, após a adição de água para retornar ao seu abatimento inicial, obteve uma relação a/c de 0,98, que equivale ao concreto sem a utilização de aditivos, observando-se um aumento no consumo de água da ordem de 14%. Já a resistência aos 28 dias apresentou uma queda de aproximadamente 7,5% em relação à resistência inicial, enquanto que o mesmo concreto dosado sem aditivo plastificante apresentou a mesma relação a/c de 0,98, mas uma resistência aos 28 dias de 13,60 MPa, que significa, em relação ao concreto com aditivo, uma redução de 20% .

Essa pequena perda de resistência apresentada pelo concreto redosado deve-se à alta absorção de água pelos agregados, em especial pelo pó de pedra, que, ao absorver água, reduz a quantidade de água de amassamento, reduzindo, deste modo, a trabalhabilidade do mesmo. Devido a essa absorção por parte dos agregados, torna-se possível uma redosagem sem grandes perdas de resistência.

## 5.5 Resultado dos ensaios de durabilidade

### 5.5.1 Resultado do ensaio de pozolanicidade da fração fina do pó de pedra

A tabela 5.25 mostra os valores obtidos nos ensaios de pozolanicidade, bem como as especificações da NBR-12653, que estabelece as exigências químicas e físicas para que um material possa ser considerado pozolânico.

Tabela 5. 25 – Resultados dos ensaios de pozolanicidade e exigências da NBR-12653

Propriedades	Resultados dos Ensaios	Exigências da NBR - 12653
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	76,29%	mín.70,0%
Perda ao Fogo	2,50%	máx.10,0%
Índice de atividade pozolânica:		
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	61,3%	mín.75%
- com a cal aos 7 dias,	0,70 MPa	mín. 6,0 MPa
- água requerida	104,60%	máx.115%
Aumento na retração por secagem de barras a 28 dias	0,008%	máx.0,05%
Reatividade com álcalis do cimento (%):		
- expansão da argamassa a 14 dias	0,106%	máx. 0,020%
- redução da expansão da argamassa a 14 dias	57,10%	mín.75%

Conforme pode ser observado na tabela 5.25, o pó de pedra não se enquadrou em todos os itens especificados pela NBR 12653. Deste modo, o pó de pedra não pode ser classificado como sendo um material pozolânico. Como exemplo, tem-se que, com relação ao índice de atividade pozolânica com cimento, o pó de pedra apresentou um valor de 61,3%, que está abaixo do mínimo estabelecido pela NBR 12653. Vale salientar, no entanto, que várias pozolanas comerciais apresentam valores em torno de 65% e são utilizadas em grande escala.

No item 5.5.2, mostrado a seguir, são mostrados os resultados dos ensaios de reatividade potencial álcali-agregado. Nestes ensaios, a fração fina do pó de pedra foi usada para inibir a reação de um agregado reativo, em porções de 10% e de 15%.

Com todo esse embasamento, conclui-se que a fração fina do pó de pedra pode possuir uma potencialidade pozolânica, no que tange ao aspecto de resistência mecânica, uma vez que foram observados, nos concretos com pó de pedra, elevados ganhos de resistência em idades mais avançadas. Além disso, a presença de finos também inibiu prováveis reações álcali-agregados.

### **5.5.2 Resultado do ensaio de reatividade potencial álcali-agregado**

A figura 5.19 apresenta os resultados do ensaio de reatividade potencial álcali-agregado.

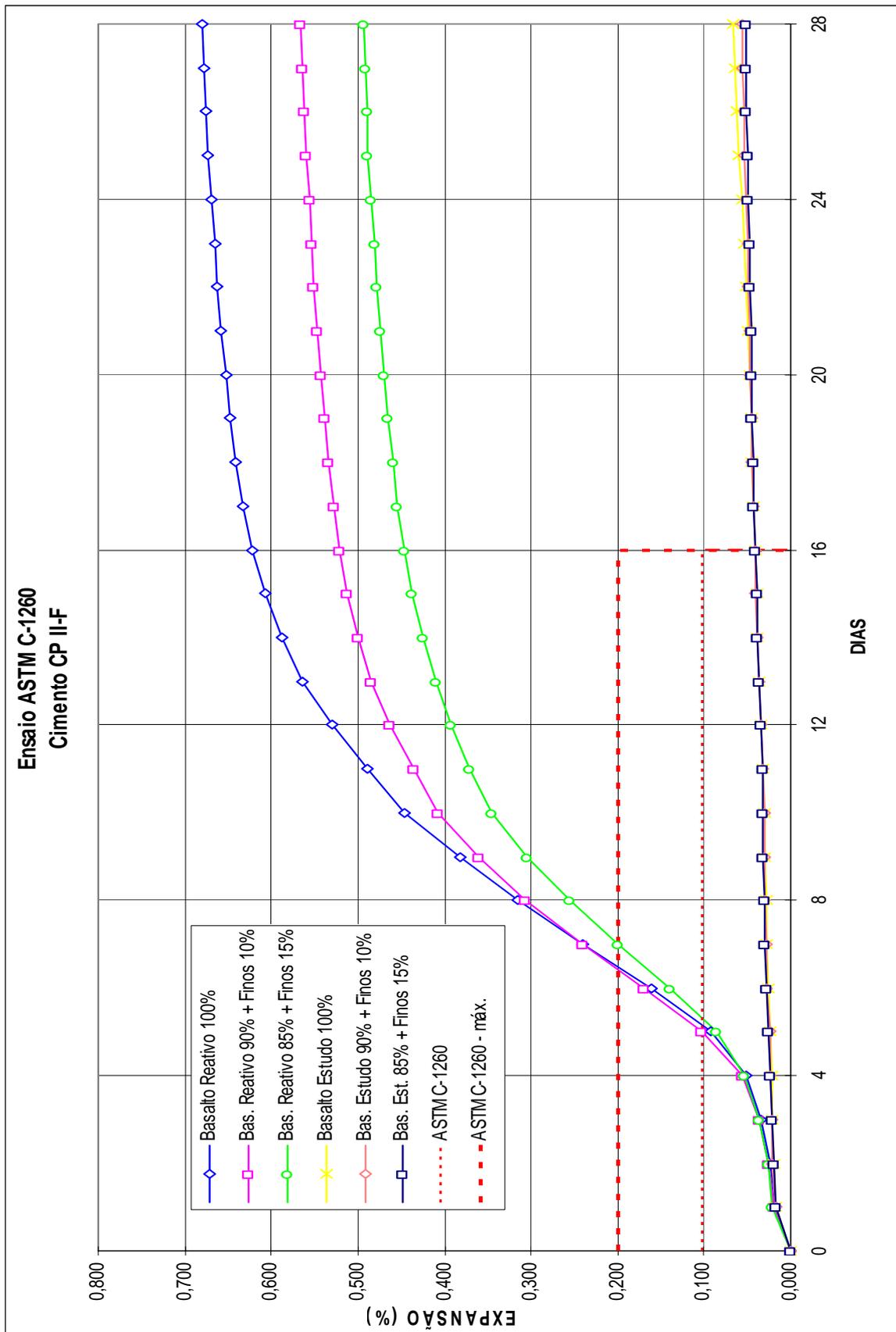


Figura 5. 19 – Reatividade potencial pelo método acelerado NBRI (Sul-Africano)

Baseado na figura 5.19, observa-se que o basalto que constitui o pó de pedra apresentou um comportamento inócuo; já o basalto reativo utilizado para o estudo de inibição da reação mostrou ter um comportamento totalmente deletério, ultrapassando os limites impostos pela norma no sexto dia de ensaio.

O basalto reativo com a utilização de 10 % de finos apresentou uma redução na expansão de 0,78% para 0,56%; com a utilização de 15% de finos, apresentou uma diminuição da expansão de 0,78% para 0,49%. Isso mostra que os finos presentes no pó de pedra podem possuir potencialidade pozolânica. Grandes obras que dispunham de basaltos altamente reativos tiveram, na composição do concreto, teores de até 40% de pozolanas, para a inibição de prováveis expansões.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

De um modo geral, todas as etapas propostas para a realização do presente trabalho foram realizadas com sucesso, demonstrando a viabilidade e as vantagens da substituição da areia natural pelo pó de pedra nos concretos usuais.

Em um panorama holístico, a principal vantagem do uso do pó de pedra no concreto está relacionada ao aspecto ambiental, uma vez que seu emprego significa redução dos danos causados pela exploração indiscriminada da areia presente nos leitos dos rios. Além disso, a utilização deste material no concreto elimina um rejeito que, por sua vez, também impacta de forma significativa o meio ambiente.

De um modo mais específico, as conclusões que podem ser apresentadas, a partir dos resultados obtidos nos ensaios que foram realizados, são as seguintes:

#### **O pó de pedra:**

- ✓ Para o pó de pedra estudado, os ensaios de caracterização realizados mostraram que este material possui todas as características físicas e químicas necessárias à sua utilização como agregado miúdo em concretos. Sua curva granulométrica, segundo a NBR 7211, classifica-o como sendo uma areia média.
- ✓ A rocha em estudo mostrou possuir um comportamento totalmente inócuo, com base no ensaio de reatividade potencial álcali-agregado, apresentado expansões da ordem de 0,04% aos 16 dias.
- ✓ A fração fina do pó de pedra, passante na peneira #200 e que corresponde a um valor da ordem de 13%, mostrou ser importante na composição dos concretos produzidos. Esses

finos têm influência direta na resistência à compressão e na trabalhabilidade, pois concretos produzidos sem a presença dos mesmos apresentaram características físicas e químicas inferiores ao concreto com presença de finos. A potencialidade pozolânica dos mesmos mostrou ter influência direta na resistência final dos concretos.

- ✓ O pó de pedra, por ser um material oriundo de britamento, possui estabilidade granulométrica, fato demonstrado pelos ensaios de granulometria realizados a cada seis meses, durante 24 meses, cujos resultados foram praticamente os mesmos.

### **Resistência à compressão:**

- ✓ O concreto com adição de pó de pedra apresentou um acréscimo de resistência à compressão axial em comparação ao concreto produzido com areia natural. Aos 28 dias esse acréscimo chegou a um valor de 66%.
- ✓ Outro aspecto interessante foi a evolução da resistência à compressão com a idade, fato importante em algumas situações. Aos 7 dias, o concreto com 100% de pó de pedra obteve um acréscimo de aproximadamente 31% em relação ao concreto normal, sendo que esses valores evoluíram para 66% aos 28 dias e 70% aos 91 dias de idade.
- ✓ Destaca-se também que o aumento de resistência observado nos concretos com 100% de substituição compensou as condições desfavoráveis de cura a que o concreto possa estar submetido. Os ensaios mostraram um acréscimo de aproximadamente 26% de resistência no concreto com pó de pedra curado em condições desfavoráveis, em relação ao concreto normal com cura em câmara úmida.
- ✓ Quando se fixou o teor de argamassa em 55%, observou-se que para os traços mais pobres em cimento houve um expressivo aumento de resistência com o tempo em relação aos traços mais ricos

### **Consumo de cimento:**

- ✓ Foi verificado, através dos diagramas de dosagem que correlaciona as leis de Abrams, Lyse e Molinari, que para um concreto produzido com areia natural, em relação a um

produzido com pó de pedra, de mesma resistência, houve uma redução do consumo de cimento, principalmente nos traços mais pobres, com  $m \leq 6,5$ .

#### **Trabalhabilidade:**

- ✓ No que diz respeito à trabalhabilidade, o concreto com pó de pedra, sem aditivo, exigiu uma demanda maior de água para que pudesse apresentar um mesmo abatimento que um concreto produzido com areia natural, sem, contudo, que esse fato prejudicasse sua resistência à compressão em relação ao concreto normal.

#### **Concretos com aditivo:**

- ✓ Para a confecção do concreto com pó de pedra, é essencial a utilização de aditivos, pois esses concretos possuem uma acentuada perda de abatimento com o tempo, o que torna uma necessidade o uso de aditivos do tipo multifuncionais.

#### **Durabilidade:**

- ✓ Com relação à durabilidade, pode-se concluir que os concretos produzidos com o pó de pedra apresentam maior compacidade (menor permeabilidade), que associado à potencialidade pozolânica da fração fina do pó de pedra, resultam em concretos com maior durabilidade quando comparados aos concretos com areia natural.

Pode-se concluir que o pó de pedra é um material alternativo à areia natural, pois apresentou todos os requisitos necessários a um agregado miúdo, melhorou significativamente a maioria das propriedades do concreto, além de contribuir com a redução de impactos ambientais no processo de produção do concreto.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Tendo-se em vista que o presente trabalho limitou-se a concretos com resistências usuais e que seu objetivo principal era qualificar o pó de pedra como sendo um agregado miúdo para

concreto, são inúmeros os estudos que podem ser realizados a partir das conclusões aqui apresentadas, dos quais podem ser citados:

- ✓ estudo sobre a utilização do pó de pedra em concretos de alto desempenho (CAD) e de alta resistência (CAR);
- ✓ estudo sobre a utilização do pó de pedra em blocos estruturais de concreto, utilizados em alvenaria estrutural;
- ✓ estudo sobre a utilização do pó de pedra em concretos auto adensáveis;
- ✓ estudo sobre a utilização do pó de pedra em argamassas de assentamento;
- ✓ estudos sobre a aderência entre o concreto com pó de pedra e armaduras.

## 7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987, 5p.

\_\_\_\_\_. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman – Método de Ensaio. NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987, 3p.

\_\_\_\_\_. Agregados - Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo - Método de ensaio. NBR 7220. Rio de Janeiro, 1987, 3p.

\_\_\_\_\_. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio. NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992, 4p.

\_\_\_\_\_. Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Procedimentos. NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994, 9p.

\_\_\_\_\_. Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio. NBR 10342. Rio de Janeiro, 1992, 2p.

\_\_\_\_\_. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

\_\_\_\_\_. Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis – Método de ensaio. NBR 7218. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos – Método de ensaio. NBR 7219. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária – Método de ensaio. NBR 7251. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo – Método de ensaio. NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. Agregados para concreto – Especificação brasileira. NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983, 1p.

\_\_\_\_\_. Materiais pozolânicos –. NBR 12653. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials. ASTM C 1260/94-Standard Test Method for potencial alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 1997.

ALMEIDA, S.L.M. e SAMPAIO, J.A.; Obtenção de Areia Artificial com Base em Finos de Pedreiras. *Areia e Pedra*, n.20, p.32-36, Dezembro de 2002.

ALMEIDA, S.L.M. e SAMPAIO, J.A.; Visitas técnicas à Metso e Pedreira Embu- SP, CETEM/MCT (RI 002/2002), ; Rio de Janeiro, 2002.

ANDOLFATO, R.P.; Controle Tecnológico Básico do Concreto – Apostila - Ilha Solteira, 2002.

BASÍLIO, Eduardo Santos. Agregados para concreto. Estudo Técnico N.º 41. 3.ed.ver.atual. São Paulo: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, fev. 1995. 44 p.

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

CARNEIRO, A; CINCOTTO, M. A importância da diversidade granulométrica. *Téchne*, n. 27, p. 29 – 31, mar/abr. 1997.

FERREIRA, Rodrigo M.; GAVA, Giovanna P.; MALAKOSKI, Jader J.; MENEGHETTI, Leila C. Utilização de Pó-de-Pedra em Substituição Parcial ao Agregado Miúdo na Confecção de Concreto. Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, 44º Congresso Brasileiro.

GIAMMUSSO, Salvador E. Agregados para concreto. A Construção São Paulo, n.1968, p. 23 – 26, out. 1985.

GIAMMUSSO, S., Manual do concreto. São Paulo: PINI, 1992, p. 23-24.

GRIGOLI, Ademir Scobin; HELENE, Paulo. Concretos com Adições Inertes. Instituto Brasileiro do Concreto, IBRACON, 44º Congresso Brasileiro.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. Manual de dosagem e controle do concreto. Ed. PINI, 1ª edição. São Paulo, 1995.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais. Ed. PINI, 1ª edição. São Paulo, 1994.

NEVILLE, A.M. Propriedades do Concreto. Editora Pini, São Paulo, 1982.

NUGENT, F.R. Ensaio com areia artificial – Como melhorar seu concreto. In: Colóquio sobre “Agregados para concreto”. São Paulo, 1979. Anais São Paulo, IBRACON. p.1-29.

SBRIGHI NETO, Cláudio, “ A Importância dos Conceitos Tecnológicos na Seleção dos Agregados para Argamassas e Concretos”. Revista Areia & Brita. EMC-Editores; nº 12; pg 26 e 27.

Reportagem. Areia industrial ganha mercado. Minérios Extração & Processamento, v. 20, n. 251, p. 25-30, ago. 2000.

Reportagem. Areia artificial reduz impacto ambiental de construção civil. Jornal da Ciência, 03 de fevereiro de 2003.

RODRIGUES, Públis Penna Firme. Parâmetros de dosagem do concreto. São Paulo: ABCP, 1984. 29 p.

WOLF, J. Estudo da durabilidade de concreto de alta resistência com a adição de microssilica. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

VERÇOZA, E. J., Dosagem de concreto (apostila). Passo Fundo, 1995. p.(42-50).