

**A INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E ARDÓSIA  
FINAMENTE MOÍDAS NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS**

**Waldemar Vaz de Resende**

**Waldemar Vaz de Resende**

**A INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E ARDÓSIA  
FINAMENTE MOÍDAS NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como exigência parcial à obtenção do grau de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Resíduos como Materiais de Construção Civil.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2012

R433i

Resende, Waldemar Vaz de.

A influência de adições de escória de alto-forno e ardósia finamente moídas nas propriedades dos concretos [manuscrito] / Waldemar Vaz de Resende. – 2012.

83 f., enc.: il.

Orientador: Abdias Magalhães Gomes.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 80-83.

1. Construção civil – Teses. 2. Materiais de construção – Teses.  
I. Gomes, Abdias Magalhães. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

**Waldemar Vaz de Resende**

**A INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO E ARDÓSIA  
FINAMENTE MOÍDAS NAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 07 de dezembro de 2012.

---

Prof. Dr. Paulo Roberto P. Andery  
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

Banca Examinadora

---

ORIENTADOR: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes  
UFMG

---

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
DEMC/UFMG

---

Prof. Dr. Eduardo Chahud  
DEMC/UFMG



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, à minha mulher, companheira maravilhosa, a meus filhos, frutos de um amor prazeroso.

Ao Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes, meu orientador, grande parceiro e interlocutor.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto P. Andery, Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil da UFMG, pelas sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Roberto Galery, do Departamento de Engenharia de Minas, pelo apoio na moagem da escória de alto forno.

Aos Professores Antônio Neves de Carvalho Júnior e Carlos Eduardo de Oliveira Santos, do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção (DEMC) da UFMG, pelos incentivos e trocas de ideias.

Ao colega Ayrton Vianna Costa, pela amizade e incentivo para o vencimento de mais esta etapa em minha vida.

À Ivonete dos Santos Magalhães, assistente em administração do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção (DEMC) da UFMG, por ser sempre tão solícita.

Aos meus amigos, que sempre estão comigo.

Enfim, meus agradecimentos a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e a finalização deste trabalho.

# SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| RESUMO.....   | vii  |
| ABSTRACT .....  | viii |
| LISTA DE FIGURAS .....  | ix   |
| LISTA DE QUADROS .....  | x    |
| LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....                             | xii  |
| <br>  |      |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....   | 13   |
| <br>  |      |
| CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS .....  | 15   |
| 2.1 Objetivo geral .....  | 15   |
| 2.2 Objetivos específicos .....   | 15   |
| <br>  |      |
| CAPÍTULO 3 – AGREGADOS, ADIÇÕES MINERAIS E ADITIVO .....                  | 16   |
| 3.1 Agregados .....   | 16   |
| 3.1.1 Areia natural .....   | 20   |
| 3.1.2 Brita .....   | 21   |
| 3.2 Adições minerais .....  | 23   |
| 3.2.1 Escória de alto-forno .....   | 26   |
| 3.2.1.1 Histórico .....   | 26   |
| 3.2.1.2 Características .....   | 27   |
| 3.2.2 Material pozolânico .....   | 29   |
| 3.2.2.1 Ardósia .....   | 29   |
| 3.2.3 Aditivos.....   | 33   |
| <br>  |      |
| CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....                                     | 35   |
| 4.1 Materiais.....  | 35   |
| 4.1.1 Cimento – CPV ARI.....  | 35   |
| 4.1.2 Escória de Alto-Forno (finamente moída).....                        | 36   |
| 4.1.3 Ardósia moída .....   | 37   |
| 4.1.4 Areia natural média .....   | 37   |
| 4.1.5 Brita - Calcário de diâmetro 19 mm.....                             | 37   |
| 4.1.6 Aditivo Químico – Plastificante polifuncional .....                 | 37   |
| 4.1.7 Água.....   | 38   |
| 4.2 Métodos.....  | 38   |
| 4.2.1 Dosagens para o concreto .....                                      | 39   |
| 4.2.2 Desempenho do concreto .....  | 46   |
| 4.2.2.1 Resistência à compressão diametral ( <i>Splitting test</i> )..... | 47   |
| 4.2.2.2 Avaliação da resistência por ultrassom .....                      | 48   |
| 4.2.2.3 Módulo de elasticidade (dinâmico e estático).....                 | 54   |
| <br>  |      |
| CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                  | 57   |
| 5.1 Características dos agregados utilizados .....                        | 57   |
| 5.2 Dosagens .....  | 59   |
| 5.3 Módulo de Elasticidade .....  | 65   |
| 5.4 Avaliação da resistência por ultrassom .....                          | 65   |
| 5.5 Resultados da resistência à compressão.....                           | 66   |

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....                     | 77 |
| CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS ..... | 79 |
| REFERÊNCIAS.....                                  | 79 |

## RESUMO

O objetivo geral deste projeto experimental foi analisar o comportamento de concretos mediante adições de escória de alto-forno e de resíduos (aparas) de ardósia, finamente moídos. Para tanto foi necessário avaliar o comportamento do concreto quando submetido às seguintes variações das adições: (1) o percentual de adição com escória de alto-forno finamente moída; (2) o percentual de adição da mistura com escória de alto-forno e ardósia, finamente moídos. A análise das variações das superfícies específicas das escórias de alto-forno por meio do permeâmetro de Blaine integrou os procedimentos experimentais. Tornou-se relevante, também, avaliar as propriedades do concreto em laboratório quanto à resistência à compressão avaliada a partir de ensaios de ultrassonografia e quanto ao módulo de elasticidade estático e dinâmico. Foi possível constatar que durante os testes experimentais os resultados obtidos aos 3, 7 e 14 dias já denotavam uma possibilidade que foi confirmada aos 28 dias, mantida e melhorada aos 63 dias: a adição da escória de alto-forno, que tem sido bastante estudada e cujos resultados têm sido animadores em termos de resistência do concreto, foram melhorados e tornaram-se mais significativos com a adição conjunta do rejeito de ardósia moída. O rejeito de ardósia – que gera vários problemas aos mineradores e industriais em termos de despesas de transporte, descarte e manutenção das áreas – ainda não haviam sido abordados. A conclusão deste estudo experimental é que a ardósia adicionada à escória de alto-forno e ao cimento, bem como ao aditivo polifuncional, nas dosagens estabelecidas, proporciona uma melhoria da resistência do concreto além de produzir benefícios ao meio ambiente, uma vez que promove o aproveitamento de pilhas e pilhas de rejeitos do material, que até então não apresentavam qualquer aproveitamento técnico-comercial mais nobre.

**Palavras-chave:** Construção civil, Resíduos como materiais de construção civil, Escória de alto-forno, Ardósia

## ABSTRACT

The overall objective of this project was to analyze the behavior of concretes by additions of finely ground blast furnace slag and waste (scrap) of slate. To this end it was necessary to evaluate the behavior of concrete when subjected to the following additions variations: (1) the percentage of admixture with finely ground blast furnace slag; (2) the percentage of the mixture with finely ground blast furnace slag and slate. Variations analyses of specific areas of blast furnace slag by means of Blaine's permeameter integrated the experimental procedures. Became relevant, too, evaluating the concrete properties in the laboratory on the compressive strength evaluated from ultrasound tests and on the dynamic and static modulus of elasticity. It was found that during experimental tests the results obtained at 3, 7 and 14 days already showed a possibility which was confirmed at 28 days, maintained and improved up to 63 days: the addition of blast furnace slag, which has been well-studied and whose results have been encouraging in terms of concrete resistance, have been improved and become more meaningful with the tailings of slate joint addition. The tailings of slate, which raises several issues to miners and industrials in terms of transport expenses, disposal and areas maintenance, had not yet been addressed. The completion of this experimental study is that slate added to the blast furnace slag and cement, as well as to the additive multipurpose footrest, in established dosages, provides improved resistance of concrete besides producing benefits for the environment, once it promotes the use of piles and piles of waste material which hitherto did not present any more noble technical-commercial use.

**Keywords:** Civil construction. Waste as construction materials. Blast furnace slag. Slate. Concrete resistance.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.1 - Moinho antes de receber a escória Blaine 415 .....  | 36 |
| Figura 4.2 - Outro ângulo do moinho.....   | 36 |
| Figura 4.3 - Visão do moinho e da caçamba de recepção .....  | 36 |
| Figura 4.4 - Moinho e motor com temporizador.....  | 36 |
| Figura 4.5- Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.....   | 47 |
| Figura 4.6 - Prensa hidráulica digital EMIC para o procedimento de rompimento de concreto .....  | 47 |
| Figura 4.7 - Equipamento de medição ultrassonográfica (a) esquema da chegada da onda principal e dos ecos (b) computador pessoal .....   | 48 |
| Figura 4.8 - Tipos de ondas geradas no interior de um material sólido .....  | 50 |
| Figura 4.9 - Esquema de funcionamento do ultrassom .....   | 51 |
| Figura 4.10 - (a) Propagação do feixe ultrassônico e (b) Resposta ao campo próximo .....   | 52 |
| Figura 4.11 - Slump test .....   | 54 |
| Figura 5.1 - Curva granulométrica de Areia Natural .....   | 58 |
| Figura 5.2 – Curva Granulométrica de Brita 1 .....   | 59 |
| Figura 5.3 - Dosagem I - $f_{ck}= 30,0$ MPa - CPV ARI sem adição .....   | 68 |
| Figura 5.4 - Dosagem II - $f_{ck}= 40,0$ MPa - CPV ARI sem adição .....  | 68 |
| Figura 5.5 – Dosagem III - $f_{ck}= 30,0$ MPa - 50% CPV ARI + 25% escória + 25% ardósia .....  | 69 |
| Figura 5.6 - Dosagem IV - $f_{ck}= 40,0$ MPa - 50% CPV ARI + 25% escória + 25% ardósia .....   | 69 |
| Figura 5.7 - Dosagem V - $f_{ck}= 30,0$ MPa- 75% CPV ARI + 25% escória .....   | 70 |
| Figura 5.8 - Dosagem VI - $f_{ck}= 40,0$ MPa- 75% CPV ARI + 25% escória .....  | 70 |
| Figura 5.9 - Dosagem VII - $f_{ck}= 30,0$ MPa- 75% CPV ARI + 25% ardósia .....   | 71 |
| Figura 5.10 - Dosagem VIII - $f_{ck}= 40,0$ MPa - 75% CPV ARI + 25% ardósia .....  | 71 |
| Figura 5.11 - Dosagem IX - $f_{ck}= 30,0$ MPa - 75% CPV ARI + 25% escória padrão ...   | 72 |
| Figura 5.12 - Dosagem X - $f_{ck}= 40,0$ MPa - 75% CPV ARI + 25% escória padrão ....   | 72 |
| Figura 5.13- Comparação dos ganhos de resistência das dosagens deste projeto experimental aos 28 e 63 dias para $f_{ck}= 30,0$ MPa.....  | 73 |
| Figura 5.14 - Comparação dos ganhos de resistência das dosagens deste projeto experimental aos 28 e 63 dias para $f_{ck}= 40,0$ MPa..... | 74 |
| Figura 5.15 - Comparação de $f_{ck}= 30,0$ MPa e $f_{ck} = 40,0$ MPa aos 28 e 63 dias – cimento sem adição .....                         | 75 |
| Figura 5.16 - Comparação de $f_{ck} = 30,0$ MPa e $f_{ck} = 40,0$ MPa aos 28 e 63 dias – 50% cimento, 25% escória, 25% ardósia .....     | 75 |
| Figura 5.17- Comparação de $f_{ck} = 30,0$ MPa e $f_{ck} = 40,0$ MPa aos 28 e 63 dias – 50% cimento + 25% escória.....                   | 76 |
| Figura 5.18- Comparação de $f_{ck} = 30,0$ MPa e $f_{ck} = 40,0$ MPa aos 28 e 63 dias – 50% cimento + 25% ardósia.....                   | 76 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 3.1 – Influência da granulometria da areia nas propriedades da argamassa .....           | 19 |
| Quadro 3.2– Classificação, composição e características das adições minerais para concreto..... | 25 |
| Quadro 3.3– Conceituações dos tipos de escória de alto-forno.....                               | 28 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Composição mineralógica modal das ardósias da Província de Ardósia de Minas Gerais .....                            | 30 |
| Tabela 3.2 – Composição química média (porcentagem em peso) das ardósias da Província de Ardósias de Minas Gerais .....          | 32 |
| Tabela 3.3– Características Físico-Mecânicas da ardósia.....   | 33 |
| <br>   |    |
| Tabela 4.1 – Consumo de água ( $l/m^3$ ) – slump e agregado graúdo.....  | 43 |
| <br>   |    |
| Tabela 5.1 – Análise de agregado – Areia Natural.....  | 57 |
| Tabela 5.2 – Análise de Agregado Brita 1 .....   | 58 |
| Tabela 5.3– Análise da Escória Moída Padrão .....  | 58 |
| Tabela 5.4 - Resultados da dosagem #1 – $f_{ck} = 30,0$ MPa – Sem mistura ao cimento CPV .....                                   | 60 |
| Tabela 5.5 – Resultados da dosagem #2 – $f_{ck} = 40,0$ MPa – Sem mistura ao cimento CPV .....                                   | 60 |
| tabela 5.6 – Resultados da dosagem #3 – $f_{ck} = 30,0$ MPa– Mistura de escória de alto-forno e ardósia ao cimento.....          | 61 |
| Tabela 5.7 – Resultados da dosagem #4 – $f_{ck} = 40,0$ MPa – Mistura de escória de alto-forno e ardósia ao cimento.....         | 61 |
| Tabela 5.8 – Resultados da dosagem #5 – $f_{ck} = 30,0$ MPa – Mistura de escória de alto-forno ao cimento.....                   | 62 |
| Tabela 5.9 – Resultados da dosagem #5 – $f_{ck} = 40,0$ MPa – Mistura de escória de alto-forno ao cimento.....                   | 62 |
| Tabela 5.10 – Resultados da dosagem #7 – $f_{ck} = 30,0$ MPa – Mistura de ardósia ao cimento.....                                | 63 |
| Tabela 5.11 – Resultados da dosagem #8 – $f_{ck} = 40,0$ MPa – Mistura de ardósia ao cimento.....                                | 63 |
| Tabela 5.12 – Resultados da dosagem #9 – $f_{ck} = 30,0$ MPa – Mistura de escória ao cimento.....                                | 64 |
| Tabela 5.13 – Resultados da dosagem #10 – $f_{ck} = 40,0$ MPa – Mistura de escória ao cimento.....                               | 64 |
| Tabela 5.14 – Resultado do módulo de elasticidade dinâmico e estático .....  | 65 |
| Tabela 5.15 – Avaliação ultrassonográfica do estudo realizada em fevereiro 2012..  | 66 |
| Tabela 5.16 – Compilação das dez dosagens objeto do estudo experimental – resistências à compressão nas respectivas idades ..... | 67 |



## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

---

O – Acelerador

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - *América Concrete Institute*

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Alumina

DMC – Dimensão Máxima Característica

GGBF – *Ground Granulated Blast - Furnace*

GGBSF – *Ground Granulated Blast-Furnace Slag*

HCl - Ácido Clorídrico

IAR – Incorporador de Ar

$\text{K}_2\text{O}$  – Óxido de potássio

MPa – Mega Pascal

$\text{Na}_2\text{O}$  – Óxido de sódio

P – Plastificante

PA – Plastificante Acelerador

PR – Plastificante Retardador

R – Retardador

$\text{SiO}_2$ – Sílica

SP – Superplastificante

SPA – Superplastificante Acelerado

SPR – Superplastificante Retardador

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A discussão mais relevante da atualidade se refere às alternativas que o desenvolvimento de tecnologias pode proporcionar à indústria do concreto sustentável. Sabe-se que é muito difícil elaborar modelos a partir dos quais o comportamento de um material possa ser previsto com confiabilidade. Contudo, o conhecimento da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes do concreto e sua interrelação servem para auxiliar no controle de suas propriedades.

Conceituando os termos deste estudo, tem-se que ‘adições’ são materiais (que não sejam água, agregados, cimentos hidráulicos e fibras (+ 5% = adições; - 5% = aditivos) usados como ingredientes do concreto ou argamassa) adicionados à massa imediatamente antes ou durante a mistura (ASTM C 125) (ACI COMMITTEE 212, 2005). Seu uso no concreto tem sido amplamente adotado pelos muitos benefícios obtidos com suas aplicações. Adições minerais, como as pozolanas (material contendo sílica reativa), utilizadas nesta pesquisa, podem reduzir a fissuração por tensões térmicas no concreto massa.

Concreto pode ser definido como um material compósito que consiste, essencialmente, de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008). No caso deste estudo, os agregados são escória de alto-forno e material pozolânico.

Dentre as várias propriedades mecânicas dos concretos, destacam-se a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios executados em condições específicas e realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações.

Contudo, nem sempre se observa que os resultados de ensaios de resistência do concreto são afetados significativamente por parâmetros que envolvem os corpos-de-prova e as condições de carregamento. Os parâmetros dos corpos-de-prova

incluem a influência do tamanho, da geometria e o estado de umidade do concreto. Parâmetros de carregamento incluem nível e duração da tensão, além da velocidade com que a tensão é aplicada (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Cabe salientar que o estudo foi comparado entre escórias com Blaine diferentes e com cimento sem adição e com adição de cimento, escória e ardósia nas proporções constantes nas planilhas do projeto experimental. Tendo em vista que resíduos sólidos de alto forno (escória) gerados na indústria siderúrgica têm promovido grande poluição ao meio ambiente, o reaproveitamento de escória gerada na produção de concreto contribui, além do custo-benefício, para a preservação do meio ambiente e o bem-estar e saúde das gerações futuras.

O uso de ardósia moída na mistura de concreto (com ou sem escória de alto-forno) foi essencialmente experimental, também com intuito de preservação ambiental, tendo apresentado expressivos ganhos de resistência do concreto aos 28 dias e 63 dias.

## **CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar o comportamento de concretos mediante adições de escória de alto-forno finamente moída e ardósia colhida “*in natura*”.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o comportamento das seguintes adições ao concreto:
  - ✓ Percentual de mistura com escória de alto-forno finamente moída;
  - ✓ Percentual de mistura com escória de alto-forno finamente moída e ardósia;
  - ✓ Variação de Blaine (finuras) das escórias de alto-forno.
- Avaliar as propriedades do concreto em avaliações laboratoriais quanto à resistência à compressão simples, resistência à compressão ultrassônica e módulo de elasticidade estático e dinâmico.

## CAPÍTULO 3 – AGREGADOS, ADIÇÕES MINERAIS E ADITIVO

### 3.1 Agregados

O termo 'agregado' é de uso generalizado na tecnologia do concreto. É material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos (ALBUQUERQUE, 2004).

Mehta e Monteiro (2008) consideram de fundamental importância o conhecimento das características de agregados para a proporcionalidade nas misturas de concreto. Geralmente, as propriedades dos agregados afetam não apenas as proporções da mistura de concreto, mas também o comportamento do concreto fresco e endurecido. Assim, dividem as características dos agregados em três grupos:

- (1) Dependentes da porosidade: densidade, absorção de mistura, força, endurecimento, elasticidade e ausência de som<sup>1</sup>;
- (2) Dependentes de exposição prévia e fatores de processamento: o tamanho das partículas, sua forma e textura;
- (3) Características dependentes da composição química e mineralógica: força, dureza, elasticidade e presença de substâncias deletérias.

Na visão de Giammusso (1992), o agregado é um componente inerte que desempenha a função de material de enchimento, constituído por partículas que devem ser cimentadas entre si pela pasta, resultante da hidratação da mistura de cimento e água.

Os agregados possuem custos relativamente baixos, não penetram nas reações químicas complexas com a água e tradicionalmente eram tratados como materiais inertes no concreto. Entretanto, devido ao papel desenvolvido na determinação de

---

<sup>1</sup> Um agregado é considerado 'sem som' quando a mudança de volume do agregado induzido pelo tempo (ciclos alternativos de umidade e secagem, ou congelamento e degelo) resulta na deterioração do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

propriedades importantes do concreto, essa visão de material inerte tem sido questionada. As características dos agregados consideradas relevantes na manufatura do concreto incluem porosidade, distribuição de tamanho, absorção de mistura, textura de forma e superfície, resistência, elasticidade e o tipo de substâncias deletérias presentes. Estas características derivam da composição mineralógica das rochas, que é afetada pelos processos de sua formação, às condições de exposição a que foram submetidas antes da mineração e o tipo de equipamento usado para produzir os agregados. Os agregados minerais naturais compreendem 90% do total de agregados usados para a manufatura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os agregados se classificam em grãos e miúdos, de acordo com o tamanho das partículas. A norma brasileira NBR NM 53 (ABNT, 2003) define o agregado grão como sendo o agregado cuja maior parte de suas partículas fica retida na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ou a porção retida nessa mesma peneira. Agregado miúdo é definido na mesma como aquele que passa na peneira com abertura de malha de 9,5 mm, que passa quase totalmente na peneira 4,75 mm e fica retido, em sua maior parte, na peneira 75  $\mu\text{m}$ , ou se define como a porção que passa na peneira de 4,75 mm e fica retida quase totalmente na peneira de 75  $\mu\text{m}$ .

Os agregados também são classificados como artificiais ou naturais, sendo artificiais as areias e pedras provenientes do britamento de rochas, pois necessitam da atuação do homem para modificar o tamanho dos seus grãos. Como exemplos de naturais, podem ser citados as areias extraídas de rios ou barrancos e os seixos rolados (pedras do leito dos rios). Outro fator que define a classificação dos agregados é sua massa unitária (ou massa específica aparente), podendo ser divididos em leves (argila expandida, pedra-pomes, vermiculita), normais (pedras britadas, areias, seixos) e pesados (hematita, magnetita, barita) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda segundo os autores, agregados que pesem menos que  $1.120\text{kg/m}^3$  são geralmente considerados leves, e encontram aplicação na produção de vários tipos de concretos leves. Os normais possuem densidade de 1.520 a  $1.680\text{ kg/m}^3$ , e

produzem o 'concreto normal' com aproximadamente 2.400 kg/m<sup>3</sup> de peso unitário. Comparado ao agregado de peso normal, o concreto pesado varia de 2.900 a 6.100 kg/m<sup>3</sup>, sendo utilizado primariamente para locais destinados à pesquisa de radiação nuclear.

Devido à importância dos agregados dentro da mistura, vários são os ensaios necessários para sua utilização, que servem para definir sua granulometria, massa específica real e aparente, módulo de finura, torrões de argila, impurezas orgânicas, materiais pulverulentos, etc.

As partículas arredondadas ou subarredondadas e de textura superficial lisa (como o seixo rolado) favorecem a plasticidade do concreto, exigindo menos água de amassamento. Em contrapartida, a ligação matriz-agregado no estado endurecido é prejudicada pela aderência da pasta, justamente devido à sua superfície lisa (RODRIGUES, 1995).

Agregados provenientes de britagem que possuam forma cúbica e com textura superficial rugosa apresentam maior área específica e requerem, portanto, maior quantidade de água de molhagem. As arestas vivas desses grãos provocam também maior atrito entre eles, aumentando, conseqüentemente, o consumo de água, areia e cimento. Os agregados cujas partículas são lamelares ou alongadas necessitam de maior quantidade de areia para uma dada plasticidade, aumentando o consumo de água e cimento da mistura.

As características dos materiais agregados possuem grande influência no processo de dosagem do concreto. A granulométrica da areia ou agregado tem grande influência nas propriedades das argamassas. O Quadro 3.1 apresenta um comparativo entre as características da areia e as principais propriedades das argamassas.

**Quadro 3.1 – Influência da granulométrica da areia nas propriedades da argamassa**

| Propriedades da Argamassa | Características da areia        |  |  |
|---------------------------|---------------------------------|--|--|
|                           | Quanto menor o módulo de finura | Quanto mais descontínua for a granulométrica | Quanto maior o teor de grãos angulosos |
| Trabalhabilidade          | Melhor                          | Pior   | Pior                                   |
| Retenção de Água          | Melhor                          | Variável                                     | Melhor                                 |
| Elasticidade              | Pior                            | Pior   | Pior                                   |
| Retração na secagem       | Aumenta                         | Aumenta                                      | Variável                               |
| Porosidade                | Variável                        | Aumenta                                      | Variável                               |
| Aderência                 | Pior                            | Pior   | Melhor                                 |
| Resistência Mecânica      | Variável                        | Pior   | Variável                               |
| Impermeabilidade          | Pior                            | Pior   | Variável                               |

Fonte: GUIMARÃES, 1997; CRUZ, 2002.

O módulo de finura pode ser entendido pela soma das percentagens retidas nas peneiras da série Tyler. O item 1.2 da NBR 7211 (ABNT, 2009) estabelece os módulos de finura para agregados miúdos, que significa a soma das percentagens acumuladas na série normal dividida por 100. Assim, existem as zonas: 'ótima' –  $2,20 < MF < 2,90$ ; 'utilizável inferior' –  $1,55 < MF < 2,20$ ; e 'utilizável superior' –  $2,90 < MF < 3,50$ .

Para o cimento, destacam-se as seguintes características:

(a) Finura – fator que governa a velocidade de reação da hidratação. Seu aumento melhora a resistência, principalmente nas primeiras idades, diminui a exsudação e outros tipos de segregação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão do concreto. Em contrapartida, ocorre a liberação de maior quantidade de calor e uma retração maior, ficando o concreto mais sensível ao fissuramento;

(b) Perda ao fogo e resíduo insolúvel – fornece indicações como ocorrerão a carbonatação e a hidratação devido à exposição do cimento ao ar, ou seja, o envelhecimento do cimento;

(c) Resistência à compressão – em sua verificação, torna-se possível conhecer previamente o comportamento mecânico do cimento. Normalmente os testes são feitos nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Para os agregados graúdos, as características de maior influência na dosagem do concreto são a composição granulométrica (granulometria), a massa específica e a



Dimensão Máxima Característica (DMC). Esta se constitui uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura de malha quadrada, em milímetros, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Quanto maior for a DMC, mais barato o concreto. Ela está relacionada ao concreto fresco, portanto depende das formas, do espaçamento entre as armaduras e do processo de transporte do concreto (OLIVEIRA; SOUZA, 2007).

### **3.1.1 Areia natural**

Geologicamente, areia é um sedimento clássico inconsolidado, de grãos em geral quartzosos de diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm (BAUER, 1994). Como material de construção, necessita ter grãos formados de material consistente e não necessariamente quartzosos.

A areia natural quartzosa, lavada, seja de barranco ou de rio, é obtida por meio de processos de desmonte ou dragagem, em ambos os casos contribuindo enormemente para a degradação ambiental dos locais e das cercanias de sua exploração, geralmente próximo aos grandes centros. Areias de praias e dunas próximas de litorais não são utilizadas para o preparo do concreto por causa de sua grande finura e alto teor de cloreto de sódio.

Ribeiro et al. (2006) destacam as seguintes características:

(a) Composição granulométrica (granulométrica) – expressão das proporções de partículas de diferentes tamanhos que compõem o agregado. Possui influência direta sobre a qualidade dos concretos e argamassas, principalmente nos aspectos relativos à trabalhabilidade, à compactidade e à resistência aos esforços mecânicos;

(b) Módulo de finura – soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal, dividida por 100. Está relacionado com a área superficial do agregado e o seu valor conseqüentemente altera a água de molhagem para certa consistência. Deve ser mantido constante dentro de certos limites para evitar alteração do traço;

(c) Massa unitária – significa a relação entre a massa e o volume de sólidos, incluindo os vazios, sob determinadas condições de compactação. Por meio da

massa unitária são feitas as transformações dos traços em massa para volume e vice-versa;

(d) Massa específica – segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2003), a massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis;

(e) Inchamento – aumento de volume de determinada massa de agregado, causado pela absorção de água. Possui fundamental importância na dosagem dos materiais em volume, pois, dependendo da umidade, podem ser obtidas diferentes massas de agregados para um mesmo volume, sendo necessária a correção do traço.

Com a constante e cada vez mais crescente evolução da construção civil e a falta de materiais alternativos em qualidade e quantidade, as areias naturais têm sido um material cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades, além, evidentemente, da sua heterogeneidade. A areia natural constitui um bem finito e não renovável. A alternativa da sua obtenção em fontes mais distantes estabelece, além do seu valor próprio, o aumento significativo dos custos de transporte, que já possui um peso relativo elevado no processo, tornando o custo deste material ainda mais dispendioso.

### **3.1.2 Brita**

Brita é agregado obtido a partir de rochas compactas que ocorrem em depósitos geológicos – jazidas, pelo processo de ‘cominuição’ ou fragmentação controlada da rocha maciça (BAUER, 1994).

As britas representam um dos principais insumos da construção civil, chegando a representar mais de 60%, em média, do volume construído. São obtidas através da cominuição de rochas do tipo granitos<sup>2</sup>, gnaisses<sup>3</sup>, basaltos<sup>4</sup>, diabásicos, migmatitos,

---

<sup>2</sup> Granito – rocha plutônica ácida ( $\cong$  75% de sílica) granular macroscópica; cristais de 1 a 5 mm ou maiores, de cor cinza (BAUER, 1994).

<sup>3</sup> Gnaisse – rocha metamórfica granular macroscópica (BAUER, 1994).

<sup>4</sup> Basalto – rocha vulcânica básica ( $\cong$  50% de sílica) de cor cinza escura (BAUER, 1994).

calcários<sup>5</sup> e dolomitos<sup>6</sup>. Em relação à granulometria, são classificadas em britas 1, 2 e 3, pedrisco e pó de pedra. A brita 3 é utilizada como lastro ferroviário; a brita 2 serve como agregado em grandes volumes de concreto e como brita classificada na formação de base e sub-base de pavimentos. A brita 1 constitui-se o produto mais nobre e é aplicada, essencialmente, em concretos esbeltos e bombeados. O pedrisco e o pó são aplicados, basicamente, como matérias-primas de massas asfálticas (SAMPAIO e CARVALHO, 2002).

Britas são produzidas em estabelecimentos industriais denominados 'pedreiras'. Na jazida, a rocha é fragmentada por meio de explosivos carregados em furos de brocas de aproximadamente 80 mm de diâmetro. A detonação é o 'fogo de bancada', que produz blocos de dimensões que podem superar um metro. A seguir, ocorre nova fragmentação por explosivos (fogacho), cuja função é reduzir os blocos a dimensões não superiores à boca do britador primário (BAUER, 1994).

O projeto de classificação depende da demanda estabelecida pelo mercado. A pedra britada consiste em produto de cominuição de rocha que se caracteriza por tamanhos nominais de grãos enquadrados entre 2,4 e 64 mm, segundo as divisões padronizadas pela NBR 5564 (ABNT, 1991).

Conforme Bauer (1994), as propriedades físicas das rochas pouco diferem entre as pedreiras, com três exceções na rocha gnáissica (resistência à compressão, resistência à abrasão e porosidade).

A NBR 7211 (ABNT, 2009), que trata de agregados para concreto, padroniza a pedra britada em:

- Pó de pedra - Em virtude do próprio processo industrial, as pedreiras produzem, além da pedra britada, o pó de pedra, agregado de graduação

---

<sup>5</sup> Calcário – rocha sedimentar constituída de mais de 50% de carbonato de sódio (BAUER, 1994).

<sup>6</sup> Dolomito - rocha sedimentar constituída de carbonato de sódio e magnésio (BAUER, 1994).

0/4,8 mm. Sua curva granulométrica pode diferir de pedreira para pedreira, pois ele é formado pelo material que passa na peneira industrial de 2,4 mm;

- Areia de brita - É produzida nas pedreiras que dispõem de instalação de lavagem de brita. A água de lavagem é levada para o separador, onde a areia é retirada. Em média, essa areia (granito) possui graduação média de 0,15/4,8 mm (BAUER, 1994);
- Filer - É utilizado em masticos betuminosos, concretos asfálticos, espessamento de betumes fluidos e na vulcanização de borracha. Constitui-se material fino que decanta nos tanques de instalações de lavagem de brita nas pedreiras, composto de filer e areia. O filer é retirado em operações de tanques alternados, um em processo de decantação e outro em processo de extração. Uma vez separado da areia pela peneira de 0,075 mm, possui superfície específica da ordem de 10 a 28 m<sup>2</sup>/N (1.000 a 2.800 m<sup>2</sup>/kg);
- Bica-corrída - Não é produzida usualmente, mas apenas sob encomenda. Constitui-se bica-corrída secundária, de graduação 0/76 mm;
- Rachão - Como a brita-corrída, é de produção eventual. Significa a fração acima de 76 mm da bica-corrída secundária ou, de vez em quando, de bica-corrída primária. Sua graduação vai de 76/200 mm a 76/300 mm, dependendo das regulagens e dos tipos de britadores (BAUER, 1994).
- Restolho - Subproduto de algumas pedreiras de rocha menos sã, sendo retirado do fluxo à saída do britador primário.
- Blocos - Resultado dos fogos de bancada. Suas dimensões dependem da morfologia da rocha e do tamanho do britador primário, e variam de um a três metros de dimensões extremas.

### **3.2 Adições minerais**

Adições minerais são materiais silicosos finamente divididos e normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20 a

70% por massa do material cimentício total. Embora as pozolanas naturais em estado bruto ou após ativação térmica ainda sejam usadas em algumas partes do mundo, devido a aspectos econômicos e ambientais muitos subprodutos industriais têm se tornado fonte primária de adições minerais no concreto. Sempre que um subproduto pozolânico e/ou cimentício puder ser usado em substituição parcial ao cimento Portland no concreto, há uma considerável economia de energia e custo, além de expressivos ganhos em sustentabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Algumas adições são pozolânicas (como a cinza volante de baixo teor de cálcio), algumas cimentantes (como a escória granulada de alto-forno), enquanto outras são tanto cimentantes quanto pozolânicas (como as cinzas volantes com alto teor de cálcio).

Uma classificação das adições minerais de acordo com suas características pozolânicas e/ou cimentantes é apresentada no Quadro 3.2.

**Quadro 3. 2– Classificação, composição e características das adições minerais para concreto**

| <b>Classificação</b>   | <b>Composição química e mineralógica</b>   | <b>Característica da partícula</b>   |
|--|--|--|
| <b>Cimentantes e pozolânicas</b>   |  |  |
| Escória granulada de alto-forno (cimentante)   | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Em sua maior parte silicato vítreo contendo, principalmente cálcio, magnésio, alumínio e sílica.</li><li>✓ Componentes cristalinos do grupo melilita podem estar presentes em pequenas quantidades.</li></ul>  | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ O material não processado é da dimensão da areia e contém de 10 a 15% de umidade. Antes de ser usado, é seco e triturado em partículas menores de 45 µm (cerca de 500 m<sup>2</sup>/kg Blaine). As partículas têm textura áspera.</li></ul>  |
| Cinzas volantes com alto teor de cálcio (cimentantes e pozolânicas)  | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Em sua maior parte silicato vítreo contendo, principalmente cálcio, magnésio, alumínio e álcalis.</li><li>✓ A pequena quantidade de matéria cristalina presente geralmente consiste de quartzo e C<sub>3</sub>A: cal livre e periclásio podem estar presentes.</li><li>✓ C<sub>2</sub>S e C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S podem estar presentes no caso de carvões com alto teor de enxofre. O carbono não queimado é menor do que 2%.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ O pó corresponde a 10-15% de partículas maiores de 45 µm (normalmente 300-400 m<sup>2</sup>/kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro menor que 20 µm. A superfície de partícula normalmente é lisa, mas não tão limpa quanto às cinzas volantes com baixo teor de cálcio.</li></ul> |
| <b>Pozolanas altamente reativas</b>  |  |  |
| Sílica ativa condensada  | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Consiste essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Pó extremamente fino, consistindo de esferas sólidas de 0,1 µm de diâmetro médio (área superficial específica de cerca de 20 m<sup>2</sup>/g, por adsorção de nitrogênio).</li></ul>   |
| Cinza de casca de arroz  | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Consiste essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ As partículas normalmente são menores do que 45 µm, mas são altamente celulares (área superficial específica de 40 a 60 m<sup>2</sup>/g, por adsorção de nitrogênio).</li></ul>  |
| <b>Pozolanas comuns</b>  |  |  |
| Cinza volante com baixo teor de cálcio   | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Em sua maior parte silicato vítreo contendo alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo, mulita, silimanita, hematita e magnetita.</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ O pó corresponde a 15-30% de partículas maiores que 45µm, (normalmente 200 a 300 m<sup>2</sup>/kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro médio de 20 µm. Cenosferas e plenosferas podem estar presentes.</li></ul>   |
| Materiais naturais   | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Além de vidro de aluminossilicato, as pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato e mica.</li></ul>   | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ As partículas são moídas a menos de 45 µm e têm textura áspera.</li></ul>  |
| <b>Pozolanas pouco reativas</b>  |  |  |
| Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinzas de forno, escória de caldeira, palha de arroz queimada em campo | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Consistem essencialmente de materiais de silicato cristalino e apenas uma quantidade pequena de matéria não-cristalina.</li></ul>  | <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Os materiais devem ser pulverizados em partículas de dimensões muito finas para desenvolver alguma atividade pozolânica. As partículas moídas são de textura áspera.</li></ul>   |

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2008.

Neste trabalho apenas as adições minerais cimentantes e pozolânicas são explicitadas.

### **3.2.1 Escória de alto-forno**

#### **3.2.1.1 Histórico**

O uso de escória de alto-forno granulada triturada (*groundgranulatedblast-furnace* GGBF, ou *groundgranulatedblast-furnaceslag* GGBFS) como material cimentífero surgiu em 1774, quando Lorient produziu uma argamassa usando escória de alto-forno triturada em combinação com cal apagada (MATHER, 1975).

Em 1962, Emil Langen propôs um processo de granulação para facilitar a remoção e manejo de escória que saía de alto-forno de ferro. Mais tarde, GGBF vítreas foram investigadas por vários especialistas, sendo que Pasow introduziu o processo de granulação a ar, desempenhando papel importante no desenvolvimento da escória de alto-forno de ferro como ligante hidráulico (THOMAS, 1979). Na década de 1980, o uso de escórias de GGBF na produção de cimentos misturados representava 20% do cimento total produzido na Europa (HOGAN; MEUSEL, 1981).

A primeira produção registrada de cimento de escória de alto-forno Portland ocorreu na Alemanha em 1892, seguida pela dos Estados Unidos quatro anos mais tarde. Até a década de 1950, a escória de GGBF era usada de duas maneiras: como matéria-prima para a produção de cimento Portland e como material cimentífero combinado com cimento Portland, cal hidratada, gesso ou anidrido (LEWIS, 1981).

Em 2000, a capacidade de produção de cimento com escória foi estimada pelo Comitê do *American Concrete Institute* (ACI) superior a 2.000.000 toneladas ou Megagrams (Mg) anuais na América do Norte. Nos Estados Unidos, a produção de cimento com escórias foi estimada em mais de 1.500.000 Mg por nove empresas, sendo que em 1990 a produção era de 700.000 Mg realizada por apenas duas. Em 2003, várias empresas do Canadá e México também iniciaram esse tipo de produção (ACI 233R-03, 2012).

De acordo com Solomon (1991), 13.293.000 Mg de escórias de alto-forno de ferro foram vendidas ou usadas nos Estados Unidos durante o ano de 1990. Desde 2003, o ACI (2012) acredita que grande parte desse material poderia ser usada para a produção de escória se a disponibilidade de granulação estivesse disponível em todos os locais dos altos-fornos. Mais fontes de cimento com escórias podem tornar-se disponíveis devido à energia e estímulo ambiental. A maioria de cimento com escória é usada como um ingrediente separado nas indústrias de concreto. Uma parcela significativa do cimento com escória é usada para fazer cimentos hidráulicos misturados. O cimento com escória também é usado para outras aplicações, incluindo estabilização de rejeitos de minas e resíduos industriais.

### **3.2.1.2 Características**

Na produção de ferro, o alto-forno é continuamente carregado desde o topo com fontes de óxido de ferro (minério, pastilhas, material sinterizado, dentre outros), rocha fundente (cal e dolomita) e combustível (carvão coque). Dois produtos são obtidos do forno: ferro fundido, que é coletado no fundo do forno (cadinho) e escória de alto-forno de ferro líquido, flutuando sobre a massa de ferro fundido. Ambos são periodicamente coletados do forno a uma temperatura de aproximadamente 1500°C. A escória consiste primariamente de sílica e alumina (que provém dos minérios de ferro), combinada com os óxidos de cálcio e magnésio (que provém da rocha fundente). A atividade cimentífera desta escória para uso em cimento ou concreto é determinada por sua composição e pela taxa à qual o material fundido é resfriado quando sai do forno (ACI 233R-03, 2011).

Na produção de ferro fundido (ferro gusa), quando a escória é resfriada lentamente ao ar, os componentes minerais normalmente estão presentes como melilitas cristalinas (solução sólida  $C_2AS-C_2MS_2$ ), que não reagem com água em temperatura ambiente. Quando moído em partículas muito finas, o material será pouco cimentante e pozzolânico. No entanto, se a escória líquida tiver a alta temperatura rapidamente reduzida por água ou uma combinação de ar e água, a maior parte do calcário, magnésio, sílica e alumina permanecem em um estado não cristalino ou vítreo. O produto resfriado pela água é chamado 'escória granulada' pelo fato de as



partículas terem dimensões de areia. O material resfriado rapidamente ao ar e com quantidade limitada de água fica em forma de pelotas e é chamado 'escória peletizada'. Normalmente, o primeiro contém mais vidro, mas quando moído a 400 até 500 m<sup>2</sup>/kg de finura Blaine, os dois produtos desenvolvem propriedades cimentantes satisfatórias (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O Quadro 3.3 apresenta as definições de GGBF elaboradas pelo *American Concrete Institute* (ACI):

**Quadro3. 3– Conceituações dos tipos de escória de alto-forno**

|   |   |   |
|---|---|---|
| Blast-Furnace Slag                                  | Escória de alto forno                     | Produto não metálico que consiste essencialmente de silicatos e alumino silicatos de cálcio e de outras bases, que é desenvolvido em uma condição fundida simultaneamente com ferro em um alto forno  |
| Air-Cooled Blast-Furnace Slag                       | Escória de alto-forno resfriada a ar      | Produto resultante de solidificação de escória de alto-forno fundida sob condições atmosféricas; o resfriamento subsequente pode ser acelerado pela aplicação de água à superfície solidificada.  |
| Expanded Blast-Furnace Slag                         | Escória de alto-forno expandida           | Produto celular de baixo peso obtido por processo controlado de escória de alto-forno fundida com água ou com água e outros agentes, como vapor, ar comprimido ou ambos.  |
| Granulated Blast-Furnace Slag (GBFS)                | Escória de alto forno granulada           | Material granulado vítreo formado quando a escória de alto-forno fundida é rapidamente resfriada, como, por exemplo, por imersão em água.   |
| <i>Ground Granulated Blast-Furnace Slag</i> (GGBFS) | Escória De Alto-Forno Granulada Triturada | Considerada como Cimento, Escória pela ACI 233R-2003  |
| Cement, Blended                                     | Cimento Mistura                           | Cimento hidráulico que consiste essencialmente de uma mistura uniforme de escória de alto-forno granulada e cal hidratada; ou uma mistura uniforme de cimento Portland e escória de alto-forno granulada e pozolanas, ou cimento Portland de escória de alto-forno granulada e pozolanas produzido por moagem de clínquer de cimento Portland com outros produtos ou por mistura de clínquer de cimento Portland com outros materiais, ou uma combinação de misturas e moagens. |
| Cement, Portland Blast-Furnace Slag                 | Cimento, Escória de alto-forno Portland   | Cimento hidráulico que consiste de mistura triturada de clínquer de cimento Portland e escória de altos-fornos granulada ou uma mistura uniforme do cimento Portland e escória granulada de alto-forno finamente moída em que a quantidade do componente de escória é estabelecida em limites especificados   |
| Cement, Slag  | Cimento, Escória                          | Escória de alto forno granulada finamente moída e que é considerada um cimento hidráulico.  |
| Glass   | Vidro                                     | Produto inorgânico de fusão, resfriado até uma condição rígida sem cristalização  |

Fonte: ACI 233R-03, 2003 (atualizada em 2011).

Na maioria dos casos, as escórias de alto-forno granuladas têm sido usadas em proporções de 25 a 70% em massa do material cimentício total. Estas proporções

estão de conformidade com as estabelecidas na ASTM C 195 para a produção de cimento de escória de alto-forno (WOOD, 1981).

A proporção de escória de alto-forno granulada deve ser ditada pelas finalidades para as quais o concreto deve ser usado, a temperatura de cura e o grau de atividade da escória. Quando estas são misturadas com cimento Portland, a combinação de material cimentífero resultará em propriedades físicas que são características do material predominante. Assim, à medida que aumenta a porcentagem de escória deve-se esperar uma taxa mais lenta de ganho de resistência, particularmente nos tempos iniciais, a menos que o teor da água seja substancialmente reduzido ou haja cura acelerada (ACI 233R-03, 2011).

### **3.2.2 Material pozolânico**

Exceto a terra diatomácea, todas as pozolanas naturais são derivadas de rochas e materiais vulcânicos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2008), a partir da descrição da reação pozolânica e propriedades dos cimentos compostos, os prováveis benefícios para a engenharia podem ser obtidos com o uso de adições minerais no concreto, os quais incluem melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, o aumento da resistência final e à impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição na interface e uma durabilidade muito maior no que diz respeito ao ataque por sulfato e à expansão pela reação álcali-agregado.

#### **3.2.2.1 Ardósia**

Conforme dados do Ministério do Desenvolvimento da Indústria e Comércio, a redução de 17,22% das exportações de ardósias em 2011 (US\$ 59,3 milhões) impactou na produção nacional, com perda de participação de 1,3% no total produzido. A crise do mercado europeu, o valor do câmbio e a concorrência com a Espanha e a China, neste mesmo mercado, contribuíram para a redução das exportações de ardósia em 2011. A Região Sudeste deteve 64,5% da produção

nacional e a Nordeste 24,5%. As regiões Sul, Centro-Oeste e Norte atingiram em conjunto 11% (MAIA e HELDER, 2012).

A clivagem ardosiana é definida por uma forte orientação preferencial da mica branca. A clorita é muito fina e juntamente com a mica branca forma a matriz da rocha. Grãos finos de feldspato intersticial são identificados e, conforme observado ao microscópio, essas ardósias verdes não reagem com ácido clorídrico (HCl). As ardósias verdes intercalam níveis de ardósias roxas; os estudos microscópicos sugerem que o mineral responsável por esta coloração é a clorita oxidada. As ardósias cinzas exibem cor uniforme e os planos de estratificação podem ser vistos ao microscópio. A superfície dos planos de clivagem ardosiana é lisa a ligeiramente rugosa, não se podendo observar mesoscopicamente a orientação planar preferencial dos filossilicatos (minerais placóides). A matriz é constituída por uma massa de mica branca e clorita verde-clara (CHIODI FILHO et al., 2003).

A estratificação é muito fina e perfeita. Concentrações de “poeira” carbonosa são raras e a clivagem é definida por escamas alongadas de mica branca. As ardósias negras e grafite exibem planos de partição geralmente lisos, podendo ocorrer superfícies rugosas e “rascamento” na delaminação. A estratificação (acamamento) é marcada pela intercalação de cores (negra - mais rica em carbonatos - e cinza escura), em leitos com aproximadamente 0,3 mm de espessura. Os leitos mais claros (cinza-escuros) têm elevada proporção de quartzo em grãos fragmentados (0,25 mm) e alongados paralelamente à estratificação, por vezes formando lenticularizações. A matriz filossilicática não é orientada e possui cor negra, devido à presença de poeira carbonosa. A composição mineralógica modal (% em volume) das ardósias da Província encontra-se discriminada na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1– Composição mineralógica modal das ardósias da Província de Ardósia de Minas Gerais**

| MINERAIS (%)       | ARDÓSIA NEGRA | ARDÓSIA CINZA | ARDÓSIA VERDE |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Quartzo            | 24-26         | 26-30         | 30-32         |
| Mica Branca        | 31-33         | 32-34         | 34-36         |
| Clorita            | 20-23         | 18-20         | 18-20         |
| Feldspato          | 12-15         | 12-15         | 14-15         |
| Carbonato          | 3-5           | 2-3           | 0.5-1         |
| Óxido de Ferro     | 2-3           | 2-3           | 2-3           |
| Material Carbonoso | 0.5-1         | 0.2-0.6       | < 0.1         |

Fonte: CHIODI FILHO et al., 2003.

Para cimentos, é desejável a reação álcali/agregado  $K_2O + Na_2O < 0,6\%$ . Na hidratação, a ardósia transforma-se em carbonato de sódio e carbonato de potássio, com elevada solubilidade em água e com possibilidades de eflorescências.

A Tabela 3.2 mostra os dados químicos médios para algumas variedades comerciais de ardósias da Província. Segundo Grossi-Sad et al. (1985; 1998), essa composição química reflete bem a mineralogia das ardósias. As razões  $Na_2O/K_2O$ ,  $Al_2O_3/Na_2O$  e  $FeO/Fe_2O_3$  são similares entre as ardósias verdes, negras e cinzentas. As ardósias roxas possuem distinções: a razão  $FeO/Fe_2O_3$  é de 0,67 (em outros tipos tal razão é maior que 1) e o conteúdo de  $K_2O$  é muito alto (5,1%).

Em caráter geral, observa-se que a sílica ( $SiO_2$ ) é o óxido dominante e está contida no quartzo, em filossilicatos (representados por sericita-illita-clorita) e no plagioclásio sódico. A alumina ( $Al_2O_3$ ) está contida principalmente nos filossilicatos e, em menor proporção, no plagioclásio, da mesma forma que a soda ( $Na_2O$ ) e a potassa ( $K_2O$ ). Parte do potássio está presente como sericita;  $MgO$  e  $FeO$  compõem a clorita; parte do  $Fe_2O_3$  ocorre como hematita e parte, juntamente com o  $FeO$ , como magnetita; enxofre (S) ocorre como pirita e  $P_2O_5$  ocorrem como apatita (não observada ao microscópio). Os óxidos  $CaO$  e  $CO_3$  representam calcita. O óxido  $TiO_2$  deve ocorrer como rutilo e seus produtos hidratados (leucóxênio). Não se acredita que a composição química da sequência sedimentar tenha se modificado durante sua transformação metamórfica (GROSSI-SAD et al. 1985; 1998).

O metamorfismo é essencialmente isoquímico, com alguma perda de água e redução parcial do ferro ( $Fe_{3+}$ - $Fe_{2+}$ ). Pode-se imaginar que a caulinita original dos folhelhos precursores tenha sido utilizada para formar o plagioclásio sódico, assumindo-se que o sódio seria proveniente da água do mar (GROSSI-SAD et al. 1985; 1998).

**Tabela 3.2– Composição química média (porcentagem em peso) das ardósias da Província de Ardósias de Minas Gerais**

|   | ARDÓSIA |       |       |       |
|---|---------|-------|-------|-------|
|   | Preta   | Cinza | Verde | Roxa  |
| SiO <sub>2</sub>                                  | 60,95   | 62,85 | 64,45 | 61,20 |
| TiO <sub>2</sub>                                  | 0,74    | 0,79  | 0,85  | 0,84  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | 15,97   | 15,47 | 15,40 | 16,60 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | 1,80    | 1,86  | 2,30  | 4,50  |
| FeO   | 4,82    | 4,57  | 4,35  | 3,00  |
| MnO   | 0,10    | 0,11  | 0,12  | 0,12  |
| MgO   | 3,07    | 2,82  | 2,65  | 2,70  |
| CaO   | 1,62    | 1,16  | 0,35  | 0,37  |
| Na <sub>2</sub> O                                 | 1,70    | 1,72  | 1,50  | 1,20  |
| K <sub>2</sub> O                                  | 3,67    | 3,77  | 3,85  | 5,10  |
| H <sub>2</sub> O+                                 | 3,28    | 2,97  | 2,99  | 3,30  |
| CO <sub>2</sub>                                   | 1,27    | 0,91  | 0,27  | 0,29  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                     | 0,16    | 0,16  | 0,14  | 0,12  |
| C   | 0,47    | 0,28  | 0,07  | 0,11  |
| Total (%)   | 99,62   | 99,44 | 99,29 | 99,45 |
| Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O                | 0,46    | 0,46  | 0,39  | 0,23  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> O | 9,39    | 8,99  | 10,27 | 13,83 |
| FeO/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 2,68    | 2,46  | 1,89  | 0,67  |

Fonte: CHIODI FILHO et al., 2003.

A coloração das ardósias é fortemente controlada pela razão Fe<sub>2+</sub>/Fe<sub>3+</sub> e independe do conteúdo total de ferro. O conteúdo de carbono orgânico é outro importante fator cromático, em parte independente do anterior (POTTER et al., 1980). Para o caso das ardósias Bambuí, Grossi-Sad et al. (1998) caracterizaram duas séries cromáticas: uma roxa® verde (baseada na razão Fe<sub>2+</sub>/Fe<sub>3+</sub>) e outra verde® cinza® negra (baseada no conteúdo de carbono) (CHIODI FILHO et al., 2003).

Um zoneamento cromático das ardósias verdes, cinzas e escuras (negras e grafite) é observado no campo. A fácies de cor escura (negra e grafite) está representada na borda sul da bacia Bambuí, em zonas onde a sedimentação foi ligeiramente confinada e o ambiente anóxico, podendo estender-se mais para o norte, sob o pacote das ardósias cinza (Membro Superior). Fora da borda sul da bacia em direção ao norte ocorre ardósias cinza com baixo conteúdo de carbono, em que não houve redução do ferro. Uma terceira zona ou fácies cromática ocorre ainda mais para o norte, na região de Felixlândia, com ardósias verdes e roxas de caráter síltico.

A Tabela 3.3 a seguir apresenta o resultado de um trabalho que avaliou as características físico-químicas da ardósia de uma específica região de Portugal.

**Tabela 3.3– Características físico da ardósia**

|  |                        |
|--|------------------------|
| Resistencia mecânica à compressão                          | 425 kg/cm <sup>2</sup> |
| Resistência mecânica à compressão após teste de gelividade | 448 kg/cm <sup>2</sup> |
| Resistência mecânica à flexão                              | 561 kg/cm <sup>2</sup> |
| Massa volumétrica aparente                                 | 2801 kg/m <sup>3</sup> |
| Absorção de água à P.At. N.                                | 0,47 %                 |
| Porosidade aberta  | 1,32 %                 |
| Coefficiente de dilatação linear térmica                   | 8,8 x 10-6 per °C      |
| Resistencia ao desgaste                                    | 6,7 mm                 |
| Resistência ao choque: altura mínima de queda              | >110 cm                |

Fonte: ARDÓSIA DO MARÃO, 2012.

Essas características físico-químicas da ardósia já haviam motivado o pesquisador a inseri-la em testes, o que ocorreu no desenvolvimento deste estudo.

### 3.2.3 Aditivos

Aditivo é todo produto que adicionado em pequena proporção em argamassas ou concretos, no momento da mistura, com a finalidade de modificar as propriedades desse conglomerado, no sentido favorável, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (ABNT NBR 11768, 2011).

É comum que 70% a 80% de todo concreto produzido contenha um ou mais aditivos (MEHTA e MONTEIRO, 2008). É considerado como o quarto elemento da família composta por cimento, água e agregados e sua utilização é diretamente proporcional à necessidade de se obter concretos com características especiais.

Os aditivos carregam em si dois objetivos fundamentais, o de ampliar as qualidades de um concreto e de minimizar seus pontos fracos. Sua aplicação pode melhorar a qualidade do concreto nos seguintes aspectos: (1) trabalhabilidade; (2) resistência; (3) compacidade; (4) durabilidade; (5) bombeamento; e (6) fluidez (auto adensável). Ao mesmo tempo, o uso de aditivos pode diminuir sua: (1) permeabilidade; (2) retração; (3) calor de hidratação; (4) tempo de pega (retardar ou acelerar); e (5) a absorção de água.

Sua utilização, porém, requer certos cuidados, tais como o prazo de validade, a conservação, o momento certo da aplicação, a forma de se colocar o produto e a dose exata.

A NBR 11768 (Aditivos para Concreto de Cimento Portland) (ABNT, 2011) divide os aditivos em nove tipos, mas apenas o tipo P – plastificante - utilizado neste projeto experimental é explicitado:

- Tipo IAR: incorporador de ar;
- Tipo A: acelerador;
- Tipo SP: superplastificante;
- Tipo SPR: superplastificante retardador;
- Tipo SPA: superplastificante acelerador.
- Tipo PR: plastificante retardador;
- Tipo PA: plastificante acelerador;
- Tipo P: plastificante;
- Tipo R: retardador.

O aditivo plastificante (tipo P) é um produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência (ABNT NBR 11768, 2011). Quando usado corretamente, esse aditivo proporciona ao concreto os seguintes benefícios: reduz os picos térmicos; promove a manutenção da plasticidade por períodos mais longos; melhora o bombeamento; gera aumento das resistências finais; melhora a impermeabilidade e aumenta a durabilidade.

Tendo sido brevemente revisada a literatura, informando os conceitos principais fundamentados em Normas Regulamentadoras da Associação Brasileira de Normas Técnicas e em autores de relevante competência, o próximo capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste projeto experimental.

## **CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS**

Em linhas gerais, este trabalho pretende contribuir para menor custo na construção civil e com o meio ambiente. O tema 'adição de escória de alto-forno finamente moída e de ardósia na produção de concreto buscou avaliar principalmente o desempenho da resistência mecânica no concreto em corpos normalizados pelas normas brasileiras, ou seja, diâmetro 10 cm x altura 20 cm, sabendo, por experiência profissional, que a adição de escória na produção de concreto registra um ganho de resistência em comparação com o mesmo concreto sem adição de escória. Além disso, o custo para processar a moagem da escória é baixo.

O procedimento deste estudo é essencialmente experimental e está baseado na experiência profissional do pesquisador que, em sua atuação junto a empresas de concretagem e de construção civil, tem percebido a necessidade do desenvolvimento de um concreto com alta resistência e menor custo, ao mesmo tempo em que possibilite o aproveitamento de escória de alto-forno e de ardósia não aproveitadas comercialmente.

Foram adotados, em linhas gerais, os seguintes materiais e métodos: cimento classe CPV ARI, areia natural média, brita diâmetro 19 mm, aditivo plastificante polifuncional, slump test de  $100 \pm 20$  mm, fator água cimento: para  $f_{ck} = 30$  MPa = a/c 0,600, teor de argamassa em peso = 53% e para  $f_{ck} = 40$  MPa = a/c 0,470, teor de argamassa em peso = 52%. Foram realizados nos corpos de prova ensaios de resistência à compressão simples e avaliação de resistência através de ultrassom, módulo de elasticidade dinâmico e estático.

### **4.1 Materiais**

#### **4.1.1 Cimento – CPV ARI**

O cimento Portland de alta resistência inicial (CPV - ARI) tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de



calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquire elevadas resistências, com maior velocidade.

#### 4.1.2 Escória de Alto-Forno (finamente moída)

A escória de alto-forno utilizada no estudo foi fornecida pela IBEC, Lagoa Santa, MG, Blaine 415 m<sup>2</sup>/kg.

Para a moagem, foi utilizado o moinho de bola do Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (Fig. 4.1 a 4.4) por especial deferência do Professor Dr. Roberto Galery que, pessoalmente, se incumbiu da moagem da escória de alto-forno a partir do Blaine 415 m<sup>2</sup>/kg para a obtenção do Blaine solicitado de 598 m<sup>2</sup>/kg. Ambos os Blaine foram utilizados neste estudo experimental.



**Figura 4.1 - Moinho antes de receber a escória Blaine 415 m<sup>2</sup>/kg**



**Figura 4.2 - Outro ângulo do moinho**



**Figura 4.3 - Visão do moinho e da caçamba de recepção**



**Figura 4.4 - Moinho e motor com temporizador**

Fonte: Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

Há um gasto considerável de energia, que é compensada pelo ganho de resistência, como se verá adiante neste trabalho.

#### **4.1.3 Ardósia moída**

A ardósia foi aleatoriamente colhida em estado natural e moída sem especificações na região de Sete Lagoas, MG. Foram selecionadas a partir de pilhas de aparas dispostas desordenadamente em pátios normalmente localizados ao lado das jazidas e não têm, nos dias de hoje, destino ou utilização viabilizada ou concretizada.

#### **4.1.4 Areia natural média**

A areia natural média foi adquirida da Dragagem Irineu, em Carmópolis de Minas, MG (vide Tabela 5.1)

#### **4.1.5 Brita nº 1 - Calcária**

A Brita 1 utilizada no estudo foi adquirida da Mineração Borges, em Pedro Leopoldo, MG. O diâmetro máximo da brita é de 19 mm (vide Tabela 5.2).

#### **4.1.6 Aditivo Químico – Plastificante polifuncional**

O Plastificante utilizado foi o TEC MULT 829 SPX (marca RHEOSET), um aditivo líquido pronto para uso e isento de cloretos, destinado a plastificar o concreto. Atende aos requisitos da NBR 11.768 (tipo P) e ASTM C 494 (tipo A e F).

Conforme seu fabricante é compatível com a maioria dos tipos de cimento disponíveis no mercado e recomendado para todos os tipos de concretos, principalmente quando se deseja características de maior plasticidade da mistura e manutenção dessa característica por período longo. O TEC MULT 829 SPX é utilizado na proporção de 300 a 1000 ml para 100 kg de cimento. A RHEOSET recomenda a realização de ensaios de laboratório para se determinar o teor ideal de aditivo e quando não houver ensaios prévios, aconselha iniciar o estudo com a dosagem de 800 ml para cada 100 kg de cimento.

#### 4.1.7 Água

A água utilizada no projeto foi a fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

#### 4.2 Métodos

O planejamento do presente estudo foi concebido e desenvolvido em uma única etapa. Inicialmente teve como foco principal os estudos básicos para o conhecimento dos materiais e uma avaliação preliminar sobre a viabilidade do emprego da escória de alto-forno e de ardósia moída como agregados em argamassa de cimento e seu desempenho. O teste em argamassa ocorreu por mera conveniência executiva, realizado em laboratório com quantidades reduzidas dos agregados e utilizando-se corpos de prova moldados de pequena dimensão.

Foi estabelecido o critério de amostragem, bem como procedidos os ensaios tecnológicos, físicos e químicos necessários a uma conveniente e adequada caracterização e realizado um teste comparativo de desempenho entre as argamassas de escória de alto forno e ardósia, utilizando o cimento Portland como aglomerante por meio do ensaio de resistência à compressão simples. Foi definido que a dosagem racional seria realizada no concreto com resistência à compressão simples de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa

Como um projeto experimental, a questão principal foi de como seria adotada a proporção entre os agregados, cimento, percentual de adição (escória e ardósia), percentual de aditivo químico, quantidade de água, trabalhabilidade do concreto (*Slump Test*), fator água cimento (a/c), tudo isso para dosar um concreto com um volume de  $1\text{m}^3$ , ou seja, 1000 litros.

#### 4.2.1 Dosagens para o concreto

Embasado em experiências e serviços desenvolvidos pelo autor ao longo de sua vida profissional, foram selecionadas 10 (dez) traços e composições para ser objeto de estudo, sendo adotado o critério de "traços" mais comercializados no mercado, com o uso de cimento CPV ARI, a saber:

##### $f_{ck} = 30,0 \text{ MPa} + \text{cimento}$

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)      | 0,600              |
| ✓ Percentual de cimento         | 100%               |
| ✓ Teor de argamassa em peso     | 53%                |
| ✓ Percentual de aditivo químico | 0,7%               |
| ✓ Quantidade de água            | 195 litros         |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test) | 100 mm $\pm$ 20 mm |

##### $f_{ck} = 40,0 \text{ MPa} + \text{cimento}$

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)      | 0,470              |
| ✓ Percentual de cimento         | 100%               |
| ✓ Teor de argamassa em peso     | 52%                |
| ✓ Percentual de aditivo químico | 0,7%               |
| ✓ Quantidade de água            | 198 litros         |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test) | 100 mm $\pm$ 20 mm |

##### $f_{ck} = 30,0 \text{ MPa} + \text{cimento} + \text{escória } 598 \text{ m}^2/\text{kg} + \text{ardósia}$

|                                       |                    |
|---------------------------------------|--------------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)            | 0,600              |
| ✓ Percentual de cimento               | 50%                |
| ✓ Percentual de escória de alto-forno | 25%                |
| ✓ Percentual de ardósia               | 25%                |
| ✓ Teor de argamassa em peso           | 53%                |
| ✓ Percentual de aditivo químico       | 0,7%               |
| ✓ Quantidade de água                  | 195 litros         |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test)       | 100 mm $\pm$ 20 mm |

$$\underline{f_{ck} = 40,0 \text{ MPa} + \text{escória } 598 \text{ m}^2/\text{kg} + \text{ardósia}}$$

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)            | 0,470          |
| ✓ Percentual de cimento               | 50%            |
| ✓ Percentual de escória de alto-forno | 25%            |
| ✓ Percentual de ardósia               | 25%            |
| ✓ Teor de argamassa em peso           | 52%            |
| ✓ Percentual de aditivo químico       | 0,7%           |
| ✓ Quantidade de água                  | 198 litros     |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test)       | 100 mm ± 20 mm |

$$\underline{f_{ck} = 30,0 \text{ MPa} + \text{cimento} + \text{escória } 598 \text{ m}^2/\text{kg}}$$

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)            | 0,600          |
| ✓ Percentual de cimento               | 75%            |
| ✓ Percentual de escória de alto-forno | 25%            |
| ✓ Teor de argamassa em peso           | 53%            |
| ✓ Percentual de aditivo químico       | 0,7%           |
| ✓ Quantidade de água                  | 195 litros     |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test)       | 100 mm ± 20 mm |

$$\underline{f_{ck} = 40,0 \text{ MPa} + \text{cimento} + \text{escória } 598 \text{ m}^2/\text{kg}}$$

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)            | 0,470          |
| ✓ Percentual de cimento               | 75%            |
| ✓ Percentual de escória de alto-forno | 25%            |
| ✓ Teor de argamassa em peso           | 52%            |
| ✓ Percentual de aditivo químico       | 0,7%           |
| ✓ Quantidade de água                  | 198 litros     |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test)       | 100 mm ± 20 mm |

$f_{ck} = 30,0 \text{ MPa} + \text{cimento} + \text{ardósia}$

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)      | 0,600              |
| ✓ Percentual de cimento         | 75%                |
| ✓ Percentual de ardósia         | 25%                |
| ✓ Teor de argamassa em peso     | 53%                |
| ✓ Percentual de aditivo químico | 0,7%               |
| ✓ Quantidade de água            | 195 litros         |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test) | 100 mm $\pm$ 20 mm |

$f_{ck} = 40,0 \text{ MPa} + \text{cimento} + \text{ardósia}$

|                                 |                    |
|---------------------------------|--------------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)      | 0,470              |
| ✓ Percentual de cimento         | 75%                |
| ✓ Percentual de ardósia         | 25%                |
| ✓ Teor de argamassa em peso     | 52%                |
| ✓ Percentual de aditivo químico | 0,7%               |
| ✓ Quantidade de água            | 198 litros         |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test) | 100 mm $\pm$ 20 mm |

$f_{ck} = 30,0 \text{ MPa} + \text{cimento} + \text{escória } 400 \text{ m}^2/\text{kg}$

|  |                    |
|--|--------------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)                   | 0,600              |
| ✓ Percentual de cimento                      | 75%                |
| ✓ Percentual de escória de alto-forno PADRÃO | 25%                |
| ✓ Teor de argamassa em peso                  | 53%                |
| ✓ Percentual de aditivo químico              | 0,7%               |
| ✓ Quantidade de água                         | 195 litros         |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test)              | 100 mm $\pm$ 20 mm |

$f_{ck} = 40,0 \text{ MPa} + \text{cimento} + \text{escória } 400 \text{ m}^2/\text{kg}$

|  |                    |
|--|--------------------|
| ✓ Fator água/cimento (a/c)                   | 0,470              |
| ✓ Percentual de cimento                      | 75%                |
| ✓ Percentual de escória de alto-forno PADRÃO | 25%                |
| ✓ Teor de argamassa em peso                  | 52%                |
| ✓ Percentual de aditivo químico              | 0,7%               |
| ✓ Quantidade de água                         | 198 litros         |
| ✓ Trabalhabilidade (Slump Test)              | 100 mm $\pm$ 20 mm |

A Tabela 4.1 demonstra dos dados do consumo de água, slump e agregado graúdo.

**Tabela 4.1– Consumo de água (l/m<sup>3</sup>) – slump e agregado graúdo**

CONTINUA

| Slump (mm) | Consumo de Água (l/m <sup>3</sup> )                 |      |      |      |      |
|------------|---|------|------|------|------|
|            | Dimensão Máxima Característica Agregado Graúdo (mm) |      |      |      |      |
|            | 9,5   | 19,0 | 25,0 | 32,0 | 38,0 |
| 20         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 21         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 22         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 23         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 24         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 25         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 26         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 27         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 28         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 29         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 30         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 31         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 32         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 33         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 34         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 35         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 36         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 37         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 38         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 39         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 40         | 215   | 190  | 185  | 180  | 175  |
| 41         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 42         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 43         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 44         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 45         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 46         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 47         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 48         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 49         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 50         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 56         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 57         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 58         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 59         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 60         | 220   | 195  | 190  | 185  | 180  |
| 61         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 62         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 63         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 64         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 65         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 66         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 67         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 68         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |
| 69         | 225   | 200  | 195  | 190  | 185  |



**Tabela 4.2 - Consumo de água (l/m<sup>3</sup>) – slump e agregado graúdo**

CONTINUA

| Slump (mm) | Dimensão Máxima Característica Agregado Graúdo (mm) |     |     |     |     |
|------------|---|-----|-----|-----|-----|
| 70         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 71         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 72         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 73         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 74         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 75         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 76         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 77         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 78         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 79         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 80         | 225   | 200 | 195 | 190 | 185 |
| 81         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 82         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 83         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 84         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 85         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 86         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 87         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 88         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 89         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 90         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 91         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 92         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 93         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 94         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 95         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 96         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 97         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 98         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 99         | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 100        | 230   | 205 | 200 | 195 | 190 |
| 101        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 102        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 103        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 104        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 105        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 106        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 107        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 108        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 109        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 110        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 111        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 112        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 113        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 114        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 115        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 116        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 117        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |
| 118        | 235   | 210 | 205 | 200 | 195 |

**Tabela 4.2 - Consumo de água (l/m<sup>3</sup>) – slump e agregado graúdo**

| Slump (mm) | CONCLUSÃO       |                |          |             |     |
|------------|-----------------|----------------|----------|-------------|-----|
|            | Dimensão Máxima | Característica | Agregado | Graúdo (mm) |     |
| 119        | 235             | 210            | 205      | 200         | 195 |
| 120        | 235             | 210            | 205      | 200         | 195 |
| 121        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 122        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 123        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 124        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 125        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 126        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 127        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 128        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 129        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 130        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 131        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 132        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 133        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 134        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 135        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 136        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 137        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 138        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 139        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |
| 140        | 240             | 215            | 210      | 205         | 200 |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A dosagem de concreto é estabelecida na NBR 12655 (ABNT, 2006) como sendo:

- Condição de controle: A, B ou C direcionando um desvio padrão de 4, 5 e 6 MPa, respectivamente.

A condição A é aplicável às classes C10 até C80. O cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou em volume, com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados.

A condição B é aplicável às classes C10 até C25. O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em massa combinada com volume. É aplicável, também, às classes C10 até C20. O cimento é medido em massa, a água de amassamento medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados medidos em volume. A umidade do agregado miúdo é determinada pelo menos três vezes

durante o serviço do mesmo turno de concretagem. O volume do agregado miúdo é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado.

A condição C é aplicável apenas aos concretos de classe C10 e C15. O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto, conforme disposto na ABNT NBR NM 67 (ABNT, 2011) ou em outro método normalizado.

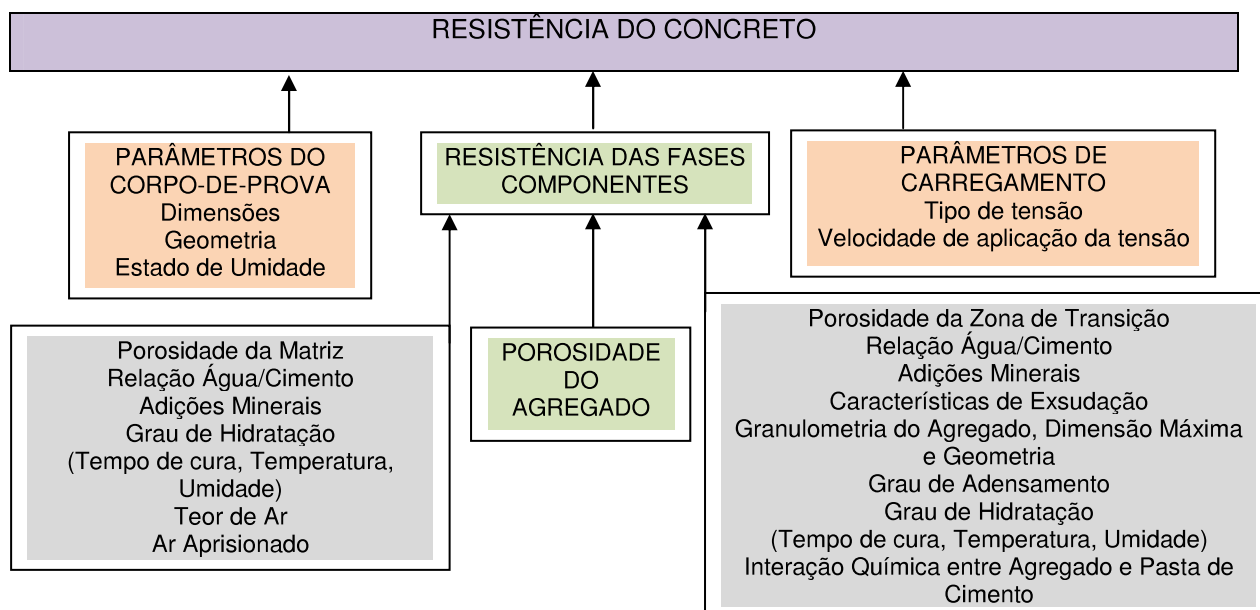
#### **4.2.2 Desempenho do concreto**

A resistência à compressão simples ( $f_c$ ) é a característica mecânica mais importante. Para estimá-la em um lote de concreto, são moldados e preparados corpos-de-prova para ensaio segundo a NBR 5738/2008 (Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto), ensaiados segundo a NBR 5739/2007 (Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos), no qual a carga é aumentada progressivamente para romper o corpo-de-prova em 2 a 3 minutos.

O corpo-de-prova padrão brasileiro é o cilíndrico, com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, e a idade de referência para o ensaio é 28 dias (PINHEIRO et al., 2004).

Na prática, a maioria dos elementos estruturais é submetida a uma carga permanente por um período indefinido e, eventualmente, a cargas repetidas ou a cargas de impacto. Assim, é desejável que se conheça a relação entre a resistência do concreto obtida sob condições de ensaio no laboratório e as condições reais de carregamento. Do comportamento do concreto sob diferentes estados de tensão pode ser concluído que a condição de carregamento tem influência importante na resistência.

A Figura 4.5 demonstra a interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.



**Figura 4.5– Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto**

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2008.

O aumento da utilização de concretos de alta resistência na construção civil, o período de tempo relativamente longo exigido pelos ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova, a insegurança quanto ao fato de que as condições de conservação dos corpos-de-prova em laboratório não representam satisfatoriamente a realidade, provocando desvios importantes nos resultados de resistência do concreto. O caráter destrutivo da extração de corpos de prova para avaliação do desempenho da estrutura em serviço contribui para a necessidade de surgimento de testes mais rápidos que possibilitem a avaliação das propriedades do concreto nas primeiras idades (FERRARI; PADARATZ, 2003).

Foram realizados os seguintes ensaios realizados para avaliar o desempenho do concreto:

#### **4.2.2.1 Resistência à compressão simples**

Devem ser utilizadas prensas que tenham sensibilidade inferior ou igual a 19,6N (ou 2,0 kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s.

A Figura 4.6 apresenta a prensa hidráulica digital EMIC onde foi realizado o procedimento de rompimento dos corpos de prova do concreto.



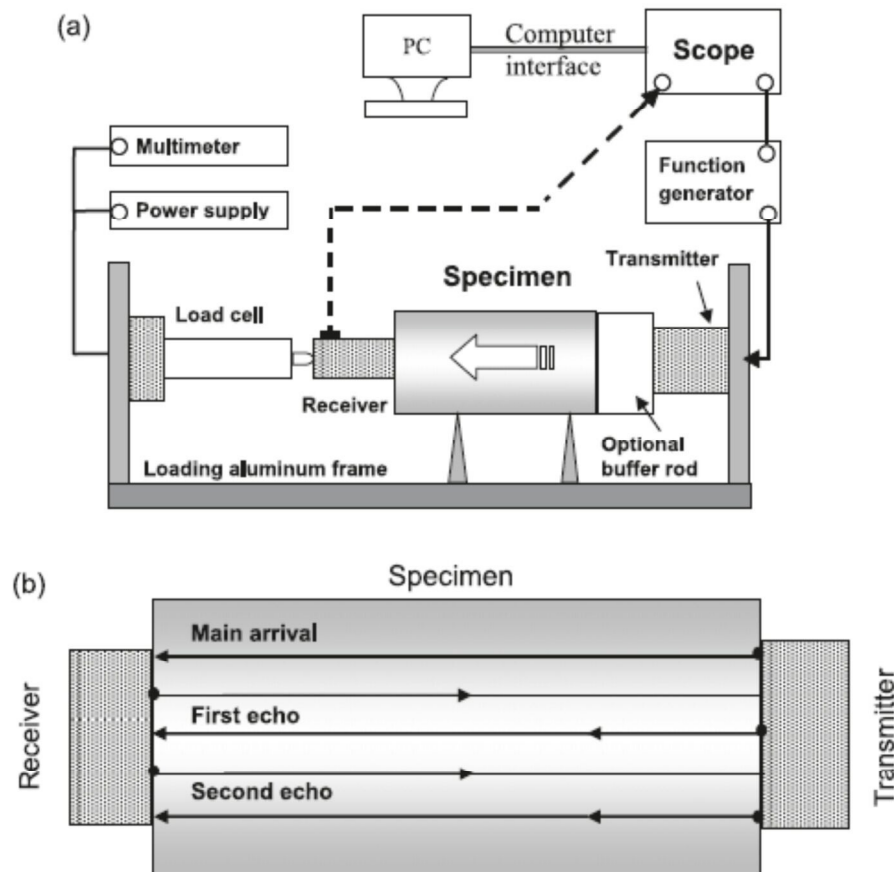
**Figura 4.6– Prensa hidráulica digital EMIC para o procedimento de rompimento de concreto**  
Fonte: Arquivo pessoal.

#### **4.2.2.2 Avaliação da resistência por ultrassom**

As propriedades dinâmicas (velocidade da onda e razão de amortecimento) de amostras sólidas são difíceis de medir usando um dispositivo de coluna de ressonância (*resonantcolumn* RC). As medições ultrassônicas de compressão e das velocidades de ondas de cisalhamento são simples, mas a avaliação da taxa de amortecimento material é complicada (KHAN et al., 2011).

O teste de ultrassom é amplamente utilizado para a medição das propriedades elásticas dos materiais, avaliação de qualidade de concretagem e medição indireta de força (NAIK e MALHOTRA 1991; POPOVICS e ROSE 1994; ASTM, 2002).

A Figura 4.7 apresenta o diagrama de um processo de medição ultrassonográfica.



Legenda: PC = Computador pessoal

**Figura 4.7 – (a) equipamento preparado para medições ultrassônicas, (b) esquema de chegada da onda principal e dos ecos**

Fonte: KHAN et al., 2011.

Para transmissão ou recepção do pulso, os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície, pois, caso contrário, a camada de ar existente introduziria um erro na leitura do tempo. Esse erro surgiria pelo fato de que somente uma quantia desprezível de pulso poderia ser transmitida pelo ar.

Em testes de ultrassom, um transmissor gera pulsos de alta frequência ( $f > 20$  kHz) que viajam através do material e são detectados por um receptor. O tempo de viagem da primeira chegada de onda é medido precisamente com equipamentos eletrônicos e a velocidade de onda é simplesmente calculada como distância ao longo do tempo. No entanto, muitas fontes de erro afetam as medições ultrassônicas (KHAN et al., 2011).

Em amostras de tamanho reduzido, variações no tempo de chegada produzem mudanças ampliadas na velocidade das ondas. Esses erros resultam da seleção

subjetiva da hora de chegada, da resolução de equipamentos eletrônicos e do atraso de tempo inerente do sistema ultrassônico (ASTM 1997; LEONG et al., 2004). Pode-se afirmar que subtrair esse atraso de tempo de medições não garante uma medição precisa de velocidade, pois a exatidão das medições depende também do acoplamento do transdutor.

A velocidade da onda de cisalhamento (*shear-wave*) e a razão de amortecimento podem ser medidas em baixas frequências ( $f < 200$  Hz) usando um dispositivo de RC (ASTM, 2000). Para um material elástico (por exemplo, a velocidade da onda independente da frequências), os resultados de testes de ultrassom e RC devem se equiparar por causa das pequenas estirpes de cisalhamento envolvidas em ambos os testes (tensão de cisalhamento,  $g < 10^{-6}$ ). O método da relação espectral foi proposto para a medição de amortecimento de materiais geológicos usando testes de ultrassom (TOKSÖZ et al. 1979; CAMPANELLA et al. 1994).

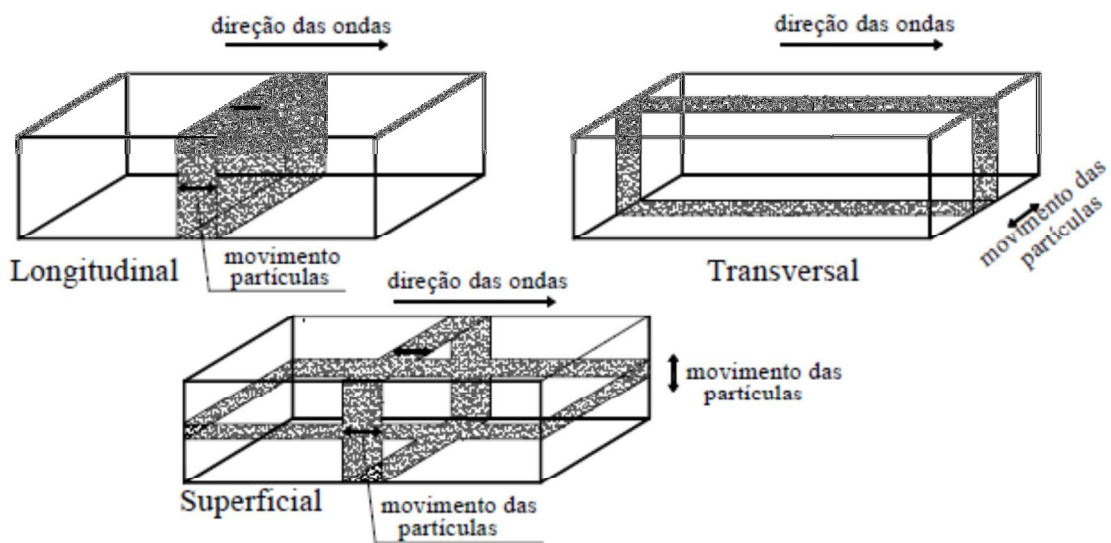
Contudo, essas medições são afetadas pelas reflexões das ondas, características dos transdutores e tempo selecionado. No teste de RC, o amortecimento do material é medido diretamente a partir da curva de ressonância da amostra, mas é superestimado para amostras sólidas (por exemplo, solos cimentados e argilas duras) por causa do amortecimento gerado pelo equipamento e a falta de fixação da base do dispositivo RC (KHAN et al. 2008).

Em estruturas de concreto, o método pode ter as seguintes aplicações (NAIK e MALHOTRA, 1991):

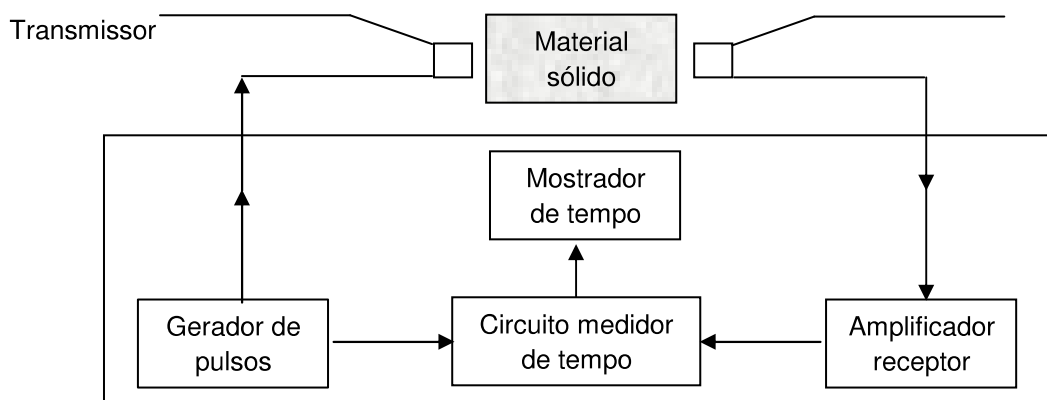
- Estimar a resistência à compressão do concreto, devido a grandes diferenças de densidade que ocorrem logo nas primeiras idades, oriundas do processo de hidratação do cimento, as quais provocam mudanças significativas na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas;
- Determinar o módulo de elasticidade dinâmico do material;
- Avaliar a homogeneidade do concreto;

- Detectar a presença de fissuras e trincas.

Quando impulsos mecânicos são aplicados a materiais sólidos, três diferentes tipos de ondas são gerados. Cada tipo de onda ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão (neste caso, o concreto). Os tipos de onda são geralmente conhecidos como longitudinal (compressão), transversal (cisalhamento) e de superfície, conforme mostra a Figura 4.8. Essas ondas são produzidas por transdutores eletroacústicos acoplados à superfície do concreto (NAIK e MALHOTRA, 1991).



**Figura 4.8–Tipos de ondas geradas no interior de um material sólido**  
 Fonte: NAIK e MALHOTRA, 1991; FERRARI e PADARATZ, 2003.



**Figura 4.9– Esquema de funcionamento do ultrassom**  
 Fonte: NAIK e MALHOTRA, 1991; FERRARI e PADARATZ, 2003.



Um transdutor eletroacústico ligado a um circuito eletrônico recebe estímulo para oscilar mecanicamente, pois o circuito emite pequenos pulsos elétricos ao transdutor, excitando o cristal na sua frequência natural. Essa vibração gera as ondas ultrassônicas capazes de atravessar o material em estudo (BUNGEY, 1982).

O equipamento de teste basicamente é composto, conforme ilustra a Figura 4.9, por um circuito eletrônico capaz de gerar os pulsos, que são transformados em ondas ultrassônicas transmitidas para o concreto e recebidas por um transdutor receptor, sendo então amplificadas e transformadas em pulsos elétricos novamente para.

Segundo Khan et al. (2011), em testes de ultrassom o transmissor toca a amostra em pontos diferentes, que funcionam como pontos originários. As interferências construtivas e destrutivas ocorrem até certa distância (zona de campo próximo é denotada  $M_f$ ) da fonte de ondas de compressão dada pela fórmula 4.1 de Schmerr (1998):

$$N_f = \frac{d_T^2 f}{4V_P} = \left( \frac{r_T}{\lambda_P} \right) r_T \quad (4.1)$$

Onde;

- $d_T$  e  $r_T$  = diâmetro e raio do transdutor, respectivamente;
- $f$  = a principal frequência da excitação ultrassônica;
- $V_P$  = velocidade média compressional da onda;
- $\lambda_P$  = o comprimento de onda na frequência.

Assim, medidas de amplitude dentro de um campo próximo poderiam ser imprecisas e sinais devem ser registrados em distâncias superiores a  $M_f$ . A intensidade  $I_x$  de ondas de compressão (em  $Wm^2$ ) para além da zona de campo próximo é dada pela fórmula 4.2 de Krautkramer e Krautkramer (1990):

$$I_x = I_T \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \left[ \sqrt{(r_T^2 + x^2)} - x \right] \right\} \quad (4.2)$$

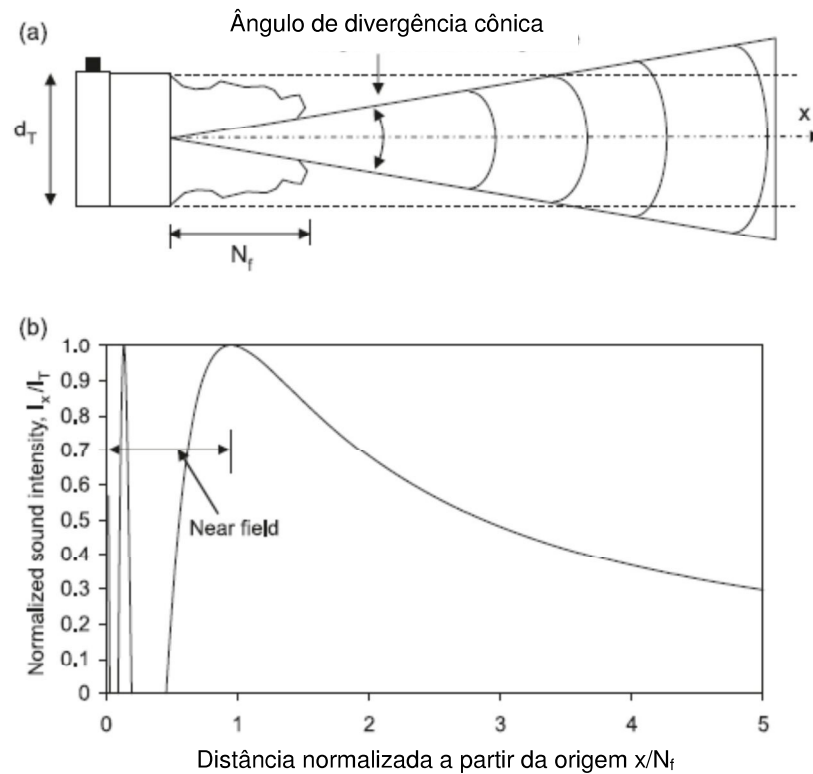
Onde:

$I_T$  = intensidade da superfície do transdutor;

$l$  = comprimento da onda;

$x$  = distância ao longo do feixe ultrassônico.

A zona do campo próximo e a degradação de intensidade relativa são demonstradas na Figura 4.10.



**Figura 4.10 – (a) Propagação do feixe ultrassônico, (b) Resposta do campo próximo**

Fonte: KRAUTKRAMER e KRAUTKRAMER, 1990; KHAN et al., 2011.

Vários são os fatores que afetam a velocidade de propagação do pulso ultrassônico, podendo ser divididos em duas categorias: (1) fatores que afetam as propriedades do material, tais como: agregados, tipo de cimento, relação água/cimento, condições de cura e idade do concreto e (2) fatores independentes das propriedades do material: temperatura do concreto, umidade, distância de propagação da onda, tamanho e forma do elemento, nível de tensão e presença de armadura. Os testes de velocidade do pulso ultrassônico são relativamente fáceis de serem conduzidos, mas o mais importante é saber interpretar os resultados (FERRARI e PADARATZ, 2003).

#### 4.2.2.3 Módulo de elasticidade (dinâmico e estático)

Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico para o concreto são baseados nas recomendações da norma *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens* da *American Society For Testing And Materials* (ASTM-C215, 2008) para determinação do módulo longitudinal.

Os ensaios são feitos a partir da determinação da frequência natural de vibração do material utilizando ondas geradas eletromecanicamente pelo método de ressonância forçada. Foram realizadas 10 medições em cada corpo-de-prova.

Foram medidos os módulos estático e dinâmico de 10 (dez) dosagens de concreto, sendo duas confeccionadas com insumos considerados 'padrão', quatro com utilização de escória de alto forno e quatro com ardósia finamente moída.

As dosagens foram dimensionadas a partir dos fatores água cimento iguais a 0,600 e 0,470, cujos módulos foram obtidos aos 7 e 28 dias, utilizando-se equipamento de medição com resolução de 1µm com as cargas sendo aplicadas em prensa (previamente aferida) com capacidade para 125 toneladas.

O equipamento para determinação do módulo de elasticidade em concreto é um extensômetro eletrônico marca Dinateste,  $L_e = 50 - 100$  e  $150$  mm  $\Delta L + 2,0$  mm, com resolução de 0,5 µm, e faixa de medição 0,05 a 0,50 mm – interface com o software Test Mod.

Os ensaios (*slump test*) foram realizados e avaliados de acordo com procedimentos das Normas Brasileiras (ABNT, 1998).

Todas as 10 dosagens realizadas em laboratório tiveram sua consistência determinada através dos prescritos pela NBR NM 67 (ABNT, 2011). O método empregado mede o abatimento de um determinado volume de concreto, devidamente adensado em 3 camadas de volumes iguais em um tronco de cone (Cone de Abrams). Após o adensamento da última camada, o tronco é retirado em

um tempo pré-estipulado (5s a 10s) quando então se faz a medição do abatimento do concreto denominado de “Slump Test.”. Todas as dosagens executadas foram ajustadas para o valor máximo (Figura 4.11).

A metodologia de execução do ensaio consiste em umedecer o molde e a placa de base e colocar o molde sobre a placa de base; encher rapidamente o molde com concreto coletado em três camadas; compactar cada camada com 25 golpes; limpar a placa de base e retirar o molde levantando-o na direção vertical em 05s a 10s. Após a retirada do molde, deve ser medido o abatimento do concreto.



**Figura 4.11–Slump Test**  
Fonte: Arquivo pessoal, 2011.

Foram executados os ensaios de Perda de Consistência em laboratório sobre duas dosagens distintas, sendo uma chamada de ‘referência’, constituída dos insumos padrões e uma segunda, utilizando-se escória de alto forno e ardósia moída. Ambas foram determinadas a partir de um fator água cimento igual a 0,600, escolhido em função de o mesmo representar a classe de concreto mais utilizada pelo mercado da construção civil, ou seja, resistência característica igual a 30,0 MPa, e de 0,470 para o  $f_{ck}=40,0$  MPa.

Os procedimentos foram executados buscando demonstrar a manutenção da trabalhabilidade do concreto ao longo do tempo, característica importante para a indústria do concreto, em função da demanda de tempo dos processos de transporte e descarga do concreto nos canteiros de obra.

Os ensaios foram realizados na Geramix, em Pedro Leopoldo, MG, conforme os prescritos pela NBR 10342 'Concreto - Perda de Abatimento' (ABNT, 2012), que prevê medições de consistência no slump a cada 15 minutos até que o slump apresente abatimento compreendido na faixa de  $20 \pm 10$  mm.

Para o acompanhamento contínuo da evolução da reação isotérmica em um sistema cimentício e pelo fato de fornecer medidas proporcionais das taxas de reação durante a hidratação, utilizou-se um calorímetro para verificar a ocorrência de interação indesejável entre cimento e aditivos por meio da identificação de alguns fenômenos, como a pega instantânea. Com o calorímetro, determina-se a curva de calor de hidratação ao longo do tempo, que é reproduzido por um software. Quando se avalia a imagem, é possível identificar em que momento é iniciado as reações de pega e de início do endurecimento.

Cabe salientar que o estudo foi comparado entre escórias com Blaine diferentes e com cimento sem adição e com adição em diversas proporções já demonstradas. Tendo em vista que resíduos sólidos de alto forno (escória) gerados na indústria siderúrgica têm promovido grande poluição ao meio ambiente, bem como a ardósia retirada das jazidas sofre também com peças não comercialmente aproveitáveis, o reaproveitamento na produção de concreto contribui, além do custo/benefício, para a preservação do meio ambiente e o bem-estar e saúde das gerações futuras.

O próximo capítulo apresenta os resultados e discute o projeto experimental.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Características dos agregados utilizados

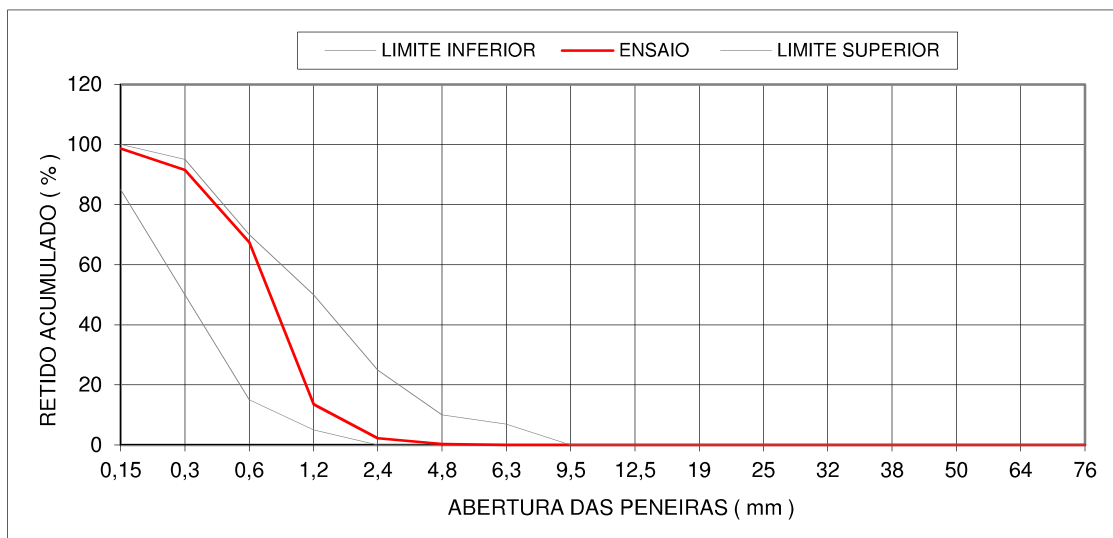
A Tabela 5.1 apresenta os resultados da análise de areia natural proveniente da Dragagem Irineu, do município de Carmópolis, MG.

**Tabela 5.1– Análise de agregado – Areia Natural**

| MATERIAL :        | Areia Natural   |                       | CERTIFICADO N°:        | 1                       |                          |
|-------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| FORNECEDOR:       | Dragagem Irineu |                       | DATA DO ENSAIO :       | 24.05.2011              |                          |
| GRANULOMETRIA     |                 |                       | ENSAIOS                |                         |                          |
| PENEIRA<br>( mm ) | PESO<br>RETIDO  | PORCENTAGEM<br>RETIDA | PORCENTAGEM<br>ACUMUL. | DESCRIÇÃO               | RESULTADOS               |
| 76                |                 |                       |                        | MASSA UNITÁRIA          | 1,400 kg/dm <sup>3</sup> |
| 64                |                 |                       |                        | NBR 7251                |                          |
| 50                |                 |                       |                        | MASSA ESPECÍFICA        | 2,591 kg/dm <sup>3</sup> |
| 38                |                 |                       |                        | NBR 9776                |                          |
| 32                |                 |                       |                        | TEOR DE ARGILA          | 0,034 %                  |
| 25                |                 |                       |                        | NBR 7218                |                          |
| 19                |                 |                       |                        | MATERIAIS PULVERULENTOS | 0,6 %                    |
| 12,5              |                 |                       |                        | NBR 7217                |                          |
| 9,5               |                 |                       |                        | ABSORÇÃO                | %                        |
| 6,3               |                 |                       |                        | NBR 9777 / 9937         |                          |
| 4,8               | 1,5             | 0,30 %                | 0,30 %                 | IMPUREZAS ORGÂNICAS     | < 300 ppm                |
| 2,4               | 9,7             | 1,94 %                | 2,24 %                 | NBR 7220                |                          |
| 1,2               | 56,4            | 11,28 %               | 13,52 %                | MÓDULO DE FINURA        | 2,737                    |
| 0,6               | 269,5           | 53,90 %               | 67,42 %                | NBR 7217                |                          |
| 0,3               | 120,4           | 24,08 %               | 91,50 %                | DIÂMETRO MÁXIMO         | 2,4 mm                   |
| 0,15              | 36,0            | 7,20 %                | 98,70 %                | NBR 7217                |                          |
| FUNDO             | 6,5             | 1,30 %                | 100%                   | COEFICIENTE DE VAZIOS   | 45,96 %                  |
| TOTAL             | 500             | 100 %                 |                        | -                       |                          |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.1 demonstra a curva granulométrica da areia natural utilizada no estudo.



**Figura 5.1 – Curva granulométrica de Areia Natural**

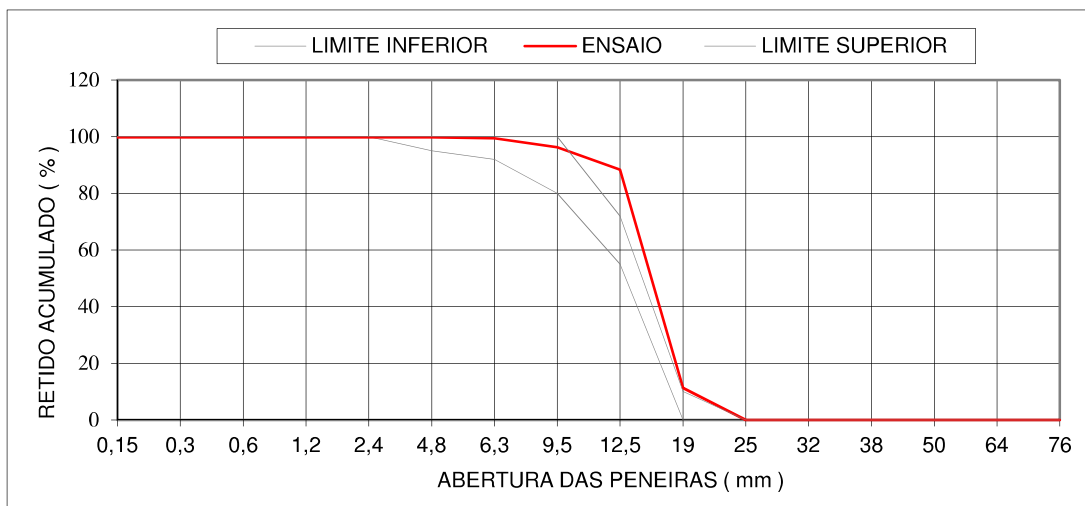
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados da análise de Brita 1 proveniente da jazida Borges, do município de Pedro Leopoldo, MG.

**Tabela 5.2– Análise de Agregado Brita 1**

| MATERIAL:     | Brita 1 Calc.    |        |                     | CERTIFICADO Nº :        | 1                        |  |
|---------------|------------------|--------|---------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| FORNECEDOR:   | Mineração Borges |        |                     | DATA DO ENSAIO :        | 04/jun/11                |  |
| GRANULOMETRIA |                  |        |                     | ENSAIOS                 |                          |  |
| PENEIRA (mm)  | PESO RETIDO      | RETIDA | PORCENTAGEM ACUMUL. | DESCRIÇÃO               | RESULTADOS               |  |
| 76            |                  |        |                     | MASSA UNITÁRIA          | 1,415 kg/dm <sup>3</sup> |  |
| 64            |                  |        |                     | NBR 7251                |                          |  |
| 50            |                  |        |                     | MASSA ESPECÍFICA        | 2,748 kg/dm <sup>3</sup> |  |
| 38            |                  |        |                     | NBR 9776                |                          |  |
| 32            |                  |        |                     | TEOR DE ARGILA          | %                        |  |
| 25            |                  |        |                     | NBR 7218                |                          |  |
| 19            | 1129             | 11,3   | %                   | MATERIAIS PULVERULENTOS | 0,3 %                    |  |
| 12,5          | 7705             | 77,1   | %                   | NBR 7217                |                          |  |
| 9,5           | 795              | 8,0    | %                   | ABSORÇÃO                | %                        |  |
| 6,3           | 318              | 3,2    | %                   | NBR 9777 / 9937         |                          |  |
| 4,8           | 32,0             | 0,32   | %                   | IMPUREZAS ORGÂNICAS     | ppm                      |  |
| 2,4           |                  |        | %                   | NBR 7220                |                          |  |
| 1,2           |                  |        | %                   | MÓDULO DE FINURA        | 7,063                    |  |
| 0,6           |                  |        | %                   | NBR 7217                |                          |  |
| 0,3           |                  |        | %                   | DIÂMETRO MÁXIMO         | 25,0 mm                  |  |
| 0,15          |                  |        | %                   | NBR 7217                |                          |  |
| FUNDO         | 21,0             | 0,21   | %                   | COEFICIENTE DE VAZIOS   | 48,52 %                  |  |
| TOTAL         | 10000            | 100    | %                   | -                       |                          |  |

A Figura 5.2 demonstra a curva granulométrica da Brita 1 utilizada no estudo.



**Figura 5.2 – Curva Granulométrica de Brita 1**

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da análise da Escória Moída Padrão fornecido pela IBEC, Lagoa Santa, MG, Blaine 415 m<sup>2</sup>/kg.

**Tabela 5.3 – Análise da Escória Moída Padrão**

| ANÁLISE QUÍMICA                    |            |
|------------------------------------|------------|
| DATA                               | 13.06.2011 |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 37,40      |
| CaO (%)                            | 38,40      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 9,80       |
| MgO (%)                            | 3,89       |
| IB (%)                             | 1,39       |
| RI (%)                             | 3,21       |
| ANÁLISE FÍSICA                     |            |
| DATA                               | 13.06.2011 |
| Característica                     | Valor      |
| Blaine (m <sup>2</sup> /kg)        | 415        |
| Resíduo #325 (%)                   | 9,40       |
| Resistência Ferret (MPa)           | 7,41       |

Fonte: IBEC, 2011.

A ardósia foi aplicada à mistura sem processamento, apenas peneirada.

## 5.2 Dosagens

A Tabela 5.4 apresenta os resultados de Dosagem #1 dos materiais sem qualquer mistura para  $f_{ck}=30,0$  MPa: 325 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 832 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.032 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 195 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.271 Lts/m<sup>3</sup> de Tec Mult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 31,7.



**Tabela 5.4– Resultados da dosagem #1 –  $f_{ck}=30,0$  MPa – Sem mistura ao cimento CPV ARI**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |               |            |      | Resistências MPa           |          |        |        |         |         | Mistura |            |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------------|------------|------|----------------------------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         | Areia Natural | Brita nº 1 | Água | Aditivo Lts/m <sup>3</sup> | 24 Horas | 3 Dias | 7 Dias | 14 Dias | 28 Dias |         | 63 Dias    |
|         |                 | Cimento                   | Escória |               |            |      |                            |          |        |        |         |         |         |            |
| I       | 30,0            | 3                         | -       | 83            | 103        | 19   | 2,271                      | 1,0      | 21,2   | 26,5   | 31,0    | 31,7    | 36,6    | CPV<br>ARI |
|         |                 | 2                         | -       | 2             | 2          | 5    |                            | -        | 21,4   | 26,2   | -       | 32,1    | -       |            |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados de Dosagem #2 dos materiais sem qualquer mistura para  $f_{ck}=40,0$  MPa: 421 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 734 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.058 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 198 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.949Lts/m<sup>3</sup> de TecMult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 50,6 MPa.

**Tabela 5.5 – Resultados da dosagem #2 –  $f_{ck}= 40,0$  MPa – Sem mistura ao cimento CPV**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |               |            |      | Resistências MPa           |          |        |        |         |         | Mistura |            |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------------|------------|------|----------------------------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         | Areia Natural | Brita nº 1 | Água | Aditivo Lts/m <sup>3</sup> | 24 Horas | 3 Dias | 7 Dias | 14 Dias | 28 Dias |         | 63 Dias    |
|         |                 | Cimento                   | Escória |               |            |      |                            |          |        |        |         |         |         |            |
| II      | 40,0            | 421                       | -       | 734           | 1058       | 198  | 2,949                      | 3,5      | 35,8   | 38,4   | 45,5    | 50,6    | 54,4    | CPV<br>ARI |
|         |                 | -                         | -       | -             | -          | -    |                            | -        | 36,3   | 41,8   | -       | 51,1    | -       |            |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados de Dosagem #3 dos materiais, desta vez com adição de escória de alto-forno finamente moída e ardósia na mistura para  $f_{ck}= 30,0$  MPa: 162 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 81 kg/m<sup>3</sup> de escória, 81 kg/m<sup>3</sup> de ardósia, 840 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.041 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 195 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.267Lts/m<sup>3</sup> de Tec Mult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 36,7 MPa.

**Tabela 5.6 – Resultados da dosagem #3 –  $f_{ck}$  30,0 MPa – Mistura de escória de alto-forno e ardósia ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |                  |                        | Resistências MPa |   |             |           |           |            | Mistura |            |  |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|------------------|------------------------|------------------|---|-------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|--|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia<br>Natural | Brita nº 1<br>Calcário | Água             | Aditivo Lts/m <sup>3</sup><br>TecMult 829 SPX | 24<br>Horas | 3<br>Dias | 7<br>Dias | 14<br>Dias |         | 28<br>Dias | 63<br>Dias                                 |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |                  |                        |                  |   |             |           |           |            |         |            |  |
| III     | 30,0            | 162                       | 81      | 81      | 840              | 1041                   | 195              | 2,267   | -           | 10,9      | 22,1      | 29,9       | 36,7    | 37,4       | <b>CPV<br/>ARI<br/>Escória<br/>Ardósia</b> |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados de Dosagem #4 dos materiais, desta vez com adição de escória de alto-forno finamente moída e ardósia moída na mistura para  $f_{ck}=40,0$  MPa: 210 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 105 kg/m<sup>3</sup> de escória, 105 kg/m<sup>3</sup> de ardósia, 737 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.059 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 198 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.936Lts/m<sup>3</sup> de Tec Mult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 53,8 MPa.

**Tabela 5.7 – Resultados da dosagem #4 –  $f_{ck}= 40,0$  MPa – Mistura de escória de alto-forno e ardósia ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |                  |                        | Resistências MPa |   |             |           |           |            | Mistura |            |  |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|------------------|------------------------|------------------|---|-------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|--|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia<br>Natural | Brita nº 1<br>Calcário | Água             | Aditivo Lts/m <sup>3</sup><br>TecMult 829 SPX | 24<br>Horas | 3<br>Dias | 7<br>Dias | 14<br>Dias |         | 28<br>Dias | 63<br>Dias                                 |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |                  |                        |                  |   |             |           |           |            |         |            |  |
| IV      | 40,0            | 210                       | 105     | 105     | 737              | 1059                   | 198              | 2,936   | -           | 18,2      | 37,4      | 43,7       | 53,8    | 56,9       | <b>CPV<br/>ARI<br/>Escória<br/>Ardósia</b> |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.8 apresenta os resultados de Dosagem #5 dos materiais, apenas com adição de escória de alto-forno finamente moída (598 m<sup>2</sup>/kg) na mistura para  $f_{ck}=30,0$  MPa: 243 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 81 kg/m<sup>3</sup> de escória, 839 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.040 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 195 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.271Lts/m<sup>3</sup> de Tec Mult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 38,4 MPa.

**Tabela 5.8 – Resultados da dosagem #5 –  $f_{ck}$ 30,0 MPa – Mistura de escória de alto-forno ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |                  |                        | Resistências MPa |   |             |           |           |            | Mistura |            |                    |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|------------------|------------------------|------------------|---|-------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|--------------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia<br>Natural | Brita nº 1<br>Calcário | Água             | Aditivo Lts/m <sup>3</sup><br>TecMult 829 SPX | 24<br>Horas | 3<br>Dias | 7<br>Dias | 14<br>Dias |         | 28<br>Dias | 63<br>Dias         |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |                  |                        |                  |   |             |           |           |            |         |            |                    |
| V       | 30,0            | 243                       | 81      | -       | 839              | 1040                   | 195              | 2,271   | 0,2         | 15,9      | 26,3      | 31,5       | 38,4    | 48,7       | <b>CPV<br/>ARI</b> |
|         |                 |                           |         |         |                  |                        |                  |   | -           | 15,5      | 26,0      | -          | 36,6    | -          | <b>Escória</b>     |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados de Dosagem #6 dos materiais, apenas com adição de escória de alto-forno finamente moída (598 m<sup>2</sup>/kg) na mistura para  $f_{ck}$ =30,0 MPa: 315 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 105 kg/m<sup>3</sup> de escória, 735 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.058 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 198 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.943Lts/m<sup>3</sup> de Tec Mult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 55,4 MPa.

**Tabela 5.9 – Resultados da dosagem #6 –  $f_{ck}$  40,0 MPa – Mistura de escória de alto-forno ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |                  |                        | Resistências MPa |   |             |           |           |            | Mistura |            |                    |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|------------------|------------------------|------------------|---|-------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|--------------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia<br>Natural | Brita nº 1<br>Calcário | Água             | Aditivo Lts/m <sup>3</sup><br>TecMult 829 SPX | 24<br>Horas | 3<br>Dias | 7<br>Dias | 14<br>Dias |         | 28<br>Dias | 63<br>Dias         |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |                  |                        |                  |   |             |           |           |            |         |            |                    |
| VI      | 40,0            | 315                       | 105     | -       | 735              | 1058                   | 198              | 2,943   | 0,4         | 33,8      | 39,5      | 43,4       | 55,4    | 58,6       | <b>CPV<br/>ARI</b> |
|         |                 |                           |         |         |                  |                        |                  |   | -           | 32,4      | 40,5      | -          | 56,2    | -          | <b>Escória</b>     |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados de Dosagem #7 dos materiais, apenas com adição de ardósia na mistura para  $f_{ck}$ =30,0 MPa: 243 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 81 kg/m<sup>3</sup> de ardósia, 839 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.040 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 195 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.271Lts/m<sup>3</sup> de Tec Mult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 35,1MPa.

**Tabela 5.10 – Resultados da dosagem #7 –  $f_{ck}$  30,0 MPa – Mistura de ardósia ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |               |                     | Resistências MPa |                         |          |        |        |         | Mistura |         |                    |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|---------------|---------------------|------------------|-------------------------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|--------------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia Natural | Brita nº 1 Calcário | Água             | Aditivo TecMult 829 SPX | 24 Horas | 3 Dias | 7 Dias | 14 Dias |         | 28 Dias | 63 Dias            |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |               |                     |                  |                         |          |        |        |         |         |         |                    |
| VII     | 30,0            | 2<br>4<br>3               | -       | 81      | 839           | 1040                | 195              | 2,271                   | 0,5      | 16,7   | 24,1   | 31,4    | 35,1    | 36,2    | <b>CPV<br/>ARI</b> |
|         |                 |                           |         |         |               |                     |                  |                         | -        | 16,8   | 24,1   | -       | 34,5    | -       | <b>Ardósia</b>     |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados de Dosagem #8 dos materiais, apenas com adição de ardósia na mistura para  $f_{ck}=40,0$  MPa: 315 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 105 kg/m<sup>3</sup> de ardósia, 735 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.058 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 198 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.943 Lts/m<sup>3</sup> de TecMult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 52,4 MPa.

**Tabela 5.11 – Resultados da dosagem #8 –  $f_{ck}$ 40,0 MPa – Mistura de ardósia ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |               |                     | Resistências MPa |                         |          |        |        |         | Mistura |         |                    |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|---------------|---------------------|------------------|-------------------------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|--------------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia Natural | Brita nº 1 Calcário | Água             | Aditivo TecMult 829 SPX | 24 Horas | 3 Dias | 7 Dias | 14 Dias |         | 28 Dias | 63 Dias            |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |               |                     |                  |                         |          |        |        |         |         |         |                    |
| VIII    | 40,0            | 3<br>1<br>5               | -       | 105     | 735           | 1058                | 198              | 2,943                   | 0,5      | 29,5   | 33,5   | 41,7    | 52,4    | 53,5    | <b>CPV<br/>ARI</b> |
|         |                 |                           |         |         |               |                     |                  |                         | -        | 28,4   | 32,7   | -       | 52,2    | -       | <b>Ardósia</b>     |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados de Dosagem #9 dos materiais, apenas com adição de escória padrão de alto-forno finamente moída na mistura para  $f_{ck}=30,0$  MPa: 243 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 81 kg/m<sup>3</sup> de escória padrão (Blaine 415), 839 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.040 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 195 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.271 Lts/m<sup>3</sup> de TecMult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 29,6MPa.

**Tabela 5.12 – Resultados da dosagem #9 –  $f_{ck}$  30,0 MPa – Mistura de escória padrão ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |                  |                           | Resistências MPa |   |             |           |           |            | Mistura |            |                          |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|------------------|---------------------------|------------------|---|-------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|--------------------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia<br>Natural | Brita<br>nº 1<br>Calcário | Água             | Aditivo Lts/m <sup>3</sup><br>TecMult 829 SPX | 24<br>Horas | 3<br>Dias | 7<br>Dias | 14<br>Dias |         | 28<br>Dias | 63<br>Dias               |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |                  |                           |                  |   |             |           |           |            |         |            |                          |
| IX      | 30,0            | 243                       | 81      | -       | 839              | 1040                      | 195              | 2,271   | 0,7         | 18,5      | 19,5      | 24,7       | 29,6    | 31,2       | CPVARI<br>Esc.<br>Padrão |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Tabela 5.13 apresenta os resultados de Dosagem #10 dos materiais, apenas com adição de escória padrão de alto-forno finamente moída na mistura para  $f_{ck}=40,0$  MPa: 315 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 105 kg/m<sup>3</sup> de escória padrão (Blaine 415), 735 kg/m<sup>3</sup> de areia natural, 1.058 kg/m<sup>3</sup> de brita #1, 198 kg/m<sup>3</sup> de água e 2.943 Lts/m<sup>3</sup> de TecMult 829 SPX. Aos 28 dias a resistência foi de 45,6MPa.

**Tabela 5.13 – Resultados da dosagem #10 –  $f_{ck}$  = 40,0 MPa – Mistura de escória padrão ao cimento**

| Dosagem | $f_{ck}$<br>MPa | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |         |         |                  |                           | Resistências MPa |   |             |           |           |            | Mistura |            |                          |
|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------|------------------|---------------------------|------------------|---|-------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|--------------------------|
|         |                 | Cimento + Adições         |         |         | Areia<br>Natural | Brita<br>nº 1<br>Calcário | Água             | Aditivo Lts/m <sup>3</sup><br>TecMult 829 SPX | 24<br>Horas | 3<br>Dias | 7<br>Dias | 14<br>Dias |         | 28<br>Dias | 63<br>Dias               |
|         |                 | Cimento                   | Escória | Ardósia |                  |                           |                  |   |             |           |           |            |         |            |                          |
| X       | 40,0            | 315                       | 105     | -       | 735              | 1058                      | 198              | 2,943   | 0,3         | 34,5      | 35,7      | 39,9       | 45,6    | 47,9       | CPVARI<br>Esc.<br>Padrão |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

Cabe ressaltar que o Blaine (m<sup>2</sup>/kg) aplicado neste estudo foi o seguinte:

Blaine padrão = 415 m<sup>2</sup>/kg (passante # 0,075 mm = 75%)

(passante # 0,044 mm = 33%)

Assim, quando constar a expressão Escória Padrão, o Blaine deve ser considerado como sendo de 415 m<sup>2</sup>/kg.

Blaine Solicitado = 598 m<sup>2</sup>/kg (passante # 0,075 mm = 90%)  
 (passante # 0,044 mm = 50%)

Desta forma, quando constar a expressão Escória, o Blaine deve ser considerado como sendo de 598 m<sup>2</sup>/kg.

### 5.3 Módulo de Elasticidade

A Tabela 5.14 apresenta os resultados das dez dosagens e misturas efetuadas, indicando o limite de deformação do concreto.

**Tabela 5.14– Resultado do módulo de elasticidade dinâmico e estático**

| Dosagem | f <sub>ck</sub> (MPa) | Mistura                   | Módulo de Elasticidade (MPa) |          |
|---------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|----------|
|         |                       |                           | Dinâmico                     | Estático |
| I       | 30,0                  | CPV ARI                   | 38264                        | 32524    |
| II      | 40,0                  | CPV ARI                   | 38687                        | 32884    |
| III     | 30,0                  | CPV ARI + Escória/Ardósia | 37547                        | 31915    |
| IV      | 40,0                  | CPV ARI + Escória/Ardósia | 38847                        | 33020    |
| V       | 30,0                  | CPV ARI + Escória         | 39251                        | 33363    |
| VI      | 40,0                  | CPV ARI + Escória         | 39113                        | 33246    |
| VII     | 30,0                  | CPV ARI + Ardósia         | 38085                        | 32372    |
| VIII    | 40,0                  | CPV ARI + Ardósia         | 45217                        | 38434    |
| IX      | 30,0                  | CPV ARI + Escória Padrão  | 36537                        | 31056    |
| X       | 40,0                  | CPV ARI + Escória Padrão  | 41785                        | 35517    |

OBS.: Escória Padrão = Blaine415 m<sup>2</sup>/kg.

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

Quando foram realizados os testes do módulo de elasticidade dinâmico e estático, os resultados não indicaram o que os testes de resistência à compressão constatariam, adiante demonstrados.

### 5.4 Avaliação da resistência por ultrassom

O ensaio ultrassonográfico foi realizado em 15 de fevereiro de 2012 e foi conduzido para medir a velocidade das ondas e da atenuação das medidas. Os testes foram iniciados pela calibração do equipamento ultrassônico, seguidos pela velocidade das ondas ultrassônicas e das medições da atenuação.

A Tabela 5.15 sumariza as diferentes combinações do equipamento e dos transdutores utilizados para as medições ultrassônicas.

**Tabela 5.15 – Avaliação ultrassonográfica do estudo realizada em fevereiro 2012**

| Dosagem | $f_{ck}$ (MPa) | Mistura                 | Moldagem   | Ultrassom      | Idade | Diâmetro CP (cm) |
|---------|----------------|-------------------------|------------|----------------|-------|------------------|
| I       | 30,0           | CPV ARI                 | 24/10/2011 | 23,8/24,0/22,0 | 114   | 10               |
| II      | 40,0           | CPV ARI                 | 25/10/2011 | 22,3/20,6/23,3 | 113   | 10               |
| III     | 30,0           | CPV ARI/Escória/Ardósia | 21/11/2011 | 24,7/25,8/25,2 | 86    | 10               |
| IV      | 40,0           | CPV ARI/Escória/Ardósia | 28/11/2011 | 23,7/23,0/22,8 | 80    | 10               |
| V       | 30,0           | CPV ARI/Escória         | 31/10/2011 | 22,5/23,5/24,0 | 107   | 10               |
| VI      | 40,0           | CPV ARI/Escória         | 07/11/2011 | 22,5/24,2/26,7 | 100   | 10               |
| VII     | 30,0           | CPV ARI/Ardósia         | 29/11/2011 | 24,0/25,1/24,9 | 77    | 10               |
| VIII    | 40,0           | CPV ARI/Ardósia         | 29/11/2011 | 23,3/23,7/24,6 | 77    | 10               |
| IX      | 30,0           | CPV ARI/Escória PADRÃO  | 06/12/2011 | 23,9/23,8/23,6 | 66    | 10               |
| X       | 40,0           | CPV ARI/Escória PADRÃO  | 06/12/2011 | 24,2/24,8/23,9 | 66    | 10               |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

## 5.5 Resultados da resistência à compressão

A Tabela 5.16 compila os dados sobre dosagens,  $f_{ck}=30,0$  MPa e  $f_{ck}=40,0$  MPa nas idades de 24 horas, 3, 7, 14, 28 e 63 dias.

Em seguida, os resultados deste estudo experimental são apresentados nas Figuras 5.4 a 5.13. Entendeu-se que, por meio dos gráficos, os resultados da resistência à compressão ficariam mais claros.

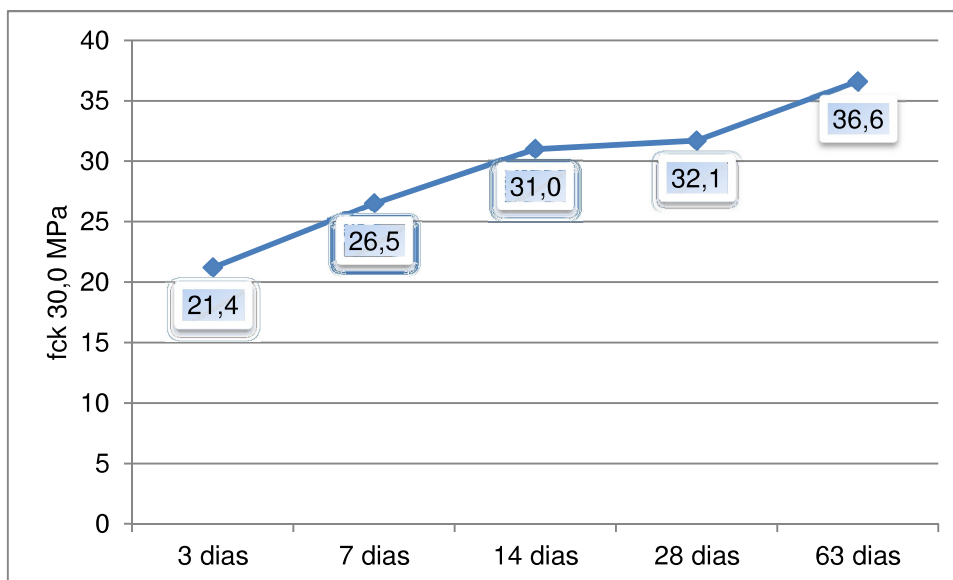
**Tabela 5.16– Compilação das dez dosagens objeto do estudo experimental – resistências à compressão na**

| Dosagem | f <sub>ck</sub><br>MPa | Cimento + Adições |         |         | Consumo Kg/m <sup>3</sup> |                        |      | Aditivo Lts/m <sup>3</sup><br>Tec Mult 829 SPX | 24 Horas | 3 Dias | 7 Dias |
|---------|------------------------|-------------------|---------|---------|---------------------------|------------------------|------|--|----------|--------|--------|
|         |                        | Cimento           | Escória | Ardósia | Areia<br>Natural          | Brita nº 1<br>Calcário | Água |  |          |        |        |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  |          |        |        |
| I       | 30,0                   | 325               | -       | -       | 832                       | 1032                   | 195  | 2,271  | 1,0      | 21,2   | 26,5   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 21,4   | 26,2   |
| II      | 40,0                   | 421               | -       | -       | 734                       | 1058                   | 198  | 2,949  | 3,5      | 35,8   | 38,4   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  |          | 36,3   | 41,8   |
| III     | 30,0                   | 162               | 81      | 81      | 840                       | 1041                   | 195  | 2,267  | -        | 10,9   | 22,1   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 10,2   | 22,5   |
| IV      | 40,0                   | 210               | 105     | 105     | 737                       | 1059                   | 198  | 2,936  | -        | 18,2   | 37,4   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 18,0   | 36,4   |
| V       | 30,0                   | 243               | 81      | -       | 839                       | 1040                   | 195  | 2,271  | 0,2      | 15,9   | 26,3   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 15,5   | 26,0   |
| VI      | 40,0                   | 315               | 105     | -       | 735                       | 1058                   | 198  | 2,943  | 0,4      | 33,8   | 39,5   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 32,4   | 40,5   |
| VII     | 30,0                   | 243               | -       | 81      | 839                       | 1040                   | 195  | 2,271  | 0,5      | 16,7   | 24,1   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 16,8   | 24,1   |
| VIII    | 40,0                   | 315               | -       | 105     | 735                       | 1058                   | 198  | 2,943  | 0,5      | 29,5   | 33,5   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 28,4   | 32,7   |
| IX      | 30,0                   | 243               | 81      | -       | 839                       | 1040                   | 195  | 2,271  | 0,7      | 18,5   | 19,5   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 17,9   | 20,4   |
| X       | 40,0                   | 315               | 105     |         | 735                       | 1058                   | 198  | 2,943  | 0,3      | 34,5   | 35,7   |
|         |                        |                   |         |         |                           |                        |      |  | -        | 33,8   | 35,9   |

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

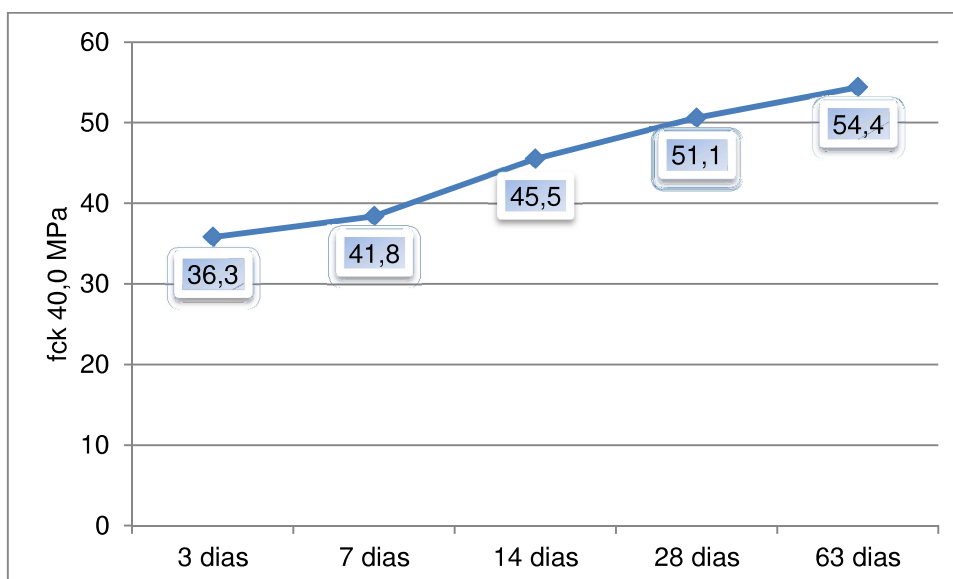


A Figura 5.4 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem #I,  $f_{ck}=30,0\text{MPa}$ , em que nenhuma adição foi feita.



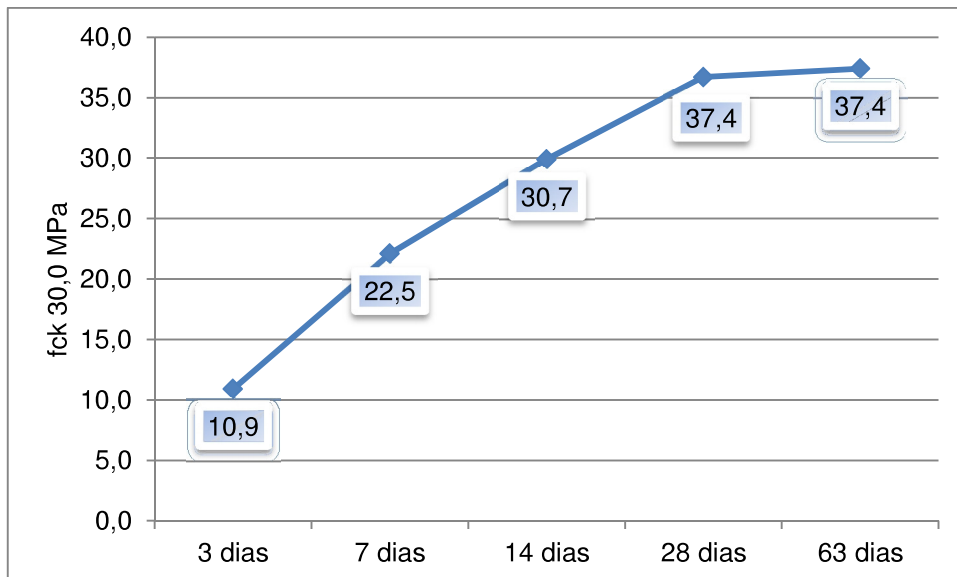
**Figura 5.4 - Dosagem I -  $f_{ck} = 30,0\text{ MPa}$ - CPV ARI sem adição**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.5 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem #I,  $f_{ck}=40,0\text{MPa}$ , em que nenhuma adição foi feita.



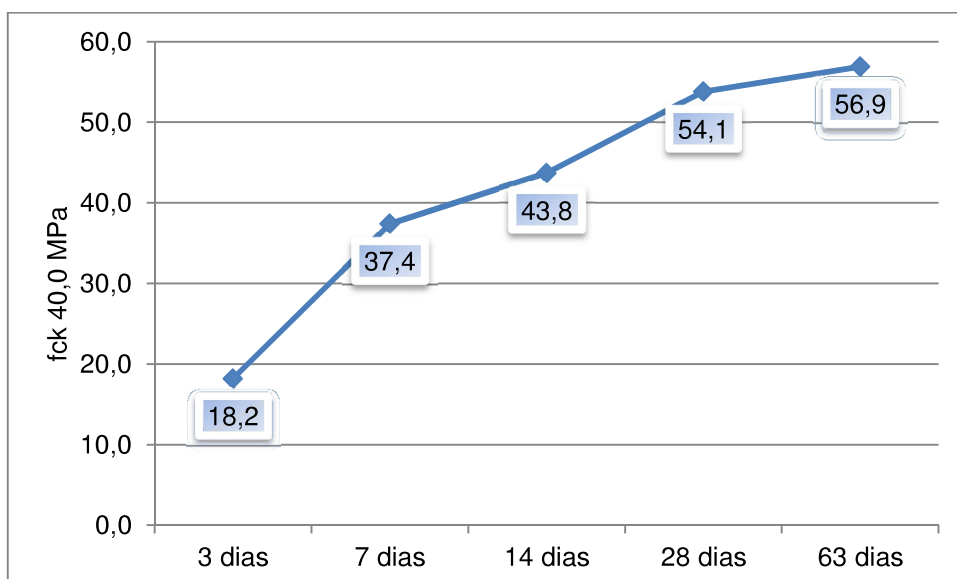
**Figura 5.5 - Dosagem II -  $f_{ck} = 40,0\text{ MPa}$ - CPV ARI sem adição**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.6 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem III,  $f_{ck}=30,0$  MPa, de 50% de cimento CPV ARI com 25% de escória padrão (Blaine 415  $\text{kg cm}^2$ ) e 25% de ardósia, aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



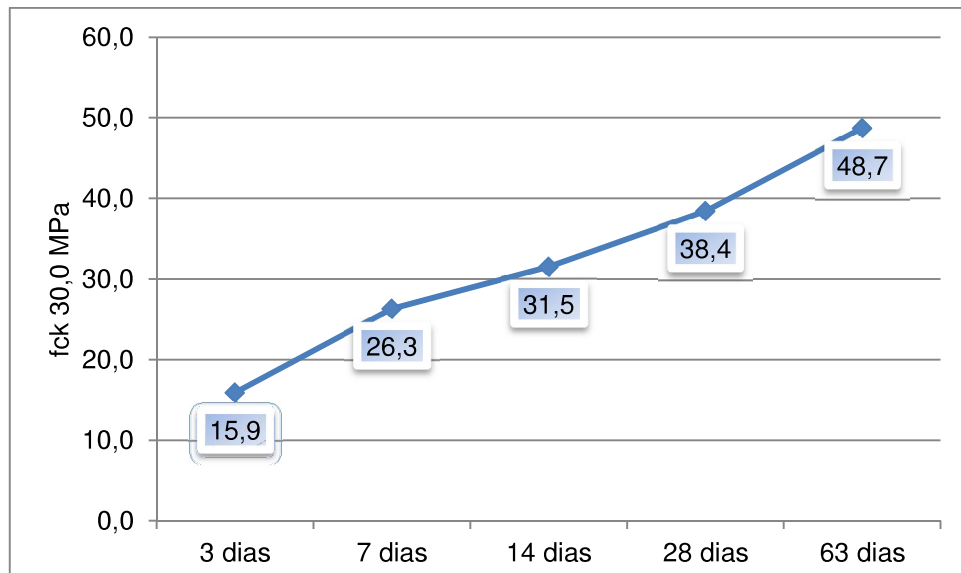
**Figura 5.6– Dosagem III -  $f_{ck}= 30,0$  MPa- 50% CPV ARI + 25% escória padrão + 25% ardósia**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.7 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem IV,  $f_{ck}=40,0$  MPa, de 50% de cimento CPV ARI com 25% de escória padrão (Blaine 415  $\text{kg cm}^2$ ) e 25% de ardósia, aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



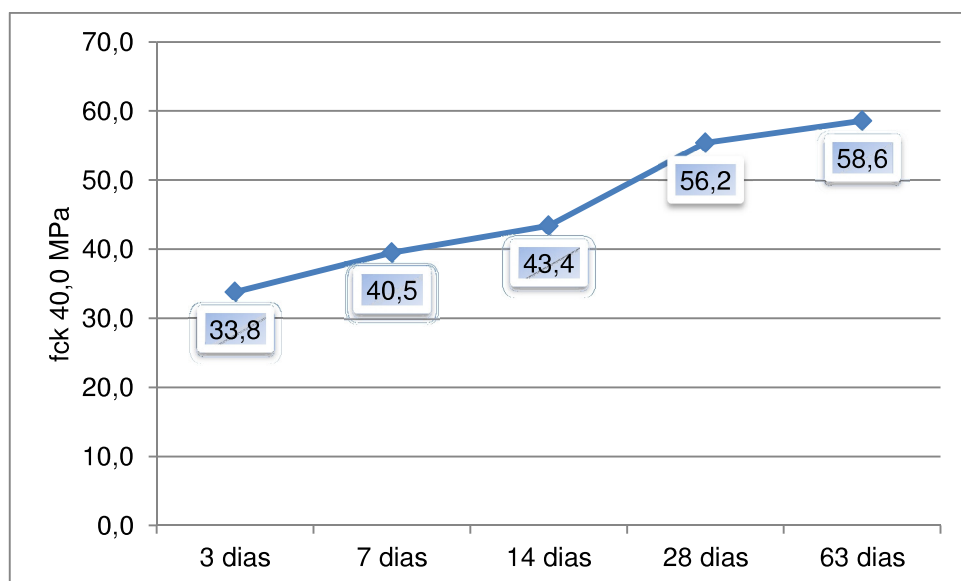
**Figura 5.7 - Dosagem IV -  $f_{ck}= 40,0$  MPa- 50% CPV ARI + 25% escória + 25% ardósia**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.8 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem V,  $f_{ck}=30,0$  MPa, de 75% de cimento CPV ARI com 25% de escória(598  $m^2/kg$ ), aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



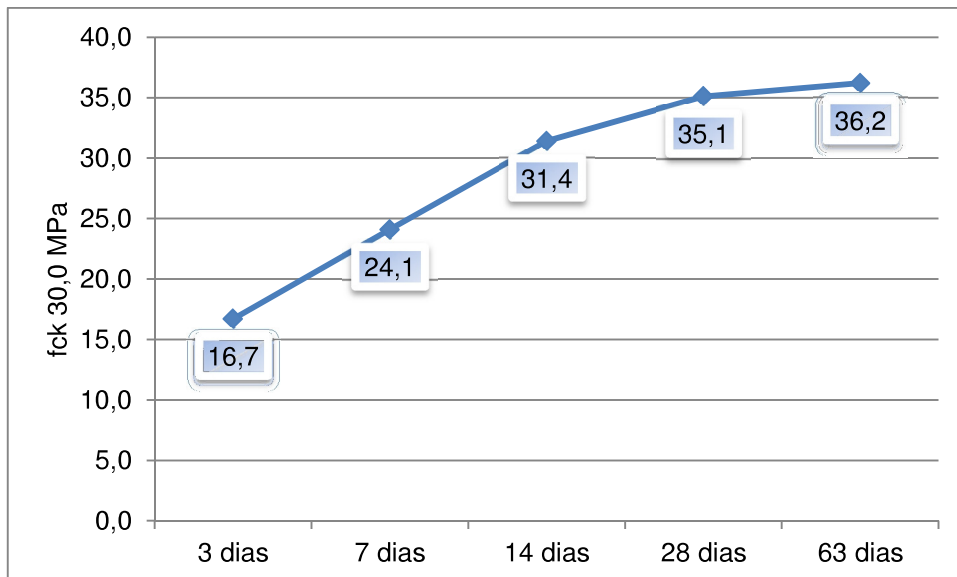
**Figura 5.8 -Dosagem V -  $f_{ck}= 30,0$  MPa- 75% CPV ARI + 25% escória 598  $m^2/kg$**   
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.9 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem VI,  $f_{ck}=40,0$ MPa, de 75% de cimento CPV ARI com 25% de escória (598  $m^2/kg$ ), aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



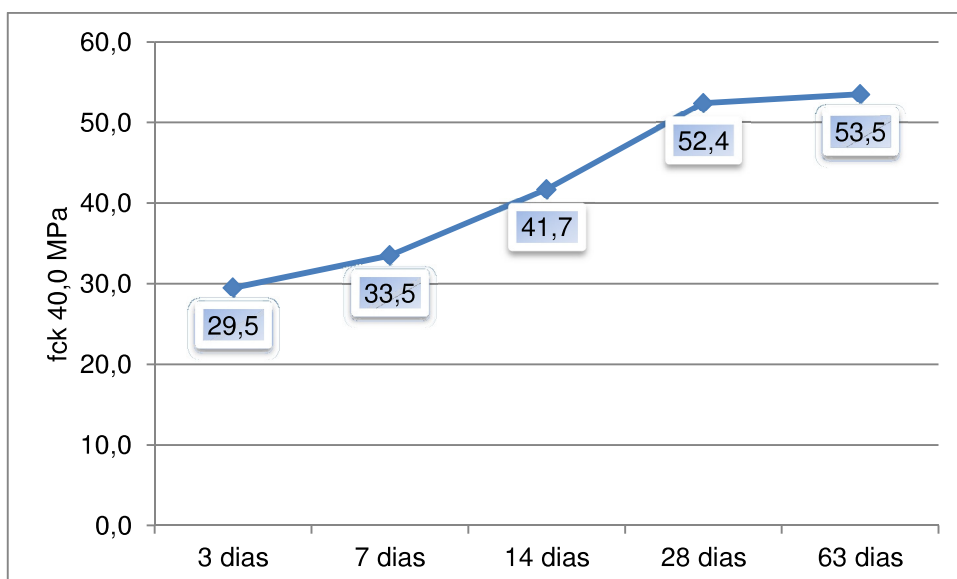
**Figura 5.9–Dosagem VI -  $f_{ck}= 40,0$  MPa- 75% CPV ARI + 25% escória 598  $m^2/kg$**   
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.10 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem VII,  $f_{ck} = 30,0 \text{ MPa}$ , de 75% de cimento CPV ARI com 25% de ardósia, aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



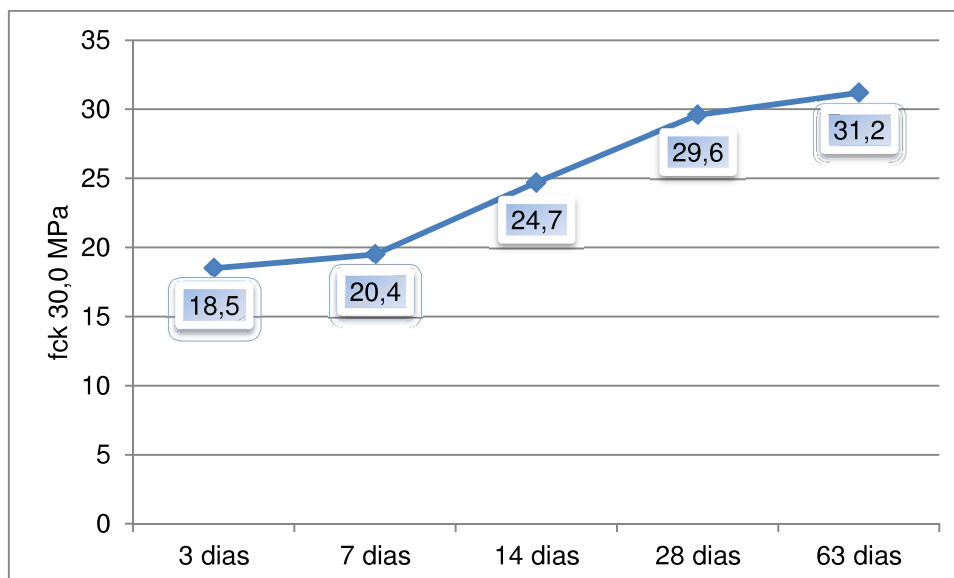
**Figura 5.10 - Dosagem VII -  $f_{ck} = 30,0 \text{ MPa}$  - 75% CPV ARI + 25% ardósia**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.11 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem VIII,  $f_{ck} = 40,0 \text{ MPa}$ , de 75% de cimento CPV ARI com 25% de ardósia aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



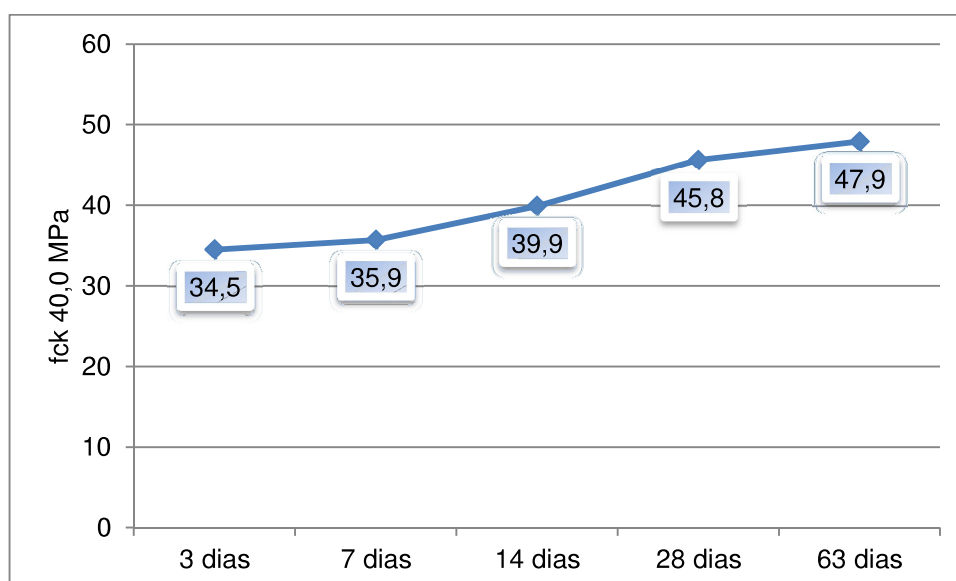
**Figura 5.11 - Dosagem VIII -  $f_{ck} = 40,0 \text{ MPa}$  - 75% CPV ARI + 25% ardósia**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.12 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem IX,  $f_{ck} = 30,0 \text{ MPa}$ , de 75% de cimento CPV ARI com 25% de escória padrão (Blaine 415  $\text{m}^2/\text{kg}$ ), aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



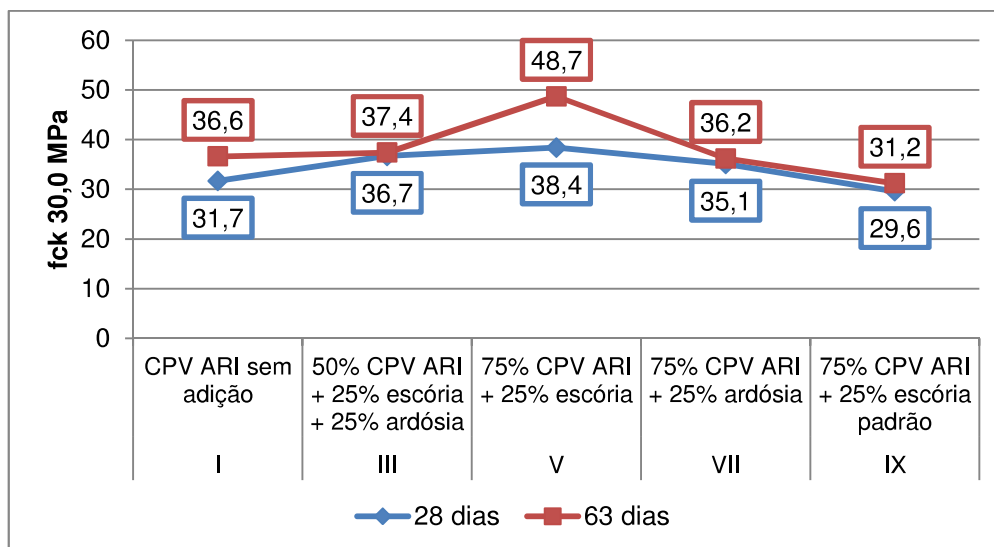
**Figura 5.12 – Dosagem IX -  $f_{ck} = 30,0 \text{ MPa}$  - 75% CPV ARI + 25% escória padrão**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A Figura 5.13 apresenta os resultados da resistência à compressão da dosagem X,  $f_{ck} = 40,0 \text{ MPa}$ , de 75% de cimento CPV ARI com 25% de escória padrão (Blaine 415  $\text{m}^2/\text{kg}$ ), aos 3, 7, 14, 28 e 63 dias.



**Figura 5.13 - Dosagem X -  $f_{ck} = 40,0 \text{ MPa}$  - 75% CPV ARI + 25% escória padrão**  
Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

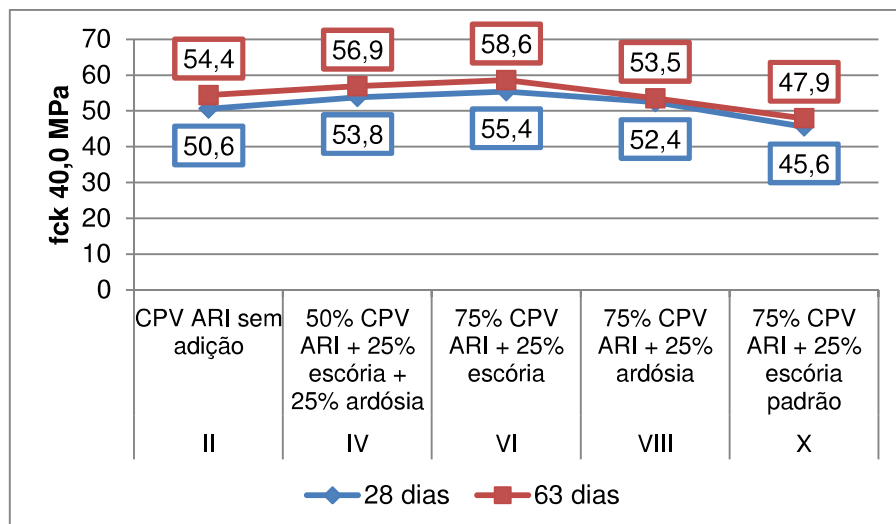
Sabe-se que no concreto padrão o limite padrão de resistência adotado se situa aos 28 dias. Assim, para comprovar a originalidade deste projeto experimental, seguem-se os resultados do  $f_{ck}= 30,0$  MPa (Figura 5.14).



**Figura 5.14 – Comparação dos ganhos de resistência das dosagens deste projeto experimental aos 28 e 63 dias para  $f_{ck}= 30,0$  MPa**  
 Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

Pela análise da Figura 5.14,  $f_{ck}= 30,0$  MPa, percebe-se que a dosagem #I – cimento sem adição – teve ganho de resistência de 15%. Na dosagem #III – 50% de cimento, 25% de escória (Blaine  $598 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) e 25% de ardósia – houve ganho de resistência da ordem de 1,9% entre 28 e 63 dias. Na dosagem #V – 75% de cimento + 25% de escória (Blaine  $598 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) – o percentual encontrado foi de 26,8%. Quanto à dosagem #VII – 75% de cimento + 25% de ardósia, houve ganho de resistência de 3,1%. Finalmente, na dosagem #IX – 75% de cimento + 25% de escória padrão, o ganho de resistência entre 28 e 63 dias foi de 5,4%.

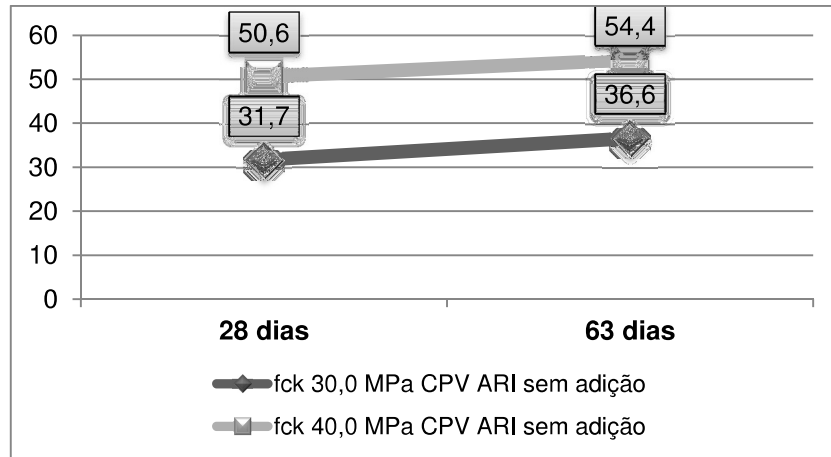
Da mesma forma, seguem-se os resultados do  $f_{ck}= 40,0$  MPa para a melhoria da resistência obtida entre 28 e 63 dias (Figura 5.15).



**Figura 5.15 - Comparação dos ganhos de resistência das dosagens deste projeto experimental aos 28 e 63 dias para  $f_{ck}= 40,0$  MPa**  
 Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

Pela análise da Figura 5.15,  $f_{ck}= 40,0$  MPa, percebe-se que a dosagem #II – cimento sem adição – teve ganho de resistência de 7,5%. Na dosagem #IV – 50% de cimento, 25% de escória (Blaine  $598 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) e 25% de ardósia – houve ganho de resistência da ordem de 5,7% entre 28 e 63 dias. Na dosagem #VI – 75% de cimento + 25% de escória (Blaine  $598 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) – o percentual encontrado foi de 5,7%. Quanto à dosagem #VIII – 75% de cimento + 25% de ardósia, houve ganho de resistência de 2,0%. Finalmente, na dosagem #X – 75% de cimento + 25% de escória padrão, o ganho de resistência entre 28 e 63 dias foi de 5,0%.

A Figura 5.16 compara o cimento sem adição com  $f_{ck}= 30,0$  MPa e  $f_{ck}= 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias.

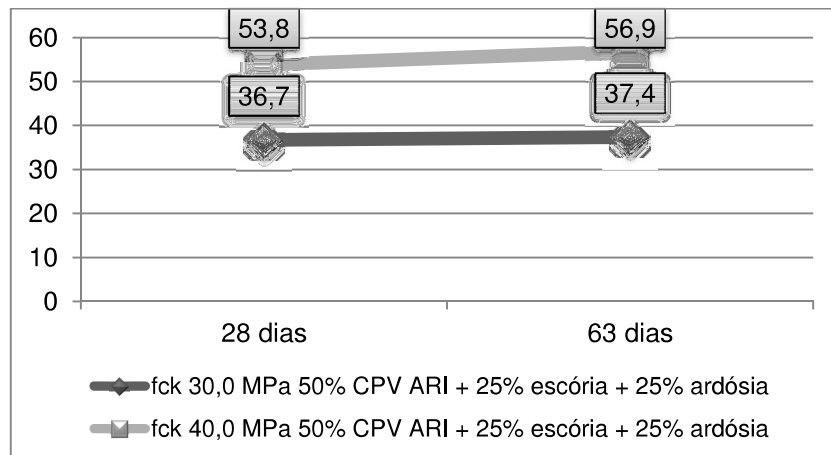


**Figura 5.16 – Comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias – cimento sem adição**

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

No cimento sem adição (Figura 5.16), aos 28 dias o ganho de resistência foi de 59,6% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa. Aos 63 dias, o ganho foi de 48,6% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa.

A Figura 5.17 compara a mistura de 50% de cimento, 25% de escória (Blaine 598  $m^2/kg$ ) e 25% de ardósia com  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias.



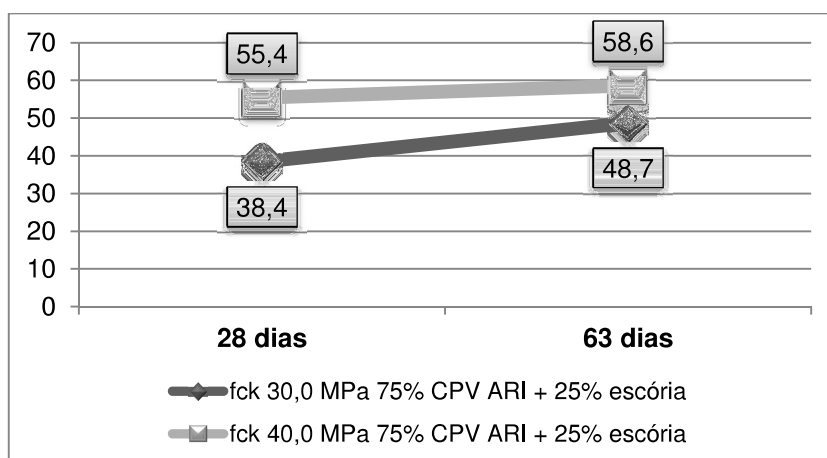
**Figura 5.17 – Comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias – 50% cimento, 25% escória (Blaine 598  $m^2/kg$ ), 25% ardósia**

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

Na mistura de 50% de cimento, 25% de escória (Blaine 598  $m^2/kg$ ) e 25% de ardósia, o ganho de resistência foi de 46,5% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa. Aos 63 dias, o ganho foi de 52,1% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa (Figura 5.17).



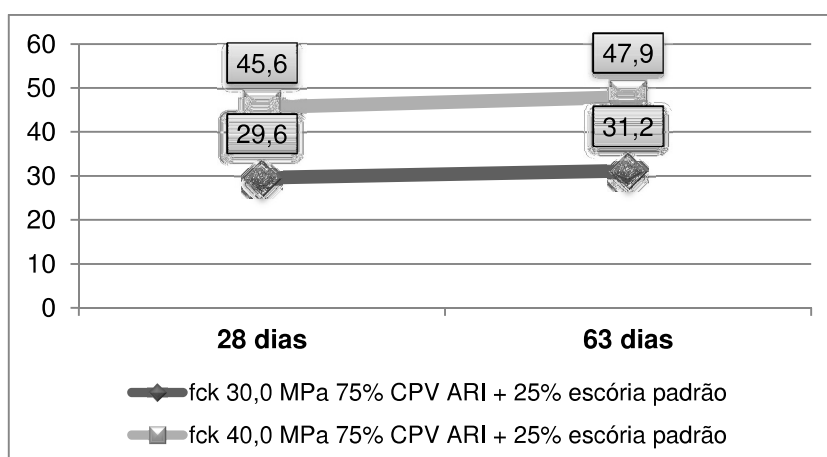
A Figura 5.18 compara a mistura de 75% de cimento e 25% de escória (Blaine 598 m<sup>2</sup>/kg) com  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias.



**Figura 5.18 - Comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias – 75% cimento + 25% escória (Blaine 598 m<sup>2</sup>/kg)**  
 Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

Na mistura de 75% de cimento e 25% de escória, o ganho de resistência foi de 44,2% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa. Aos 63 dias, o ganho foi de 20,3% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa (Figura 5.18).

A Figura 5.19 compara a mistura de 75% de cimento e 25% de escória padrão (Blaine 415 m<sup>2</sup>/kg) com  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias.



**Figura 5.19 - Comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa aos 28 e 63 dias – 50% cimento + 25% escória padrão**  
 Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

Na mistura de 75% de cimento e 25% de escória padrão, o ganho de resistência foi de 54,0% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa. Aos 63 dias, o ganho foi de 53,5% na comparação de  $f_{ck} = 30,0$  MPa e  $f_{ck} = 40,0$  MPa (Figura 5.19).

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

O objetivo geral deste projeto experimental foi analisar o comportamento de concretos mediante adições de escória de alto-forno finamente moída e de ardósia na produção de concretos;

Foi possível observar que, de uma forma geral, a substituição de cimento comumente utilizado na produção de concretos por ardósia moída melhora as resistências à compressão dos concretos, não havendo nenhum registro ou indício de mudança em sua estética, qualidade e aparência;

O uso de escórias moídas em finuras (expressas pelo Blaine) maiores ( $598 \text{ m}^2/\text{kg}$  no lugar dos tradicionais  $415 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) impactou em melhorias nas resistências de concretos de mesma composição e traço;

A substituição de cimento comumente utilizado na produção de concretos por ardósia finamente moída melhora as resistências à compressão dos concretos;

O uso de EAF combinado com ardósia (ambas finamente moídas) aumentou as resistências à compressão nos concretos;

O uso de EAF com BLAINE de  $595 \text{ m}^2/\text{kg}$  melhorou a performance de resistência se comparada com a finura de  $415 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

O uso combinado de EAF e ardósia propiciou melhorias nas resistências, sinalizando ser a ardósia um ativador das reações cimentantes das EAFs.

Não há registro ou indício de mudança na estética, qualidade e aparência.

O uso compartilhado de escória de alto forno e ardósia, ambas finamente moídas, propicia igualmente melhorias na performance das resistências à compressão.

Não foi observado nenhum impacto negativo (valores mínimos inferiores ao preconizado normalização vigente ABNT NBR 6118) dos módulos de elasticidades dos concretos.

Resumindo, a ardósia sinalizou para um grande potencial de uso na indústria da construção civil, sobretudo quando presente em misturas ternárias (cimento+ardósia+EAF), apresentando-se como uma solução na resolução do impacto ambiental propiciado pela sua deposição, em formato de aparas, nos locais de extração.

## **CAPÍTULO 7 – SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS**

Sendo gastos e custos de produção uma preocupação constante por parte das empresas que prestam serviços de fornecimento de concreto pronto para a indústria da construção civil, o presente trabalho sugere e recomenda:

- (1) Avaliar o comportamento sob a escala microscópica dos concretos produzidos a partir de misturas ternárias, binárias e até quaternárias de aglomerantes, com foco na produção de concretos e também de argamassas;
- (2) Avaliar a evolução da reologia e da microestrutura dos concretos e argamassas produzidas com adições de EAF, cimento e ardósia;
- (3) Avaliar o comportamento das ardósias frente a diferentes finuras, quando utilizada na produção de concretos e argamassas;
- (4) Avaliar o desempenho de outras propriedades físicas e mecânicas dos concretos produzidos com misturas ternárias;
- (5) Estudar novas composições e traços de concretos e argamassas com o uso de ardósia e escórias moídas em finuras maiores, através do desenvolvimento de moinho específico (tipo de rolo, por exemplo) e cuja produção seja viabilizada em escala industrial;
- (6) Realizar formulações para outros tipos de cimentos, em particular o CP III.

## REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10342. Concreto - Perda de abatimento - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11768. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12655. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738. Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6156. Cancelada. Substituída por: ABNT NBR NM ISO 7500-1:2004. Materiais metálicos - Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. Emenda 1:2009. Agregados para concreto – Especificação. Emenda 1 de 29.04.2009 complementa a ABNT NBR 7211:2005. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222. Argamassa e Concreto – determinação da resistência à tração por Compressão Diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM ISO 7500-1:2004. Materiais metálicos - Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ACI. American Concrete Institute. 233R-2011. Slag Cement in Concrete and Mortar. Farmington Hills, MI: ACI, March 20, 2012. Disponível em: [http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/233R\\_03.PDF](http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/233R_03.PDF). Acesso em: 12 abr. 2012.

ACI. American Concrete Institute Committee 212. Admixtures for Concrete. ACI Manual of Concrete Practice. Farmington Hills, MI: ACI, 2005.

AMAR-MG. Associação dos Mineradores e Beneficiadores de Ardósia de Minas Gerais. Propriedades da ardósia. <http://www.amarmg.com.br/>. Acesso em: 06 maio 2012.

ARDÓSIA DO MARÃO. Portugal. Características físico-mecânicas da ardósia. 2012. Disponível em: [http://www.construlink.com/LogosCatalogos/igam\\_ardosia\\_marao.pdf?random=873950010](http://www.construlink.com/LogosCatalogos/igam_ardosia_marao.pdf?random=873950010). Acesso em: 06 maio 2012.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D2845-08. Laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. *In* Annual book of standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. Vol. 04.08, p. 254–259, 2008.

ASTM. American Society for Testing and Materials. C597-09. ASTM. Standard test method for pulse velocity through concrete. *In* Annual book of standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. Vol. 04.02, p. 309–312, 2009.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D4015-07. ASTM. Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method. *In* Annual book of standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. Vol. 04.08, p. 473–494, 2007.

ASTM. American Society for Testing and Materials. C 494 / C494-M-12. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 2012.

ASTM. American Society for Testing and Materials. C215 / C215-10. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa, 2010.

BUNGEY, J. H. The testing of concrete in structures. New York: Surrey University Press, 1982.

CAMPANELLA, R.G., STEWART, W.P., ROY, D.; DAVIES, M.P. Low strain dynamic characteristics of soils with the downhole seismic peizocone penetrometer. *In* Dynamic geotechnical testing II. ASTM STP 1213. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa. p.73–87, 1994.

CHIODI FILHO, C. Panorama setorial das rochas ornamentais. Brasil Mineral, n.229, p.124-141, junho, 2004.

CHIODI FILHO, Cid; RODRIGUES, Eleno de Paula; ARTUR, Antonio Carlos. Ardósias de Minas Gerais, Brasil: características geológicas, petrográficas e químicas. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 22, n. 2, p. 119-127, 2003. Disponível em: [http://drifte.rc.unesp.br/revistageociencias/22\\_2/2.pdf](http://drifte.rc.unesp.br/revistageociencias/22_2/2.pdf). Acesso em: 08 maio 2012.

FERRARI, Vladimir José; PADARATZ, Ivo José. Aplicação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, v.25, n.2, p.185-191, 2003.

GROSSI-SAD, J. H.; CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K. Panorama do setor de ardósias do Estado de Minas Gerais, Brasil. Belo Horizonte: Cia. Mineradora de Minas Gerais - COMIG, 1998. v. 2, (versão em CD-ROM, 2002).

GROSSI-SAD, J. H.; QUADE, H., 1985. Revisãoestratigráfica do Grupo Bambuí (Bloco Oriental) em Minas Gerais. *SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINASGERAIS*, 3, 1985, Belo Horizonte. Boletim... Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais, 1985, n. 5, p. 68-83.

HOGAN, F. J.; MEUSEL, J. W. Evaluation for durability and strength development of a ground granulated blast-furnace slag. *Cement, Concrete and Aggregates*, v.3, n.1, p.40-52, 1981.

KHAN, Zahid H., CASCANTE, Giovanni; EL NAGGAR, M.Hesham. Evaluation of the first mode of vibration and base fixidity in resonant-column testing. *Geotechnical Testing Journal*, v.31, n.1, p.587-606, 2008.

KHAN, Zahid; CASCANTE, Giovanni; EL NAGGAR, M. Hesham. Measurement of dynamic properties of stiff specimens using ultrasonic waves. *Canadian Geotechnical Journal*, n.48, p.1-15, 2011.

KRAUTKRAMER, J.; KRAUTKRAMER, H. *Ultrasonic testing of materials*. New York: Springer-Verlag, 1990.

LEONG, E.; YEO, S.; RAHARDJO, H. Measurement of wave velocity and attenuation using an ultrasonic test system. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5): 844–860, 2004.

LEWIS, D. W. *History of Slag Cements*. Symposium on Slag Cement, University of Alabama, Birmingham, Ala., 1981.

MAIA, Cláudia Martinez; HELDER, Mathias. Rochas Ornamentais e de Revestimentos. 2012. Disponível em: [https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArqui vo=7406](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArqui vo=7406). Acesso em: 10 out. 2012.

MATHER, B. Laboratory Tests of Portland Blast-Furnace Slag Cements. *ACI JOURNAL*, Proceedings, v.54, n.3, p.205-232, 1957.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTANI, C. Stone 2003: repertorio economico mondiale. Faenza (Itália): Faenza Editrice, 2003. 230 p.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.. The ultrasonic pulse velocity method. In: Handbook of non-destructive testing of concrete. Boca Raton, Fla.: CRC Press Inc., 1991, p.169-188.

PINHEIRO, Libânio; MUZARDO, Cassiane D; SANTOS, Sandro P. Estruturas de concreto. Cap.2 In: PINHEIRO, Libânio. Fundamentos do Concreto e projeto de edifícios. São Carlos: Universidade de São Paulo, maio de 2007. Disponível em: [http://www.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost\\_EESC\\_USP\\_Libanio.pdf](http://www.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf). Acesso em: 28 abr. 2012.

POPOVICS, J. S.; ROSE, J. L.A survey of developments in ultrasonic NDE of concrete. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.41, n.1, p.140-143, 1994.

POTTER, P.E.; MAYNARD, J.B.; PRYOR, W.A. Sedimentology of shale. New York: Springer-Verlag, 1980, 306 p.

SCHMERR, L. W. Fundamentals of ultrasonic non-destructive evaluation: a modelling approach. London: Springer, 1998.

SOLOMON, C. Slag-Iron and Steel. Bureau of Mines, Annual Report, Washington, 1991.

THOMAS, A. Metallurgical and Slag Cements, the Indispensable Energy Savers: General Practices, IEEE Cement Industry 21 Technical Conference, 1979, 108p.

TOKSÖZ, M.N., JOHNSTON, D.H.; TIMUR, A. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements. Geophysics, v.44, n.4, p.681-690, 1979.