

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES NO MÓDULO DE ELASTICIDADE  
DINÂMICO, NA RESISTÊNCIA À FADIGA E NA TENACIDADE À FRATURA  
PARA CONCRETOS CONVENCIONAIS.**

Jordanna Chamon Vogt

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES NO MÓDULO DE  
ELASTICIDADE DINÂMICO, NA RESISTÊNCIA À FADIGA E NA  
TENACIDADE À FRATURA PARA CONCRETOS  
CONVENCIONAIS"**

Jordanna Chamon Vogt

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

---

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar  
DEMC - UFMG - (Orientador)

---

Prof. Dr. José Marcio Fonseca Calixto  
DEES - UFMG

---

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva  
DEMC - UFMG

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2006

**Aos meus pais queridos, irmãs, vovó e meu grande amor.**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Departamentos de Engenharia de Estruturas e o Departamento de Materiais de Construção da Universidade Federal de Minas Gerais.

À professora doutora Maria Teresa Paulino Aguilar, amiga e orientadora.

Ao professor doutor Abdias Magalhães pelos sábios conselhos.

Ao professor doutor José Márcio Fonseca Calixto pelas críticas construtivas.

Ao professor doutor Paulo R. Cetlin pela aquisição de equipamentos.

Ao aluno Vinícius Xavier pela ajuda na realização dos ensaios de laboratório.

## SUMÁRIO

### Resumo

<b>Abstract</b>	pág. 2
<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	pág 3
1.1 - Considerações Preliminares	pág 3
1.2 - Justificativa	pág 4
1.3 - Objetivo	pág 5
1.4 - Escopo do trabalho	pág 5
<b>Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica</b>	pág 6
2.1 - Construção civil sustentável	pág 6
2.2 - Aglomerantes e agregados alternativos	pág 9
2.2.1 - Escória de alto forno	pág 11
2.2.2 - Sílica ativa	pág 16
2.2.3 - Resíduo de materiais de construção e de demolição	pág 19
2.3 - Propriedades mecânicas do concreto	pág 23
2.3.1 - Resistência mecânica do concreto	pág 23
2.3.2 - Resistência à fadiga	pág 29
2.3.3 - Módulo de elasticidade	pág 35
2.3.4 - Tenacidade à fratura	pág 43
<b>Capítulo 3 - Materiais e métodos</b>	pág 49
3.1 - Materiais	pág 49
3.2 - Determinação da composição do concreto de referência	pág 55
3.3 - Composição dos concretos com adições	pág 57
3.4 - Métodos	pág 58
3.4.1 - Confecção dos corpos de prova	pág 59
3.4.2 - Ensaio de compressão	pág 59
3.4.3 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico	pág 60
3.4.4 - Resistência à fadiga	pág 61
3.4.5 - Tenacidade à fratura	pág 62
<b>Capítulo 4 – Resultados e Discussão</b>	pág 64
4.1 - Ensaio de compressão	pág 64
4.2 - Módulo de elasticidade	pág 72
4.3 - Resistência à flexo-tração	pág 80
4.4 - Resistência à fadiga	pág 82
4.5 - Resistência à tenacidade à fratura	pág 84
<b>Capítulo 5 - Conclusões</b>	pág 86
<b>Referências bibliográficas</b>	pág 88

## **LISTA DE FIGURAS**

### **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica**

- FIGURA 2.1 - Preocupações dos líderes mundiais, pág 8.
- FIGURA 2.2 - RCD reciclado utilizado pra o concreto, pág 21.
- FIGURA 2.3 - Amostras de artefatos de concreto, pág 21.
- FIGURA 2.4 - Pré-moldados intertravados utilizados em passeios, pág 21.
- FIGURA 2.5 - Blocos de concreto, pág 22.
- FIGURA 2.6 - Curva S-N (Wohler), pág30.
- FIGURA 2.7 - Representação das ligações individuais dos átomos dentro de um cristal, pág 37.
- FIGURA 2.8 - Valores experimentais do módulo de elasticidade e a tensão de ruptura de diferentes concretos dados do trabalho de MROS apresentado por COUTINHO e GONÇALVES (1988), pág 42.
- FIGURA 2.9 - Representação da curva tensão deformação, pág 46.

### **Capítulo 3 - Materiais e Métodos**

- FIGURA 3.1 - Resultante da difração de raios x da amostra de escória muída, pág 54.
- FIGURA 3.2 - Procedimento experimental, pág 58.
- FIGURA 3.3 - Fotografia da montagem para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto; módulo transversal e longitudinal, pág 60.
- FIGURA 3.4a - Fotografia da montagem para ensaios de fadiga, pág 65.
- FIGURA 3.4b - Representação do ensaio de flexo-tração para carregamentos cíclicos, pág 62.

### **Capítulo 4 - Resultados e discussão**

- FIGURA 4.1 - Resistência à compressão do concreto de referência em diferentes idades, pág 65.

- FIGURA 4.2 - Resistência à compressão do concreto com 5% de sílica ativa gel em diferentes idades, pág 66.
- FIGURA 4.3 - Resistência à compressão do concreto com 10% de sílica ativa gel em diferentes idades, pág 66.
- FIGURA 4.4 - Resistência à compressão do concreto com 17,5% de escória de alto forno em diferentes idades, pág 67.
- FIGURA 4.5 - Resistência à compressão do concreto com 35% de escória de alto forno em diferentes idades, pág 67.
- FIGURA 4.6 - Resistência à compressão do concreto com 17,5% de resíduo de cerâmica vermelha em diferentes idades, pág 68.
- FIGURA 4.7 - Resistência à compressão do concreto com 35% de resíduo de cerâmica vermelha em diferentes idades, pág 69.
- FIGURA 4.8 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias, pág 70.
- FIGURA 4.9 - Resistência à compressão dos concretos aos 14 dias, pág 70.
- FIGURA 4.10 - Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias, pág 71.
- FIGURA 4.11 - Módulo de elasticidade dinâmico para o concreto de referência, pág 72.
- FIGURA 4.12 - Módulo de elasticidade dinâmico para o concreto com 5% de sílica ativa gel, pág 73.
- FIGURA 4.13 - Módulo de elasticidade dinâmico para o concreto com 10% de sílica ativa gel, pág 73.
- FIGURA 4.14 - Módulo de elasticidade dinâmico para o concreto com 17,5% de escória de alto forno granulada, pág 74.
- FIGURA 4.15 - Módulo de elasticidade dinâmico para o concreto com 35% de escória de alto forno granulada, pág 74.
- FIGURA 4.16 - Módulo de elasticidade dinâmico para o concreto com 17,5% de resíduo de cerâmica vermelha, pág 75.
- FIGURA 4.17 - Módulo de elasticidade dinâmico para o concreto com 35% de resíduo de cerâmica vermelha, pág 75.
- FIGURA 4.18 - Módulo de elasticidade dinâmico médio dos concretos em estudo, pág 77.

FIGURA 4.19 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias, pág 78.

FIGURA 4.20 - Módulos de elasticidade do concreto, página 79.

FIGURA 4.21 - Tensão de ruptura à flexo-tração, página 81.

FIGURA 4.22 - Resistência a flexo-tração e resistência à compressão, página 82.

FIGURA 4.23 - Tensão de ruptura após 500 ciclos de carregamento, página 83.

FIGURA 4.24 - Resistência a flexo-tração com e sem 500 ciclos de carregamento, página 83.

FIGURA 4.25 - Tensão de ruptura dos corpos fendilhados, página 84.

FIGURA 4.26 - Fator de intensidade de tensões para diferentes concretos, página 85.



**LISTA DE TABELAS**

3.1 - Características químicas do cimento CP II E 32	pág 50
3.2 - Características físicas do cimento CP II E 32	pág 50
3.3 - Composição granulométrica da areia	pág 51
3.4 - Parâmetros físicos da areia	pág 51
3.5 - Composição granulométrica da brita	pág 52
3.6 - Parâmetros físicos da brita	pág 53
3.7 - Sílica ativa Gel Centrament Fume S.	pág 53
3.8 - Quantidades de materiais por m <sup>3</sup> de concreto.	pág 54

## Resumo

No Brasil, a escória de alto-forno, finamente moída no estado amorfo, e a sílica ativa são os rejeitos industriais mais utilizados como adições no concreto. Recentemente, adições de resíduos da construção civil, em especial de cerâmica vermelha, tem sido avaliadas como possíveis constituintes do concreto. Essas adições agem como materiais cimentícios e/ou pozolânicos, alterando a evolução da resistência com o tempo de cura e a durabilidade do composto. No entanto pouco se tem estudado sobre a influência desses materiais na resistência à flexo-tração, no módulo de elasticidade dinâmico, na tenacidade à fratura e na resistência à fadiga. Neste trabalho essas propriedades mecânicas são analisadas em concretos com diferentes adições de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha. De forma geral, tais adições contribuem de maneira diferenciada para as propriedades analisadas. Tendo em vista a resistência à compressão nas idades iniciais, a adição de 5% de sílica ativa gel mostrou-se mais efetiva do que a adição de 10%. Todas as adições parecem não afetar de forma significativa o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias. As adições de 10% de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha tendem a diminuir sensivelmente a resistência à flexo-tração. Os concretos sem adição e com adição de 5% de sílica ativa gel apresentaram sensibilidade a esforços cíclicos. No tocante à tenacidade à fratura não foi observado variações significativas devido às adições, e ao fator água cimento.

## Abstract

In Brazil most used the industrial wastes as concrete additions are the blast furnace slag finely ground to an amorphous state and the silica fume. Recently, wastes from civil construction, specially the red ceramics, have been evaluated as possible concrete constituents. These materials act like cements or pozzolanic material. They change the strength evolution of concrete with the cure time as well as the concrete durability. However, there are few studies on the effect of these additions on bending, Young modulus, fracture energy and static fatigue. In this paper these mechanical properties are analyzed in concrete with various additions of silica fume, granulated blast furnace slag and red ceramic waste. The addition of 5% of silica is more effective than the addition of 10% as a hardening agent, of the first hardening stages. In general the studied additions do not seem to affect the elasticity modulus on the first 28 days. The additions of 10% of silica fume, slag and red ceramic tend to decrease significantly the bending strength. The concrete without addition and with addition of 5% of silica fume shows sensitivity to cyclic efforts. The fracture energy is not affected by the additions and not even by the factor water cement.

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações preliminares

O concreto de cimento Portland é um material composto que consiste essencialmente de uma matriz uniforme obtida pela reação da água com o cimento, dentro da qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. Ao longo dos anos o controle tecnológico desse material se deu basicamente através da medida de sua consistência e resistência à compressão. Com o desenvolvimento de cimentos mais finos e mais reativos, a resistência à compressão não é suficiente para avaliar o desempenho do concreto na sua totalidade.

Outras propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade dinâmico, tenacidade à fratura, resistência à flexo-tração e resistência à fadiga, devem ser consideradas. Além disto, o concreto deve manter suas características pelo tempo previsto em projeto, ou seja, deve ser durável. Um concreto de qualidade é comumente associado a um concreto de elevada resistência à compressão que apresenta uma baixa porosidade, baixa

heterogeneidade e uma elevada resistência na zona de transição (agregado – pasta de cimento).

O concreto com desempenho satisfatório tem sido especificado em situações onde é importante a redução do peso da estrutura através da utilização de elementos mais esbeltos, e também onde o ambiente externo à estrutura é considerado agressivo. Estes têm sido obtidos pela diminuição do fator água/cimento ou através da adição de diferentes materiais. Comumente se avalia o comportamento deste composto através da resistência à compressão. Em estudos mais avançados também é avaliada a sua microestrutura.

A utilização do termo desempenho neste trabalho tem uma abordagem mais ampla, como a sugerido por AITCIN (2000). O concreto com desempenho satisfatório seria aquele que associa o desempenho desejado, em termos de solicitação mecânica, ao tempo de vida útil previsto. Obviamente estaria relacionado com a porosidade do concreto e conseqüentemente com o fator água/cimento.

Comumente a durabilidade envolve a resistência à abrasão, aos ciclos de congelamento e descongelamento, a resistência à penetração de íons cloreto, a carbonatação, ao fogo, a corrosão do aço da armadura, etc. No entanto não é considerada a influência dos constituintes do concreto em outras solicitações que os concretos estão comumente submetidos como ciclos de cargas e cargas de impacto. Portanto, neste trabalho foi analisado o comportamento mecânico de concretos fabricados com três diferentes adições (sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha), em diferentes proporções.

## **1.2 - Justificativa**

O atual cenário da construção civil exige cada vez mais concretos duráveis, de alta resistência à compressão uniaxial, a flexo-tração e adequado módulo de elasticidade. Para se obter um concreto com estas características se fazem necessárias várias medidas. Dentre

elas pode-se destacar a viabilidade de estruturas mais esbeltas, detalhes arquitetônicos, processamentos eficientes, mão de obra especializada e treinada, seleção e controle de qualidade dos materiais componentes.

Na literatura técnica-científica atual, muito se estuda sobre a influência de adições na resistência mecânica à compressão, na penetração de agentes nocivos e na durabilidade da estrutura de concreto armado. Pouco é relatado sobre a influência de adições minerais no módulo de elasticidade dinâmico, na tenacidade à fratura e na resistência à fadiga.

No sentido de contribuir para o estudo de concretos duráveis, este trabalho se propõem a avaliar o comportamento mecânico de forma ampla de concretos fabricados com diferentes adições. Este trabalho, também, se insere no contexto de implantação da construção civil sustentável, na medida em que serão estudadas adições provenientes de resíduos industriais e da própria construção civil.

### **1.3 - Objetivo**

O objetivo deste trabalho é o estudo do efeito de diferentes teores de adições, provenientes de resíduos industriais e da construção civil no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura em concretos convencionais. Serão analisadas adições de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha.

### **1.4 - Escopo do trabalho**

Este trabalho é composto por cinco capítulos. Neste primeiro capítulo o trabalho é contextualizado, justificado e definido em linhas gerais. Em seguida, é apresentada uma revisão da literatura atual disponível sobre adições em concretos convencionais. Nos capítulos seguintes, são apresentados os tópicos referentes aos materiais e métodos adotados (capítulo 3), os resultados obtidos e a análise dos mesmos (capítulo 4), e finalmente são apresentadas às conclusões (capítulo 5).

# 2

## Revisão Bibliográfica

Em função dos objetivos do estudo foi feita uma revisão bibliográfica sobre aglomerantes/agregados alternativos e sobre as propriedades relevantes do concreto no estado endurecido: resistência mecânica, módulo de elasticidade dinâmico, tenacidade à fratura e comportamento sob cargas cíclicas (fadiga).

### 2.1- Construção Civil Sustentável

Ao longo da história da humanidade, a visão de progresso vem se confundindo com um crescente domínio e transformação da natureza. Nesse paradigma, os recursos naturais são vistos como ilimitados. Resíduos gerados durante a produção e ao final da vida útil dos produtos são depositados em aterros, caracterizando um modelo linear de produção. A preservação da natureza foi vista de forma geral como antagônica ao desenvolvimento. Neste contexto, a preservação da natureza significou a criação de parques, áreas especiais destinadas à preservação de amostras da natureza para as gerações futuras, evitando-se a extinção de espécies.

A visão de desenvolvimento sustentável surge como decorrência da percepção sobre a incapacidade desse modelo de desenvolvimento e de preservação ambiental se perpetuar e até mesmo garantir a sobrevivência da espécie humana. O avanço do conhecimento sobre os efeitos de poluentes orgânicos biopersistentes, as catástrofes planetárias como a destruição da camada de ozônio por gases produzidos e liberados pelo homem e o conhecido efeito estufa demonstram que a preservação da natureza vai exigir uma reformulação mais ampla dos processos produtivos e de consumo. Isso implica em uma reformulação radical da visão de impacto ambiental das atividades humanas, que passa também a incorporar todos os impactos das atividades e de consumo, desde a extração da matéria prima, os processos industriais, o transporte e o destino dos resíduos de produção e também do produto após a sua utilização.

Além dos regulamentos que limitam a poluição do ar e da água e protegem vegetação e espécies naturais, é evidente a necessidade de uma análise crítica dos processos de produção e de consumo. Nesse sentido, a produção ambiental deixa de ser uma preocupação de ambientalistas e funcionários de órgãos ambientais, para entrar no mundo dos negócios.

Pesquisa internacional realizada pela Civil Engineering Research Foundation (CERF), entidade ligada ao American Society of Civil Engineers (ASCE) dos Estados Unidos, revelou que a questão ambiental é uma das maiores preocupações dos líderes do setor de construção Civil (FIG 2.1), logo atrás de informática (MEYER, 2006).





**FIGURA 2.1** - Preocupações dos Líderes Mundiais (MEYER, 2006).

A razão desta preocupação decorre de alguns fatores objetivos. A construção civil é responsável por entre 15 a 50 % do consumo dos recursos naturais extraídos. Em países como o Reino Unido o consumo de materiais de construção civil é de aproximadamente 6 toneladas/habitante.ano. O consumo de agregados naturais varia entre 1 e 8 toneladas/habitante.ano. No Brasil o consumo de agregados naturais, somente na produção de concreto e argamassa, é de 220 milhões de toneladas. Em volta das grandes cidades areia e agregados naturais começam a ficar escassos, inclusive graças ao crescente controle ambiental da extração das matérias primas. Em São Paulo a areia natural, em sua grande maioria viaja distâncias superiores a 100 km, elevando o custo para valores em torno de R\$ 25/m<sup>3</sup>. A construção civil consome cerca de 2/3 da madeira natural extraída e a maioria das florestas não são manejadas adequadamente. Algumas matérias primas tradicionais da construção civil tem reservas mapeadas escassas. Embora estes valores possam sempre ser questionados, certamente exercem influência no preço dos produtos, dificultando assim o seu uso.

Além de extrair recursos naturais, a produção de materiais para a construção civil também gera poluição como poeira e CO<sub>2</sub>. O processo produtivo do cimento necessariamente gera CO<sub>2</sub> gás no efeito estufa. Para cada tonelada de clínquer produzido mais de 600 kg de CO<sub>2</sub>

são gerados. As medidas de proteção ambiental de outras indústrias e o crescimento da produção mundial do cimento fazem com que a participação do cimento no CO<sub>2</sub> total gerado tenha mais que dobrado no período de 30 anos (1950 e 1980). Outros materiais usados em grande escala tem problemas similares.

A deposição indiscriminada dos resíduos da construção, em aterros ou em “bota-foras” inseridos na malha urbana, vem atualmente recebendo maior preocupação em relação ao meio ambiente e a qualidade de vida dos grandes centros urbanos. Por outro lado, é crescente a geração anual desses resíduos.

Nesse contexto, a utilização de materiais alternativos e controle do desperdício têm merecido especial atenção nos estudos nas últimas décadas. A ação imediata adotada, após o controle do desperdício, é a de utilizar ao máximo todo o material que já foi extraído antes de se extrair mais materiais. Ou seja, o principal foco seria aproveitar os resíduos dentro da sua própria cadeia, gerando assim benefícios a todos que estão ligados direta e indiretamente no processo.

## **2.2 - Aglomerantes e Agregados Alternativos**

O concreto é um material composto constituído essencialmente de um meio uniforme aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. Nos concretos de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado a partir de uma mistura de água e cimento. Aglomerantes hidráulicos são pós que através de reação química com a água produzem um volume sólido com baixa solubilidade em água. Os agregados comumente empregados são pedras (agregado graúdo) e areias (agregado miúdo).

O concreto não é tão resistente, nem tão tenaz como o aço, mas sua resistência à ação da água, a facilidade com que pode ser moldado em uma variedade de formas complexas, associado ao seu preço, faz dele um material largamente empregado na engenharia.

O aglomerante hidráulico comumente utilizado na construção civil é o cimento Portland, que é o produto obtido pela pulverização de clínquer, material este constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma determinada proporção de sulfato de cálcio natural, contendo eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades e facilitam sua utilização. O cimento Portland é constituído basicamente por cal (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), determinada proporção de magnésia (MgO) e uma pequena parcela de anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>). A proporção desses compostos constituintes é que determina as propriedades finais do cimento, e conseqüentemente as do concreto.

Agregado pode ser definido como material particulado, incoesivo, de atividade química basicamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo uma extensa gama de tamanhos. Os agregados se classificam segundo sua origem, dimensões de partículas e peso específico aparente. No que diz respeito à origem os agregados podem ser classificados como naturais ou industrializados (também conhecidos como artificiais). Dentre os naturais temos a areia e o cascalho, já para os ditos artificiais podem ser citados a escória de alto forno e a argila. Quanto às dimensões são adotadas duas classificações dentro da tecnologia do concreto: os agregados miúdos (areias) e os graúdos (cascalhos e britas). Já quanto ao peso específico aparente os agregados podem ser classificados como leves, médios ou pesados. A seleção de agregados particularmente resistentes não é necessária para a produção do concreto de até 50 MPa. Geralmente, é apenas necessário verificar se estão sendo atendidas as exigências de desempenho das normas para os agregados. No entanto no caso de baixa resistência, como os leves e os de resíduos de construção e demolição, (30 MPa), deve ser considerado que a pasta hidratada de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes que, os agregados, particularmente os graúdos, podem tornar-se o elo mais fraco dentro do concreto.

O conhecimento de certas características dos agregados é essencial na dosagem do concreto. Características como a porosidade, a massa específica, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos agregados determinam as propriedades

dos concretos no estado fresco. Não somente a porosidade, a composição mineralógica do agregado afeta a sua resistência à compressão, dureza, módulo de elasticidade e sanidade influenciam no concreto em seu estado endurecido.

O uso de resíduos, tanto industriais quanto da própria construção, como materiais alternativos em substituição, parcial ou total aos agregados e aglomerantes vem de encontro às necessidades do mundo atual no que diz respeito ao conceito de sustentabilidade, que envolve responsabilidade ambiental, social e técnica/econômica. Vários materiais alternativos têm sido estudados: resíduos agrícolas, pneus, cinzas volantes, cinzas pesadas, sílica ativa, escórias, resíduos de construção e demolição (FREIRE, 2003). Esses resíduos dependendo da sua composição química, grau de cristalinidade apresentam reatividade em meio aquoso, podendo funcionar como aglomerantes ou agregados.

#### 2.2.1 - Escória de Alto-Forno

A escória siderúrgica é um subproduto da produção de aço e ferro gusa. Dependendo das condições de resfriamento pode se apresentar no estado sólido com estrutura cristalina ou estrutura predominantemente vítrea (sempre acima de 90%). Quando cristalina, a escória, devido a sua baixa energia e conseqüente estabilidade, não apresenta características aglomerantes, sendo utilizada como agregado para concreto, regulador do pH do solo, fertilizante, na produção do vidro, em aterros e lastro de estradas férreas.

As escórias vítreas podem ser obtidas por granulação ou pelotização. Este procedimento produz um material de maior diâmetro, poroso e parcialmente cristalino, sendo comumente utilizados como agregados leves. Os grãos menores são similares a areia de quartzo natural, que possui estrutura vítrea. Para a obtenção deste material no estado granulado, a escória no estado líquido, em queda livre, é interceptada por um jato de água fria, a uma pressão de cerca de 0,6 MPa, utilizando-se em torno de 3.000 kg de água por tonelada de escória. O choque térmico leva a produção de um material granular de forma mais angular, com

granulometria muito similar à da areia natural, que freqüentemente apresenta teores de estrutura vítrea acima de 97%.

Segundo vários pesquisadores (OSBORNE 1999; WAINWRIGHT e REY, 2000, LI e ZHAO, 2002, PAL et al., 2003, NASSIF et al., 2004) a escória granulada de alto forno proporciona a obtenção de misturas com interessantes características: baixo calor de hidratação; maiores tempos de pega; menores taxas de retração na mistura plástica; formação de uma maior quantidade de silicatos hidratados de cálcio; menor segregação e exsudação e uma maior durabilidade. No entanto, CANESSO (2005) diz que para usufruir das vantagens proporcionadas pela adição de escória de alto forno é necessário um controle de sua dosagem para fabricação do cimento bem como do concreto.

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), as partículas de escória menores do que 10 $\mu$ m contribuem para as resistências iniciais do concreto até 28 dias; partículas de 10  $\mu$ m a 45  $\mu$ m contribuem para as resistências a longas idades, mas, partículas maiores do que 45  $\mu$ m são difíceis de hidratar.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), no estado fresco do concreto, a adição de escória de alto forno melhora a coesão e a trabalhabilidade, podendo também melhorar a resistência do concreto à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado, e ao ataque por sulfatos. Já no estado endurecido, reduz o calor de hidratação, provocando uma fissuração térmica menor, isto é, uma menor permeabilidade, ocasionando uma maior resistência química (CALIXTO, 2005).

DAL MOLIN (1994,1999) diz que a resistência mecânica de concretos com a adição de escória é mais baixa nas primeiras idades, pois seu desenvolvimento é mais lento, comparado com o concreto de cimento Portland convencional.

De acordo com LARANJEIRA (1991) a escória de alto forno possui ótimas qualidades como um aditivo para o cimento Portland. Sua alta reatividade assegura uma interação rápida e completa com o cimento, mesmo quando utilizada em quantidades tão elevadas quanto 50%. O material resultante, após hidratação, é praticamente indistinguível daquele com 100% de cimento, mesmo ao nível microscópico, por conseguinte, a resistência mecânica da mistura pode ser igual, ou mesmo maior.

Embora alguns autores considerem que as partículas finas de escória complementam o efeito dos grãos de cimento em reduzir os vazios entre as partículas do agregado, reduzindo assim o consumo de água para a mesma consistência BOURGUIGNON, SILVA, SANTOS, ZANDONADE (2005) afirmam que a escória de alto-forno, substituindo parte do cimento, não tem esta habilidade de redução do consumo de água sem o uso de superplastificantes, uma vez que suas partículas são mais angulares.

O tempo de pega e o calor de hidratação das misturas são outras características do concreto com escória a serem consideradas. Nas misturas com escória granulada, em temperaturas normais, o tempo de pega é maior do que nas misturas sem escória. E quanto maior o teor de escória na mistura, maior é o seu tempo de pega. Entretanto, a maior finura da escória de alto-forno não conduz a diferenças significativas (BOURGUIGNON et al 2005).

No cimento com adição de escória, as taxas de liberação de calor de hidratação são muito menores, devido a isso, embora o calor de hidratação liberado total do cimento com a adição de escória seja maior, esse cimento segundo NAGATAKI (1994) e CAMARINI (1995) é considerado de baixo calor de hidratação. NAGATAKI (1994) e BOURGUIGNON et al (2005) afirmam que o calor de hidratação é influenciado também pela finura da escória, teor de gipsita, basicidade e teor de vidro da escória.

BOURGUIGNON et al (2005) estima que nas propriedades das misturas com escória também deve-se levar em conta que a resistência à compressão dessas misturas se dá lentamente, sendo afetada pelas proporções dos materiais, pelas características do elemento estrutural, pelas condições de execução, pela relação água/aglomerante e pela necessidade de maior tempo de cura úmida. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), as características da escória utilizada, tais como finura e reatividade também influenciam.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a quantidade de escória empregada e o seu teor de alumina afetam a resistência à sulfatos dos concretos feitos com cimento Portland contendo escória granulada de alto forno. Ele ainda cita a norma ASTM C 989 (Standard Specification for Ground Iron Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars) onde informa que a utilização de escória moída diminuirá o teor de  $C_3A$  dos materiais cimentantes e diminuirá a permeabilidade e o teor de hidróxido de cálcio da argamassa ou do concreto. Os ensaios mostraram que o teor de alumina da escória também influencia a resistência ao sulfato das amostras com baixas porcentagens de substituição por escória.

BOURGUIGNON et al. (2005), relatam que o endurecimento de concretos feitos com a adição de escória se prolonga até idades mais avançadas por vários anos, devido ao desenvolvimento lento da resistência. De acordo com NAKAMURA, SAKAI, SWAMY (1992) apud BOURGUIGNON et al (2005), pode-se aumentar a finura da escória, para acelerar este desenvolvimento da resistência.

Diversas técnicas vêm sendo utilizadas para acelerar as reações iniciais lentas da escória. Entre elas, está o uso de ativador químico que não necessita nem de técnicas e nem de equipamentos especiais. CINCOTTO (2003) e SHI (2003) afirmam que cimentos de escória ativada com álcalis obterão maior resistência mecânica inicial e maior resistência a ataques químicos.

Elevados teores de escória granulada substituindo parte do cimento acarretam vários benefícios, entre eles, a melhora na estrutura do poro com a densificação da pasta de cimento, resultando num aumento da resistência a penetração de cloretos (GARCIA, 2001).

De acordo com CANESSO (2005) a adição de mais de 50% de escória afeta significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias. O aumento do teor de escória no concreto, em substituição ao cimento, faz com que haja uma redução na resistência à compressão. Aos 90 dias de cura esse valor tende a se manter constante. A quantidade de escória influencia diretamente na velocidade de crescimento da resistência à compressão.

De acordo com CERULLI (2003) as escórias de alto forno são normalmente usadas para aumentar a durabilidade do concreto. Através de seu estudo verificou-se uma melhor resistência ao ataque de ácido e sulfatos, boa resistência ao gelo-degelo (devido a uma distribuição de porosidade própria, baixa absorção de água e performance mecânica mais alta) e boa resistência mecânica. Além disso, a longa durabilidade do concreto poderia ser obtida se o produto for devidamente otimizado, em função de ter baixa absorção de água, alta permeabilidade, conteúdo baixo de hidróxido de cálcio e ausência de carbonato de cálcio.

DAL MOLIN (1994) estima que o cimento com escória de alto forno é empregado com frequência no caso de meios sulfatados, como água do mar e certas águas residuais industriais. Maior será o desempenho quanto maior o teor de escória. CALLEJA (1992) cita que o uso de teores iguais ou superiores a 65% de escória são os que se obtém melhores resultados quanto a este aspecto. Isto é devido ao menor teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) presente no clínquer, composto este que ao reagir com os sulfatos geram compostos de caráter expansivo, e conseqüentemente, diminuem a durabilidade de concretos que empregam este tipo de cimento.



De acordo com CASCUDO (1997), a resistividade elétrica do concreto, junto com a presença de oxigênio na armadura constituem os dois elementos principais dominadores do processo eletroquímico que gera o fenômeno da corrosão das armaduras. Devido a isso, a velocidade da corrosão do aço no concreto é muito dependente da resistividade elétrica ou da condutividade iônica do eletrólito (fase líquida do concreto). HELENE (1993) constatou que concretos com a adição de escória de alto forno têm um aumento significativo na resistividade elétrica.

### 2.2.2 - Sílica Ativa

No passado, foram relatadas algumas más experiências com certas sílicas ativas, e até mesmo com sílicas ativas “não pozolânicas”. De acordo com AITCIN (2000), isto decorre do fato de que na indústria do silício e suas ligas, o termo “sílica ativa” é largamente utilizado para identificar os pós muito finos que são coletados nas chamadas “câmaras de filtros”. Assim, como existem diferentes ligas sendo produzidas, da mesma forma existem diferentes tipos de sílica ativa (PISTILLI, RAU AND CECHNER, 1984; PISTILLI, WINTERSTEN AND CECHNER, 1984). Todavia, se por razões de mercado, diferentes ligas são produzidas em diferentes fornos em momentos diversos, o coquetel de sílica ativa varia. Para evitar uma tal situação, o usuário deve verificar cuidadosamente a qualidade da fonte da sílica ativa ou comprá-la de uma fonte que controle tais variabilidades (PISTILLI, RAU AND CECHNER, 1984; PISTILLI, WINTERSTEN AND CECHNER, 1984).

Até onde vai o mau conhecimento, nos poucos países que possuem uma norma prescrevendo a qualidade da sílica ativa a ser usada em concreto têm sido estabelecidas várias exigências em termos de composição química e de propriedades físicas. Essas exigências podem ser usadas como guias para controlar a qualidade de qualquer fonte de sílica ativa (Holland, 1995; ACI – American Concrete Institute - Guide for the use of silica fume in concrete, 1996).

Atualmente, a sílica ativa é apresentada em diferentes formas. Ela pode ser comprada como coletada na “câmara de filtros”. Nesse caso, a massa unitária varia de 200 a 250 kg/m<sup>3</sup> portanto, o caminhão para transporte de cimento a granel de 30 toneladas pode transportar apenas cerca de 11 a 12 toneladas de sílica ativa bruta, tornando o transporte caro. A sílica ativa bruta é também disponível em sacos de 15 kg ou em saco grande de uma tonelada. O manuseio da sílica ativa bruta não é impossível, mas não é fácil.

A sílica ativa é também oferecida, com frequência crescente, numa forma dita “adensada”. Diferentes processos podem ser usados para adensar a sílica ativa e, a partir dos poucos dados comparativos publicados, parece que a sílica ativa adensada tem um desempenho tão bom como o da não adensada. Em tais casos, a massa unitária pode variar de 400 kg/m<sup>3</sup> a 500 kg/m<sup>3</sup>. Recentemente, contudo, uma sílica ativa fortemente adensada esteve sob suspeita de estar na origem de reações de tipo álcali/sílica. Isso aconteceu em torno de alguns núcleos endurecidos de sílica ativa não dispersados, mas até agora o caso não foi plenamente documentado.

A sílica ativa está também disponível na forma de suspensão em água, na qual o teor de sólidos está em torno de 50%, mas é necessário equipamento especial para usar a sílica ativa nessa forma.

Atualmente, a sílica ativa está também disponível misturada diretamente no cimento Portland, na Islândia, no Canadá e na França. A percentagem de sílica ativa na mistura varia entre 6,5% a 8,5%. Esse teor expresso em relação à massa de cimento Portland corresponde a 6,7% a 9,3%.

Quando o uso e a forma da sílica ativa tiverem sido decididos, o passo seguinte é definir a sua dosagem. Teoricamente, para fixar todo o potencial de cal liberada pela hidratação do C<sub>3</sub>S e do C<sub>2</sub>S, a dosagem da sílica ativa estaria entre 25% a 30%. Tais dosagens elevadas têm sido ocasionalmente usadas em laboratório, mas não tão frequentemente em aplicações no canteiro, devido às quantidades elevadas de superplastificantes necessárias.

De fato, do ponto de vista da resistência, pode ser demonstrado que, ao menos para o concreto usual e para a classe I do concreto de alto desempenho, os ganhos de resistência são muito significativos quando a dosagem da sílica ativa aumenta de 5% para 10%, mas qualquer adição de sílica ativa a mais resulta em aumentos de resistência muito menores. Assim, como o custo dessa sílica ativa adicional é alto e mais superplastificante terá de ser usado para dispersá-la, o retorno em termos de custo/MPa é cada vez menos atrativo.

Mesmo que não possam ser encontrados na literatura estudos econômicos ou científicos bem documentados sobre a dosagem ótima de sílica ativa no domínio do concreto de alto desempenho, AITCIN (2000) sugere uma dosagem de sílica ativa entre 8% e 10% em relação à massa de cimento. Entretanto, este não é um número definitivo, e as condições locais podem provar que uma dosagem diferente pode ser mais eficiente em termos de custo/MPa .

Normalmente, a dosagem de sílica ativa é expressa como percentagem da massa de cimento utilizada no traço em questão e não como percentagem de todos os materiais cimentícios, exceto no caso de um cimento composto. Doravante, sempre que a dosagem de sílica ativa for expressa como uma percentagem, essa percentagem representará sempre a relação entre a massa de sílica ativa usada na mistura e a massa de cimento ou da quantidade total de material cimentício (excluída a sílica ativa) multiplicada por 100.

Segundo COUTINHO (1997) para o concreto no estado fresco, a introdução de sílica ativa diminui a exsudação e a tendência de segregação, embora faça aumentar a dosagem de água para que a trabalhabilidade seja mantida constante. No entanto, usando plastificantes ou superplastificantes, a quantidade de água de amassamento é pouco afetada pela introdução de sílica ativa. A diminuição da exsudação pode aumentar o risco de fissuração do concreto, pois mais facilmente surgem situações em que a facilidade de evaporação da água é superior àquela que chega à superfície.

Com a adição de porcentagens adequadas de sílica ativa, pode-se conseguir aumentos significativos para a resistência á compressão. Segundo COUTINHO (1997) a porcentagem de substituição ideal depende da dosagem do cimento, podendo as misturas mais pobres suportar maiores quantidades de sílica ativa sem redução da resistência.

Já em termos de durabilidade a adição de sílica ativa acarreta a uma redução de permeabilidade e porosidade, aumentando assim a resistência do concreto aos agentes agressivos. Isto se dá uma vez que a sílica ativa devido a sua finura, irá ocupar os vazios entre as partículas do cimento e do agregado, diminuindo assim o diâmetro dos poros de maiores dimensões, tornando o composto mais denso COUTINHO (1997).

### 2.2.3 - Resíduos de materiais de construção e demolição

A busca pelo chamado desenvolvimento sustentável levou países como os Estados Unidos e a Espanha a desenvolverem programas governamentais que visam diagnosticar os setores geradores de resíduos, suas fontes, tipos e quantidades, de forma a subsidiar o aproveitamento dos mesmos através da reciclagem. Contudo, países com pouco material primário tais como Holanda, Bélgica e Dinamarca são os que mais reciclam entulhos. No Brasil, as técnicas de reciclagem de concreto começaram há cerca de 20 anos, recicla-se menos de 5% do entulho gerado a cada ano. A reutilização é menos desenvolvida quando comparada com os países europeus. Em Belo Horizonte já existem vinte três URPV's (Unidades de Recebimento de Pequenos volumes) e três estações de reciclagem de entulho em funcionamento, que transformam o entulho em agregados para utilização na construção civil.

Os resíduos de construção e demolição apresentam características heterogênicas que necessitam de uma pré-seleção para a sua utilização de maneira adequada (JOHN, 2000). O entulho oriundo de demolições de construções em concreto fornece fragmentos nos quais o agregado está contaminado por pasta endurecida de cimento, gipsita e outras substâncias em menor quantidade. A fração que corresponde a agregado miúdo contém, principalmente,

pasta endurecida de cimento e gipsita, sendo, portanto inadequada para a produção de concreto. Entretanto, a fração que corresponde a agregado graúdo, embora coberta com pasta de cimento, tem sido usada com sucesso em vários estudos de laboratório e de campo. A presença de vidro triturado no agregado tende a produzir misturas de concretos pouco trabalháveis e, devido ao alto teor de álcalis, tem sua resistência e durabilidade afetadas em longo prazo. Metais como alumínio reagem com soluções alcalinas e causam expansão excessiva. Papel e rejeitos orgânicos, com ou sem incineração, causam problemas de pega e endurecimento no concreto de cimento Portland. Em geral, portanto, rejeitos urbanos não são adequados para produzir agregados para uso em concreto estrutural, mas se analisados cuidadosamente podem fornecer resultados que complementam as características principais para um bom concreto estrutural, não se esquecendo da análise econômica e também ambiental.

Os agregados reciclados possuem boa potencialidade de uso na obra PINTO, (1999): aterramento de valas e reconstituição de terreno; execução de estacas ou sapatas para muros com pequenas solicitações; lastro e contrapiso em áreas comuns externas e passeio público; contrapiso interno às unidades habitacionais; contrapiso ou enchimento em casa de máquinas a áreas comuns internas; sistema de drenagem em estacionamentos, poços de elevadores e floreiras; vergas e pequenas colunas de concreto com baixa solicitação; assentamento de blocos e tijolos não estruturais; enchimentos em alvenarias, lajes e esquadrias; chumbamentos de batentes, contramarcos e esquadrias e revestimentos internos e externos em alvenaria. O entulho processado pelas usinas de reciclagem pode ser utilizado como agregado para concreto não estrutural, a partir da substituição dos agregados convencionais (areia e brita).

Seguindo esta tendência mundial de reciclagem, em Belo Horizonte o RCD (resíduos de construções e demolições) é utilizado para artefatos de concreto não estrutural, como pré - moldados intertravados para passeios e confecção de meio fio. A FIG. 2.2 apresenta este material após beneficiamento, e as FIG. 2.3 a 2.5 mostram algumas de suas utilizações.



FIGURA 2.2 - RCD reciclado utilizado como agregado para o concreto.



FIGURA 2.3 - Amostras de artefatos de concreto.



FIGURA 2.4 - Pré - moldados intertravados utilizados em passeios.



FIGURA 2.5 - Blocos de concreto.

No Brasil o RCD não é utilizado para a confecção de concretos estruturais, mas em Belo Horizonte a SLU juntamente com a UFMG e a iniciativa privada estão desenvolvendo pesquisas para esta utilização.

Concreto reciclado ou concreto de entulho britado pode ser uma fonte economicamente viável de agregados, em locais onde agregados de boa qualidade são escassos e quando o custo de disposição do entulho é incluído na análise econômica. Com base no maior trabalho, já realizado, de reciclagem de pavimento de concreto, o “Michigan State Department of Transportation”, de Michigan/USA, publicou que o entulho reciclado pela britagem do pavimento existente foi mais barato do que se usar, inteiramente material novo, sendo consideradas todas as variáveis de beneficiamento bem como uma possível disposição do material caso este não fosse utilizado ([www.departmentsearch.com/departmentoftransportation](http://www.departmentsearch.com/departmentoftransportation)).

Uma revisão de vários estudos indica que, comparado ao concreto com agregado natural, o concreto com agregado reciclado teria no mínimo dois terços da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, bem como trabalhabilidade e durabilidade satisfatória. O principal obstáculo no uso do entulho de construção como agregado para concreto é o custo de seu beneficiamento inicial: britagem, graduação, controle de pó e separação dos constituintes indesejáveis.

A maior dificuldade apresentada para o uso do entulho é a separação das partes cerâmicas, e o custo de britagem/peneiramento. Alguns estudos têm se voltado para o uso de resíduos de cerâmica vermelha. Grande parte das matérias-primas utilizadas na indústria cerâmica tradicional é natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Após a mineração, os materiais devem ser beneficiados, isto é desagregados ou moídos, classificados de acordo com a granulometria e muitas vezes também purificados. O processo de fabricação, propriamente dito, tem início somente após essas operações. As matérias-primas sintéticas geralmente são fornecidas prontas para uso, necessitando apenas, em alguns casos, de um ajuste de granulometria. Os materiais cerâmicos geralmente são fabricados a partir da composição de duas ou mais matérias-primas, além de aditivos e água. São então moldados e tratados termicamente.

### **2.3 - Propriedades Mecânicas do Concreto**

Propriedade é uma característica de um material expressa em termos da resposta medida para um estímulo específico que é imposto. Dentre as várias maneiras existentes para a classificação, a mais utilizada é a organização dessas propriedades em mecânicas, físicas e químicas. As propriedades mecânicas são aquelas que definem o comportamento do material quando sujeito à ação de forças. Dentre elas são de grande importância para o uso do concreto endurecido à resistência mecânica, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura, e comportamento sob cargas cíclicas (fadiga).

#### **2.3.1 - Resistência Mecânica do Concreto**

Na prática o concreto é submetido simultaneamente a uma combinação de esforços de cisalhamento, compressão e tração em duas ou mais direções, além de estar sujeito a variações de volume, a agentes agressivos, à fluência, esforços de fadiga, a variações de temperatura, etc. No entanto a tensão de ruptura do concreto, em especial a tensão de ruptura sob compressão uniaxial, é geralmente a grandeza com a qual se especifica o concreto em virtude da simplicidade com que se realiza o ensaio. Além do fato de que



outras propriedades, como impermeabilidade, módulo de elasticidade, são diretamente relacionadas com esta tensão de ruptura.

O concreto é um material pouco deformável, que apresenta fratura frágil (rompe com deformações inferiores a 0,04). Sendo assim a sua tensão de ruptura coincide com a máxima tensão que o material é capaz de suportar. Como a resistência é a capacidade do material resistir à tensão sem romper, a resistência do concreto é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura, ou seja, é o valor máximo de tensão suportada sem haver a ruptura. Deve ser lembrado que a ruptura é algumas vezes identificada, com o aparecimento de fissuras, o que não é o caso do concreto que contém fissuras antes mesmo de ser submetido a tensões externas.

As resistências do concreto são normalmente determinadas em ensaios de compressão uniaxial e flexo-tração. Os ensaios para determinação da resistência à tração uniaxial são mais raros, pois são de difícil execução. Autores afirmam a razão entre a resistência à tração uniaxial e à compressão é geralmente em torno de 0,07 a 0,11 (COUTINHO, 1997, e METHA e MONTEIRO, 1994). No entanto as tensões de tração não podem ser ignoradas, pois a fissuração do concreto é freqüentemente conseqüência de uma ruptura por tração causada pela retração restringida.

Ao ser solicitado o concreto apresenta deformações elásticas e inelásticas, bem como nos processos de retração, secagem ou resfriamento. Quando restringidas, as deformações de contração resultam em complexos padrões de tensões que normalmente levam a fissuração. Este processo de fissuração é, portanto uma resposta do material a carga externa bem como ao ambiente externo no qual é submetido. Espera-se que o material fissure quando há uma combinação entre o módulo de deformação e a deformação por retração, acarretando assim tensões de tração no concreto que se fissura devido a sua baixa resistência ao esforço de tração. Em se tratando de concreto armado o baixo valor da resistência à tração do concreto é desprezado, justificando assim o emprego do aço para atender a esta solicitação. Já em estruturas de concreto maciço o uso de barras de aço não é aplicado. Faz-se, portanto

necessária uma estimativa de resistência à tração uma vez que tal solicitação possa a vir ocorrer.

A resistência de materiais sólidos é inversamente proporcional à sua porosidade. Sendo assim, fatores que influenciam na porosidade do concreto, afetam seu comportamento sob cargas estáticas. Embora o fator água/cimento seja o mais importante para a determinação da porosidade da pasta e da zona de transição outros fatores, como características e proporções dos materiais constituintes, adensamento, grau de hidratação do cimento, dimensões e composição dos agregados, aditivos, geometria do corpo de prova, tipo de tensão, velocidade de carregamento e deformação, podem ter importância sobre a resistência. Dessa forma os resultados dos ensaios devem se referir, além do material, à geometria e dimensões do corpo de prova, e às condições em que foram obtidos.

Observa-se que em concretos de baixa e média resistência, preparados com agregados comuns, é válida a relação direta entre a resistência e o fator água/cimento (lei de Abrams do fator água/cimento). Para fatores abaixo de 0,30, grandes aumentos de resistência podem ser obtidos para pequenas reduções do fator água/cimento.

Vazios em forma de ar incorporado por adensamento inadequado ou uso de aditivo incorporador de ar aumentam a porosidade, e conseqüentemente diminuem a resistência do concreto. A expressão proposta por FERET em 1892 (METHA e MONTEIRO, 1994) leva em conta tanto o fator água/cimento (A) como o volume de vazios ( $V_V$ ) para uma determinada massa C de cimento por metro cúbico de concreto:

$$\sigma_o = K \left\{ \frac{C}{A+V_V} \right\} / \left[ \frac{C}{A + V_V} \right] + \rho \left\}^2 \quad (\text{Equação 2.3.1})$$

onde K é uma constante empírica e  $\rho$  a massa específica do cimento.

Apesar do exposto na equação, ao melhorar a trabalhabilidade, o ar incorporado tende a aumentar a resistência da zona de transição, logo aumenta a resistência do concreto.

Os dados mostram que para dado fator água/cimento, a incorporação de ar promove uma diminuição significativa de resistência, enquanto concretos com maior teor de cimento tendem a sofrer um aumento de resistência (COUTINHO, 1997).

A resistência do agregado comumente não é um fator determinante na resistência do concreto, pois, à exceção dos agregados leves, o agregado é mais resistente que a pasta endurecida e a zona de transição. No entanto, o tamanho, a forma, a textura, a distribuição granulométrica influenciam na resistência do concreto.

Para concretos com um mesmo teor de cimento, consistência e distribuição granulométrica bem graduada, misturas com partículas de agregado maiores requerem menos água de amassamento do que misturas com partículas menores. No entanto agregados grandes tendem a formar zonas de transição mais fracas, com mais microfissuras. O efeito resultante vai depender do fator água/cimento utilizado: concretos com baixo fator água/cimento são afetados negativamente pelo aumento da dimensão do agregado; a partir de um dado fator água/cimento a dimensão do agregado parece não ter efeito sobre a resistência de concretos de baixa resistência. Isto estaria relacionado ao fato da zona de transição nos concretos de alta resistência ser mais resistente.

Quando se aumenta a proporção de agregado graúdo/miúdo, tende-se a um maior abatimento no tronco de cone. Misturas com abatimentos elevados tendem a exsudar e portando a ter baixa resistência.

Nas primeiras idades misturas com agregados de textura rugosa ou britado apresentam maior resistência, principalmente à tração, devido à ligação física mais forte. A maiores idades, quando começa a ter mais efeito a interação química entre o agregado e a pasta, a influência da textura passa a ser menor. Deve-se considerar que agregados rugosos, para uma mesma trabalhabilidade, necessitam de maior quantidade de água de amassamento, o que contribui para uma menor resistência.

Aditivos incorporadores de ar são prejudiciais à resistência. Aditivos redutores de água, para uma mesma relação água-cimento, tem influência positiva sobre a taxa de hidratação e o desenvolvimento da resistência a baixas idades. Aditivos capazes de acelerar ou retardar a hidratação do cimento têm grande influência sobre a velocidade de desenvolvimento da resistência, mas pouco influenciam nas resistências finais. Alguns pesquisadores afirmam existir uma tendência de resistências finais maiores quando a velocidade de desenvolvimento de resistência a baixas idades é reduzida. O uso de aditivos minerais, quando capazes de reagir com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento, pode levar a uma maior resistência final. Efeito que parece ser mais pronunciado na resistência à tração.

A presença de água nos poros do cimento hidratado é uma condição para a sua contínua hidratação. A cura visa promover a hidratação através do controle do tempo, temperatura e umidade. Para um dado fator água-cimento, quando maior o tempo de cura maior é a resistência, admitindo-se que a hidratação das partículas de cimento continua a ocorrer e que a cura seja úmida (não haja perda de água pelos capilares). A seguinte equação retirada do Código Modelo do CEB – FIP de 1990 pode ser utilizada para a previsão da resistência média à compressão após  $t$  dias ( $f_{cm}(t)$ ) de corpos de prova de concreto curados à 20°C:

$$f_{cm}(t) = \exp\{s [ 1 - ( 28 / ( t / t_1 ) )^{1/2} ]\} f_{cm} \quad (\text{Equação 2.3.2})$$

onde  $f_{cm}$  é a resistência à compressão aos 28 dias,  $s$  o coeficiente que depende do tipo de cimento ( $s = 0,20$  para cimento de alta resistência inicial,  $s = 0,25$  para cimento comum,  $s = 0,38$  para cimentos com adições), e  $t_1$  é 1 dia.

A umidade tem um efeito benéfico sobre a resistência do concreto. A idade de cura, após 28 dias, não afeta significativamente a resistência do concreto a menos que a cura seja na presença de umidade.

Para o concreto curado em condições úmidas, a influência da temperatura sobre a resistência depende da idade e da temperatura da moldagem e cura. As temperaturas de moldagem e temperatura de cura controlam o grau de hidratação do cimento, e, conseqüentemente, a velocidade de desenvolvimento da resistência e a resistência final. Temperaturas de cura compreendidas entre 4 e 23°C são adequadas para que ocorra o endurecimento em tempo bom e não se comprometa a resistência final. Após a cura inicial, a elevação da temperatura acelera o desenvolvimento da resistência.

O tamanho e geometria do corpo de prova assim com a umidade do concreto, condições de carregamento (velocidade de aplicação de carga, tipo de carregamento), características da máquina de ensaio e temperatura afetam os valores de resistência.

Quanto mais elevada é a temperatura em que se realiza o ensaio, mais baixa é a resistência. Durante o ensaio a aplicação da carga, a deformação deve ser o mais uniforme possível, dessa forma a máquina deve ter seus eixos alinhados, ser o mais rígida possível e ser capaz de aplicar carga ou deformação a velocidade o mais constante possível.

A Natureza do carregamento também afeta os valores da resistência. Sob compressão uniaxial o concreto apresenta um comportamento linear elástico até aproximadamente 30% da resistência final. Para tensões acima desse ponto a curva apresenta um aumento gradual de curvatura até 0,75 - 0,90 da resistência final, depois muda repentinamente de declividade e desce.

O comportamento sob tração uniaxial é semelhante à compressão uniaxial. No entanto como as fissuras se propagam muito facilmente sob tração, a razão entre as resistências à tração uniaxial e à compressão é em torno de 0,07 a 0,11. À medida que a resistência à compressão aumenta, a resistência à tração aumenta, mas a uma velocidade decrescente. A resistência à tração pode ser feita por medidas direta e indireta: ensaio de tração, de compressão diametral e flexo-tração. Vários fatores (tempo de cura, fator água-cimento, tipo de agregados, aditivos) afetam a razão resistência à tração/resistência à compressão. De

modo geral fatores que diminuem a porosidade da matriz e da zona de transição levam a uma melhoria das duas propriedades. No entanto a magnitude de melhoria da resistência à tração parece depender da resistência intrínseca dos produtos de hidratação que formam a zona de transição (enquanto estiverem presentes uma grande quantidade de cristais de hidróxido de cálcio orientados, a resistência à tração continuará sendo mais fraca).

Ensaio mostram que a resistência do concreto submetido à compressão biaxial pode ser até 27% maior que a uniaxial. No entanto a resistência sob tração biaxial é aproximadamente igual à tração uniaxial (COUTINHO, 1997). O comportamento do concreto sob tensões multiaxiais é muito complexo, não havendo ensaios padrões para determiná-lo.

### 2.3.2 – Resistência à fadiga

No que diz respeito ao carregamento nas estruturas de concreto, podemos classificá-los como dinâmicos ou estáticos. São consideradas cargas estáticas aquelas que variam de amplitude de maneira muito lenta. Já as dinâmicas são aquelas que variam ao longo da vida útil da estrutura.

A fadiga de respeito às cargas dinâmicas que tendo em vista suas variações, acarretam alterações nas propriedades mecânicas do concreto. Estes carregamentos não são grandes o suficiente para provocar a ruptura da estrutura de imediato, mas pode ser alcançada se for submetida a ciclos deste carregamento. Esta ruptura provocada por ciclos de carregamento denomina-se fadiga. As alterações das propriedades mecânicas provocadas pela fadiga reduzem a tensão de ruptura (COUTINHO, 1997).

A fadiga produz alterações nas propriedades mecânicas do material devido a ciclos repetidos de cargas variáveis. A ação de carregamentos repetidos, de intensidade muito elevada, devido a sismos ou outros acontecimentos catastróficos, pode provocar ruptura estrutural em menos de 100 ciclos segundo a definição do ACI - American Concrete Institute. Há três tipos fundamentais de ciclos de fadiga: carregamento repetido,

carregamento alternado e carregamento ondulado, onde os outros tipos de fadiga são quaisquer combinações destes. (COUTINHO, 1997).

Um material rompe por fadiga, quando é solicitado a tensão cíclica repetitiva maior que um valor característico, denominado limite de fadiga, o qual pode ser determinado mediante um ensaio de fadiga. O ensaio de fadiga consiste em submeter um corpo de prova a esforços cíclicos de diferentes intensidades até a ruptura do material. São registrados para as diferentes tensões aplicadas o número de ciclos necessários para o rompimento. A curva tensão(S) versus logaritmo do número de ciclos necessários para a fratura sob esse valor de tensão(N), curva S-N, também conhecida como curva de Wöhler é a ferramenta utilizada para análise de dados experimentais obtidos no ensaio de fadiga. Os valores de S podem ser representados pela tensão máxima aplicada  $\sigma_{max}$ , tensão mínima,  $\sigma_{min}$ , ou amplitude da tensão,  $\sigma_a$ .

Uma típica curva S-N para o aço e para o concreto é apresentada na FIG. 2.6. Observa-se que o número de ciclos aumenta na medida em que se baixa os níveis de tensões. A esse valor de tensão se dá o nome de limite de fadiga. No caso do concreto tal valor não existe.

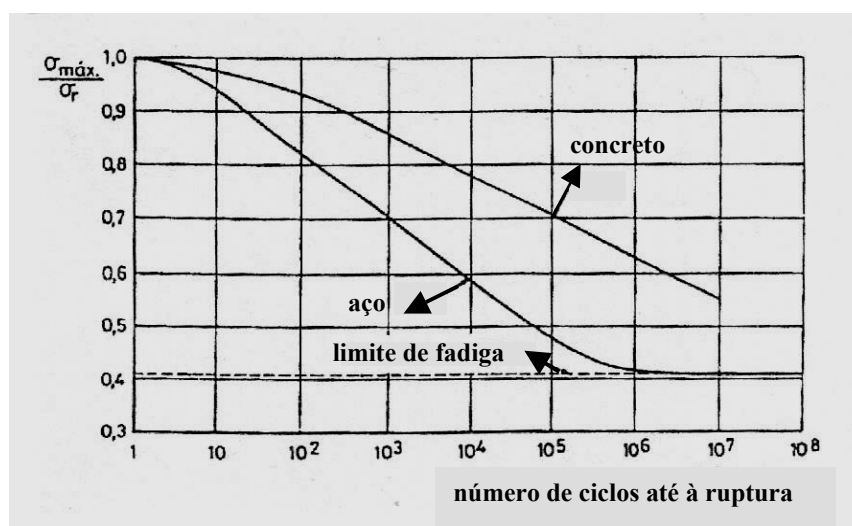


FIGURA 2.6 - Curva S-N (Wöhler) - (COUTINHO, 1997).

Segundo COUTINHO (1997) os primeiros ciclos de fadiga não afetam praticamente a tensão de ruptura, podendo até elevá-la. As dispersões nos ensaios de fadiga são muito grandes, devido à influência de inúmeras variáveis de ensaios.

Os ensaios de fadiga em corpos de prova são normalmente realizados aplicando solicitações uniaxiais das seguintes formas:

- Flexão rotativa (alternada);
- Flexão plana (alternada, repetida ou pulsante);
- Torção alternada;
- Tração - compressão alternada, repetida ou pulsante.

Podem também se realizar ensaios biaxiais em que se sobrepõem tais solicitações das seguintes maneiras:

- Flexão alternada ou tração alternada;
- Tração ou compressão biaxiais;
- Torção alternada com tração estática.

Para efeitos comparativos, qualquer destes ensaios será satisfatório para obtenção de resultados de fadiga (COUTINHO, 1997). Contudo, deve ser escolhido para cada tipo de solicitação um tipo de ensaio adequado. Neste aspecto é de referir que os ensaios biaxiais são mais caros que os uniaxiais devido ao elevado custo de equipamentos e montagem. Por esse motivo os ensaios uniaxiais são muito mais utilizados na prática que os biaxiais.

Existem três variações possíveis para os corpos de prova, para a realização do ensaio de fadiga. O mais indicado é a própria peça ou um modelo ou protótipo, porém dependendo das dimensões da peça pode ser inviável devido à dificuldade de se obter um equipamento para realização de tal ensaio. Outro tipo de corpo de prova seria na forma de barras, chapas, tubos. Também podem ser usados corpos de prova usinados, destinados especificamente



para a realização do ensaio. Estes corpos de prova podem apresentar um entalhe ou podem ser planos.

A forma do corpo de prova é determinada de acordo com o tipo de esforços que o material terá quando este estiver em operação, além disto depende também das normas que regem o ensaio de fadiga. As formas mais utilizadas são a circular e a retangular, sendo que a parte útil que estará sob esforço apresentará uma secção reduzida em relação ao restante do corpo.

As condições superficiais têm uma grande influência na vida, em fadiga, de um componente. De modo geral, quanto mais lisa for à superfície da amostra, maior será a resistência à fadiga, ou seja, superfícies rugosas originam concentrações de tensões que facilitam a formação de trincas de fadiga. A resistência à fadiga é fortemente reduzida pela presença de concentradores de tensão, tais como entalhes, cavidades, rasgos ou variações bruscas da seção. As fraturas por fadiga podem ser minimizadas fazendo um projeto cuidadoso, de modo a evitar, na medida do possível, concentrações de tensões.

Outra variável no processo de fadiga é a influência exercida pelo meio em que se encontra o material (COUTINHO, 1997). Geralmente a variação ou realização do ensaio de fadiga em atmosfera controlada causa a redução do limite de fadiga do material. Um exemplo disto é se um material for ensaiado em atmosfera salina ou ácida seu limite de fadiga decresce a ponto de poder até desaparecer. Um material quando submetido a tensões cíclicas e a ação corrosiva, acaba sofrendo uma redução maior de suas propriedades de fadiga do que se estivesse apenas exposto à corrosão isoladamente. Isto pode ser explicado uma vez que o efeito químico ocasiona uma aceleração da propagação da trinca de fadiga e as tensões cíclicas aceleram a corrosão do material. Um outro parâmetro que deve ser considerado quando se trata de ensaios realizados em ambientes corrosivos, é a velocidade do ensaio sendo que quanto maior for à velocidade menor será a influência da corrosão na diminuição do limite de fadiga. Quando o ensaio é realizado sem atmosfera corrosiva a velocidade do ensaio não tem grande influência, pode ter algum efeito quando a frequência

ultrapassar o valor de 10000 Hz. Protegendo os corpos de prova com óleo ou mesmo realizando o ensaio no vácuo, pode observar que o ambiente atmosférico também influencia na fadiga uma vez que os resultados obtidos são ligeiramente maiores.

Quando é realizado um ensaio de fadiga a temperaturas inferiores à ambiente, observa-se um aumento da resistência do material à fadiga. O material quando exposto a elevadas temperaturas, aproximadamente 50% do ponto de fusão do material, apresenta um decréscimo de sua resistência à fadiga.

O aumento do tamanho do corpo de prova implica numa redução do limite de fadiga. Sendo, que 90% das falhas por fadiga iniciam na superfície, aumentando-se a área superficial do corpo, facilita-se o surgimento de uma nova falha. Mas um dos problemas de maior importância no projeto de peças sujeitas à fadiga é a previsão do comportamento de peças com grandes dimensões a partir dos resultados obtidos em ensaios de fadiga em pequenos corpos de prova.

A curva S-N obtida laboratorialmente em corpos de prova de pequena dimensões não se aplica se o tamanho da peça for diferente da do corpo de prova. Abstraindo qualquer efeito de concentração de tensões, considerando, portanto apenas corpos de prova e peças lisas, os resultados experimentais indicam que existe um efeito de tamanho, isto é, para peças semelhantes, a resistência à fadiga diminui quando o tamanho da peça aumenta. Verificou-se que o fator mais importante que caracteriza o tamanho da peça, é a área da secção transversal.

O interesse pelo estudo da fadiga do concreto começou quando se iniciou a construção das primeiras pontes de concreto armado. Posteriormente pavimentos de estradas de concreto simples ou armado, estruturas na plataforma marítima para a exploração do petróleo aumentaram ainda mais o interesse pelo estudo desse fenômeno, que também é importante na resistência das estruturas aos sismos.

Segundo COUTINHO, (1997), durante a vida útil de uma estrutura, onde após algumas dezenas de anos, a passagem de cargas rolantes por um ponto de um pavimento ou laje, ou a ação das ondas numa estrutura marítima provoca um momento fletor nesse local, que pode ser repetido dezenas de milhões de vezes. Uma onda marítima atuando em uma estrutura durante dez anos, a um ritmo de uma por cada dez segundos, provoca uma fadiga de trinta milhões de ciclos. Pontes ou pavimentos de estradas com intensa circulação rodoviária podem sofrer a ação das cargas rolantes mais de cinquenta milhões de vezes durante um provável tempo de sua utilização. Desta forma se faz necessário o conhecimento do comportamento do concreto sob a ação da fadiga, desde de 1 a 50 ou mais milhões de ciclos, isto é, determinar o nível admissível da tensão a que o material resiste a este número de repetições sem a sua deterioração.

Os primeiros estudos realizados sobre a resistência à fadiga são devidos a VAN ORNUM entre 1903 e 1907, que estabeleceu a base da resistência do concreto a este tipo de solicitação. Mostrou-se que o fenômeno da fadiga atinge o concreto gerando um limite de 0,55 da tensão de ruptura estática estando sob a ação de 7000 ciclos. Nestes estudos foi observado também que o diagrama de tensão-deformação, originalmente convexo em relação ao eixo das tensões, se tornava linear ao fim de poucas repetições de cargas. Cerca de 50 anos mais tarde, LIGER e GILLESPIE determinaram que a linearidade se dava quando atingia 0,15 do número total de ciclos que provocava a ruptura. Quando a carga máxima era suficientemente elevada VAN ORNUM observou que a curva tensão-deformação se tornava progressivamente côncava para o eixo das tensões (no intervalo de 0,15 e 0,80 a 0,85 do número total de ciclos, segundo LIGER e GILLESPIE) e, finalmente, próximo da ruptura, a curva tensão-deformação tomava a forma de um S (COUTINHO, 1994).

A incorporação de fibras de aço ou outros tipos de ligas têm uma aplicação considerável na melhoria das propriedades do concreto, como a resistência inicial de ruptura, impacto, fadiga e ductilidade. Por essa razão, concretos reforçados com fibras são usados em

pavimentos de aeroportos, rodovias, piso de pontes e fundações de máquinas com carregamentos dinâmicos, que estão sujeitos a carregamentos cíclicos.

### 2.3.3 - Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica. É uma medida da sua rigidez. Materiais com baixo módulo deformam muito elasticamente quando sujeitos a solicitações mecânicas. Alguns desses materiais são indicados para estruturas previamente projetadas para sofrerem deformação apenas transitória. No entanto, na maioria das aplicações não se deseja a ocorrência de deflexões, ou seja, os materiais devem apresentar alto módulo de elasticidade. A avaliação da rigidez do material é importante tanto durante o processo de montagem/fabricação, quando durante sua vida útil, para que haja controle da estabilidade dimensional do componente. No caso de materiais perfeitamente elásticos a determinação do módulo exige alguns cuidados. No entanto, quando a relação linear entre tensão e a deformação não é obedecida, ou no caso de materiais compósitos, a determinação dessa propriedade apresenta algumas peculiaridades. Este é o caso do concreto.

Como material de construção, o concreto apresenta várias vantagens. O módulo de elasticidade do concreto, diferentemente dos metais, varia em função das matérias primas utilizadas e de sua resistência mecânica. No caso dos aços, independentemente da matéria prima, a estrutura básica do cristal de ferro é sempre a mesma: cúbica de corpo centrado a temperaturas inferiores a 723°C, com átomos de carbono, de impurezas e elementos de liga distribuídos na rede. Independente da composição é sempre o cristal cúbico de ferro que se sujeita às deformações elásticas, ou seja, as deformações sempre vão depender das forças de ligação entre os átomos de ferro. No caso do concreto, o cimento hidratado não tem sempre a mesma estrutura, pois é formado por cristais de diferentes espécies. Além disso, a microestrutura da zona de transição (pasta-agregado) afeta o módulo de elasticidade. Como resultado é praticamente impossível se ter um único módulo para o composto cimentício. Um outro fator a ser considerado é que apesar do agregado e da pasta apresentarem

comportamento elástico, o mesmo não acontece com o concreto. Isto estaria relacionado ao fato de que o concreto apresenta microfissuras mesmo antes do carregamento. Essas fissuras se localizam principalmente na zona de transição. Seu número e velocidade de propagação dependeriam das características das matérias primas e resistência do concreto.

O módulo de elasticidade é definido através da lei de Hooke, apresentada na Eq.2.3.3. Esta lei descreve matematicamente o comportamento experimental de determinados materiais, nos quais a deformação ( $\varepsilon$ ) é praticamente proporcional à tensão( $\sigma$ ) quando as deformações são pequenas:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Equação 2.3.3})$$

A constante de proporcionalidade E é chamada de Módulo de Young ou de elasticidade. Como a deformação é adimensional, o módulo de Young tem as mesmas dimensões da tensão: MPa. No entanto é comum utilizar a unidade GPa, pois os módulos são valores muito grandes.

A Lei de Hooke se aplica também para esforços de compressão. De forma similar, a deformação de cisalhamento e a volumétrica são proporcionais à tensão de cisalhamento e à pressão hidrostática, respectivamente. No caso do cisalhamento, a constante de proporcionalidade recebe o nome de módulo de cisalhamento. Quando da pressão isostática, a constante é o módulo volumétrico.

Para se analisar os fatores que influenciam o módulo de elasticidade é necessário que se compreenda o significado físico desta propriedade.

Os átomos nos cristais são mantidos juntos por ligações que se comportam como molas, de acordo com a FIG.2.7.

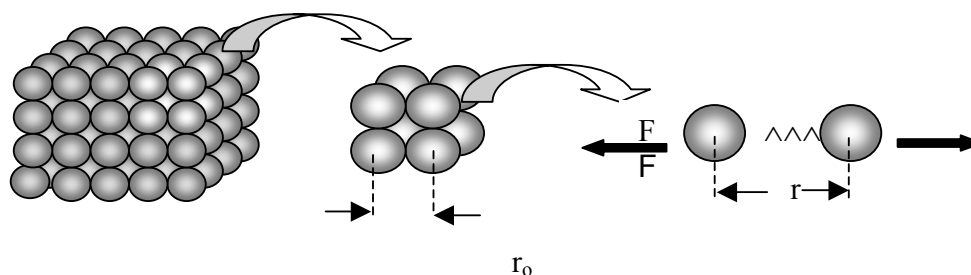


FIGURA 2.7 - Representação das ligações individuais dos átomos dentro de um cristal.

A rigidez de cada uma das ligações atômicas ( $S$ ) é definida por:

$$S = df/dr \quad (\text{Equação 2.3.4})$$

onde  $df$  é força de atração introduzida entre os átomos quando os mesmos estão afastados de um valor  $dr$  em relação à posição de equilíbrio.

Para pequenas deformações,  $S$  é constante e recebe o nome de constante elástica da ligação ( $S_0$ ). Isto significa que a força entre dois átomos sujeitos a um pequeno deslocamento, de  $r$  a  $r_0$ , onde  $r_0$  é distância de equilíbrio, é:

$$F = S_0 \int dr \quad (\text{Equação 2.3.5})$$

$$F = S_0 (r - r_0) \quad (\text{Equação 2.3.6})$$

Se  $F$  age em uma área, na qual existem  $N$  ligações (ligações por unidade de área), tem-se:

$$\sigma = N S_0 (r - r_0) \quad (\text{Equação 2.3.7})$$

Convertendo o deslocamento em deformação ( $\varepsilon$ ) e considerando que os átomos se tangenciam,  $N$  é, então, inversamente proporcional à área média do átomo):

$$\sigma = (S_0/r_0) \varepsilon \quad (\text{Equação 2.3.8})$$

Ou seja, o módulo de Young pode ser calculado teoricamente a partir da força e da distância entre as ligações:

$$E = S_0/r_0 \quad (\text{Equação 2.3.9})$$

Considerando uma mesma distância de equilíbrio, pode-se afirmar, de forma grosseira, que materiais com ligações covalentes tem  $S_0$ , e conseqüentemente  $E$ , maior que os materiais com predominância de ligações metálicas, que por sua vez tem essas grandezas maiores que os que possuem ligações iônicas. Os materiais com ligações secundárias dipolo-dipolo, como os polímeros, apresentam módulos ainda menores. No entanto, para se avaliar o módulo de elasticidade como um todo é também necessário considerar  $r_0$ , que irá depender do grau de empacotamento do arranjo: o número de vizinhos mais próximos influencia o deslocamento do átomo.

Torna-se evidente que o módulo de elasticidade está relacionado à frequência natural de vibração da estrutura. Um componente com baixo módulo tem uma frequência natural de vibração menor que um outro que tenha maior módulo, desde que a massa específica seja a mesma.

Existem algumas formas de se avaliar o módulo de Young. O método mais simples é submeter o material a uma força de compressão e medir sua deformação. O módulo de Young será dado pela Eq.2.3.3. Essa não é uma forma ideal de medição: se o material tiver um módulo alto, a deformação será mínima, o que dificulta a precisão da medida. Além disso, se algum outro agente contribuir para a deformação, como máquina de teste não muito rígida, as medições podem conduzir a cálculos de falsas deformações e a valores incorretos de módulos. Outro fator a ser considerado é que o grau de declividade da curva,

ou mesmo o aparecimento da linearidade entre a tensão e a deformação, vai depender da taxa de deformação imposta ao corpo de prova. Quanto maior a velocidade de aplicação de carga maior será o módulo de elasticidade. Para taxas muito lentas o efeito elástico se superpõe aos de fluência, e o módulo tende a diminuir.

A estimativa do módulo de elasticidade a partir do diagrama tensão-deformação fornece o chamado de módulo de elasticidade estático. Com esse método é comum a obtenção de módulos para um mesmo material que diferem entre si de até 20%, mesmo para materiais como o aço. Mesmo assim, no caso de materiais que não atendem a lei de Hooke, é usual que o módulo seja medido a partir do ensaio de compressão/tração. É importante que se tenha em mente que na ausência de linearidade, o módulo estático é apenas uma aproximação grosseira do módulo de Young.

Considerando o significado físico do módulo de elasticidade, uma estimativa mais adequada seria através da frequência natural de vibração do material. O princípio fundamental do método se baseia na teoria de propagação da velocidade do som (vibração mecânica) em meios sólidos. Existe uma correlação entre a velocidade de propagação do som ( $v$ ) em uma determinada amostra (material, forma e dimensões), sua massa específica ( $\rho$ ) e suas características elásticas:

$$v \propto (E/\rho)^{1/2} \quad (\text{Equação 2.3.10})$$

Um método usual de determinação da frequência fundamental é o de ressonância. O método de frequência ressonante utiliza ondas geradas eletromecanicamente. Normalmente o módulo assim obtido é chamado de módulo de elasticidade dinâmico, que é calculado a partir das dimensões, massa, forma e frequência fundamental de vibração do corpo de prova. Essa relação se aplica a rigor a um meio sólido homogêneo, isotrópico e perfeitamente elástico. Entretanto, tem sido utilizada com sucesso para concretos e argamassas em muitos trabalhos científicos (HAN e KIM, 2003, BSI 1990, AFNOR, 1975).



Um segundo caminho para determinação da frequência fundamental é através da velocidade de pulsação ultra-sônica, que envolve a medida do tempo de propagação de pulsações mecânicas geradas eletronicamente. Uma outra opção desse método envolve a medida do tempo de propagação através do material de uma onda causada por impacto.

No caso de materiais compostos pode-se calcular o módulo a partir das características elásticas de seus constituintes, ou seja, pela regra das misturas, desde que se considere uma ligação inalterada entre as fases da mistura.

Em um composto, o módulo de elasticidade é afetado pela natureza, fração volumétrica e características dos constituintes. No caso do concreto, apesar da linearidade típica das curvas tensão-deformação da pasta de cimento e do agregado, o composto não é um material tipicamente elástico. Portanto a lei de Hooke não é obedecida. A não linearidade estaria relacionada ao fato de que o concreto é um material microfissurado mesmo antes do carregamento. Essa microfissuração estaria relacionada a efeitos de retração por secagem ou contração térmica atuando na pasta e no agregado, que apresentam diferentes características térmicas e mecânicas. Como resultado surgiriam microfissuras na zona de transição. Para tensões muito baixas essas trincas permanecem estáveis e o comportamento do material seria linear. A partir de um determinado valor de tensão (30% da tensão de ruptura) as fissuras da zona de transição começariam a se propagar, mas a fissuração da matriz seria desprezível. A partir de 50 a 60% da tensão de ruptura inicia-se a fissuração da matriz, tendo início à ruptura do material. A partir de 75% tem-se um tamanho crítico a partir do qual a trinca cresce sob tensão constante até a ruptura do material como um todo. O término da linearidade da curva coincide com o início da propagação das trincas. Em função dessa não linearidade da curva não é possível determinar um só módulo de elasticidade do concreto. Por isso são definidos alguns tipos de módulo numa tentativa de prever o módulo de elasticidade.

O módulo tangente é determinado pelo coeficiente angular da tangente à curva tensão-deformação em uma dada tensão. O módulo secante é dado pela declividade da reta traçada

da origem a um ponto da curva que corresponde a 40% da tensão de ruptura. O módulo corda pode ser calculado pela inclinação de uma reta que passa pela deformação longitudinal de  $50\mu\text{m}/\text{m}$  e pelo ponto correspondente a 45% do limite de resistência. Também, pode-se determinar para o concreto o módulo de deformação à flexão, a partir do ensaio de flexão de uma viga.

Devido aos aparatos necessários para o traçado preciso da curva tensão-deformação, comumente os módulos de elasticidade do concreto são estimados a partir de equações empíricas que pressupõe uma relação direta entre o módulo ( $E_c$ ), a resistência mecânica a compressão ( $f_c$ ) e a massa específica:

$$E_c = k\rho^x f_c^y \quad (\text{Equação 2.3.11})$$

onde  $k$ ,  $x$  e  $y$  são constantes determinadas empiricamente, que variam em função da natureza do agregado e da resistência do concreto.

De modo geral, essas equações foram desenvolvidas a partir de concretos estruturais, com resistências na faixa de 20 a 40 MPa. Para concretos de alto desempenho o composto tende a se comportar de forma mais homogênea, tendo um comportamento mais próximo do elástico, devido às características da zona de transição:

$$E_c = k f_c + y \quad (\text{Equação 2.3.12})$$

São muitas as equações propostas para a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência do concreto. No entanto, os dados da FIG. 2.8 mostram diferenças significativas entre os valores medidos e previstos. Tal constatação indica ser a relação complexa, o que deve ser considerado quando se utiliza esse método indireto para previsão do módulo.

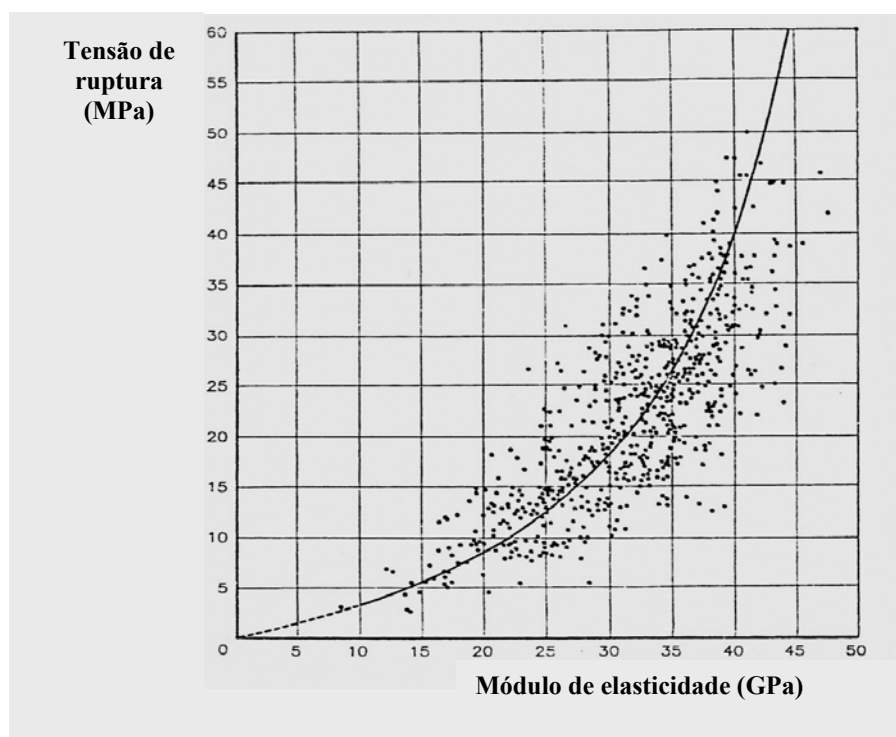


FIGURA 2.8 - Valores experimentais do módulo de elasticidade e a tensão de ruptura de diferentes concretos (dados do trabalho de M. ROS apresentado por COUTINHO & GONÇALVES, 1988).

Uma alternativa seria a estimativa do módulo de elasticidade do concreto por ensaios de frequência ressonante. O módulo é calculado a partir da frequência fundamental de vibração, da massa, das dimensões, e da forma do corpo de prova. A rigor esse método não poderia ser aplicado a materiais não homogêneos, como o concreto. No entanto, bons resultados são obtidos desde que o corpo de prova tenha dimensões suficientemente grandes e seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da heterogeneidade do material. Como o ensaio não é destrutivo, inúmeras medidas podem ser feitas no mesmo corpo de prova. Também se pode avaliar de forma eficaz a evolução da propriedade com o passar do tempo, e correlacioná-la com a resistência mecânica, sem que os efeitos impostos pela moldagem afetem os resultados.

Alguns autores sugerem que o módulo de deformação dinâmico pode ser obtido através do módulo tangente calculado pela reta traçada desde a origem (COUTINHO,1988). Em função da forma da curva, verifica-se que esse módulo tangente inicial é maior, se comparado ao secante ou a qualquer outro tangente. Sendo assim é de se esperar que os módulos calculados a partir de métodos dinâmicos sejam maiores que os estáticos.

A razão entre o módulo tangente e o dinâmico é em torno de 0,5 para concretos de baixa resistência, crescendo para cerca de 0,8 com o aumento da resistência. A proximidade dos valores para concretos de alto desempenho estaria relacionada à qualidade da zona de transição.

Além da natureza e da proporção dos constituintes, e dos parâmetros de ensaio, a umidade da amostra afeta os resultados: concretos úmidos apresentam módulo de elasticidade cerca de 15% maior do que os testados no estado seco. É importante observar que o inverso ocorre com a resistência, que é cerca de 15% maior quando as amostras estão secas.

#### 2.3.4 - Tenacidade à Fratura

Do ponto de vista da engenharia, a ruptura do material de construção pode ser definida essencialmente por dois aspectos: separação de um sólido contínuo em dois ou mais pedaços distintos ou por um estado de deformação ou de fissuração de tal modo excessivo que o material não mais possa ser utilizado.

Vários critérios de ruptura tem sido sugeridos para os materiais, mas nenhum é satisfatório para se adaptar à ruptura do concreto. Segundo NEWMAN (METHA e MONTEIRO, 1994), os critérios de ruptura, embora expressos em termos de tensões principais e de extensões, deveriam ser baseados em considerações energéticas, pois a energia envolvida na fissuração é a grandeza que deve ser considerada. Ainda segundo o mesmo autor, a ruptura deve ser analisada a dois níveis, sugerindo que se considerem os dois critérios seguintes:

- Um critério para as fissurações ou início da ruptura quando o concreto não pode mais suportar a carga aplicada sem uma severa descontinuidade da sua estrutura;
- Um critério para a ruptura ou para a carga máxima que o concreto pode suportar sob várias combinações de tensões.

Atualmente, considera-se que a ruptura do concreto poderá ser mais bem explicada por meio da chamada mecânica da fratura. As bases da mecânica da fratura foram lançadas por GRIFFITH em 1920, mas somente nos anos 40, devido aos graves acidentes ocorridos com barcos da marinha americana durante a Segunda Guerra Mundial, se instituiu definitivamente como disciplina, os trabalhos de OROWAN e IRWIN (METHA e MONTEIRO, 1994).

A mecânica da fratura estuda as condições de deformação e propagação das fissuras através de um material. A resistência dos materiais à propagação das fissuras é designada por tenacidade à fratura.

No que diz respeito à engenharia, o principal objetivo no estudo da mecânica da fratura consiste em relacionar o crescimento e orientação da superfície da fratura que conduz à ruptura com o estado de tensão aplicado. Deste modo, a mecânica da fratura assume como um critério de dimensionamento alternativo aos métodos baseados na tensão de deformação do material ou numa tensão máxima admissível.

Várias expressões têm sido estabelecidas relacionando comprimento e orientação das fissuras com os parâmetros da mecânica fratura, para diferentes sistemas de forças atuantes. Estas relações permitem calcular a resistência à fratura de um elemento se forem conhecidos o estado de tensão, a tenacidade à fratura, e a orientação e dimensões das fissuras.

Apesar do desenvolvimento da mecânica da fratura, a determinação da resistência à fratura apresenta sérias dificuldades, dentre elas podemos citar a localização e identificação dos defeitos a serem apresentados pelo elemento de análise. No entanto, a mecânica da fratura proporciona, pelo menos em termos qualitativos, elementos fundamentais no estudo da resistência dos materiais.

A tenacidade à fratura do material pode ser expressa através do fator de intensidade de tensão,  $K$ , proposto por IRWIN a partir de considerações da Mecânica da Fratura elástica e linear. O parâmetro  $K$  é normalmente expresso em  $\text{MPa m}^{1/2}$ :

$$K = \sigma (\sqrt{c})^{1/2} \quad (\text{Equação 2.3.13})$$

onde  $\sigma$  é a tensão e  $2c$  o comprimento da trinca.

De acordo com a geometria do corpo de prova, a tensão remota aplicada e o comprimento da fissura,  $K$  pode atingir um valor crítico,  $K_c$ , em que a fissura se propagará rapidamente até à ruptura do material.

Na realidade, o comportamento dos materiais, de modo geral, não é elástico e linear em toda a gama de tensões até a ruptura, sendo normal obterem-se curvas tensão-deformação como a apresentada a seguir na FIG.2.9:

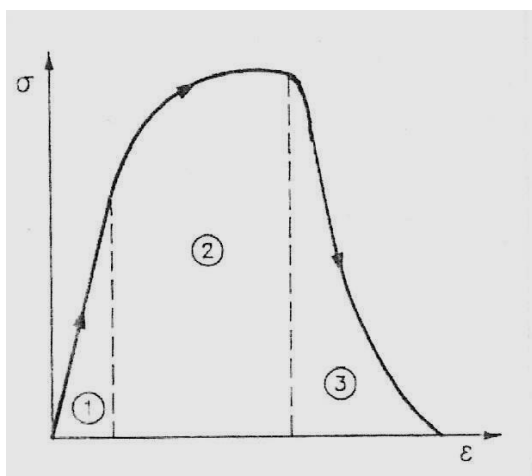


Figura 2.9 - Representação da curva tensão-deformação

No caso de uma fissura em crescimento é possível considerar três zonas diferentes em correspondência com as três partes da FIG. 2.9. Assim temos:

- 1 - Zona elástica e linear
- 2 - Zona plástica em que a relação tensão-deformação já não é linear e a tensão aumenta ou é pelo menos constante à medida que a deformação aumenta.
- 3 - Zona de fratura, em que a tensão diminui e a deformação continua a aumentar.

Se as zonas de fratura e plástica não forem pequenas comparadas com o comprimento da fissura, a mecânica da fratura elástica e linear não pode ser utilizada, sendo necessário recorrer a outros métodos.

O concreto pode ser considerado um material compósito constituído de duas fases: uma matriz de pasta de cimento e agregado disperso nessa matriz. Embora a pasta de cimento endurecida e os agregados apresentem curva tensão-deformação quase lineares, o concreto mostra um comportamento mais acentuadamente não linear devido, em parte, a um escorregamento do agregado na pasta de cimento e em parte ao mecanismo de propagação das fissuras. Estas fissuras estão normalmente presentes, mesmo na ausência de

qualquer carga, resultantes, por exemplo, da retração ou da exsudação, situando-se de preferência na ligação cimento-agregado.

O primeiro estudo experimental sobre a aplicação da mecânica da fratura ao concreto foi publicado por KAPLAN em 1961 (1968), que efetuou ensaios sobre vigas de cimento, argamassa e concreto com entalhes, para determinação do parâmetro  $K$  da taxa de libertação de energia de deformação. Apesar de alguns aspectos menos concordantes, KAPLAN (1968) concluiu que o conceito de GRIFFITH – de uma taxa de libertação crítica da energia de deformação ser a condição para a propagação rápida de uma fissura e conseqüente fratura – era aplicável ao concreto. Este trabalho pioneiro de KAPLAN motivou uma série de discussões, merecendo destaque à apresentada por GLUCKLICH em 1963 (METHA e MONTEIRO, 1994) que, apesar de aceitar a aplicabilidade da mecânica da fratura, introduziu algumas limitações, tendo mais tarde desenvolvido o assunto com maior detalhe.

A aplicação da mecânica da fratura elástica e linear no concreto, 30 anos após o estudo de Kaplan, continua a não merecer consenso geral, existindo basicamente, duas questões em aberto:

- a) Pode a resistência do concreto ser controlada por entalhes introduzidos artificialmente, ou é sempre controlada pelas fissuras naturais do material?
- b) Se as fissuras artificiais podem controlar a fratura do concreto, existe uma dimensão mínima para o corpo de prova, ou relação entre a dimensão do entalhe e do elemento ensaiado, de modo que o ensaio de fratura seja válido?

A resposta à primeira pergunta, segundo a maioria dos investigadores, é positiva, ou seja, a fratura do concreto é sensível ao entalhe, condição fundamental para a aplicação da mecânica da fratura elástica linear. Um material é considerado sensível ao entalhe se, para a mesma seção resistente, a tensão de ruptura diminuir com o aumento do comprimento do



entalhe. Em relação à segunda questão, a diversidade dos resultados obtidos não tem permitido a unanimidade das opiniões.

Segundo MINDESS (1983), a não existência de resultados concordantes deve-se à diversidade das máquinas de ensaio utilizadas, considerando, no entanto, que o problema fundamental é a definição das dimensões do corpo de prova de modo a obter-se um ensaio válido.

É possível que sejam as dimensões do corpo de prova a razão das discussões: são necessárias dimensões extremamente grandes.

# 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo das influências das adições minerais nas propriedades do concreto se deu através da análise comparativa do comportamento mecânico de concretos distintos, confeccionados com adições de diferentes naturezas e proporções.

As propriedades analisadas foram resistência à compressão, resistência a flexo-tração, módulo de elasticidade dinâmico, tenacidade à fratura e resistência à fadiga.

### 3.1 - Materiais

A escolha dos materiais a serem estudados levou em consideração a facilidade de aquisição, bem como suas características físicas/químicas relevantes para o estudo.

O concreto adotado como referência foi confeccionado com cimento Portland, brita calcária, areia natural e fator água/aglomerante de 0,6. Este fator mais elevado foi adotado visando a não utilização de aditivos superplasticantes, minimizando assim, as variáveis que poderiam afetar os resultados.

O cimento Portland utilizado foi o CP II E 32, fabricado pela Ciminas, cujas características químicas/físicas são apresentadas nas TAB. 3.1 e 3.2, respectivamente.

TABELA 3.1 - Características químicas do cimento CP II E 32.

Constituinte	Porcentagem em peso
Clínquer	56 – 94%
Escória	29-31%
Materiais Carbonáticos	9,5%

TABELA 3.2 - Características físicas do cimento CP II E 32.

#325 (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Tempo de início de pega (min)	Resistência à compressão (MPa)			
			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
10	3300	150	9,0	18,0	26,0	36,0

A água empregada na confecção dos concretos é disponibilizada na região metropolitana de Belo Horizonte e atende às especificações da NM 137 – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland da ABNT.

Os agregados utilizados foram caracterizados de acordo com as prescrições das normas vigentes. O agregado miúdo foi a areia natural quartzosa, caracterizada como de granulometria média de acordo com a NBR 7211 – Agregados para o Concreto.

A TAB. 3.3 apresenta os resultados do ensaio de granulometria deste agregado tendo como norma de referência a NBR 7217 – Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados.

TABELA 3.3 - Composição granulométrica da areia.

Peneiras (mm)	Material Retido		% Retida		Média % Retida	% Acumulada
	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>		
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0,3	0,4	0	0	0	(0)
4,8	2,0	2,5	0,2	0,3	0	0
2,4	28,2	25,0	2,8	2,5	3	3
1,2	91,5	81,6	9,2	8,2	9	12
0,6	245,5	233,4	24,6	23,3	24	36
0,3	339,1	342,7	33,9	34,3	34	70
0,15	218,3	231,5	21,8	23,2	22	92
Fundo	73,4	82,1	7,3	8,2	8	(100)
Total	998,4	999,2	99,8	100,0	100	-

Conhecida a composição granulométrica, foram realizados ensaios para a determinação de parâmetros físicos relevantes da areia. Estes resultados são apresentados na TAB 3.4.

TABELA 3.4 - Parâmetros físicos da areia.

Características	Norma	Resultados Obtidos	Limite da Norma 7211
Módulo de Finura	NBR 7211	2,5	-
Diâmetro Máximo	NBR 7211	2,4 mm	-
Massa Específica	NBR 9776	2,58 kg/dm <sup>3</sup>	-
Massa Aparente	NBR 7251	1,30 kg/dm <sup>3</sup>	-
Teor de Material Pulverulento	NBR 7219	3,5%	Menor ou igual a 5%
Teor de Impurezas Orgânicas	NBR 7220	<300 p.p.m	Menor ou igual a 300 p.p.m

Foi utilizado nos trabalhos como agregado graúdo a brita calcária de granulometria zero. A escolha deste agregado se deu basicamente devido a sua disponibilidade e facilidade de manuseio. A composição granulométrica do agregado graúdo é apresentada na TAB. 3.5.

TABELA 3.5 - Composição granulométrica da brita.

Peneiras (mm)	Material Retido		% Retida		Média % Retida	% Acumulada
	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>		
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
12,5	0	0	0	0	0	0
9,5	300	305	6,0	6,1	6	6
6,3	2971	2860	59,4	57,2	58	64
4,8	1230	1323	24,6	26,4	26	90
2,4	434	443	8,7	8,9	9	99
1,2	0	0	0	0	0	99
0,6	0	0	0	0	0	99
0,3	0	0	0	0	0	99
0,15	0	0	0	0	0	99
Fundo	65	69	1,3	1,4	1	100
Total	5000	5000	100	100	100	

Com os dados da tabela acima e ensaios de massa específica, e de determinação dos teores de material pulverulento e de impurezas orgânicas, determinou-se os parâmetros físicos apresentados na TAB. 3.6. Com os resultados destes ensaios pode-se avaliar a conformidade dos agregados utilizados, tendo como base os requisitos exigidos nas normas comumente utilizadas.

TABELA 3.6 - Parâmetros físicos da brita.

Características	Norma	Resultados Obtidos	Limite da Norma 7211
Módulo de Finura	NBR 7211	5,91	-
Dimensão Máxima Característica	NBR 7211	12,5 mm	-
Massa Específica	NBR 9776	2,65	-
Massa Aparente	NBR 7251		-
Teor de Material Pulverulento	NBR 7219	2,5%	Menor ou igual a 5%
Teor de Impurezas Orgânicas	NBR 7220	< 100 ppm	Menor ou igual a 5%

Os concretos com adições foram confeccionados substituindo-se parcialmente o cimento do concreto de referência por adições de sílica ativa gel, escória de alto-forno granulada ou resíduo de cerâmica vermelha. A substituição se deu em massa.

A sílica ativa gel empregada na fabricação do concreto foi adquirida no mercado com o nome de *Centrament Fume S<sub>2</sub>* na forma de suspensão. Suas propriedades relevantes são apresentadas na TAB 3.7.

TABELA 3.7 - Sílica ativa gel - *Centrament Fume S*.

Propriedade	Valor
Densidade	31,38 g/cm <sup>3</sup>
Dosagem máxima	20% do peso de cimento
Teor de sólidos (%)	50 ± 2,0

A escória utilizada foi de alto-forno granulada, ativada quimicamente com cal. Para garantir um material fino, com Blaine 420m<sup>2</sup>/kg foi previamente processada em um moinho de bolas. As características químicas finais da escória são apresentadas na TAB 3.8.

TABELA 3.8 - Constituintes químicos da escória granulada de alto-forno ativada.

Componente	(%)
CaO	38,69
SiO <sub>2</sub>	34,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,00
MgO	4,53
MnO	0,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,79
K <sub>2</sub> O	0,70
Na <sub>2</sub> O	0,12
Sulfetos	0,48
RI	2,00
PF	3,05

A análise de difração de raios x da escória utilizada é apresentada na FIG. 3.1. Observa-se que não foi detectada nenhuma fase cristalina, apenas alguns ruídos, isto é, o gráfico não apresentou nenhum pico, caracterizando assim, o material como amorfo.

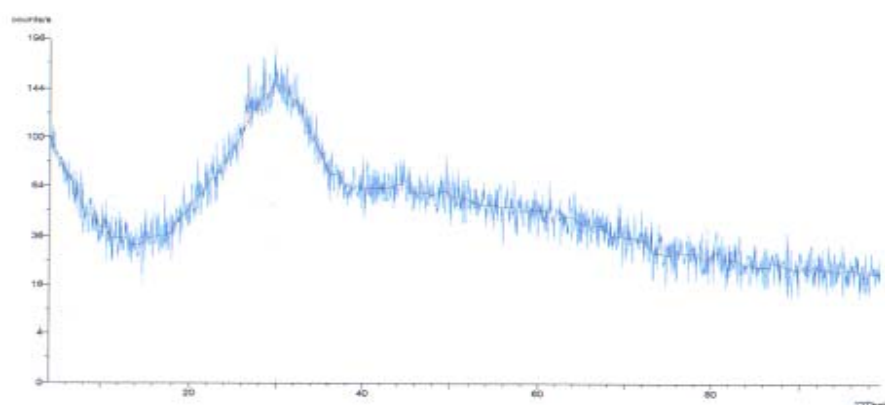


FIGURA 3.1 - Resultante da difração de raios-x da amostra de escória moída.

O resíduo de cerâmica vermelha foi obtido de telhas coloniais, disponíveis no mercado. Para serem adicionadas ao concreto, foram quebradas com a ajuda de uma marreta, de modo a simular a utilização de um resíduo da construção civil. Nenhum controle granulométrico foi feito sobre esse material.

Com esses materiais foram confeccionados corpos de prova para estudo. Em função dos ensaios realizados utilizou-se dois diferentes tipos de corpos de prova. Corpos de prova cilíndricos de (20x10) cm de comprimento x diâmetro, e corpos de prova prismáticos de dimensões (15x15x45) cm. As formas cilíndricas utilizadas são de material plástico, de fácil montagem, desmontagem e limpeza. As formas prismáticas foram de ferro fundido de difícil manuseio, devido ao seu elevado peso.

Em função do número de formas disponíveis para uma mesma mistura, optou-se na maioria das vezes (exceto nas idades de 7 dias) por dois corpos de prova para cada idade e composição analisada.

### 3.2 - Determinação da Composição do Concreto de Referência

A determinação das proporções dos vários materiais componentes do concreto foi feita através de dosagens experimentais. Traços preliminares foram determinados e posteriormente modificados em função de observações feitas durante a etapa de mistura dos constituintes e confecção dos corpos de prova. Na fase da mistura, por exemplo, as observações basearam-se na aparência do concreto fresco, em função dos teores de argamassa, bem como a homogeneidade do composto.

Todos os concretos produzidos tiveram a relação água/aglomerante fixada em 0,6, alterando-se assim o peso de cimento em função das adições minerais.

Foram propostas sete diferentes composições de concreto, tendo como principal premissa à substituição de parte do cimento por outro material aglomerante em estudo. As



composições têm como base um traço experimental que será apresentado a seguir. É importante salientar que a confecção destes concretos não teve como foco a resistência à compressão, mas sim analisar o quanto e de que forma estas adições afetam o desempenho do composto.

A determinação do traço experimental teve como base o método americano de dosagem – American Concrete Institute, o método ACI. Este método se baseia no fato de que, para um determinado tamanho máximo de agregado, o teor de água em  $\text{kg/m}^3$ , determina a trabalhabilidade da mistura, independentemente de suas proporções dentro de limites amplos. Neste método, são apresentadas duas abordagens, a primeira chamada linha ponderal que leva em consideração as massas específicas de cada constituinte do composto, e a segunda, chamada linha volumétrica, leva em consideração o volume ocupado pelos constituintes no composto final.

O traço experimental 1: 2,11: 2,43 em peso seco, com fator água/cimento de 0,6 foi obtido através da linha ponderal. Neste traço tem-se 4,54 kg de agregados/kg de cimento, 46% de agregado miúdo/agregados.

Utilizando a linha volumétrica, obteve-se o traço experimental 1:1,94: 2,43 em peso seco, com fator água/cimento de 0,6. Com este traço obtêm-se 4,37kg de agregados/kg de cimento, 44,4% de agregado miúdo/agregados.

Tendo em vista a similaridade dos resultados foi adotado neste trabalho o traço obtido através da linha ponderal. Esta escolha se justifica uma vez que através deste cálculo obteve-se um maior peso de agregados por peso de cimento, o que a primeira vista poderia indicar um concreto de menor custo.

### 3.3 - Composição dos concretos com adições

Foram estudados sete tipos de concretos, cujas composições variam no que se refere às proporções e naturezas das adições utilizadas. As adições analisadas foram de escória de alto forno granulada, sílica ativa gel e resíduo de cerâmica vermelha. Todos os concretos foram confeccionados com cimento tipo CP II E 32 marca Ciminas, brita calcária, areia lavada, seca e peneirada. Foi mantida em todos os concretos a relação água/aglomerante de 0,6, bem como a base de medidas fornecidas pelo traço experimental. O teor de adições usado foi calculado em substituição parcial do peso de cimento, uma vez que as mesmas têm características cimentícias e/ou pozolânicas.

A TAB 3.8 apresenta as quantidades de materiais utilizados por m<sup>3</sup> de concreto confeccionado. A sílica ativa gel utilizada apresenta cerca de 50% de sólidos, portanto no cálculo da água de amassamento foi subtraído o valor de água presente nessa solução.

TABELA 3.8 – Quantidades de materiais por m<sup>3</sup> de concreto.

Composição		Constituintes (kg)				
Tipo	Adição	Cimento	Adição Mineral	Brita Calcária	Areia Natural	Água
A	Sem Adição	495,50	-	1215,00	1035,00	297,50
B	5% de Sílica	446,00	49,50	1215,00	1035,00	272,50
C	10% de Sílica	396,50	99,00	1215,00	1035,00	248,00
D	17,5% de Escória	408,00	87,50	1215,00	1035,00	297,50
E	35% de Escória	324,00	171,50	1215,00	1035,00	297,50
F	17,5% de Resíduo	408,00	87,50	1215,00	1035,00	297,50
G	35% de Resíduo	324,00	171,50	1215,00	1035,00	297,50

Cabe lembrar que o cimento contém de 29 a 31% de escória (TAB. 3.1) na sua composição. Para cada uma das composições acima foram confeccionados 12 corpos de prova

cilíndricos e 6 corpos de prova prismáticos. Cada composição foi analisada nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Para a confecção dos corpos de prova prismáticos o traço foi rodado em duas etapas, fato este justificado pela capacidade de 50 litros da betoneira utilizada para o amassamento.

### 3.4 - Métodos

O procedimento experimental adotado é apresentado esquematicamente na FIG 3.2.

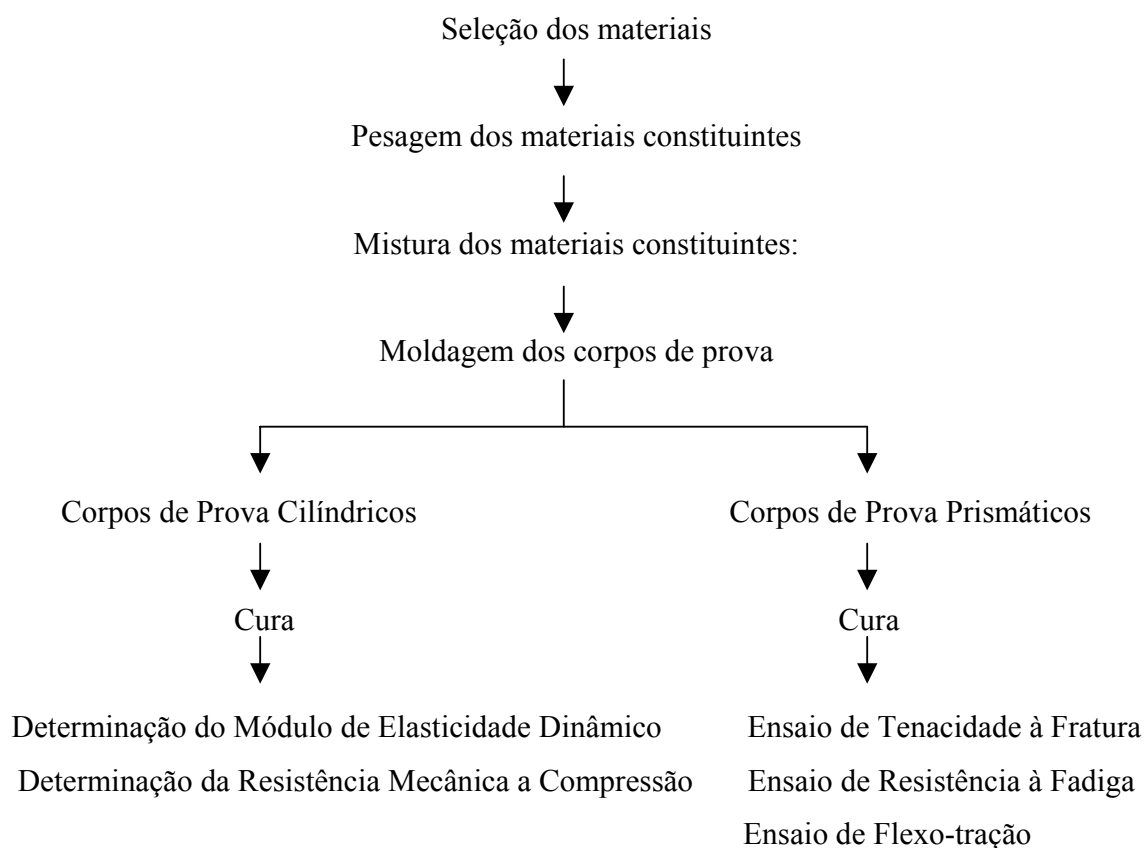


FIGURA 3.2 - Procedimento Experimental

### 3.4.1 - Confeção dos corpos de prova

Após a seleção dos materiais, foi feita a pesagem, e mistura em uma betoneira com capacidade de 50 litros, lotada no laboratório de concreto da E.E.UFMG. Foi estabelecido um tempo de mistura de cerca de 3 minutos, após os quais o concreto fresco foi lançado em um vasilhame para a confecção dos corpos de prova. As formas utilizadas independente da geometria e material foram limpas e receberam a aplicação de um desmoldante para a posterior desforma dos exemplares. O concreto confeccionado foi colocado nas formas em três camadas adensadas. Para os corpos de prova cilíndricos o adensamento foi manual com 30 golpes por camada. Para as formas prismáticas, foi utilizada uma mesa vibratória durante um pequeno intervalo de tempo. Neste caso, o controle do adensamento foi visual.

Após a confecção, os dos corpos de prova foram mantidos em condição ambiente, e após um prazo mínimo de 24h foram desformados e transportados até a câmara úmida. Após o período de cura úmida pré-estabelecida (7,14 ou 28 dias) os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de compressão, flexo-tração e determinação do módulo de elasticidade dinâmico, sendo os mesmos retirados do ambiente de cura 24h antes da realização dos ensaios.

### 3.4.2 - Ensaios de compressão

A prensa utilizada no ensaio para determinação da resistência mecânica à compressão é de origem suíça, marca Alfred J. Amsler & Co., com capacidade máxima de carga de 100 toneladas, e controle manual da velocidade de aplicação de carga.

Os ensaios foram realizados de acordo com os parâmetros usualmente recomendados. Foram ensaiados corpos de prova nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Antes de submeter os corpos de prova cilíndricos ao carregamento, foi feito o capeamento de suas bases visando uma superfície plana para distribuição uniforme de cargas. Este capeamento foi feito com enxofre derretido.

### 3.4.3 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico do concreto foi estimado por ensaios de frequência ressonante, em um aparelho da marca Elle mostrada na FIG. 3.3. Neste ensaio, o módulo é calculado a partir da frequência fundamental de vibração, da massa, das dimensões, e da forma do corpo de prova. A rigor esse método não poderia ser aplicado a materiais não homogêneos, como o concreto. No entanto, bons resultados são obtidos desde que o corpo de prova tenha dimensões suficientemente grandes e seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da heterogeneidade do material (HAN e KIM, 2003, BSI 1990, AFNOR, 1975, ASHBY e JONES, 1996).

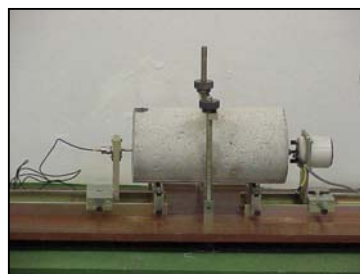
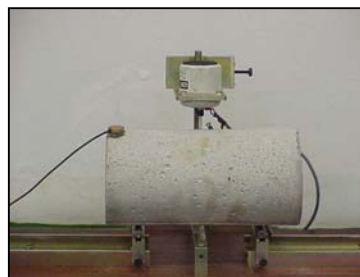
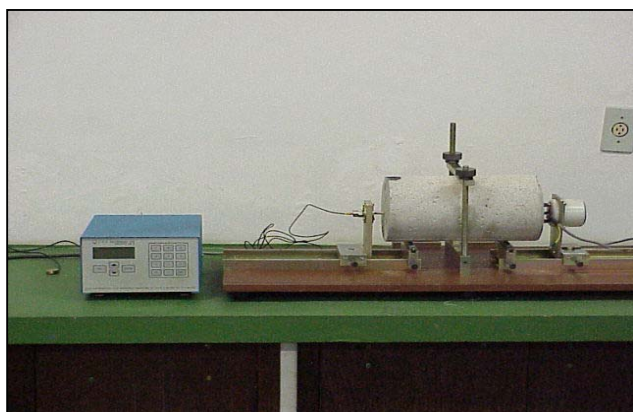


FIGURA 3.3 - Fotografia da montagem para determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto: módulo transversal e longitudinal.

Neste trabalho foi determinado apenas o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, apresentado na FIG 3.3.

#### 3.4.4 - Resistência à fadiga

O ensaio utilizado para estudo do comportamento à fadiga foi o de flexo-tração, realizado em uma máquina de ensaios marca Instron modelo 4482, com capacidade máxima de carga de 10 toneladas, apresentada na FIG 3.4a. A FIG. 3.4b apresenta de forma esquemática a realização do ensaio de flexo-tração para carregamentos cíclicos.



FIGURA 3.4a - Fotografia da montagem para ensaios de fadiga.

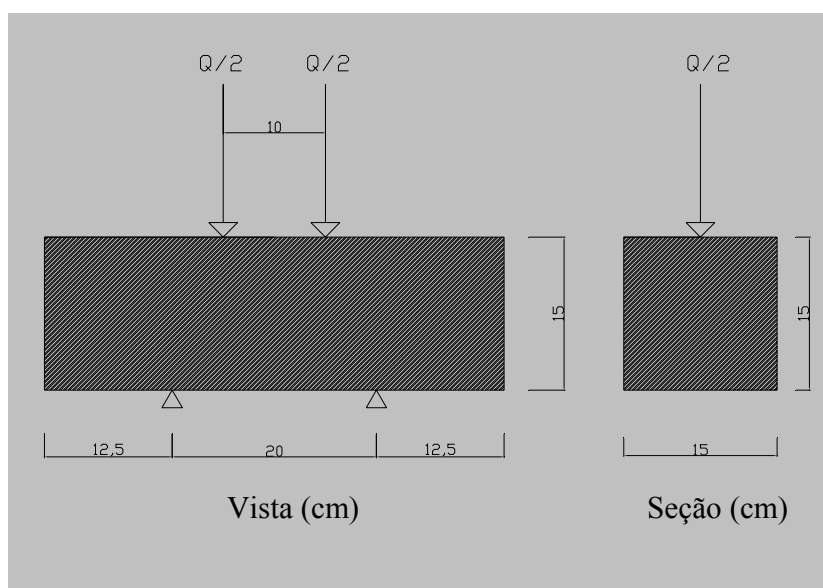


FIGURA 3.4b - Representação do ensaio de flexo-tração para carregamentos cíclicos.

Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados a flexo-tração com aparato de quatro pontos e vão livre na base de 0,20 m. A taxa de deflexão imposta foi de 0,0002 m/s. Neste ensaio foram utilizados 2 corpos de prova de dimensões (15x15x45)cm, aos 28 dias para cada composição.

Em função das características da máquina (servo-mecânica) só foi possível à aplicação de 500 ciclos de carregamento. Dessa forma, o estudo do comportamento à fadiga dos concretos se deu de forma indireta: avaliou-se comparativamente a resistência a flexo-tração de amostras submetidas ou não a esforços cíclicos. Em todos os testes foi mantida a velocidade de deformação.

#### 3.4.5 - Tenacidade à fratura

O ensaio de tenacidade à fratura foi feito tendo como base a norma do RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Constructions et Ouvrages - 1973).

Foram ensaiados 2 corpos de prova prismáticos de cada uma das sete composições estudadas, aos 28 dias de idade. Em cada um destes corpos de prova com auxílio de uma serra para concreto, foi feita uma fenda de cerca de 1,5 cm de profundidade, e 0,5 cm de largura. Os corpos fendilhados foram submetidos à flexo-tração em quatro pontos em uma máquina Instron modelo 4482, apresentada na FIG 3.4.

A FIG. 3.4b ilustra de forma esquemática a realização do ensaio nos corpos de prova fendilhados. Com os dados obtidos foi calculada a tenacidade à fratura das composições propostas.



# 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos experimentos são apresentados em função dos cinco ensaios realizados: resistência à compressão, determinação do módulo de elasticidade dinâmico, resistência a flexo-tração, resistência à fadiga e tenacidade à fratura. Considerou-se na análise dos resultados apenas a influência da adição, sem contabilizar o teor de escória do cimento, uma vez que era o mesmo para todos os concretos estudados.

### 4.1 - Ensaio de Compressão

A FIG. 4.1 mostra os resultados do ensaio de compressão uniaxial para o concreto de referência (sem adição) nas idades de 7, 14 e 28 dias. Cabe lembrar que em função do número de formas disponíveis foram realizados, na maioria das vezes, dois experimentos para cada idade considerada.

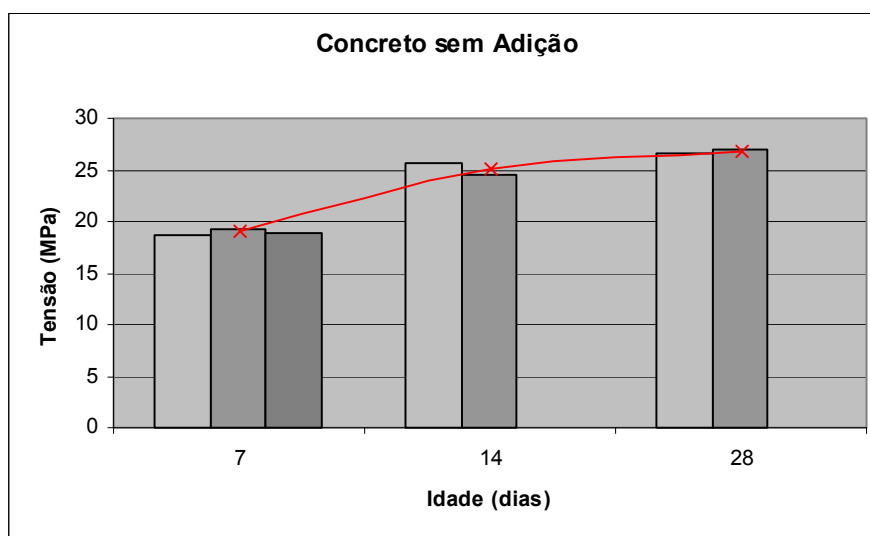


FIGURA 4.1 - Resistência à compressão do concreto de referência em diferentes idades.

É visto que os exemplares submetidos ao ensaio de compressão uniaxial apresentaram uma uniformidade nas resistências indicando a adequabilidade do processo adotado para a confecção dos corpos de prova. O valor de aproximadamente 27 MPa para a resistência à compressão aos 28 dias, conforme o fator água/cimento adotado, está de acordo com as especificações do cimento. A evolução da resistência em função da idade segue padrões comumente apresentados nas bibliografias de referência sobre o assunto (MEHTA, 1994 e AITCIN, 2000).

Os gráficos apresentados nas FIG. 4.2 e 4.3 ilustram o comportamento da resistência à compressão dos concretos com adição de sílica ativa gel, em duas diferentes porcentagens, 5% e 10% respectivamente. Deve-se ressaltar que as adições se deram em substituição parcial do peso de cimento, determinado no concreto de referência.

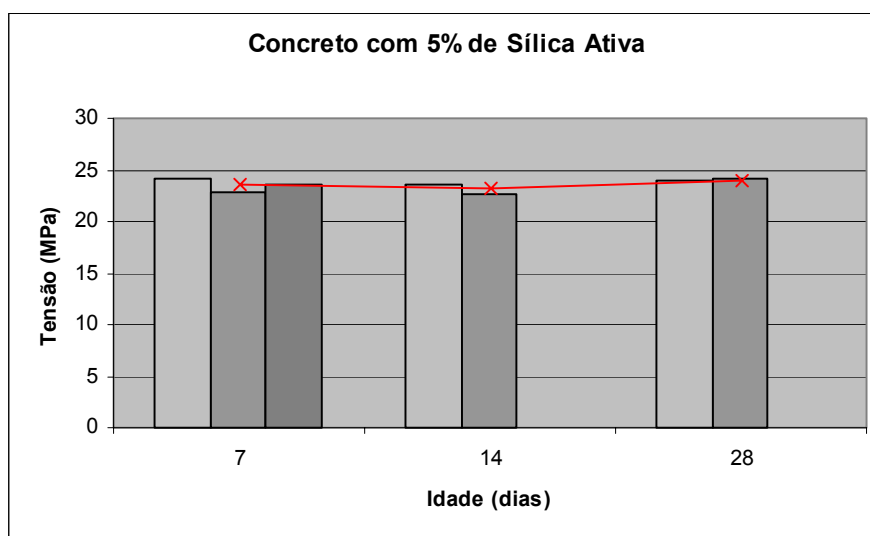


FIGURA 4.2 - Resistência à compressão do concreto com adição de 5% sílica ativa gel em diferentes idades.

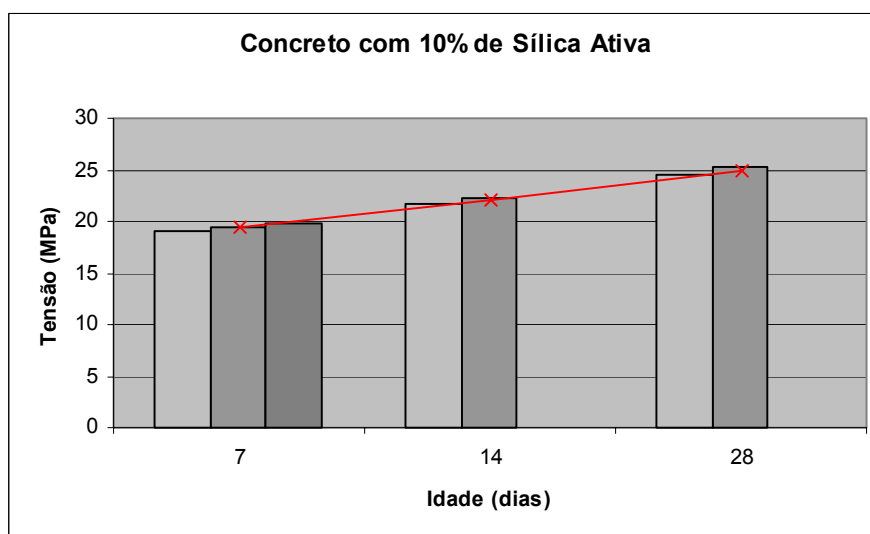


FIGURA 4.3 - Resistência à compressão do concreto com adição de 10% de sílica ativa gel em diferentes idades.

Os concretos com adição de sílica ativa gel apresentaram resistências à compressão da ordem de 24 MPa aos 28 dias. Para o concreto com 5% desta adição observa-se uma evolução pouco significativa da resistência nas idades consideradas. No entanto, o concreto com 10% desta adição apresenta uma evolução evidente, mas gradual.

Nas FIG. 4.4 e 4.5 pode-se analisar a evolução da resistência à compressão nas idades de 7,14 e 28 dias para o concreto com adição de 17,5% e 35% de escória de alto forno granulada, respectivamente.

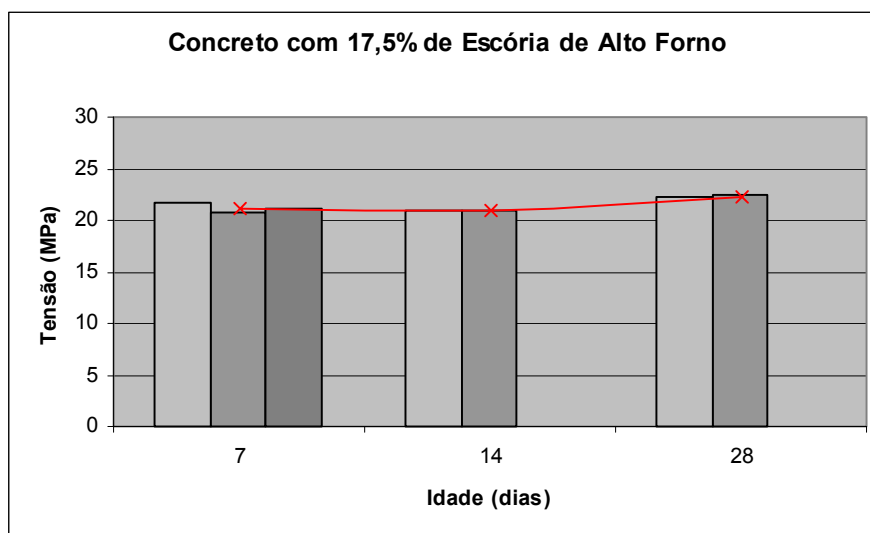


FIGURA 4.4 - Resistência à compressão do concreto com adição de 17,5% de escória de alto forno granulada em diferentes idades.

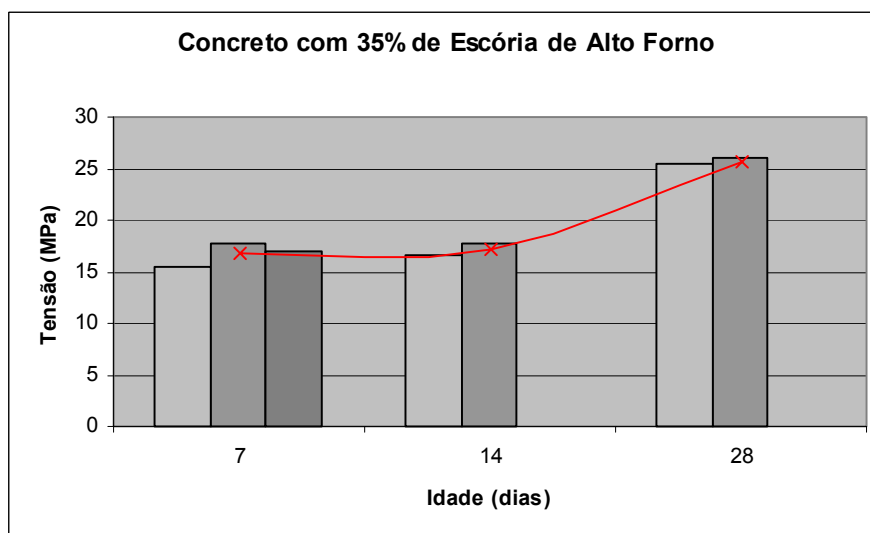


FIGURA 4.5 - Resistência à compressão do concreto com adição de 35% de escória de alto forno granulada em diferentes idades.

A adição de escória de alto forno granulada em substituição a 17,5% de cimento que possui em média 30% de escória, a princípio, não afeta significativamente a evolução da resistência à compressão do concreto. A adição de 35% escória de alto forno granulada nas mesmas condições leva a um crescimento mais acelerado da resistência à compressão após 14 dias.

As FIG. 4.6 e 4.7 apresentam as resistências à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias para o concreto com 17,5% e 35% de resíduo de cerâmica vermelha, respectivamente.

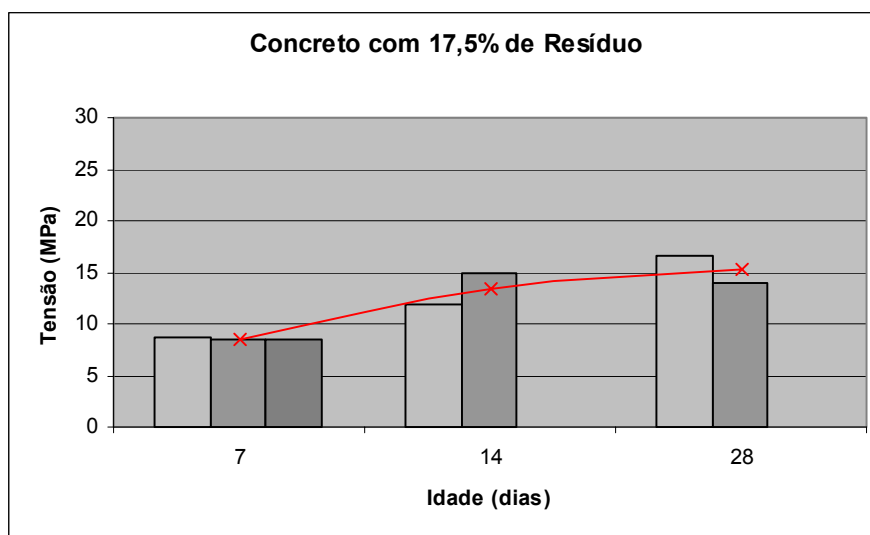


FIGURA 4.6 - Resistência à compressão do concreto com adição de 17.5% de resíduo de cerâmica vermelha em diferentes idades.

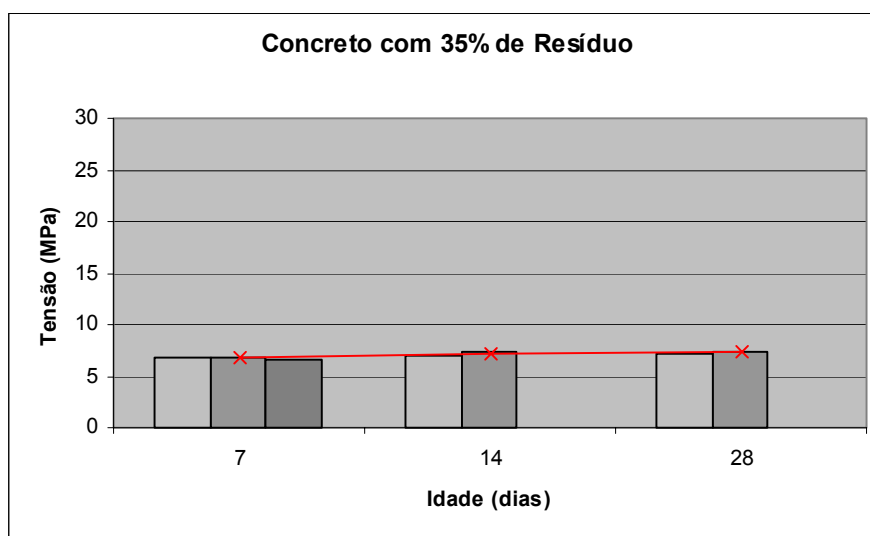


FIGURA 4.7 - Resistência à compressão do concreto com adição de 35% de resíduo de cerâmica vermelha em diferentes idades.

Aos 7 dias, resistências à compressão da ordem de 7MPa, são obtidas com as adições de resíduo de cerâmica vermelha. Para a primeira composição é visto um acréscimo significativo e crescente no decorrer da idade do concreto, já na segunda composição, não há acréscimo significativo para a resistência à compressão. Este fato pode ser justificado uma vez que o resíduo de cerâmica vermelha utilizado não foi beneficiado de tal forma que garantisse que o mesmo contribuísse para o composto como um material pozolânico, uma vez que suas elevadas dimensões fizeram com que ele trabalhasse como um agregado e não como uma adição aglomerante.

As FIG. de 4.8 a 4.10 mostram a evolução das resistências à compressão das diferentes composições estudadas, nas idades de 7,14 e 28 dias.

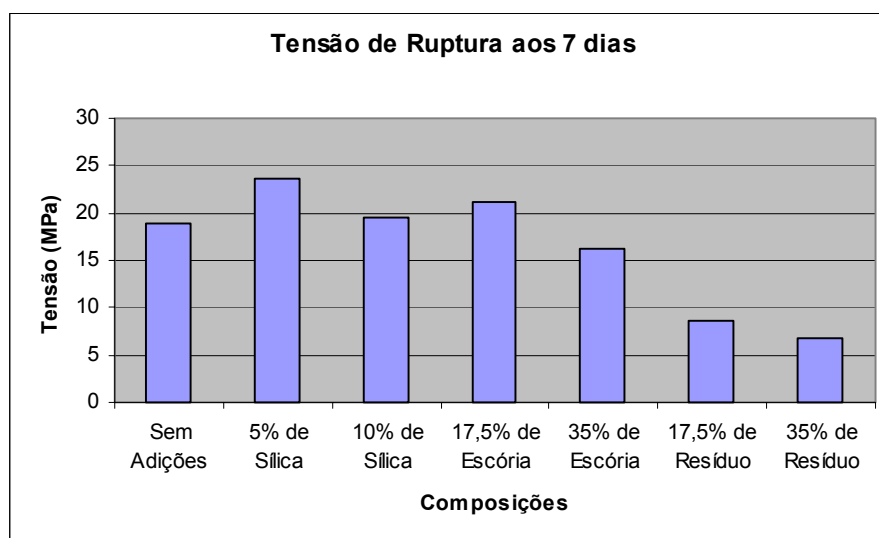


FIGURA 4.8 - Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias.

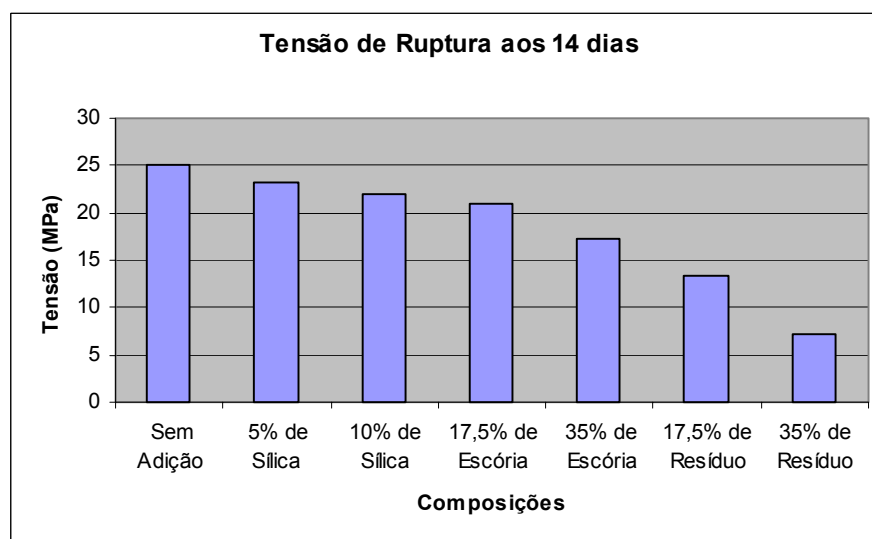


FIGURA 4.9 - Resistência à compressão dos concretos aos 14 dias.

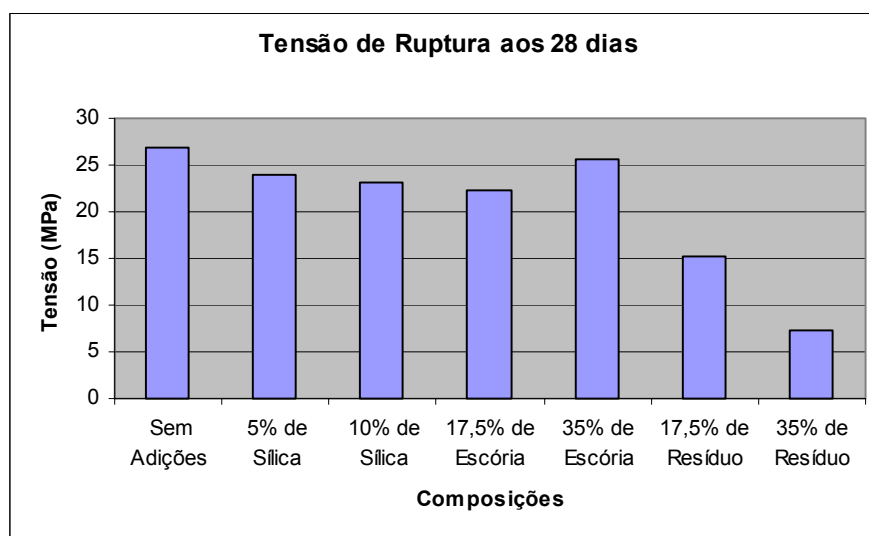


FIGURA 4.10 - Resistência à compressão dos concretos com 28 dias.

A adição de sílica ativa gel proporciona maiores resistências iniciais, sendo que 5% desta adição mostra-se mais efetiva como agente enrijecedor nas primeiras idades. Para a idade de 14 dias o concreto sem adição, adotado como concreto de referência, apresenta um valor mais satisfatório tendo em vista os outros resultados obtidos.

Aos 28 dias fica evidente que as adições em nada contribuíram para a resistência à compressão do concreto, uma vez que o maior valor obtido para a resistência nesta idade foi do concreto sem adição.

A FIG. 4.10 revela também que a adição de 35% de escória de alto forno granulada ( o que corresponde efetivamente a 25%) proporciona uma resistência equivalente à do concreto sem adições. Estes resultados diferem dos comumente apresentados na literatura (MEHTA e MONTEIRO, 1994 e AITCIN, 2000), onde o aumento do teor de escória no concreto, em substituição ao cimento, leva a uma redução da resistência à compressão.

Em todas as idades a resistência à compressão do concreto fabricado com resíduo, foi menor. Isto poderia ser devido ao fato de que o resíduo se comportou como agregado, dessa



forma o fator água/cimento da mistura se elevaria de 0,6 para cerca de 0,92 (o teor de cimento foi reduzido em até 65% sem se alterar a quantidade de água).

## 4.2 - Módulo de Elasticidade

Aos 28 dias de idade, foram submetidos ao ensaio de frequência ressonante 2 corpos de prova de cada composição, sendo realizadas 10 medidas para cada amostra analisada.

As FIG. 4.11 a 4.18 mostram os resultados obtidos na determinação do módulo de elasticidade dinâmico para os concretos em estudo.

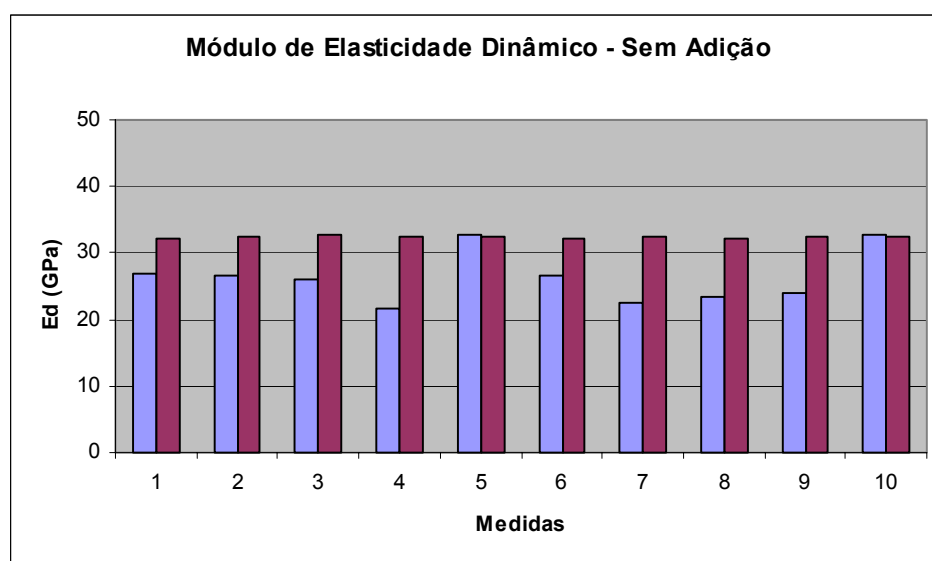
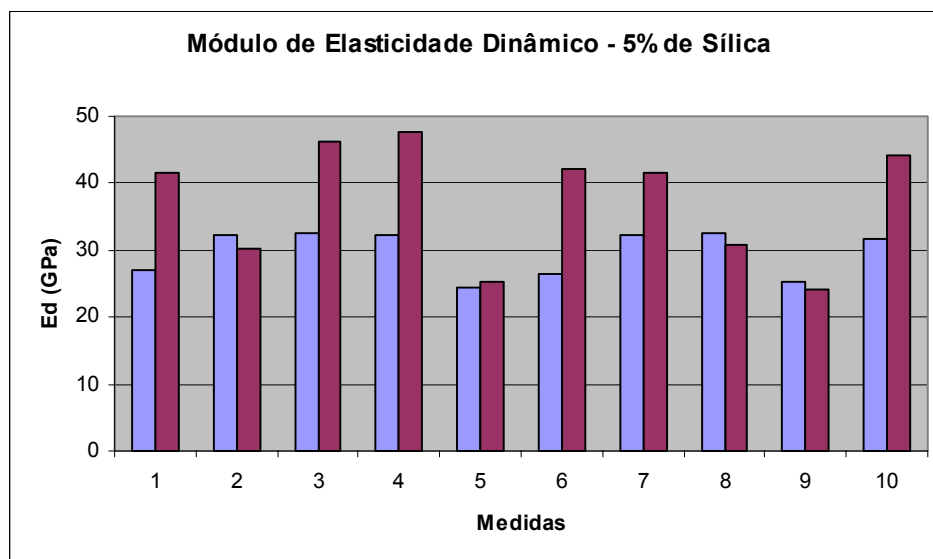
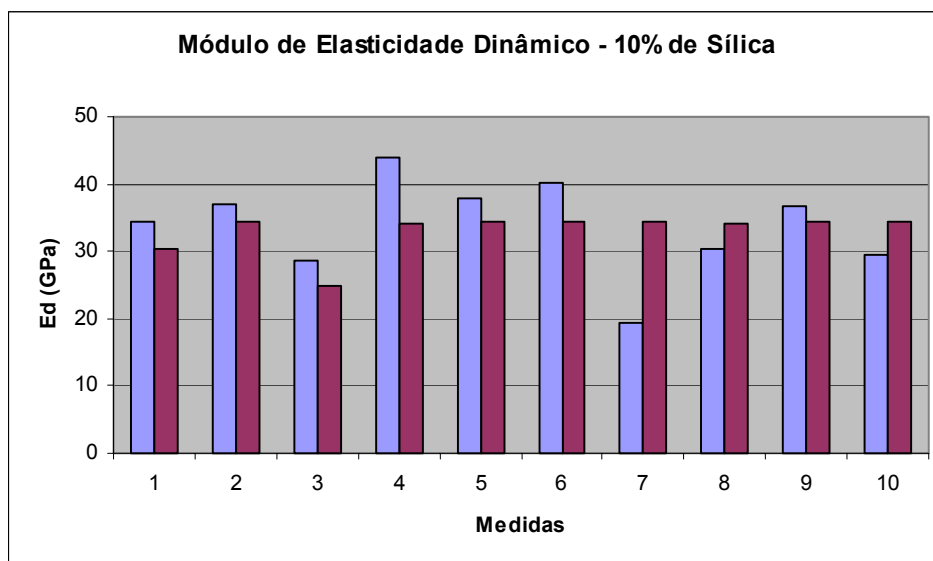


FIGURA 4.11 –  $E_d$  dinâmico para o concreto de referência.

FIGURA 4.12 -  $E_d$  dinâmico para o concreto com 5% de Sílica ativa gel.FIGURA 4.13 -  $E_d$  dinâmico para o concreto com 10% de Sílica ativa gel.

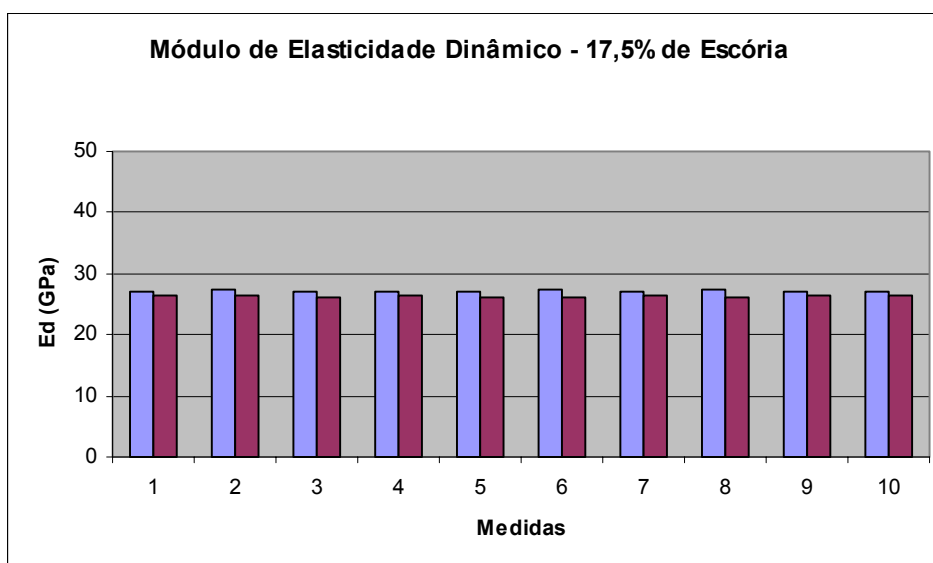


FIGURA 4.14 -  $E_d$  dinâmico para o concreto com 17,5% de Escória de alto forno granulada.

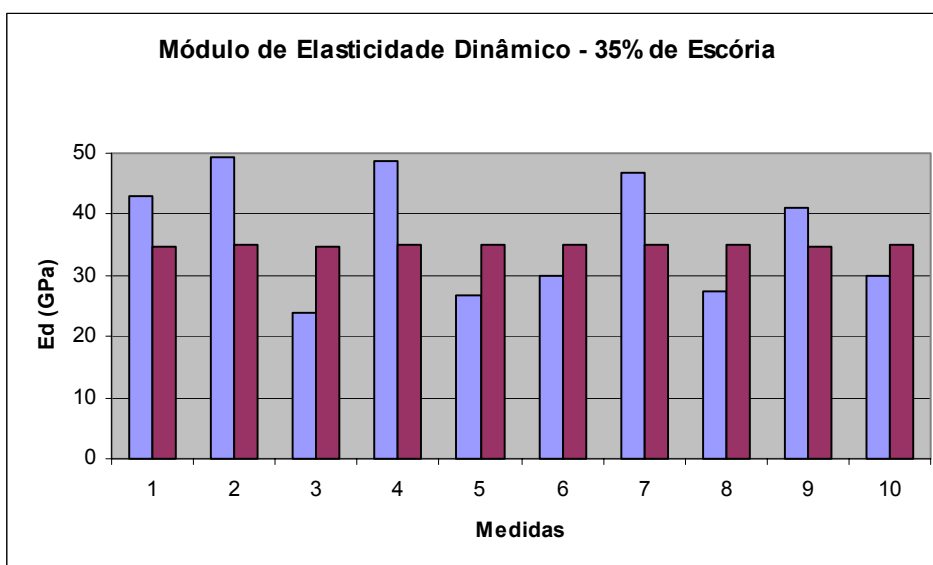


FIGURA 4.15 -  $E_d$  dinâmico para o concreto com 35% de Escória de alto forno granulada.

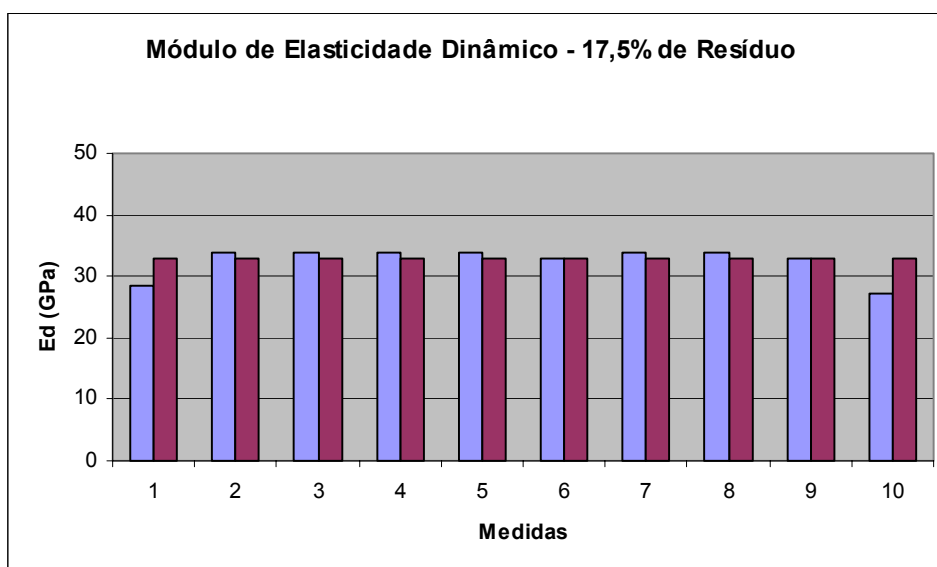


FIGURA 4.16 -  $E_d$  dinâmico para o concreto com 17,5% de resíduo de cerâmica vermelha.

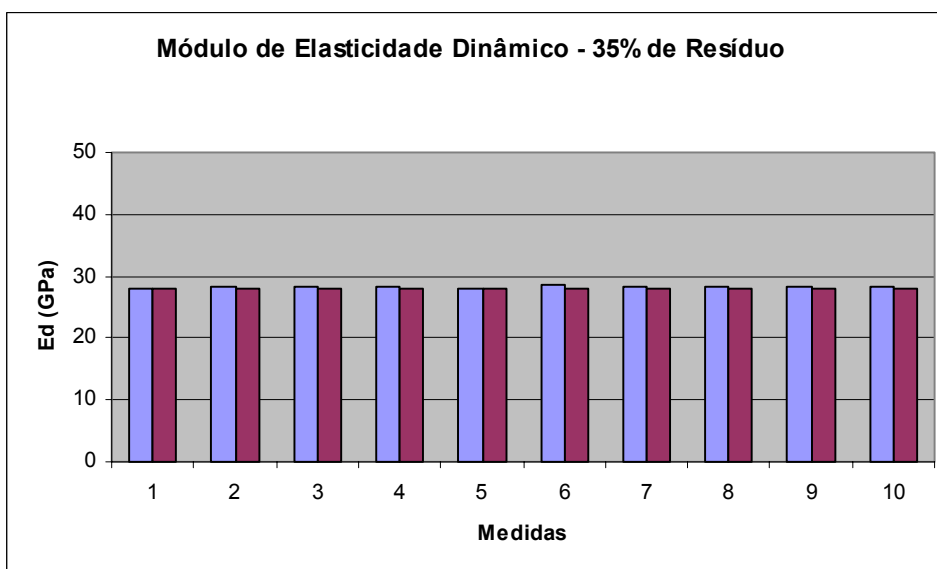


FIGURA 4.17 -  $E_d$  dinâmico para o concreto com 35% de resíduo de cerâmica vermelha.

Observa-se pelas FIG 4.11 a 4.17 que alguns corpos de prova apresentaram variações de até 20% no módulo de elasticidade dinâmico. Esta disparidade de resultados pode estar associada ao processo de confecção dos corpos de prova, bem como a capacidade da adição de se incorporar á mistura como um todo. Verifica-se que no caso dos resíduos de cerâmica

vermelha, que na verdade funcionaram como agregados, os corpos se apresentaram bem homogêneos, tendo em vista os resultados apresentados nas FIG 4.16 e 4.17.

Nas amostras com grande teor de escória (FIG 4.15), a heterogeneidade poderia estar associada à dificuldade de mistura de uma maior quantidade de material muito fino, bem como seu grande poder de absorção de água. Esta justificativa se confirmou durante a confecção desta composição, uma vez que a mistura apresentou-se seca e com elevada consistência.

A grande diferença no módulo de elasticidade dinâmico observado nas amostras com sílica ativa gel estariam relacionadas à dificuldade de mistura observada durante a confecção dos concretos. Fato este relevante uma vez que o material é muito consistente e de difícil mistura mesmo não estando associado a nenhum outro material.

As variações observadas no concreto sem adição estão dentro da faixa comumente observadas nas bibliografias de referência (COUTINHO, A. S. e GONÇALVES, A. 1988). Essas variações podem ser visualizadas na FIG. 4.18, onde são apresentados os valores médios para o módulo de elasticidade dinâmico para cada concreto em estudo.

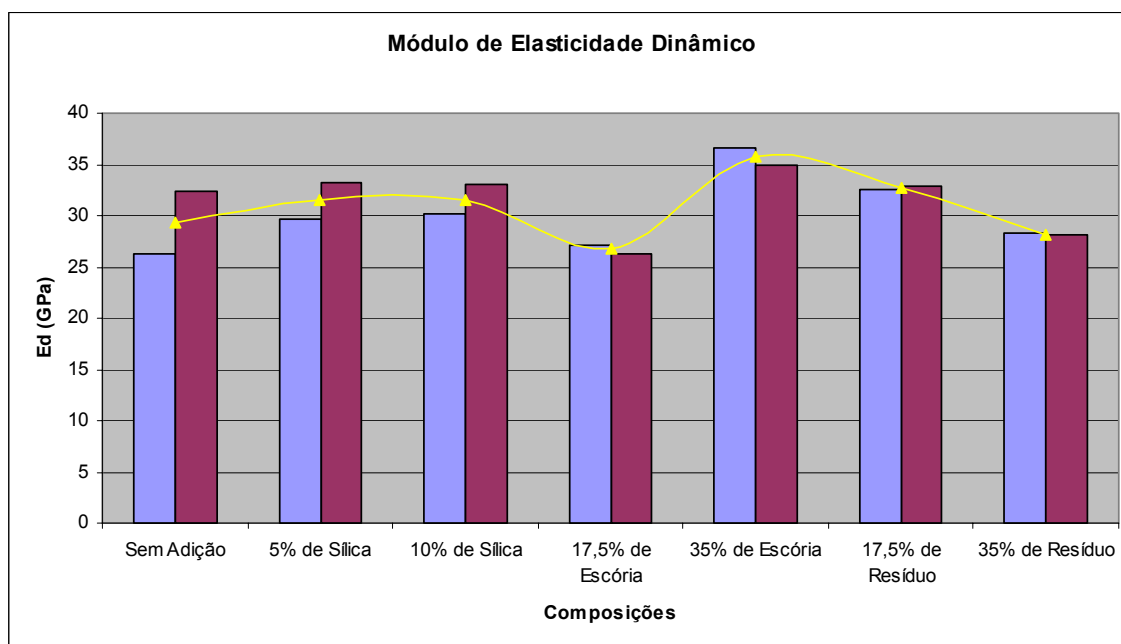


FIGURA 4.18 -  $E_d$  dinâmico médio dos concretos em estudo.

Considerando as variações em torno de 20% nas medidas individuais dos módulos de elasticidade, a análise da influência das adições foi apenas considerada para valores superiores a esse, ou seja, as adições de sílica ativa gel, 17,5% de escória de alto forno granulada e de resíduos de cerâmica vermelha não afetam o módulo de elasticidade dinâmico. Este fato é justificado uma vez que suas variações em relação ao concreto de referência estão em torno de 20%. Dessa forma, apenas adição de 35% de escória de alto forno granulada promove um aumento significativo no módulo de elasticidade dinâmico.

A FIG. 4.19 mostra a resistência à compressão juntamente com o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias para os concretos em estudo. Nota-se que o módulo de elasticidade dinâmico não acompanha de forma monotônica a variação da resistência à compressão. Portanto, a princípio não existe uma dependência direta entre estes parâmetros. Os valores apresentados indicam que os mecanismos que controlam essas propriedades não são inteiramente dependentes.

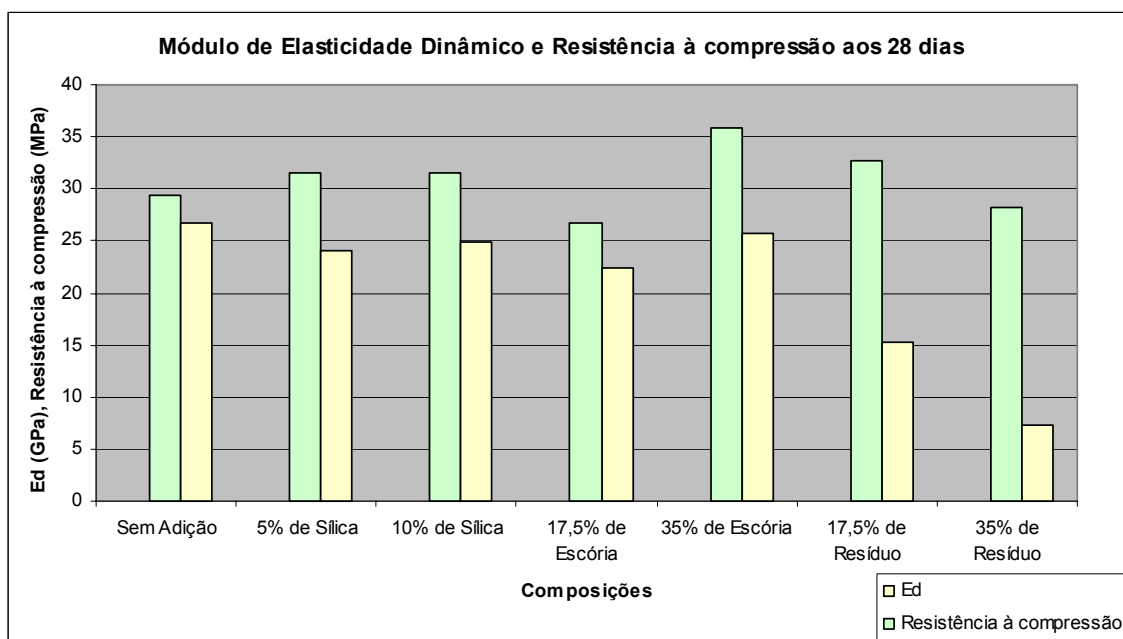


FIGURA 4.19 - Resistência à compressão e  $E_d$  dinâmico aos 28 dias.

Apesar do módulo de elasticidade dinâmico calculado pela frequência ressonante ser o mais indicado para avaliar a capacidade de deformação do material no regime elástico (ASHBY & JONES, 1996), é usual adotar para efeito de cálculo o módulo de elasticidade obtido através de equações empíricas.

De acordo com a NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimentos, pode-se estimar o módulo de elasticidade do concreto em MPa pelo  $E_{ci}$  (módulo de elasticidade tangente) ou pelo  $E_{cs}$  (módulo de elasticidade secante) através das equações abaixo:

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (\text{Equação 4.2.1})$$

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci} \quad (\text{Equação 4.2.2})$$

Onde  $f_{ck}$  é a resistência à compressão do concreto aos 28 dias em MPa.

A utilização das equações acima é indicada apenas para concretos fabricados com agregados convencionais.

Utilizando as Eq. 4.2.1 e 4.2.2, os resultados da resistência à compressão aos 28 dias e os dados da FIG 4.18 pode-se avaliar os módulos de elasticidade estáticos (tangente e secante) e o módulo de elasticidade dinâmico obtidos para as diferentes composições.

A FIG 4.20 apresenta os três valores para o módulo de elasticidade dos concretos em estudo.

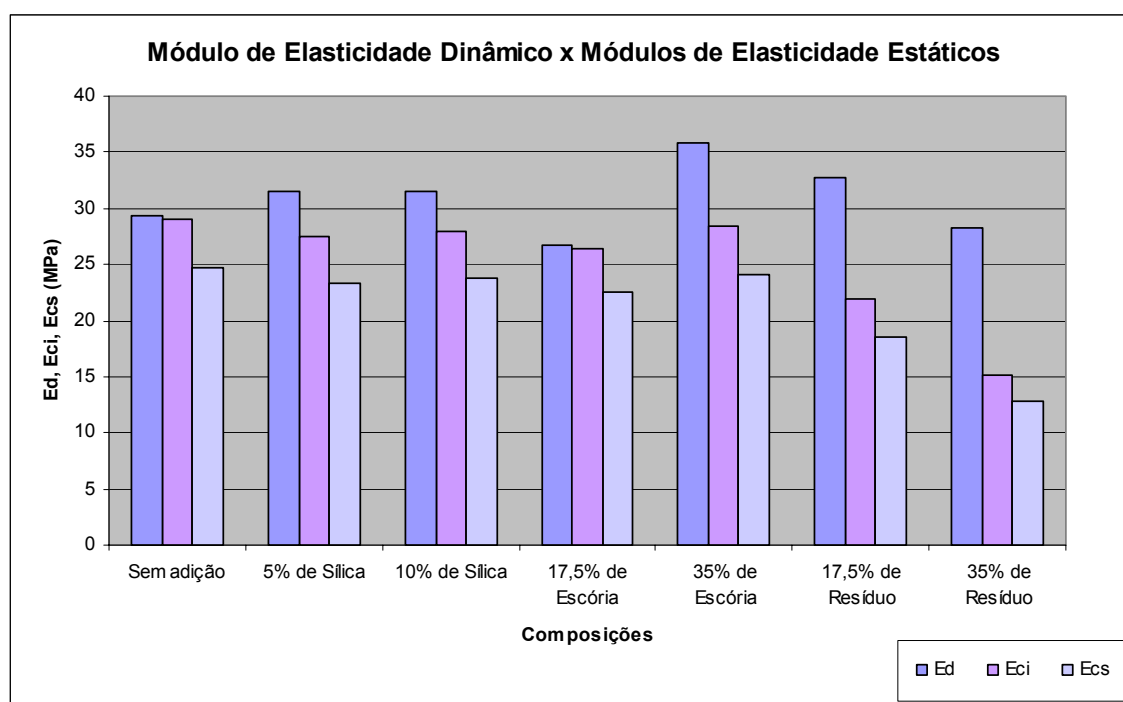


FIGURA 4.20 - Módulos de elasticidade dos concretos.

Os resultados mostram que o módulo tangente tem valores mais próximos do módulo obtido por frequência ressonante. Isto está em concordância com alguns autores que sugerem que o módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido através do módulo tangente calculado pela reta traçada desde a origem da curva tensão-deformação (COUTINHO, A. S. e GONÇALVES, A., 1994). Sendo assim é de se esperar que os



módulos calculados a partir de métodos dinâmicos sejam maiores que os estáticos calculados através de equações empíricas.

Na FIG 4.20 é apresentada uma diferença de cerca 25% em média para os valores obtidos entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade tangente. Observa-se que para os concretos de baixa resistência (concretos com adição de resíduo de cerâmica vermelha) o módulo de elasticidade dinâmico é aproximadamente 50% maior que os módulos estáticos. A bibliografia relata uma diferença entre os módulos estáticos e dinâmicos em torno de 50% para os concretos de baixa resistência, e para concretos com resistências mais elevadas, em torno de 20%, (COUTINHO, A. S. e GONÇALVES, A. 1994).

### **4.3 - Resistência a flexo-tração**

No cálculo da resistência mecânica do corpo de prova sob flexo-tração considerou-se a razão entre o momento atuante e o momento resistente. A FIG 4.21 apresenta os valores das tensões de ruptura obtidos nos ensaios de flexo-tração para os diferentes concretos estudados, na idade de 28 dias.

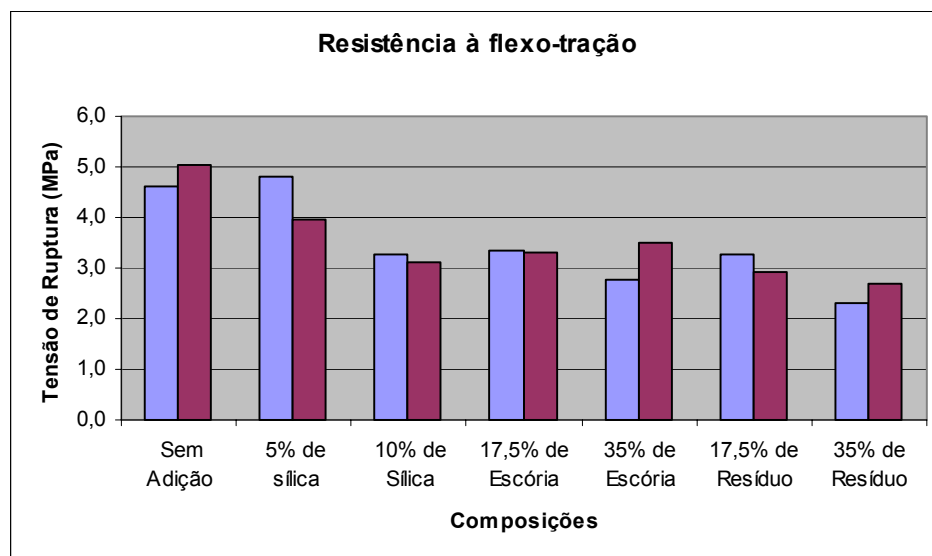


FIGURA 4.21 - Tensão de ruptura a flexo-tração.

Observa-se que as adições consideradas não contribuem para o aumento da resistência a flexo-tração aos 28 dias. As adições de 10% de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha tendem a diminuir sensivelmente a resistência a flexo-tração, ou seja, as influências destas adições seguem tendências diferentes no tocante a resistência à compressão e a flexo-tração. Isto pode ser visualizado na FIG 4.22, onde se apresenta a resistência a flexo-tração juntamente com a resistência à compressão aos 28 dias para os concretos em estudo.

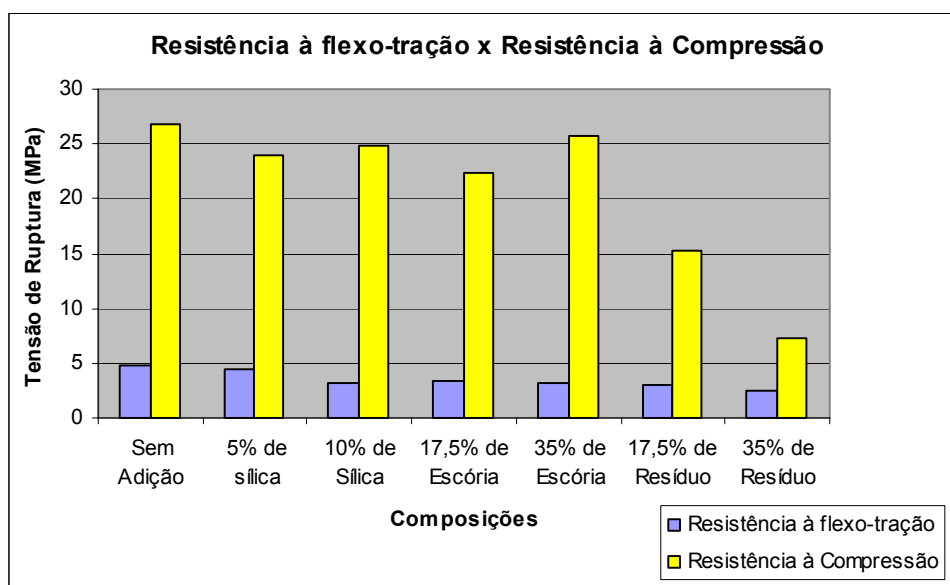


FIGURA 4.22 - Resistência a flexo-tração e resistência à compressão.

Na FIG. 4.22 considerou-se os valores médios para cada amostra. Nos concretos de referência e nos com adições de sílica gel e escória, a resistência à compressão foi em média 5 vezes maior que a resistência a flexo-tração. Na literatura essa razão varia de 14 a 9 vezes, quando se considera tração uniaxial (COUTINHO, 1997, ASHBY e JONES, 1996, METHA e MONTEIRO, 1994). Variações no ensaio de flexão (ensaios em 3 ou 4 pontos) levam a alterações significativas no valor da resistência, indicando que essa razão também deve se alterar quando se passa de tração uniaxial para flexo-tração. Para os concretos com resíduo de cerâmica vermelha o resultado é intrigante, uma vez que esta adição desempenhou a função de material inerte, levando a uma resistência à compressão menor e não afetou a flexo-tração.

#### 4.4 - Resistência à fadiga

A resistência à fadiga foi analisada através da redução percentual da resistência a flexo-tração de corpos de prova submetidos a carregamentos cíclicos. Na FIG 4.23 são apresentadas as tensões de ruptura no ensaio de flexo-tração após a aplicação de 500 ciclos

de carregamentos, também em flexo-tração. Foram ensaiados dois corpos de prova de cada composição, na idade de 28 dias.

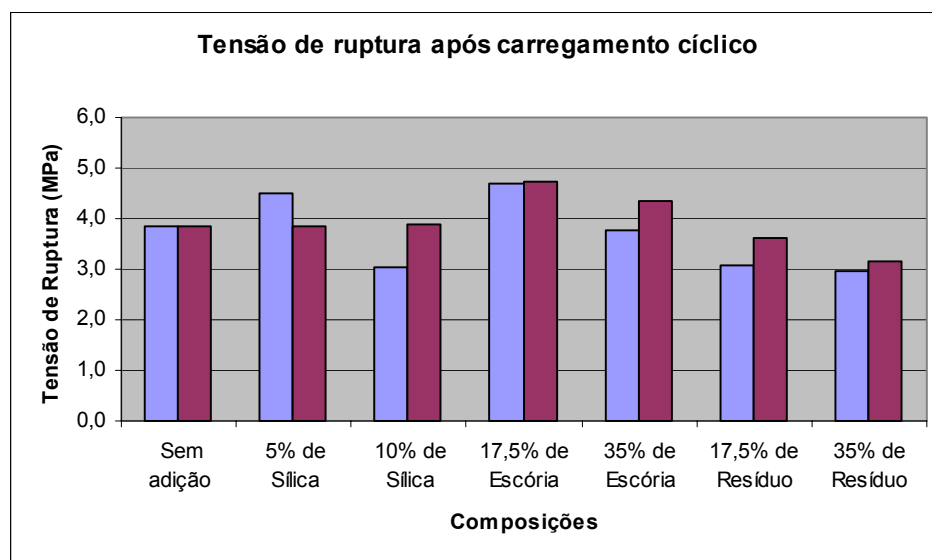


FIGURA 4.23 - Tensão de ruptura após 500 ciclos de carregamentos.

A FIG 4.24 evidencia a redução da resistência à compressão dos concretos após carregamentos cíclicos

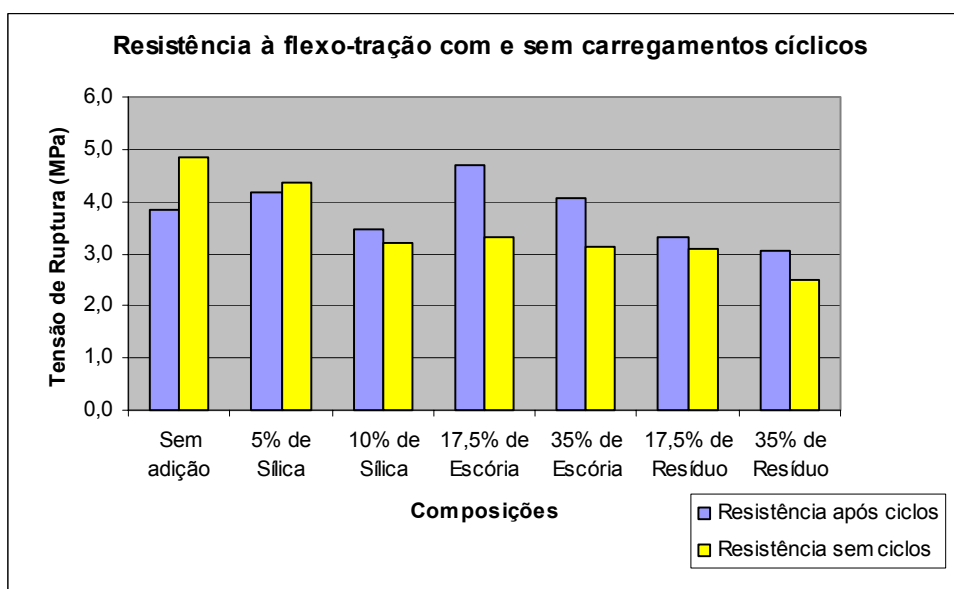


FIGURA 4.24 - Resistência a flexo-tração com e sem 500 ciclos de carregamentos.

Observa-se que houve uma redução de 20% na capacidade de suportar cargas no caso do concreto sem adições, já para os concretos com adição de 10% de sílica ativa gel a redução foi da ordem de 5%. Para os concretos com outras adições, a resistência à flexo-tração após carregamentos cíclicos se tornou maior do que se comparada à sem carregamentos cíclicos. O concreto com a adição de 10% de sílica ativa gel apresentou um aumento de resistência da ordem de 5%, já os concretos com adição de escória de alto forno granulada o aumento foi em média de 20%. Os concretos com adição de resíduos de cerâmica vermelha apresentaram um aumento médio em torno de 5%.

#### 4.5 - Resistência à tenacidade à fratura

A FIG 4.25 apresenta os resultados do ensaio de tenacidade à fratura, na forma de tensão de ruptura dos corpos fendilhados.

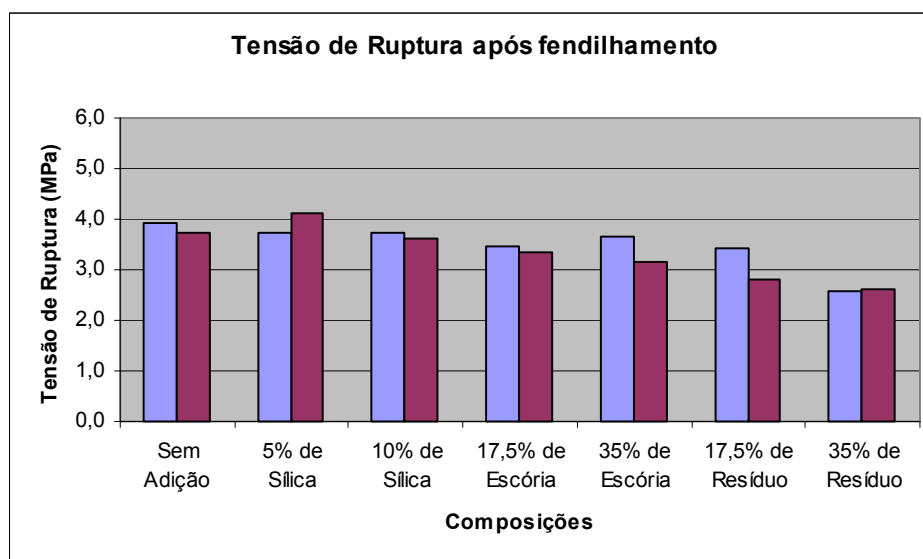


FIGURA 4.25 - Tensão de ruptura dos corpos fendilhados

Com os dados da FIG 4.25, considerando-se a área efetiva do corpo de prova, e com a Eq. 2.3.13 pode-se determinar o fator de intensidade de tensões crítico a condição I ( $K_{IC}$ ), que são apresentados FIG.4.26 para as diferentes composições analisadas.

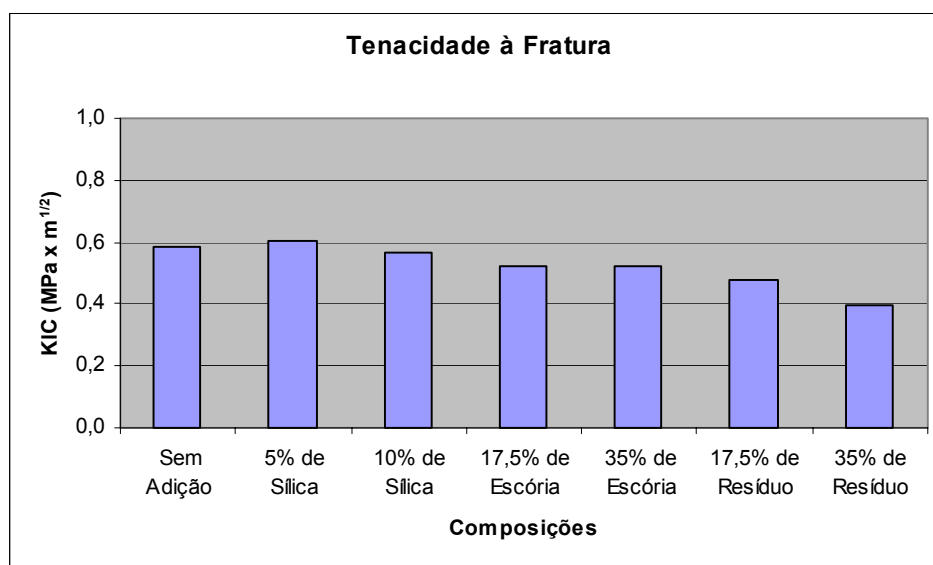


FIGURA 4.26 - Fator de intensidade de tensões para os diferentes concretos.

A tenacidade à fratura a princípio não é afetada pelas adições consideradas neste estudo. As análises do comportamento dos concretos com resíduos poderiam indicar que a tenacidade à fratura é pouco afetada pelo fator água/cimento.

# 5

## CONCLUSÕES

Neste capítulo são enumeradas as conclusões obtidas neste estudo.

1 - A adição de sílica ativa gel conduz a altas resistências iniciais.

2 - A adição de 5% de sílica gel é mais efetiva do que de 10% como agente enrijecedor das primeiras idades.

3 - A adição de 5% de sílica gel produz efeitos mais acentuados na resistência mecânica do que a de 10% desta mesma adição.

4 - A adição de 17,5% de escória de alto forno granulada parece não afetar a resistência do concreto à compressão.

5 - A adição de 35% promove um crescimento mais lento da resistência.

6 - As adições de escória de alto forno granulada e sílica ativa gel nas proporções analisadas não contribuem na prática para o aumento da resistência à compressão aos 28 dias.

7 - Resíduos de cerâmica vermelha sem controle granulométrico quando adicionados ao concreto atuam como inertes químicos.

8 - Adições de 5 ou 10% de sílica ativa gel, de 17,5% de escória de alto forno granulada e de resíduo de cerâmica vermelha a princípio, não afeta o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias.

9 - A adição de 35% de escória de alto forno granulada promove um aumento significativo do módulo de elasticidade dinâmico na idade de 28 dias.

10 - Não foi constatada uma dependência direta entre o módulo de elasticidade dinâmico do concreto e sua resistência à compressão.

11 - Para concretos de resistência à compressão abaixo de 15 MPa o módulo de deformação tangente calculado pela Norma NBR 6118 é um bom indicativo do módulo de elasticidade dinâmico.

12 - Para concretos de resistências em torno de 28 MPa o módulo de deformação tangente calculado pela Norma NBR 6118 difere em 50% do módulo de elasticidade dinâmico.

13 - As adições de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha não contribuem para um aumento significativo da resistência à flexo-tração aos 28 dias.

14 - As adições de 10% de sílica ativa, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha tendem a diminuir sensivelmente a resistência a flexo tração.



15 - O concreto sem adição e o concreto com adição de 5% sílica ativa gel apresentam grande sensibilidade a esforços cíclicos.

16 - A tenacidade à fratura mostrou-se não ser afetada pelas adições de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha, nem pelo fator água/cimento.

## Referências Bibliográficas

AGOPYAN, V; OLIVEIRA, C. Estudo da água do poro de pastas de cimento de escória pelo método de água de equilíbrio. In: **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/259. São Paulo. p.12, 2000.

AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto desempenho**. Ed. Pini, São Paulo 1ªed. 2000.

AMORIM. L.V., PEREIRA. A. L, NEVES. G., FERREIRA.H. Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.222-228, 1999 Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados** - Dissertação de Mestrado. 2000.

ASHBY, M.F., JONES, D. R. H. **Engineering Materials 1: an Introduction to Their Properties & Applications**. Second Edition. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1996. p.306.

ASHBY, M.F., JONES, D. R. H. **Engineering Materials 2: an Introduction to Microstructures, Processing & Design**. Second Edition. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1996. p.367.

ASHBY, M.F. **Materials Selection in Mechanical Design**. United Kindel: Pergamon Press, 1992. p.311.

ASKELAND, D.R.. **The Science and Engineering of Materials**. Third Edition. Boston: PWS Publishing Company, 1994. p.812.

ASSOCIATION FRANÇAÍSE DE NORMALIZATION. **Produits de Carrières: Pierres Calcaires – Mesure di module d’elasticité dynamique**. NF B 10-511. Paris, 1975.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251. MB 1665**. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522. MB 1924**. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 137**. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7220. MB 10**. Rio de Janeiro, ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118. NB 1**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217. MB 7**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776. MB 2643**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219. MB 9**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211. EB 4.** Rio de Janeiro, ABNT, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-C215. ASTM-C848-88.** USA, ASTM.

BOURGUIGNON, K. M.B.G.; SILVA, M. G.; SANTOS, F. L.S.; ZANDONADE, E. A carbonatação de concretos com adição de escória granulada de alto-forno na betoneira. **In: Anais do 43 °Congresso Brasileiro de Concreto IBRACON, 2005.**

BRITO, L. A. Utilização de Entulho de Construção Civil como Agregado Graúdo para a Confecção de novos Concretos. **In: Anais do IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Materiais Reciclados e suas Aplicações, São Paulo, 2001. p.203 - 214.**

BUTTLER, A. M. Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto. **Revista do concreto – IBRACON, 2005.**

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Testing concrete. Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity.** BS 1881 part 209. England, 1990.

CALIXTO, J. M. F., MELO, C., GOMES, L.C., SILVA, H. J. F., LAVALL, A. Efeito da Utilização de Diferentes Tipos de Concreto no Comportamento e na Resistência de Lajes Mistas com Forma de Aço Incorporada; **Anais do 47°Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. 2005, v. 1, p.1-15.**

CAMARINI, G. **Desempenho de misturas de cimento Portland e escória de alto-forno submetidas à cura térmica.** (Tese de doutorado). Escola Politécnica de Universidade de São Paulo – EPUSP. 1995, p. 252.

CANESSO, F. A. C., BELUCO, J. A., GOMES, A. M., AGUILAR, M. T. P., CETLIN, P. R. Influência da Adição de Escoria Granulada de Alto Forno nas Propriedades Mecânicas do Concreto. **Anais do 47º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON**. 2005, v. 5, p. 901-910.

CASCUDO, O. **Contribuição ao Estudo e Emprego de Técnicas Eletroquímicas no Controle da Corrosão em Concreto Armado**. (Dissertação de Mestrado), EPUSP, 1991.

CERULLI T., PISTOLESI C., MALTESE C. Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster. **Cement and Concrete Research**. 2003, p.1375-1383(9).

CHARLES, J.A., CRANE, F.A.A., FURNESS, J.A.G. **Selection and use of Materials**. Great Britain: Butterworth Heinemann. 1997, p.343.

CINCOTTO, M. A. MELO, N., A., A., REPETTE, W. L. Hydration Evolution of Activated Blast Furnace Slag Cement Effect of Different Activators Type and Dosages and Relation with Autogenous Shrinkage. **In: 11th. International Congress on the Chemistry of Cement, 2003, Durban. Cement's Contribution to Development in the 21th. Century**. Johannesburg, G.Grieve/ G. Owens, 2003. v. 4. p. 1878-1888.

CÓDIGO MODELO CEB – FIP, **Comité Euro-Internacional du Beton – FIP**. Fédération Internationale de la Précontrainte, editorado em Viena em Setembro de 1991, correspondente à edição de 1990, p.2-27.

COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A. **Fabrico e Propriedades do Betão**. 2ª edição. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, v. 1, 1988, p.401.

COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A. **Fabrico e Propriedades do Betão**. 2<sup>a</sup> edição. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, v. 3, 1997, p.137.

DAL MOLIN, D.C.C., SILVEIRA, A.A., MOURA, W., MASUERO, A. B. Compressive strength of concretes containing mineral admixtures. **In: Internacional Conference on Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction**, 1999, v. 1. p. 371-380.

DAL MOLIN, D.C.C., MASUERO, A.B., GEYER, R., VILLELA, A. . Escórias Siderúrgicas: Caracterização e Aplicações para a Indústria da Construção Civil. **In: 25 Seminário de Redução de Matérias Primas - Resíduos na Siderurgia**, 1994.

DORSTORST, B. J. H., HENDRIX, C. F. Re-use of construction and demolition waste in the EU, **Construction & Environment - Theory into practice**, November 23rd and 24th, 2000 - São Paulo Brazil.

ESPER, M. W. **Contribuição ao estudo de algumas propriedades do cimento Portland de alto-forno**. (Dissertação de Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993, 140p.

FREIRE, W.J. **Materiais Alternativos de Construção in Tecnologia e Materiais Alternativos de Construção** Ed. UNICAMP. 2003, p.27-54.

GARCIA, J., I., B., GASTALDINI, A., L., G., . Permeabilidade à cloreto de concreto com altos teores de adições minerais. **In: XVI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e 2<sup>a</sup> Feira de Protótipos**, 2001.

GOMES, A. G. **Caracterização de Argamassas Tradicionais Utilizadas nos revestimentos Exteriores de Edifícios** (Tese de Doutorado), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 1995, p.269.

HAN, S., KIM, J. Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34. 2004, p.1219-1227.

HANI H. N.; HUSAN N.; NAKIN S., Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. **Cement and Concrete Composites**, v.27, n 6, 2005. p.661-670.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. (Tese de Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1993, p. 231.

HUDSON, J.A., AT AL.. **SOFT, Stiff and Servo Controlled Testing Machines: A Review with Reference to Rock Failure**. MTS Systems Corporation, Minneapolis, 1976.

IRWIN, G.R., “ **Analisis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate**”, J. App. Mechanics, Março 1957, p. 361.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento** (Tese de Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

KAPLAN, The application of fracture mechanics to concrete , **Proc. Int. Conf. Struct. of Conc.**, Londres, Set. 1965, Ed. Cem. Conc. Assoc., 1968, p.169.

LARANJEIRA, E., B. **Adição de Escória Granulada de Alto-Forno Em Argamassas de Cimento Portland: Influência na resistência mecânica, composição de fases e Microestrutura**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, 1991.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. Tese de Doutorado**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001, p. 266.

LI, B.; LIANG, W.; HE, Z. Study on high-strength composite portland cement with a larger amount of industrial. **Cement and Concrete Research**. 2002, v. 32, p. 1341-1344.

LI, G.; ZHAO X. Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**. 2003, v 25, p. 293-299.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora Pini, 1994, p.573.

MEYER, C. The us Concrete Industry and Sustainable Development Department of Civil Engineering And Engineering Mechanics Columbia University, New York, NY **In: VII Seminário Desenvolvimento Sustentável e a reciclagem na construção civil**, Ct-207, São Paulo, 2006.

MINDESS, S., **The application of fracture mechanics to cement and concrete: a historical review, in fracture mechanics of concrete**, Ed. By Folker H. Wittman, Elsevier Science Publishers, 1983.

NAGATAKI, S. Mineral Admixtures in concrete: state of the art and trends. **In: MEHTA, P. K. V. Mohan Malhotra Symposium – Concrete Technology Past, Present, and Future**. American Concrete Institute, 1994, p. 447-483. (SP-144).

NASSIF, H.H., NAJM, H. SUKSAWANG, N. Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. **Cement and Concrete Composites**, v.27, n6. 2005. p.661-670.



NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1989.

OLIVEIRA C. T. A. **Água do Poro de Pastas de Cimento de Escória**. (Tese de Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998.

OSBORNE, G. J. Durability of portland blast-furnace slag cement concrete. **Cement and Concrete Composites**. 1999, v.21 p. 11-21.

PAL, S. C.; MUKHERJEE A.; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag I concrete. **Cement and Concrete Research**. 2003, v. 33, p. 1481-1486,

PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de resíduos sólidos da Construção Urbana**. (Tese de Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999, p.190.

PISTILLI, M . F., RAU, G. and CECHNER, R. The variability of condensed silica fume from a Canadian source and its influence on the properties of Portland cement concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**. 1984, 6(1), 33-7.

PISTILLI, M . F., WINTERSTEIN, R., and CECHNER, R. (). The uniformity and influence of silica fume from a US source on the properties of Portland cement concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**. 1984, 6(2), 120-24.

PORTO, A.A, TORRES, S.M., BARBOSA. N.P. Considerações sobre o aproveitamento do resíduo de cerâmica vermelha moído como pozolana em concretos. **Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**. 2006.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLÉRE, A.M.; DRON, R. Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires. **In: Congrès International de la Chimie des Ciments**, 1980, p. 30.

RILEM, Essai en traction directe, CPC 7, **Mat. Const. Ess. Rech.**, vol. 6, n° 35, de 1973.

SCANDIUZZI, L., ANDRIOLO, F.R. **Concreto e seus Materiais: Propriedades e Ensaios**. Editora PINI, 1986, p. 553.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate **In: ACI Materials Journal**, September-October, 2003 p. 371-380.

SHI, C., HU S. Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions. **Cement and Concrete Research**. 2003, v. 33, n. 11, p. 1851-1856(6).

SMITH, W.F. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Portugal: McGraw-Hill Ltda. 1998, p.892.

SOMAYAJI, S. **Civil Engineering Materials**. USA: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995.

VAZQUEZ, e. et al. Draft of Spanish regulations for the used of recycled aggregate in the production of structural concrete. **International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures**, 2004, Barcelona, Spain.

VLACK, H.. **Materials for Engineering: Concepts and Applications**. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1982.

YOUNG, J. F., MINDESS, S., BENTUR, A., GRAY, R. J. **The Science and Technology of Civil Engineering Materials**. USA: Prentice Hall, 1997.

WAINWRIGHT, P. J.; REY, N. The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS ) additions and time delay on the bleeding of concrete. **Cement and Concrete Composites**. 2000, v.22, p. 253-257.