



Jaqueline Passamani Zubelli Guimarães

**“ESTUDO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES DO
CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO”**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de concentração: Estruturas.

Orientadora: Marta de Souza Lima Velasco

Rio de Janeiro
Setembro de 2002

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e da orientadora.

Jaqueline Passamani Zubelli Guimarães

Graduou-se na PUC-Rio em Engenharia Civil em 1988. Atuante no ramo da construção civil na área de impermeabilização, isolamentos térmicos e revestimentos especiais. Teve atuação, no período 1996-2000, na diretoria das principais entidades do setor IBI, AEI, realizando neste período palestras no SENAI/RJ.

Ficha Catalográfica

Zubelli Guimarães, Jaqueline Passamani

Estudo Experimental das Propriedades do Concreto de Alto Desempenho/Jaqueline Passamani Zubelli Guimarães; orientadora: Marta de Souza Lima Velasco. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2002.

v., 131 f.:il.;29,7 cm

1.Dissertação (mestrado)- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1.Engenharia Civil – Teses 2.Concreto alto desempenho.3.Propriedades.4.Resistência Compressão.5 . Resistência tração.6.Módulo elasticidade.7.Porosidade.8.Compatibilidade aditivo e material cimentício.I. Velasco,Marta S L(Marta Velasco).II.Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.III.Título



Jaqueline Passamani Zubelli Guimarães

Estudo experimental das propriedades
do concreto de alto desempenho

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Marta de Souza Lima Velasco

Orientadora
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Icléa Reys de Ortiz

UFRJ

Profa. Claudia Maria de Oliveira Campos

IME

Prof. Luiz Eloy Vaz

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de Setembro de 2002

Este trabalho é dedicado

A minha mãe Lucy, por todo o carinho
que recebo;

Ao meu marido Silvio, pelo apoio e
cumplicidade ao longo desta jornada;

Aos meus três filhos Silvio, Juliana e
Luciana, que são as maiores obras que já
fiz!

Agradecimentos

A minha orientadora Professora Marta de Souza Lima Velasco, por toda a amizade e todo o incansável apoio, dado ao longo de todo este trabalho.

À Coordenação Central de Pós Graduação e Pesquisa da PUC-Rio pela concessão da bolsa VRAc, com isenção de taxas escolares para realização deste mestrado.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil, em especial aqueles com quem tive a oportunidade de receber ensinamentos e conviver ao longo deste período: Deane Roehl, Guisepe Guimarães, Khosrow Ghavami, Luiz Eloy Vaz, Luiz Fernando Martha, Ney Dumont, Paulo Batista Gonçalves e Raul Rosas e Silva.

A todos da secretaria do departamento, em especial à grande Ana Roxo, cujo cuidado e atenção com todos os alunos da pós-graduação é muito mais do que eficiência.

A toda a equipe do LEM –DEC: José Nilson, Euclides, Evandro, Haroldo, pela atenção e pela força (no real sentido da palavra) ao longo de toda a fase experimental.

Aos funcionários do ITUC : Jorge, Roberto, Luciano e Ubirajara pela cordialidade e atenção dispensada ao longo dos ensaios mecânicos.

Ao Prof. Paulo Monteiro, da Universidade de Berkeley, Califórnia, por toda a atenção, resposta solícita aos meus e-mails e pelo material enviado.

Ao Prof. Romildo Toledo Filho, COPPE –UFRJ, pela atenção e por diversos esclarecimentos prestados ao longo deste trabalho.

Ao meu irmão Jorge P. Zubelli, o fantástico PhD da família, por todo carinho, incentivo e apoio logístico em diversas situações.

A todos os colegas da pós-graduação, cuja convivência ao longo deste período foi uma fantástica experiência.

À Sika pelo fornecimento do aditivo SIKAMENT 300 utilizado na elaboração dos corpos de prova.

À Camargo Correa, pelo fornecimento da sílica ativa SILMIX, utilizada na elaboração dos corpos de prova.

Aos colegas de trabalho, que de alguma forma, participaram e me ajudaram ao longo de todo esse caminho, com problemas relacionados a obtenção e transporte dos materiais necessários a este trabalho.

À Cida, o meu agradecimento especial por ter cuidado dos meus filhos.

RESUMO

Zubelli Guimarães, Jaqueline Passamani; Velasco, Marta de S L (Orientadora). **Estudo Experimental das Propriedades do Concreto de Alto Desempenho.** Rio de Janeiro, 2002.131p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Projetos estruturais que empregam concretos com resistências mais elevadas, ou seja, maiores que 40 MPa, nomeados *Concretos de Alto Desempenho*, são cada vez mais freqüentemente utilizados. Sabe-se, entretanto, que as propriedades destes concretos são diferenciadas daquelas dos concretos considerados convencionais, necessitando-se estudos que visem, principalmente, mensurar a realidade dentro dos materiais disponíveis em nosso país.

Este trabalho experimental estuda as principais propriedades deste material: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, Módulo de Elasticidade e permeabilidade, através da determinação do índice de vazios.

Após um estudo sobre métodos de dosagem mais utilizados e empregando-se materiais disponíveis no Rio de Janeiro, foram moldados um total de 230 corpos de prova para resistências características à compressão de 40MPa, 60 MPa, 80 MPa e 100 MPa. Foi realizado um estudo sobre compatibilidade entre superplastificante e aglomerante.

Com os dados obtidos experimentalmente, foram relacionados resistências à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e porosidade com resistência à compressão axial. Estes resultados foram comparados com as recomendações das principais normas internacionais e com as propostas de alguns pesquisadores que foram encontradas na literatura.

Palavras-Chave

Concreto de alto desempenho; dosagem; propriedades mecânicas; resistência à compressão; resistência à tração; módulo de elasticidade; permeabilidade; porosidade.

Abstract

Zubelli Guimarães, Jaqueline Passamani; Velasco, Marta de S L (Advisor). **Experimental Study of High Performance Concrete Properties**. Rio de Janeiro, 2002. 131p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

High Performance Concrete, i.e., those whose compressive strength is higher than 40 Mpa, have been used in a wide range of Civil Engineering applications. Notwithstanding that, it is known that their mechanical and physical properties are different from those of their conventional counterparts.

In this dissertation, it is studied mixture proportion methods with good acceptance rate, preparing 230 specimens with materials available in Brazil's state of Rio de Janeiro and that have compressive strength of 40 MPa, 60MPa, 80 MPa and 100 MPa.

For each prepared specimen, it is studied its mechanical properties, compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and porosity for the determination of the emptiness ratio. It is also studied the compatibility between superplasticizer and cement materials.

It is also performed a comparison between the experimental data and the expressions available in the literature, as well as the relation between the compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and the porosity.

Keywords

High Performance Concrete; mix proportions; mechanical properties; compressive strength; splitting tensile strength; modulus of elasticity; porosity

Sumário

| | | |
|------|---|----|
| 1. | Introdução | 17 |
| 1.1 | Objetivo | 18 |
| 1.2 | Organização do trabalho | 19 |
| 2. | Concreto de Alto Desempenho | 20 |
| 1.3 | Histórico | 20 |
| 1.4 | Características do Concreto de Alto Desempenho | 21 |
| 1.5 | Utilização e Funcionamento do Concreto de Alto Desempenho | 24 |
| 1.6 | Materiais Constituintes | 25 |
| 1.7 | Procedimentos de Dosagem aplicada ao CAD | 33 |
| 2 | Propriedades do Concreto de Alto Desempenho | 37 |
| 2.1 | Resistência à compressão | 37 |
| 2.2 | Resistência à tração | 43 |
| 2.3 | Módulo de Elasticidade | 46 |
| 2.4 | Permeabilidade | 51 |
| 4. | Estudo Experimental | 61 |
| 4.1. | Método de Dosagem | 61 |
| 4.2. | Materiais Utilizados | 63 |
| 4.3. | Procedimentos Experimentais | 69 |
| 4.4. | Execução dos Ensaios | 74 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5. | Resultados Experimentais | 89 |
| 5.1. | Resistência à compressão axial | 89 |
| 5.2. | Resistência à tração por compressão diametral | 93 |
| 5.3. | Módulo de Elasticidade ou Módulo de Deformação e Comportamento Tensão x Deformação | 96 |
| 5.4. | Estudo da Porosidade | 106 |
| 5.5. | Estudo da Compatibilidade entre Aglomerante e Material Cimentício | 109 |
| 6. | Conclusões e Sugestões | 112 |
| 6.1. | Conclusões | 112 |
| 6.2. | Sugestões para próximos estudos | 116 |
| 7. | Referências bibliográficas | 117 |
| 8. | Apêndice 1 | 122 |
| 9. | Apêndice 2 | 128 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Complexidades das interações entre cimento portland, sulfato de cálcio e aditivos. | 29 |
| Figura 2.2 – Resistência à compressão x fator água/ aglomerante | 35 |
| Figura 3.1 – Gráfico tensão x deformação para diversas resistências | 42 |
| Figura 3.2 – Gráfico tensão x deformação com módulos de elasticidade tangente inicial, secante e corda. | 49 |
| Figura 3.3 – Fotografia do equipamento do ISAT teste. | 56 |
| Figura 3.4 – Fotografia do equipamento que constitui o In-situ teste. | 56 |
| Figura 3.5 – Fotografia de tipo de permeâmetro com capacidade para testar 3 amostras simultaneamente. | 57 |
| Figura 4.1 – Relações propostas entre fator água/ aglomerante e a resistência à compressão. | 62 |
| Figura 4.2 – Determinação da dosagem mínima de água. | 63 |
| Figura 4.3 – Determinação do teor de agregado graúdo. | 63 |
| Figura 4.4 – Corpos de prova capeados para ensaio. | 75 |
| Figura 4.5 – Foto de corpo de prova ensaiados à compressão diametral. | 76 |
| Figura 4.6 – Corpo de prova posicionado na máquina para ensaio de tração por compressão diametral. | 77 |
| Figura 4.7 – Corpos de prova ensaiados por compressão diametral. | 77 |
| Figura 4.8 – Corpo de prova preparado para ser ensaiado com Medições de deformação. | 78 |
| Figura 4.9 – Corpo de prova posicionado na máquina INSTRON | 80 |
| Figura 4.10 – Corpos de prova rompidos indevidamente. | 80 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.11 – Corpos de prova preparados para ensaio de porosidade. | 82 |
| Figura 4.12 – Corpos de prova colocados na estufa. | 82 |
| Figura 4.13 – Corpos de prova imersos em água. | 83 |
| Figura 4.14 – Balança hidrostática para pesagem dos corpo de prova imersos. | 83 |
| Figura 4.15 – Desenho esquemático do Funil de Marsh. | 85 |
| Figura 4.16 – Material e equipamento utilizados para estudo de compatibilidade | 87 |
| Figura 4.17 – Funil de Marsh | 88 |
| Figura 5.1 – Histogramas com freqüência de ocorrência dos valores de resistência à compressão. | 92 |
| Figura 5.2 – Variação da resistência à compressão axial em função da variação do fator água/ material cimentício | 93 |
| Figura 5.3 – Gráfico comparativo entre relações existentes E resultados experimentais de f_c e f_{sp} . | 96 |
| Figura 5.4 - Gráfico comparativo entre relações existentes e resultados experimentais de f_c e E_o . | 99 |
| Figura 5.5 - Gráfico comparativo entre relações existentes e resultados experimentais de f_c e E_{sec} . | 103 |
| Figura 5.6 – Gráfico tensão x deformação para série 60. | 104 |
| Figura 5.7 – Gráfico tensão x deformação para série 80. | 104 |
| Figura 5.8– Gráfico tensão x deformação para série 100. | 105 |
| Figura 5.9 – Variação da resistência com a porosidade. | 107 |
| Figura 5.10 – Micro estrutura da série 100 ampliada 22 vezes. | 108 |
| Figura 5.11 – Micro estrutura da série 80 ampliada 22 vezes. | 108 |
| Figura 5.12 – Micro estrutura da série 60 ampliada 22 vezes. | 108 |
| Figura 5.13 – Micro estrutura da série 100 ampliada 12,5 vezes. | 108 |
| Figura 5.14 – Gráfico do estudo de compatibilidade para $a/mc=0.35$. | 110 |
| Figura 5.15 – Gráfico do estudo de compatibilidade para $a/mc=0.40$. | 111 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Comparação entre diferentes procedimentos de dosagem. | 34 |
| Tabela 3.1 – Classes diferentes de concreto de alto desempenho. | 35 |
| Tabela 3.2 – Relações entre resistência à compressão e compressão diametral. | 45 |
| Tabela 3.3 – Valores para α_1 e α_2 . | 50 |
| Tabela 3.4 – Relações encontradas na literatura entre f_c e E_c . | 51 |
| Tabela 4.1 – Composição Química do CP V. | 64 |
| Tabela 4.2 – Propriedades físicas e mecânicas do CP V. | 64 |
| Tabela 4.3 – Características do aditivo superplastificante. | 65 |
| Tabela 4.4 – Características físicas da sílica ativa. | 66 |
| Tabela 4.5 – Características químicas da sílica ativa . | 66 |
| Tabela 4.6 – Características do agregado graúdo. | 67 |
| Tabela 4.7 – Características do agregado miúdo. | 68 |
| Tabela 4.8 – Dosagem para 1m ³ de CAD – Ensaio Piloto. | 69 |
| Tabela 4.9 – Resultados com corpos de prova aos 7 dias. | 70 |
| Tabela 4.10 - Resultados com corpos de prova aos 28 dias. | 71 |
| Tabela 4.11 – Proporções de materiais para 1 m ³ de concreto. | 72 |
| Tabela 4.12 – Mistura para 1 m ³ de CAD. | 74 |
| Tabela 4.13 – Proporções das misturas para estudo de compatibilidade. | 86 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 5.1 – Valores de cargas e tensões obtidos nos ensaios de compressão axial. | 90 |
| Tabela 5.2 – Valores de f_c , f_c' , f_{ck} e desvio padrão. | 91 |
| Tabela 5.3 – Valores de cargas e tensões obtidos nos ensaios de compressão diametral. | 94 |
| Tabela 5.4 – Valores médios e variação percentual de f_c e f_{sp} . | 95 |
| Tabela 5.5 – Resultados experimentais comparados a relações da literatura para f_{sp} , | 95 |
| Tabela 5.6 – Valores de módulo de elasticidade tangente inicial | 97 |
| Tabela 5.7 – Valores médios do Módulo de Elasticidade tangente inicial | 98 |
| Tabela 5.8 – Resultados experimentais comparados a relações da literatura para E_0 e f_c , | 98 |
| Tabela 5.9 – Valores do Módulo de Elasticidade Secante Segundo a NBR 8522. | 101 |
| Tabela 5.10 – Valores médios de módulo de elasticidade secante. | 101 |
| Tabela 5.11 - Quadro comparativo entre valores de Módulo de Elasticidade secante da literatura e ensaios. | 102 |
| Tabela 5.12 – Valores das massas das amostras para ensaio de porosidade. | 106 |
| Tabela 5.13 – Valores de porosidade relacionados à f_c . | 107 |

LISTA DE SÍMBOLOS

- f_{ck} – Resistência característica do concreto;
- f_{c28} – Resistência média aos 28 dias;
- CAD - Concreto de Alto Desempenho;
- ν - Coeficiente de Poisson;
- f_c - Valor médio da resistência à compressão;
- f_{cr}' - Valor médio da resistência à compressão;
- f_c' - Valor característico de resistência à compressão, segundo o ACI;
- σ - Desvio Padrão;
- $f_{ctk,min}$ - Valor mínimo de resistência à tração, segundo CEB-FIP/90;
- $f_{ctk,max}$ - Valor máximo de resistência à tração, segundo CEB-FIP/90;
- $f_{ctk,m}$ - Valor médio de resistência à tração, segundo CEB-FIP/90;
- f_{ct0} - Valor referência de resistência à tração, segundo CEB-FIP/90 equivalente a 10 MPa;
- f_{sp} - Resistência à tração por compressão diametral;
- E_{ci} - Módulo de Elasticidade tangente inicial, segundo Paulo Heléne;
- α_1 - Índice relacionado à natureza do agregado;
- α_2 - Índice relacionado à consistência do concreto fresco;
- E_{c0} - Módulo de Elasticidade tangente inicial;
- E_{sec} - Módulo de Elasticidade secante;

“ Das leis que regem o universo de nossa existência, são fundamentais as de sobrevivência e conservação.

Para que haja plena obediência a essas leis, o homem é obrigado a controlar e disciplinar o seu próprio meio ambiente.

Para descanso e proteção, o Ser Humano é levado a procurar um refúgio ou seja um abrigo, que o defenderá, e os de sua prole, de todas as intempéries tais como frio, calor, a chuva, etc...”

Do livro “Aditivos e Impermeabilização em Edifícios” de autoria do Engº Jorge Castilho Zubelli, meu pai.