

JOSÉ CARLOS GASPARIM

**CONCRETO PROJETADO ELABORADO COM CIMENTOS
ESPECIAIS: ANÁLISE SEGUNDO PARÂMETROS DE
DURABILIDADE**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**São Paulo
2007**

JOSÉ CARLOS GASPARIM

**CONCRETO PROJETADO ELABORADO COM CIMENTOS
ESPECIAIS: ANÁLISE SEGUNDO PARÂMETROS DE
DURABILIDADE**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e
Urbana**

**Orientador: Prof. Dr. Antonio
Domingues de Figueiredo**

**São Paulo
2007**

À
minha esposa:
Valquiria,
valente guerreira

AGRADE... CIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo, orientador neste trabalho, amigo sempre e verdadeiro irmão nos momentos difíceis.

À Holcim Brasil, que apostou na evolução dos cimentos brasileiros e viabilizou o presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene, que prontamente me acolheu nesta casa e acreditou no meu potencial.

Ao Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon, que, juntamente com o saudoso Prof. Dr. Eládio Gerardo Requião Petrucci, mesmo sem querer, há três décadas me iniciou na área de materiais de construção.

Ao Prof. Dr. Silvio Burratino Melhado, ao Prof. Dr. Selmo Chapira Kuperman e ao Prof. Dr. Fernando Rebouças Stucchi, pelo constante incentivo.

Aos colegas dos laboratórios da Escola Politécnica, da ABCP e do IPT, que colaboraram na elaboração dos ensaios.

Ao engenheiro Wesley Guimarães Rosa, incansável participante dos trabalhos.

“É muito difícil você conseguir vencer numa boa. Pra vencer você tem que lutar, e essa luta muitas vezes significa se indispor de certa forma com algumas pessoas, pra prevalecer aquilo que você acredita. Seu ponto de vista, sua cabeça, a sua personalidade acima de tudo. E se você não lutar pra valer, você acaba perdendo seu próprio rumo. E se você perde o seu próprio caminho, você não é ninguém. Então, pra conseguir manter essa linha de conduta, você tem que lutar muito. E, muitas vezes, tem que brigar mesmo.”

(Ayrton Senna da Silva)

RESUMO

O presente trabalho contempla um estudo experimental de análise do comportamento de concretos projetados por via seca, através de ensaios indicadores dos principais parâmetros de durabilidade, constantes de especificações nacionais e internacionais. A pesquisa envolve a avaliação comparativa entre quatro tipos de cimento especialmente formulados para uso em concreto projetado, em relação a outros dois tipos de cimento tradicionalmente empregados na composição de misturas projetáveis, no que se refere ao atendimento aos requisitos relativos à durabilidade, normalmente especificados para o material.

Os concretos projetados, elaborados com consumos de cimento de 300 kg/m³, 350 kg/m³, 400 kg/m³ e 450kg/m³ foram inicialmente caracterizados, no estado fresco, com base em ensaios de consistência e depois produzidas amostras, em condições similares às de obra e estas submetidas aos ensaios balizadores de parâmetros de durabilidade adotados neste estudo, a saber: Absorção por Imersão e Fervura, Índice de Vazios, Massa Específica Real; Absorção de Água por Capilaridade; Migração de Íons Cloreto; Resistividade Elétrica; Penetração de Água sob Pressão e Carbonatação Acelerada.

Como alguns dos ensaios supracitados não são destrutivos, foi possível aproveitar corpos-de-prova, que foram depois submetidos a ensaios de resistência à compressão axial e à tração através da compressão diametral, que também contribuíram para caracterização do material.

De um modo geral, os resultados foram satisfatórios e atenderam às especificações vigentes. Contudo, os concretos elaborados com cimentos especiais, formulados com granulometria mais fina e adição de metacaulim, apresentaram indicadores de durabilidade consideravelmente superiores aos dos concretos elaborados com cimentos convencionais ou mesmo cimentos especiais formulados com aditivos, inclusive para consumos relativamente baixos.

Apesar de não ter sido o foco principal deste trabalho, vale ressaltar os surpreendentes resultados dos ensaios de resistência mecânica, obtidos para os concretos elaborados com cimentos especiais formulados com granulometria mais fina e adição de metacaulim, que atingiram valores de resistência à compressão nunca antes observados, fato que pode tornar o material bastante promissor.

ABSTRACT

The present work involves an experimental study with dry-mix shotcrete aiming at the behavior analysis, through indicative testing of the main durability parameters of national and international specifications.

The research involves the use of four cement types especially formulated for use in shotcrete use in comparison with two other cements that are traditionally used in mix production for shotcrete spraying.

The shotcrete mixtures were elaborated with cement consumptions of 300 kg/m³, 350 kg/m³, 400 kg/m³ and 450kg/m³. They were characterized initially, in the fresh state, in terms of stiffness tests, and later, cores were extracted to produce samples, in similar conditions and submitted to ordinary durability tests: Water Absorption, Volume of Voids, Specific Weight; Water Absorption by Capillarity; Chloride Migration; Electric Resistivity; Water Penetration under Pressure and Accelerated Carbonatation.

As some of the tests are not destructive, some of the samples was used for compressive and tensile (Brazilian Test) strength determination, what also contributed to additional characterization of the material.

In general, the results were very satisfactory and they fit to the specifications requirements. However, the shotcretes elaborated with special cements, formulated with finer gradation and metakaolin addition, presented a much better behavior in terms of durability indicators comparing to the shotcretes produced with conventional cements and cements formulated with accelerators, even when, relatively low consumption of cement was used.

Despite not being the main focus of this work, it is worth mentioning the surprising results of the testing of mechanical resistance, obtained for the shotcretes elaborated with special cements formulated with finer gradation and metakaolin addition, which

reached resistance values to the compression never observed, making it a promising material.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVO	3
1.4 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	4
CAPÍTULO 2 – CONCRETO PROJETADO	5
2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS	5
2.2 APLICAÇÕES DO CONCRETO PROJETADO	6
2.3 ASPECTOS TÉCNICOS BÁSICOS	7
2.3.1 Projeção do Concreto	9
2.3.2 Processos de Projeção	10
2.3.2.1 Processo por via seca	10
2.3.2.2 Processo por via úmida	11
2.3.3 Fatores Intervenientes no Processo	11
2.3.4 Especificações	13
2.3.4.1 Especificações para aplicação em túneis	15
2.3.4.2 Normatização	17
2.4 ADITIVOS	19
2.4.1 Ação dos Aditivos	19
2.4.1.1 Aditivos dispersantes	21
2.4.1.2 Aditivos consolidantes	23
2.5 ADIÇÕES	25
2.6 CIMENTOS ESPECIAIS	27
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA	30
3.1 MATERIAIS	30
3.1.1 Cimentos	30
3.1.1.1 Caracterização química dos cimentos especiais	30
3.1.1.2 Caracterização física dos cimentos especiais	31

3.1.1.3 Caracterização química dos cimentos de referência	32
3.1.1.4 Caracterização física dos cimentos de referência	32
3.1.2 Agregados	33
3.2 PROPORÇÕES (TRAÇOS)	33
3.3 INSTALAÇÕES DE LABORATÓRIO DE CAMPO, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS DE MISTURA	34
3.4 MOLDAGEM DE PLACAS	36
3.5 PROCESSO E EQUIPAMENTOS DE PROJEÇÃO	37
3.5.1 Reflexão	38
3.6 CURA DAS PLACAS	38
3.7 AMOSTRAGEM	39
3.8 EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS	39
3.9 ENSAIOS	39
3.9.1 Ensaio de Caracterização	39
3.9.2 Ensaio de Durabilidade	41
3.9.2.1 Absorção após imersão e fervura, índice de vazios e massa específica real	43
3.9.2.2 Absorção de água por capilaridade	43
3.9.2.3 Migração de íons cloreto	45
3.9.2.4 Resistividade elétrica	46
3.9.2.5 Penetração de água sob pressão	47
3.9.2.6 Carbonatação acelerada	49
3.9.3 Ensaio de Resistência Mecânica	51
3.9.3.1 Resistência à compressão axial	52
3.9.3.2 Resistência à tração através da compressão diametral	52
3.10 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS	54
4.1 RESULTADOS DE ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA	54
4.2 ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	55
4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	56
4.4 MIGRAÇÃO DE IONS CLORETO	60
4.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA	67
4.6 PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO	68

4.7 CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	69
4.8 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	70
4.9 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	72
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
5.1 ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS	74
5.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	78
5.3 MIGRAÇÃO DE IONS CLORETO	82
5.4 RESISTIVIDADE ELÉTRICA	84
5.5 PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO	87
5.6 CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	89
5.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	92
5.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	97
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	102
REFERÊNCIAS	105
ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	112
ANEXO B – CARACTERIZAÇÃO DA AREIA NATURAL.....	114
ANEXO C – CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ARTIFICIAL.....	116

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – A “ <i>plastergun</i> ” utilizada por Akeley em 1907.	5
Figura 2 – Laboratório de campo.	35
Figura 3 – Produção da mistura para a projeção.	35
Figura 4 – Fôrma metálica posicionada para a moldagem.	36
Figura 5 – Placa sendo moldada durante o estudo.	37
Figura 6 – Conjunto de placas produzidas numa seqüência de moldagem com proteção de capa plástica para melhorar as condições de cura após a projeção.	38
Figura 7 – Realização do ensaio de determinação de consistência do concreto recém projetado através da agulha de Proctor.	40
Figura 8 – Corpo-de-prova após ruptura diametral: a demarcação mostra a altura atingida pela água.	44
Figura 9 – Ensaio de migração de íons cloreto, realizado em baterias de 12 células.	46
Figura 10 - Verificação da resistividade elétrica linear, através do aparelho “Resi”.	47
Figura 11 – Ensaio de penetração de água sob pressão.	48
Figura 12 – Câmara de carbonatação.	50

Figura 13 – Corpos-de-prova submetidos à carbonatação acelerada.....	51
Figura 14 – Ensaio de resistência à compressão axial, conforme norma NBR-5739 da ABNT (1994).....	52
Figura 15 – Ensaio de resistência à tração do concreto, através da compressão diametral.....	53
Figura 16 – Correlações entre absorção de água após imersão e fervura e consumo, para cada tipo de cimento.....	75
Figura 17 – Correlações entre índice de vazios após saturação e fervura e consumo, para cada tipo de cimento.....	76
Figura 18 – Curvas de tendência da evolução de absorção após imersão e fervura com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.....	77
Figura 19 – Curvas de tendência da variação de índices de vazios com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.....	77
Figura 20 – Correlações entre absorção de água por capilaridade (expressa em massa por área de contato) e consumo, para cada tipo de cimento.....	79
Figura 21 – Correlações entre absorção de água por capilaridade (expressa em milímetros de altura atingida) e consumo, para cada tipo de cimento.....	80

- Figura 22 – Curvas de tendência da evolução de absorção (expressa em massa por área de contato) com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.81
- Figura 23 – Curvas de tendência da evolução de absorção (expressa em milímetros de altura atingida) com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.81
- Figura 24 – Correlações entre carga elétrica passante (proporcional à penetração de cloretos) e consumo, para cada tipo de cimento.82
- Figura 25 – Curvas de tendência da evolução de carga elétrica (proporcional à migração de íons cloreto) com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.83
- Figura 26 – Correlações entre resistividade elétrica superficial e consumo, para cada tipo de cimento.84
- Figura 27 – Curvas de tendência da evolução de resistividade elétrica superficial com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.85
- Figura 28 – Correlações entre volume de penetração de água e consumo, para cada tipo de cimento.87
- Figura 29 – Curvas de tendência dos volumes de penetração de água sob pressão com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.88

Figura 30 – Perspectiva de avanço de frentes de carbonatação para cada tipo de cimento, para teor de saturação de 5% de CO ₂ .	90
Figura 31 – Correlações entre resistência à compressão axial após 91 dias de idade e consumo, para cada tipo de cimento.	93
Figura 32 – Correlações entre resistência à compressão axial após 180 dias de idade e consumo, para cada tipo de cimento.	94
Figura 33 – Curvas de tendência da evolução de resistência à compressão, após 91 dias de idade, com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.	95
Figura 34 – Curvas de tendência da evolução de resistência à compressão, após 180 dias de idade, com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.	95
Figura 35 – Curvas médias de tendência da evolução de resistência à compressão com relação à idade, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.	96
Figura 36 – Correlações entre resistência à tração após 28 dias de idade e consumo, para cada tipo de cimento.	98
Figura 37 – Correlações entre resistência à tração após 180 dias de idade e consumo, para cada tipo de cimento.	99
Figura 38 – Curvas de tendência da evolução de resistência à tração, após 28 dias de idade, com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.	100

Figura 39 – Curvas de tendência da evolução de resistência à tração, após 180 dias de idade, com relação ao consumo de cimento, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados ...100

Figura 40 – Curvas médias de tendência da evolução de resistência à tração com relação à idade, para concretos elaborados com os diversos tipos de cimento utilizados.....101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Característica, composição e denominação comercial dos cimentos especiais	29
Tabela 2 – Composição química e perda ao fogo dos cimentos especiais	31
Tabela 3 – Índices físicos dos cimentos especiais	31
Tabela 4 – Composição química e perda ao fogo dos cimentos de referência	32
Tabela 5 – Índices físicos dos cimentos de referência	33
Tabela 6 – Consumos típicos e respectivos traços utilizadas na projeção	34
Tabela 7 – Datas das moldagens das placas	36
Tabela 8 – Correlação do risco de penetrabilidade de íons cloreto no concreto com a carga elétrica passante	45
Tabela 9 – Resultados de consistência determinada com o auxílio da agulha de Proctor imediatamente após a projeção	54
Tabela 10 – Resultados de ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica, elaborados no período de 15 a 25 de junho de 2004	56
Tabela 11 – Resultados de ensaios de absorção de água por capilaridade, realizados entre 15 e 25 de junho de 2004, expressos em altura de penetração de água absorvida	57
Tabela 12 – Resultados de ensaios de absorção de água por capilaridade conforme NBR-9779/95, elaborados no período de 15 a 25 de junho	

de 2004, expressos na relação de massa de água absorvida por área de contato	59
Tabela 13A – Resultados de ensaios de migração de íons cloreto em amostras de concreto moldado com cimento “E1”	61
Tabela 13B – Resultados de ensaios de migração de íons cloreto em amostras de concreto moldado com cimento “E2”	62
Tabela 13C – Resultados de ensaios de migração de íons cloreto em amostras de concreto moldado com cimento “C1” (CPIII-40 RS)	63
Tabela 13D – Resultados de ensaios de migração de íons cloreto em amostras de concreto moldado com cimento “E3”	64
Tabela 13E – Resultados de ensaios de migração de íons cloreto em amostras de concreto moldado com cimento “C2” (ARI – RS)	65
Tabela 13F – Resultados de ensaios de migração de íons cloreto em amostras de concreto moldado com cimento “E4”	66
Tabela 14 – Resultados de ensaios de resistividade elétrica superficial	67
Tabela 15 – Resultados de ensaios de penetração de água sob pressão	68
Tabela 16 – Resultados de ensaios de carbonatação acelerada	69
Tabela 17 – Resultados de ensaios de compressão axial, após 91 dias de idade	70
Tabela 18 – Resultados de ensaios de compressão axial, após 180 dias de idade	71
Tabela 19 – Resultados de ensaios de tração, após 28 dias de idade	72

Tabela 20 – Resultados de ensaios de tração, após 180 dias de idade	73
Tabela 21 – Relação dos valores da constante de proporcionalidade de avanço da frente de carbonatação “k”, calculados para cada tipo de cimento e traço	89
Tabela 22 – Exemplo de vida útil de estruturas submetidas à carbonatação acelerada	91