UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INTERUNIDADES EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**CONCRETOS E PASTAS DE ELEVADO DESEMPENHO:
CONTRIBUIÇÃO AOS ESTUDOS DE REPAROS
ESTRUTURAIS E LIGAÇÕES ENTRE CONCRETOS NOVO E
VELHO, COM TRATAMENTO DA ZONA DE INTERFACE**

Samir Costa Fagury

Dissertação apresentada à Área de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036923

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi Liborio

**São Carlos
2002**

Class.	C CC35
Call.	1012,
Tomo	101/02

Ficha catalográfica preparada pela Seção de
Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca -

F156c Fagury, Samir Costa
Concretos e pastas de elevado desempenho :
contribuição aos estudos de reparos estruturais e
ligações entre concretos novo e velho, com tratamento
da zona de interface / Samir Costa Fagury.
-- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área : Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi
Liborio.

1. Ligação 2. Aderência. 3. Silica ativa. 4.
Material de reparo. 5. Concreto. 6. CED. I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 - São Carlos-SP – Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

e-mail: wladerez@if.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SAMIR COSTA FAGURY, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 28-03-2002.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. JEEFFERSON BENEDICTO LIBARDI LIBORIO (Orientador e Presidente)

Prof. Dr. JASSON RODRIGUES DE FIGUEIREDO FILHO – UFSCar

Prof. Dr. ALUÍSIO BRÁZ DE MÉLO – UFPb

**Dedico este trabalho aos meus pais,
Guilherme e Tereza,
mesmo distantes, sempre próximos a mim.**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo. “O Senhor é minha luz, proteção da minha vida. Porque ter medo de caminhar?”

Ao professor Doutor Jefferson Benedicto Libardi Liborio, por aceitar o desafio desta orientação, pela confiança depositada em mim desde o início deste trabalho, sempre demonstrando disposição, empenho e competência. Pelo incentivo no dia-a-dia, pelas horas de discussões e valiosas correções, motivo maior de meu amadurecimento científico.

À Daniela Grando, pelo amor e companheirismo que nos une e fortacele, minha fonte de força e esperança. À sua família, sempre acolhedora e gentil, me proporcionado momentos felizes.

Ao meu irmão Elias e minha cunhada Renata, pelo apoio nos primeiros meses em São Carlos.

Aos amigos pós-graduandos, companheiros no cotidiano: Érica, Joaquim, Joel, Valdirene, Oda, Fernando, Isac, Alessandra (Chan), Vanessa, Luana, Ricardo, Carlos, Márcia, Marcão, “Fernandas”, Alessandra, Roberto, e muitos outros amigos que de alguma forma contribuíram para que estes anos de mestrado fossem agradáveis e proveitosos.

Aos Departamentos de Arquitetura e Urbanismo e Engenharia de Estruturas da ESSC-USP pelo apoio na etapa experimental desta pesquisa, enfatizando o agradecimento ao técnico do Laboratório de Construção Civil-SAP, Paulo Wanderley Pratavieira, pela colaboração e disposição durante os ensaios laboratoriais.

Aos professores e funcionários da Área de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais-EESC-USP, em especial à Prof^o Dra. Regina Helena Porto

Francisco e à Érica Regina De Favari Signini, pelo incentivo e apoio desde o início deste mestrado.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de bolsa de estudo.

Às seguintes empresas, pela doação de alguns materiais utilizados nesta pesquisa:

- Elken-Microsílica Tecnologia Ind. e Com. Ltda
- Grupo Holdercim Brasil S/A
- Vibrato Serviços de Concretagem Ltda
- SIKA S/A.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE DOCUMENTOS FOTOGRÁFICOS	v
LISTA DE ABREVIACÕES	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivos.....	7
1.3. Apresentação do trabalho.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Manifestações patológicas em estruturas de concreto.....	11
2.1.1. Considerações sobre o estudo de manifestações patológicas em edificações.....	12
2.2. Considerações sobre a deterioração de estruturas de concreto armado.....	16
2.2.1. Principais causas de deterioração de estruturas de concreto.....	25
2.2.1.1. Deterioração do concreto por ações físicas.....	25
2.2.1.2. Deterioração do concreto por ações químicas.....	27
2.3. Estrutura da superfície do concreto.....	37
2.4. Considerações sobre a reabilitação de estruturas de concreto deterioradas.....	40
2.5. A utilização do concreto de elevado desempenho como material de reparo.....	50
2.6. Considerações a respeito da zona de interface em concretos.....	54
2.7. Considerações a respeito do estudo de dosagem e dos materiais utilizados.....	59
2.7.1. Cimento Portland.....	61
2.7.1.1. Hidratação do cimento Portland.....	64
2.7.1.2. Adições presentes em cimentos Portland.....	67
2.7.2. Aditivos.....	77
2.7.3. Agregados.....	80
2.7.4. Água.....	83

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	84
3.1. Cimentos.....	84
3.2. Agregados.....	88
3.2.1. Agregado miúdo.....	88
3.2.2. Agregado Graúdo.....	89
3.3. Aditivos.....	91
3.4. Sílica ativa.....	94
3.5. Água de amassamento.....	95
4. ENSAIOS 01 – Estudo de dosagem de concretos	96
4.1. Determinação adequada da mistura entre duas faixas granulométricas de agregados graúdos.....	97
4.2. Determinação do teor Ideal de Argamassa (α) para o traço 1:5,0.....	98
4.3. Moldagens.....	101
4.4. Ensaio mecânicos.....	102
4.5. Resultados obtidos e curvas de dosagem.....	102
5. ENSAIOS 02 – Execução de substratos de concreto	106
5.1. Dosagens.....	107
5.2. Moldagens.....	108
5.3. Ensaio mecânicos.....	109
5.4. Resultados obtidos e curvas de dosagem.....	112
6. ENSAIOS 03 – Ligação concreto novo x concreto velho	114
6.1. Preparo do substrato.....	115
6.2. Aplicação de pasta de cimento.....	117
6.3. Concretagens de ligação.....	118
6.4. Ensaio mecânicos.....	120
6.5. Resultados obtidos e discussões.....	121
6.6. Conclusões parciais.....	125
7. ENSAIOS 04 – Recuperação de ninhos de concretagens	129
7.1. Procedimento executivo.....	129
7.1.1. Moldagens.....	130
7.1.2. Moldagens de recuperação.....	132
7.1.3. Ensaio mecânicos e resultados obtidos.....	132

7.1.4. Conclusões parciais.....	134
8. CONCLUSÕES FINAIS	136
9. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	142
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
ANEXO A – Resultados referentes aos Ensaios 01	151
ANEXO B – Resultados referentes aos Ensaios 02	153
ANEXO C – Resultados referentes aos Ensaios 03	161
ANEXO D – Resultados referentes aos Ensaios 04	168

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-	Origem dos problemas patológicos com relação às etapas de produção e obras civis.....	2
Figura 2.1 -	Rotina metodológica para tratamento de manifestações patológicas e terapias em obras.....	15
Figura 2.2 -	Variação da propriedade de materiais ou componentes em função do tempo ou quando submetido à ação de agentes agressivos.....	18
Figura 2.3 -	Vida útil em função da distribuição estatística de componentes.....	19
Figura 2.4 -	Relação entre desempenho, manutenção e vida útil.....	22
Figura 2.5 -	Esquema ilustrativo sobre porosidade e permeabilidade.....	23
Figura 2.6 -	Classificação das causas de deterioração do concreto.....	25
Figura 2.7 -	Reação eletroquímica de oxi-redução em um condutor metálico.....	28
Figura 2.8 -	Fatores que afetam a durabilidade dos concretos para reparos.....	44
Figura 2.9 -	Desvio de tensões em uma peça reforçada.....	48
Figura 2.10 -	PIM - pastas de cimento Portland, com relação a/c = 0,45, sob regime de cura normal.....	51
Figura 2.11 -	PIM - pastas de cimento Portland, com relação a/agl = 0,45, com adição de 10% de sílica ativa e 1% de superplastificante, sob regime de cura normal.....	52
Figura 2.12 -	Porosidade capilar em concreto.....	53
Figura 2.13 -	MEV - zona de transição em concreto de baixa resistência.	56
Figura 2.14 -	MEV - interface pasta de cimento/agregado em um concreto de elevado desempenho.....	57
Figura 2.15 -	Atuação da sílica ativa na interface agregado-pasta dos concretos.....	58
Figura 2.16 -	Mecanismo de hidratação do cimento Portland.....	65
Figura 2.17 -	MEV - distribuição das partículas de sílica ativa de Fe-Si.....	74
Figura 3.1 -	Limites granulométricos para areia fina.....	89
Figura 4.1 -	Curvas de dosagem.....	103
Figura 5.1 -	Diagrama de esforços solicitantes do corpo-de-prova prismático de concreto.....	110
Figura 5.2 -	Curvas de dosagem... ..	113
Figura 6.1 -	Resistência à tração na flexão x traços (1:m).....	121
Figura 6.2 -	Avaliação da intensidade de reação do CH e sílica de Fe-Si, para diferentes idades.....	123
Figura 6.3 -	Avaliação da intensidade de reação do CH e sílica de Fe-Si – amostras anidra e curadas por 28dias.....	124

Figura 6.4 -	Avaliação da intensidade de reação do CH e sílica de Fe-Si – amostras anidra e curadas por 06 dias.....	124
Figura 7.1 -	Distribuição de tensões no corpo-de-prova cilíndrico recuperado.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Principais mecanismos de degradação das superfícies de concreto.....	39
Tabela 2.2 -	Alguns procedimentos de limpeza e preparo de substratos.....	43
Tabela 2.3 -	Sentido da evolução de diversos parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e do custo.....	60
Tabela 2.4 -	Propriedades dos quatro principais componentes do cimento.....	62
Tabela 2.5 -	Transformações de fases que ocorrem em um forno de produção de cimento....	63
Tabela 2.6 -	Relação entre a dimensão das partículas de cimento Portland e o tempo de hidratação.....	66
Tabela 2.7 -	Correspondência entre cimentos (ABNT x ASTM).....	68
Tabela 3.1 -	Análises Químicas - CP II F 32.....	85
Tabela 3.2 -	Ensaio Físicos - CP II F 32.....	85
Tabela 3.3 -	Teores dos componentes - CP II F 32 (EB 2138).....	85
Tabela 3.4 -	Ensaio físicos - CP V ARI RS.....	87
Tabela 3.5 -	Análises químicas - CP V ARI RS.....	87
Tabela 3.6 -	Teores dos componentes - CP V ARI RS.....	87
Tabela 3.7 -	Determinação da composição granulométrica de agregados miúdos.....	88
Tabela 3.8 -	Valores de norma (NBR – 7217/ABNT).....	89
Tabela 3.9 -	Algumas características de rochas basálticas.....	90
Tabela 3.10 -	Características físicas dos agregados graúdos.....	91
Tabela 3.11 -	Resultado qualitativo e semi-quantitativo por MEV com microanálise na amostra de SP.....	93
Tabela 3.12 -	Composição química – sílica ativa de ferro-silício.....	95
Tabela 3.13 -	Outras características importantes deste material.....	95
Tabela 4.1 -	Determinação da composição “ideal” entre pedra britada nº1 e nº2.....	97
Tabela 4.2 -	Traços auxiliares.....	99
Tabela 4.3 -	Tolerâncias admitidas para consistências do concreto através do abatimento do tronco de cone.....	99
Tabela 4.4 -	Características dos traços em massa executados.....	102
Tabela 5.1 -	Traços unitários em massa e f_{cdj}.....	108
Tabela 5.2 -	Determinações para ensaios 02.....	112
Tabela 6.1 -	Materiais componentes da pasta de cimento.....	117

Tabela 6.2 -	Traços em massa - material de reparo (1:areia:pedrisco).....	119
Tabela 6.3 -	Resultados mecânicos (material de reparo).....	121
Tabela 7.1 -	Resultados mecânicos - resistência à compressão axial simples (traço1:7,5).....	133
Tabela 7.2 -	Resultados mecânicos - resistência à compressão axial simples (traço 1:2,9).....	133

LISTA DE DOCUMENTOS FOTOGRÁFICOS

DF 2.1 -	Ninho de concretagem em pé de pilar.....	36
DF 5.1 -	A- Início de carregamento, B- Momento da ruptura do corpo-de-prova.....	112
DF 6.1 -	Escarificação manual.....	115
DF 6.2 -	Aplicação de pasta.....	118
DF 6.3 -	A - Concretagem de ligação, B - Corpo-de-prova recuperado (1dia).....	120
DF 6.4 -	Corpo-de-prova após ruptura (28dias)	126
DF 6.5 -	Detalhe da área de ruptura (28dias)	126
DF 6.6 -	Corpo-de-prova apresentando ruptura pasta de cimento x concreto novo.....	127
DF 7.1 -	A e B - Detalhes de ninho de concretagem, C - Corpo-de-prova em meia seção.....	131
DF 7.2 -	A, B e C - Detalhes dos corpos-de-prova reconstituídos.....	132

LISTA DE ABREVIações

- a/c - Relação água/cimento
- a/agl - Relação água/aglomerante
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI - American Concrete Institute
- AFNOR - Association Française de Normalization
- AFm - Monosulfoaluminato de cálcio
- AFt - Trissulfoaluminato de cálcio
- ASTM - American Society Test Materials
- CaCO₃ - Carbonato de cálcio
- Ca(OH)₂, CH - Hidróxido de cálcio
- CAD - Concreto de alto desempenho
- CED - Concreto de elevado desempenho
- C₂S, β'-C₂S - Silicato Dicálcico (Belita)
- C₃A - Aluminato Tricálcico (Alita)
- C₃S - Silicato Tricálcico
- C₄AF - Ferroaluminato Tetracálcico
- CH, Ca (OH)₂ - Hidróxido de cálcio ou portlandita
- CO₂ - Dióxido de carbono
- CP II F 32 - Cimento Portland composto (filler calcário)
- CP V ARI Plus - Cimento Portland de alta resistência inicial
- CP V ARI RS - Cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos
- C-S-H - Silicato de cálcio hidratado
- D_{máx} - Diâmetro máximo de agregado
- f_{cdj} - Resistência característica do concreto à compressão de dosagem, a "j" dias de idade.
- f_{ck} - Resistência característica do concreto à compressão axial simples
- f_{t,d} - Resistência característica do concreto à tração por compressão diametral
- f_{ctm} - Resistência característica do concreto à tração na flexão
- f_{c28} - Resistência característica do concreto à compressão axial simples aos 28 dias de idade

FT-IR - Espectroscopia no infravermelho

k - Índice de consistência

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

Mg-S-H - silicato de magnésio hidratado

NBR - Norma Brasileira Registrada

PCA - Portland Cement Association

PED - Pasta de cimento Portland de elevado desempenho

PIM - Estudos de porosimetria por intrusão de mercúrio

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les
Materiaux et les Constructions

S - SiO₂

SA - Sílica ativa

SP - superplastificante

UR - Umidade relativa

α - Teor ideal de argamassa

RESUMO

Concretos e pastas, de elevado desempenho: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concretos novo e velho, com tratamento da zona de interface

A ligação entre concretos com cimento Portland de diferentes idades, composições e resistências é um dos problemas da tecnologia dos concretos estruturais. A continuidade desta ligação é prejudicada por uma diversidade de fatores que implicam desde a retomada de uma concretagem (junta fria) até a recuperação de estruturas de concreto deterioradas. Sob esse ponto de vista apresenta-se neste trabalho uma análise do comportamento de um sistema de reparos aplicados à recuperação de estruturas, ligações concretos velhos x concretos novos (caso das ampliações) e continuidades de concretagens. Um dos pontos mais frágeis de uma estrutura é a zona de interface, tanto dos materiais que a compõe quanto da transição entre os diferentes concretos. Utilizou-se como substrato corpos-de-prova prismáticos executados com concretos (f_{ck} =15MPa, 18MPa, 21MPa, 25MPa, 30MPa, 40MPa e 50MPa), que após ruptura completa através de ensaios de tração na flexão foi posteriormente executada ligação com concretos de reparo, e corpos-de-prova cilíndricos de concretos convencionais apresentando ninhos de concretagem. Com a finalidade de melhorar a zona de transição citada, utilizou-se como sistema de reparo, concretos de elevado desempenho executados com cimento Portland CP V ARI RS - NBR 5733/NBR 5737 - ABNT, agregados: miúdo de origem quartzosa, e gráudo de $D_{max} \leq 6,3\text{mm}$ de origem basáltica, adições de sílica ativa (Fe-Si) de 5%, 10% e 15% e aditivo superplastificante de pega normal em teores de 1,5%, 1,8% e 2,0%, após prévio tratamento, através de desbaste superficial e imprimação com pastas de cimento de elevado desempenho. A eficácia da ligação é percebida principalmente pelo fato de que em resultados de ensaios de tração na flexão do corpo-de-prova prismático recuperado a ruptura ocorreu, em quase 100% dos casos na região do concreto velho. Em ensaios de compressão axial com corpos-de-prova cilíndricos com ninhos de concretagem recuperados, percebeu-se através do modo de ruptura, que as transferências de tensões ocorreram normalmente através do sistema de reparo, sem que houvesse desvio de tensões, além de um acréscimo de resistência em alguns casos.

Palavras-chave: Ligação, aderência, sílica ativa, material de reparo, concreto, CED.

ABSTRACT

High-performance Concrete and pastes: contribution to the studies of structural repairs and new-to-old concretes bonding, with interfacial zone treatment

The bonding among Portland cement concrete of different ages, compositions and resistances is one of the technological problems of structural concretes. The continuity of this connection is harmed by a several factors from the re-starting of a casting (cold joint) to the recovery of deteriorated concrete structures. From this point of view this paper presents an analysis of the behavior of a repair system applied to the recovery of structures, new-to-old concrete bonding (amplification cases) and casting continuities. One of the most fragile points of a concrete structure is the interface zone, of both materials that compose it and the transition among the different concretes. Prismatic specimens executed with concretes (f_{ck} =15MPa, 18MPa, 21MPa, 25 MPa, 30 MPa, 40 MPa and 50 MPa), were used as substratum after a previous complete rupture through a flexural strenght test for a further connection, with repair concrete as a bond link, and cylindrical specimens of conventional concretes presenting intentionally "holes". High-performance concretes with Portland cement CP V ARI RS (NBR 5733/NBR 5737-ABNT), small quartz aggregates, basaltic coarse aggregates with $D_{max} \leq 6,3\text{mm}$, silica fume (Fe-Si) additions of 5%, 10% and 15%, and normal setting superplasticizer with contents of 1,5%, 1,8% and 2,0% were used as repair system to improve the transition zone mentioned. Such materials were used after the specimens had been treated superficially and primed with High-performance Portland cement paste. the effectiveness of the connection is noticed mainly by the fact that in results of the flexural strenght test of recovered prismatic specimens, the rupture occurred in almost 100% of the cases in the area of the old concrete. In axial compression tests with cylindrical specimens presenting recovered "holes", the rupture way demonstrated that the transfers of tensions usually occurred through the repair system, with no tension deviation, and there was a resistance increase in some cases.

key words: bonding, adherence, silica fume, repair material, concrete, HPC.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Projetar uma estrutura de concreto atualmente não diz respeito somente aos conceitos da Engenharia Civil. Os problemas patológicos podem estar implícitos já na elaboração de projetos, devido ao descaso ou desconhecimento do projetista em relação às características e comportamentos dos materiais, e também a possíveis interferências do meio ao qual estará exposta a edificação.

Outros focos de surgimento de problemas patológicos estão tanto na fase de execução da estrutura, que é seguida de vícios tanto por parte da execução em si quanto por parte dos profissionais que as executam, quanto na fase de utilização da estrutura, quando não realizadas manutenções necessárias ou quando a deterioração é causada pelo mau uso da edificação.

Em vista desta problemática, a cada dia é ratificada a necessidade do amplo conhecimento das características de todos os materiais envolvidos no processo de confecção de estruturas de concreto, e atrelado a esta corrente segue a necessidade da conscientização do conceito de durabilidade, pois nenhum material é

inexoravelmente durável, suas características e propriedades são alteradas com o passar do tempo.

Em resposta a estas observações haverá certamente uma minimização de custos, tanto na produção como em eventuais manutenções nas estruturas.

GRUNAU (1981) citado em HELENE (1992) afirma que uma elevada porcentagem das manifestações patológicas tem origem nas etapas de planejamento e projeto, conforme apresentado na Figura 1.1. As falhas de projeto são em geral, mais graves do que as falhas de qualidade dos materiais ou de má execução. É sempre preferível investir mais tempo no detalhamento e nos estudos da estrutura que, por falta de previsão, tomar decisões apressadas ou adaptadas durante a execução.

Figura 1.1 – Origem dos problemas patológicos com relação às etapas de produção e obras civis. Fonte: GRUNAU (1981) apud HELENE (1992)

A constante busca por soluções de problemas enfrentados diariamente em canteiros de obras é o fator que move diversas pesquisas em níveis Nacionais e Internacionais, entretanto, apesar de grandes avanços, muitos destes problemas ainda persistem.

Um dos problemas relacionados à tecnologia dos concretos estruturais reside na ligação entre concretos com cimento Portland executados em diferentes idades, e com diferentes composições e resistências.

As dificuldades geradas neste tipo de ligação atingem desde a retomada de uma concretagem durante a execução de uma estrutura ou, sua continuidade depois de determinado tempo, por suspensão temporária de atividades, ampliações ou ainda, nos casos de recuperação da estrutura, quando afetada por alguma patologia associada à deterioração do concreto e/ou armadura.

A primeira situação citada acima se relaciona àqueles casos em que se executam, por exemplo, os pavimentos-tipo das construções de edifícios onde as continuidades das concretagens são realizadas em intervalos que variam de 15 dias a 30 dias.

Muitas vezes, nesses casos, observa-se que existem deficiências de cura, ocorrência de carbonatação (resumidamente - $\text{CO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$), segregações dos materiais, concentração de pasta de cimento Portland excessivamente porosa ocasionada pela alta relação água/cimento quando da execução da etapa antecedente, causada pelo fenômeno da exsudação. GARCIA (1999).

Essas ocorrências vêm interferir na retomada da atividade de execução da estrutura, caso não se executem tratamentos adequados naquelas regiões de sua continuidade e que, muitas vezes, são relegadas aos pedreiros envolvidos no processo de execução.

Como decorrência dessa situação, a ligação concreto novo x concreto velho fica prejudicada, pois, nesse local se dará o ponto mais frágil da ligação, que é a zona de interface ou zona de transição.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a zona de transição representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta. A zona de transição é geralmente a parte mais fraca em comparação com os outros dois

componentes principais do concreto, e conseqüentemente, exerce uma forte influência no seu comportamento mecânico. É uma camada delgada, tipicamente de 10 μ m a 50 μ m de espessura, ao redor do agregado graúdo.

O problema também é agravado quando o planejamento de retomada da concretagem não é bem executado. Nesses casos, onde a execução da estrutura é interrompida por longo espaço de tempo, já poderá ter ocorrido uma grande penetração do dióxido de carbono, além da deposição de outros sais e fuligens ácidas.

Nesse caso, tratamentos especiais deverão se processar a fim de que se restabeleça uma região pouco afetada para retomada dos serviços (o que também não é feito). De qualquer forma, se executado, recai-se na condição da primeira situação citada.

Noutra situação, na deterioração da estrutura de concreto armado, o problema poderá estar relacionado com a necessidade de reforço em construções que atingiram o colapso, ou seja, aquelas que necessitam de reforço para desempenho de novas funções ou as que sofreram a deterioração do concreto e/ou da armadura, pela incompatibilidade com o meio ambiente ou micro-climas.

O custo direto da recuperação estrutural quando a obra está em uso poderá significar investimentos de até US\$150,00 para cada dólar envolvido na fabricação correta do elemento estrutural. Indiretamente esse custo poderá ser ainda maior se considerados os transtornos proporcionados aos usuários da construção, os lucros cessantes, etc.

Nesse sentido diversos projetos de pesquisa interligando a Engenharia Civil e a área tecnológica da Ciência e Engenharia de Materiais estão sendo realizados no Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento (LMABC) - SET-EESC-USP no desenvolvimento de técnicas e na utilização de novos materiais para a elaboração de

concretos e argamassas mais resistentes e duráveis. No caso, a presente pesquisa está ligada a outros projetos em andamento visando colaborar para a ampliação do conhecimento nesta área.

Nesta pesquisa é proposta uma investigação sobre o comportamento de um sistema de reparos, superficiais e estruturais, para estruturas de concreto que apresentam problemas patológicos e em casos de ampliações. Os concretos utilizados como substratos, são ditos convencionais e apresentam-se em uma faixa de resistência variando desde concretos com reduzida resistência ($f_{ck}=21\text{MPa}$) até concretos de elevada resistência ($f_{ck}=56\text{MPa}$), além de diferentes composições, podendo-se assim analisar de forma mais completa o comportamento deste sistema em diversos substratos.

A aplicação deste sistema é baseada primeiramente no preparo do substrato (concreto velho) utilizando técnicas que contribuem consideravelmente às aderências física e química deste substrato em relação ao material de reparo. Em seguida utilizam-se pastas de cimento Portland modificadas e concretos, ambos de elevado desempenho, como material de reparo.

DECTER & KEELEY (1997) afirmam que a baixa porosidade do material a ser utilizado como reparo é necessária, pois a área a ser preenchida por este material estará mais vulnerável a ataques.

Sob este ponto de vista, muitos são os benefícios decorrentes da utilização do concreto de elevado desempenho (CED), atualmente sinônimo de alta resistência e, sobretudo, alta durabilidade, em estruturas que necessitem recuperação ou estejam submetidas a condições severas de agressividade. Alguns autores preferem classificar o aludido concreto sob a sigla CAD - concreto de alto desempenho.

As propriedades apresentadas por concretos de elevado desempenho, como elevada resistência à compressão, elevada compacidade, reduzida permeabilidade, resistência a agentes agressivos, resistência à abrasão e outros, são de interesse especial em se tratando de materiais para recuperação de estruturas de concreto.

A qualidade deste material é indiscutível, sua evolução, tanto em relação às características mecânicas quanto à durabilidade, ocorrem principalmente devido ao rigor no controle de produção e à utilização de materiais suplementares como superpozolanas e aditivos superplastificantes, no mais se utilizam os mesmos componentes utilizados normalmente em concretos convencionais.

No que tange à melhoria na qualidade dos materiais, no Prólogo do livro *Concreto de alto desempenho* de Pierre-Claude Aïtcin (AÏTCIN, 2000), Yves Malier, ocupante da cátedra de concreto da École Nationale des Pontes et Chaussées, Paris - a mais antiga Escola de Engenharia do mundo, faz a seguinte citação - "Quarenta e cinco anos atrás, Albert Caquot, um membro da academia Francesa de Ciências, apresentou o curso de cálculo do professor Courbon, na École Nationale des Pontes et Chaussées, em Paris com esta visão - É melhorando as características dos materiais, muito mais do que através dos avanços que estão sendo feitos nos métodos de computação, independentemente de quão significativos possam ser, que podemos esperar as mais radicais modificações na indústria da construção".

Em observação à citação acima, pode-se entender que, é nesse sentido que a utilização de concretos de elevado desempenho como material de reparo, surge como uma alternativa de escolha dentre os diversos materiais conhecidos e já utilizados no campo da recuperação de estruturas de concreto.

A investigação experimental desta pesquisa visou analisar a ligação entre os diferentes concretos não só do ponto de vista da compatibilidade, adesão e

transferência de esforços entre os diferentes materiais, mas também na influência da inserção de adições minerais e aditivos químicos no comportamento aderente e reológico de concretos de elevado desempenho.

1.2. Objetivos da pesquisa

- **Objetivo geral**

Ao passo que novos materiais e novas técnicas de reabilitação e reparos de estruturas de concreto estão surgindo, surgem também dúvidas relativas à utilização adequada destes, pois se sabe que para cada situação patológica podem existir uma ou mais soluções. Sob este ponto de vista, apresenta-se como objetivo geral deste trabalho a avaliação de um sistema de reparo, com melhoria da zona de interface concreto novo *versus* concreto velho, através da aplicação de pasta de cimento e de concreto, ambos de elevado desempenho, que podem aplicados em estruturas de concreto deterioradas e/ou continuidade entre elementos estruturais.

- **Objetivos específicos**

A partir do objetivo geral são propostos objetivos específicos e inter-relacionados como visto a seguir:

1. verificar quais as influências das técnicas de preparo dos substratos de concreto na compatibilidade e comportamento aderente com os materiais de reparo, no caso desta pesquisa, concretos de elevado desempenho.

2. avaliar o desempenho da utilização de uma ponte de aderência, no caso uma pasta de cimento Portland de elevado desempenho (PED), na ligação entre os diferentes concretos na capacidade de adesão entre ambos em vista da redução da zona interfacial entre agregado-pasta.
3. verificar o comportamento do sistema de reparo proposto com relação à capacidade de adesão e transferência de esforços entre concreto velho x concreto novo através do ensaio de determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos de concreto - NBR 12142.
4. propor critérios específicos de composição de materiais (concreto novo-CED) para os seguintes casos:
 - a) ligações entre concretos para pequenas idades (concretagem contínua);
 - b) ligações entre concretos de diferentes idades (ampliações);
 - c) ligações entre concretos para recuperação de estruturas (colapso e reforço).

1.3. Apresentação do trabalho

A dissertação está estruturada em nove capítulos listando-se a seguir as referências bibliográficas consultadas e os anexos. Como já visto, o trabalho se inicia com a Introdução, onde são abordadas, de maneira geral, as ocorrências patológicas em estruturas de concreto, a problemática da ligação entre concretos estruturais de diferentes idades, composições e resistências e faz-se também uma abordagem geral em relação às atividades desenvolvidas ao longo da pesquisa.

No capítulo 2 - Revisão bibliográfica - são apresentadas considerações gerais sobre os temas abordados nesta pesquisa. Trata-se do levantamento da literatura relevante, já publicado na área, que serviu de base à investigação do trabalho

proposto. Acerca de alguns assuntos discutem-se idéias, problemas, soluções e sugestões dos vários autores pertinentes e selecionados, a fim de justificar os fundamentos deste trabalho. Apresentam-se algumas considerações e referências a respeito de vários assuntos como: a deterioração e a reabilitação de estruturas de concreto, aspectos relativos à durabilidade e vida útil, compatibilidade entre substrato e material de reparo, concreto de elevado desempenho (desenvolvimento e aplicações), zona de interface em concretos convencionais e concretos de elevado desempenho, sílica ativa, etc. Apresentam-se também considerações gerais sobre os materiais aqui utilizados, enfatizando aspectos relativos às influências das propriedades e potencialidades de cada um desses materiais e componentes na dosagem e produção dos concretos aqui estudados.

No Capítulo 3 - Caracterização dos materiais utilizados - são apresentadas as principais propriedades e características dos materiais utilizados nesta pesquisa, além de informações relativas à origem e produção de cada um dos materiais.

No Capítulo 4 são apresentados os Ensaios 01 - Estudo de dosagem de concretos - nesta etapa da pesquisa executou-se curvas de dosagem para concretos compostos com cimento CP II F 32, agregados regionais, sem adições e utilizando aditivo plastificante. O estudo dos traços unitários (1:m - cimento: agregados secos totais, em massa) 1:3,5 - 1:5,0 - 1:6,5 - 1:7,5, permitiu produzir em condições de laboratório, concretos convencionais, produzidos diariamente nas usinas de concreto da região da cidade de São Carlos.

O Capítulo 5 contém os Ensaios 02 - Execução de substratos de concreto - baseado nas curvas de dosagem geradas durante os Ensaios 01; apresentam-se neste capítulo resultados referentes à execução de corpos-de-prova prismáticos de concreto, projetados com resistências características (f_{c28}) de: 15Mpa, 18Mpa, 21Mpa, 25Mpa,

30Mpa, 40Mpa e 50Mpa, com respectivos traços em massa (1:m) 1:7,5, 1:7,1, 1:6,9, 1:6,4, 1:5,6, 1:4,15, 1:2,9. Foram observadas também as propriedades mecânicas destes concretos, os quais serviram de substrato a alguns ensaios referentes ao material de reparo.

O Capítulo 6 apresenta a etapa relativa aos Ensaios 3 - Ligação concreto novo x concreto velho. Nesta etapa é apresentada a seqüência de ensaios relacionados à utilização do material de reparo "Concreto novo". Após as rupturas dos corpos-de-prova prismáticos ocorridas nos Ensaios 2 inicia-se o procedimento de recuperação desses corpos-de-prova com o preparo do substrato, em seguida a aplicação de pasta de cimento Portland de elevado desempenho, finalmente procede-se a concretagem de ligação da junta entre as partes rompidas. Novamente os corpos-de-prova são ensaiados à tração na flexão, onde através de resultados pôde-se avaliar a capacidade de adesão de cada ligação, e em seguida apresentam-se as conclusões parciais.

A etapa final de avaliação da ligação concreto velho x concreto novo é apresentada no Capítulo 7 - Recuperação de ninhos de concretagem. Desta vez o sistema de reparo foi utilizado no preenchimento de ninhos de concretagens, simulados em corpos-de-prova cilíndricos (10cm x 20cm) e na concretagem da continuidade da seção destes. As avaliações mecânicas foram realizadas submetendo os corpos-de-prova à compressão axial simples; em seguida apresentam-se os resultados e conclusões parciais.

No Capítulo 8 apresentam-se as conclusões finais extraídas de todas as avaliações referentes à utilização do sistema de reparo para estruturas de concreto aqui estudado.

O Capítulo 9 apresenta sugestões para a continuidade de estudos referentes ao tema aqui abordado.

Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas e a bibliografia consultada que viabilizaram e apoiaram o aprofundamento teórico e desenvolvimento desta pesquisa, e os anexos contendo todos resultados obtidos nesta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas considerações gerais sobre os temas abordados nesta pesquisa. Trata-se do levantamento da literatura relevante, já publicado na área, que serviu de base à investigação do trabalho proposto. Acerca de alguns assuntos discutem-se idéias, problemas, soluções e sugestões dos vários autores pertinentes e selecionados a fim de justificar os fundamentos deste trabalho.

2.1. Manifestações patológicas em estruturas de concreto

2.1.1. Considerações sobre o estudo de manifestações patológicas em edificações

O estudo de problemas patológicos em edificações está ligado ao próprio surgimento das mesmas. A constatação de manifestações patológicas em construções é feita desde que o ser humano construiu sua primeira moradia.

A necessidade de sanar problemas encontrados no decorrer do processo construtivo de edificações ou após sua conclusão, fez com que com o passar dos

séculos o construtor fosse aprimorando técnicas de construção e criando um acervo de conhecimento, reduzindo assim as incidências patológicas. Ainda nos dias de hoje são muitos os problemas patológicos que afetam as edificações, em todos os seus subsistemas.

Segundo LICHTENSTEIN (1985), uma enorme quantidade de edifícios em todo o mundo apresentam hoje problemas relacionados a um desempenho insatisfatório, seja em termos globais, seja em termos de suas partes. Uma grande parte destes problemas, desde mereça uma análise metódica individualizada, poderá ser resolvida.

A prática profissional da análise destes problemas, no entanto tem sido caracterizada pela falta de uma metodologia universalmente aceita. São as intuições pessoais baseadas na experiência que prevalecem; a habilidade prevalece no lugar do método.

O mundo da habilidade e o mundo da ciência são mundos diferentes cuja fronteira não é suficientemente definida, e as fronteiras da ciência sempre mais invadem o terreno da habilidade. Com isso, no entanto a habilidade não é suprimida, apenas adquire novos horizontes, sempre que puder ser substituída pelo método, deve ser deixada de lado a habilidade pessoal intuitiva que naturalmente se engana muitas vezes. LICHTENSTEIN (1986).

Segundo REYGAERTS (1980)¹, as pessoas que estiverem estreitamente ligadas ao processo de produção e que tiverem uma boa bagagem de conhecimento sobre a física e a química aplicada aos materiais de construção e que forem possuidoras de uma carga de conhecimento vivenciada neste campo têm condições de resolver a maioria dos problemas patológicos.

¹ REYGAERTS, J. (1980) apud LICHTENSTEIN (1986) *Diagnostic des cas de pathologie du bâtiment* CSTC Revue,(4) Dez, Bruxelas.

Esta observação é importante, porém ainda que o estudo de problemas patológicos não deva basear-se somente em intuições pessoais, estas têm grande influência na tomada de decisões, de acordo com a vivência prática e teórica do analista.

A constatação do surgimento de patologia em uma edificação ou em seus subsistemas implica na necessidade de uma investigação especializada com o objetivo de analisar se faz-se oportuno um processo de intervenção.

A estrutura de um estudo patológico das edificações deve contemplar fases distintas de observação, análise e conclusão, que permitam ao especialista, o levantamento das informações necessárias à formação das hipóteses, por meio de pesquisas *"In loco"*, pesquisas bibliográficas, elaboração de ensaios analíticos ou comprobatórios, tornando possível desta maneira, a completa compreensão dos fenômenos envolvidos, a determinação das causas e conseqüentemente a definição da conduta corretiva. Como exemplo de um estudo patológico, neste trabalho cita-se o modelo de tratamento dos problemas patológicos como ilustrado na Figura 2.1. Este modelo apresenta a rotina metodológica genérica para tratamento de patologia e terapias em obras.

Em hipótese, se realizada toda a rotina apresentada a seguir, em um caso patológico qualquer de uma estrutura ou em suas partes, é completamente previsível que se disponha de uma ou mais alternativas de intervenção e correção de patologia. Neste instante é necessário que sejam estimados o grau de incerteza, a relação custo/benefício e o levantamento dos recursos tecnológicos envolvidos em cada uma das alternativas de intervenção. Entende-se por recursos tecnológicos, a técnica requerida pelos profissionais responsáveis pela execução e os materiais e equipamentos necessários.

Figura 2.1 - Rotina metodológica para tratamento de manifestações patológicas e terapias em obras.

A partir destes dados obtém-se a adoção da alternativa mais viável ao tratamento de manifestações patológicas. É recomendado ainda, após o tratamento, um acompanhamento do comportamento não só na área recuperada, mas do comportamento global da estrutura.

2.2. Considerações sobre a deterioração de estruturas de concreto armado

A deterioração de estruturas de concreto está intimamente ligada ao fato de que no passado e mesmo nos dias de hoje, no instante em que é projetada uma estrutura de concreto muita importância é dada à resistência mecânica do concreto, enquanto que uma insuficiente importância é dada aos fatores ambientais que a estrutura terá que enfrentar no desempenho de sua função estrutural.

AITCIN (2000) considera a durabilidade do concreto como um critério-chave para um bom projeto, porém comenta que o termo “durabilidade” pode ser vago.

A expressão “durabilidade do concreto” é usualmente empregada para caracterizar, em termos gerais, a resistência do concreto ao ataque de agentes agressivos físicos e químicos. A natureza, a intensidade e os mecanismos implicados em cada um desses diversos ataques podem variar consideravelmente, e essa é a razão pela qual a expressão durabilidade do concreto é entendida como muito vaga. AITCIN (2000).

O estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado tem evoluído graças ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos nos meios porosos como o concreto, que possibilitaram associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos. Conseqüentemente passou a ser viável a avaliação da vida útil expressa em número

de anos e não mais em critérios apenas qualitativos de adequação da estrutura a um certo grau de exposição.

O princípio básico, no entanto, não se alterou. Há necessidade, por um lado, de conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente e, por outro, de conhecer o concreto e a geometria da estrutura, estabelecendo então a correspondência entre ambos, ou seja, entre a agressividade do meio *versus* a durabilidade da estrutura de concreto. HELENE (1983).

É importante salientar que os condicionantes da deterioração estão associados à forma e velocidade com que eles podem ocorrer, dependendo da natureza dos materiais e componentes, até pela própria situação de como se combinaram os materiais e as condições de exposição a que fica submetido.

A Figura 2.2 apresenta 4 curvas que correspondem a comportamentos diferenciados de materiais ou componentes ao longo do tempo. As curvas 1 e 3 apresentam velocidades de deterioração diferenciadas de um mesmo componente, dependendo da agressividade a que estão submetidos (ex. curva 1 - ambiente não agressivo; curva 3 - ambiente altamente agressivo), ou comportamento diferenciado de dois componentes distintos, para uma mesma possibilidade de uso na construção e para uma mesma agressividade.

Esse tipo de comparação torna possível que se faça a escolha mais adequada dos materiais e componentes em situações de projeto, em função das agressividades. A curva 2 trata o caso típico do aumento na velocidade do processo de deterioração de um dado componente, como resultado de um uso inadequado, ou seja, aquele caso de origem da patologia devido a problemas de uso. No caso da curva 4, pode-se dizer que se trata daquela situação na qual a origem da patologia está no projeto, o que aumenta bastante a velocidade de deterioração dos materiais ou componentes.

Figura 2.2 - Variação da propriedade de materiais ou componentes em função do tempo ou quando submetido à ação de agentes agressivos. Fonte: LICHTENSTEIN (1985) citado em GARCIA (1999).

Alguns dos documentos de referência que bem tratam do tema durabilidade são o CEB-FIP Model Code 90², CEB Design Guide³, ACI COMMITTEE 201⁴, o projeto de norma europeia ENV-206⁵, o projeto de revisão e calibragem da NBR 6118 (NB-1 da ABNT), artigos de especialistas no tema tais como ANDRADE & GONZALEZ⁶, HELENE⁷, ROSTAM⁸, e documentos clássicos como a norma CETESB L1 007⁹. HELENE (1996).

NEVILLE (1997) em comentários acerca da durabilidade de concretos cita que, é essencial que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto, ou pelo menos razoável. Portanto o concreto deve poder suportar o processo de deterioração a qual se suponha a ser submetido. Nessas

² Comité Euro-Internacional du Béton (1993), CEB-FIP, *Model code 1990*. Desing code, Lausanne, CEB. May.

³ Comité Euro-Internacional du Béton (1992), *Durable Concrete*. Desing guide, Lausanne, Thomas Telford.

⁴ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1991), *Guide to durable concrete(ACI committe 201)* ACI Materials Journal, SET/OUT.

⁵ EUROPEAN NORMALIZATION VOLUNTAIRE ENV-206 (1992) *Performance, Production, Mise and Ouvre et Critères de conformité du Béton*.

⁶ ANDRADE, C. & GONZALEZ, J. A (1998) *tendencias actuales en la investigación sobre Corrosion de Armaduras*, revista Informes de la Construcción vol.40, n.38, Madrid.

⁷ HELENE, P. R. L. (1993) *Vida útil das estruturas sob o ponto de vista da corrosão das armaduras* Anais Encol/SENAI, Brasília.

⁸ ROSTAM, S. (1993) *Service Life Desing, The European Approach*, revista Concrete internacional, v.5 n.7, USA.

condições o concreto é considerado durável.

A durabilidade de uma estrutura é então relacionada com o período de tempo que esta estrutura permanece em serviço; depara-se, portanto com o conceito de vida útil. A vida útil de um material ou componente pode ser definida como o período durante o qual as propriedades desse material ou componente permanecem acima de limites mínimos admissíveis.

Esses limites mínimos admissíveis variam em função das condições a que os materiais e componentes estejam expostos ou submetidos. Por exemplo, um concreto projetado com determinada composição de materiais e resistência mecânica pode apresentar um desempenho variado, dependendo do grau de exposição: local, meio ambiente, micro-região, compatibilidade de materiais etc. LIBORIO (1996).

Ainda assim, partindo-se da premissa de que todos os fatores intervenientes foram considerados, a vida útil de um material ou componente é obtido através de uma análise estatística, conforme Figura 2.3.

Figura 2.3 - Vida útil em função da distribuição estatística de componentes

Fonte: LICHTENSTEIN (1985) citado em LIBORIO (1996).

Segundo HELENE (1986), a questão da vida útil das estruturas de concreto deve ser enfocada de forma holística, sistêmica e abrangente, envolvendo equipes multidisciplinares. Deve também ser considerada como resultante de ações coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo: concepção ou planejamento; projeto; fabricação de materiais e componentes; execução propriamente dita e principalmente durante a etapa de uso da estrutura. É nessa etapa onde serão realizadas as operações de vistoria, monitoramento e manutenções preventivas e corretivas, indispensáveis numa consideração correta e sistêmica da vida útil.

No que tange à manutenção das estruturas, LIBORIO (1996) cita que a primeira tendência de todo material, que exigiu energia para sua elaboração é passar de uma forma termodinamicamente instável, para uma situação estável. Essa estabilidade é conseguida através de sua volta ao seu estado natural, como se encontra na natureza.

As pirâmides do Egito permanecem até nossos dias, porque foram construídas com material natural de $\text{pH}^{10} \approx 7$, nem ácida, nem básica, dando uma característica de estabilidade química.

Os concretos têm sido produzidos com $11 < \text{pH} < 12,5$, extremamente básico e necessitaram para isso uma elevada aplicação de energia, permanecendo numa situação instável, que por sua vez tenderá a assumir uma situação estável. GARCIA (1999).

Essa característica portanto, para a maioria dos materiais, está associada à sua deterioração. O importante nesse caso é a interferência no sentido de reduzir a velocidade com que isso ocorre, associando-se a uma condição de vida útil, previamente estabelecida.

do meio ao concreto, São Paulo, SP.

¹⁰ pH - Medida de acidez e basicidade de um líquido - Dissociação da água: $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$. O produto das concentrações de H^+ e do OH^- é igual a 10^{-14} . Para água pura (soluções neutras) $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$. Em soluções ácidas: $[\text{H}^+] > 10^{-7}$ e $[\text{OH}^-] < 10^{-7}$. Em soluções básicas: $[\text{H}^+] < 10^{-7}$ e $[\text{OH}^-] > 10^{-7}$.

Isso se consegue com o estabelecimento de proteções às construções, realçando-se o comportamento de um ou mais parâmetros associados ao meio ambiente e de sua manutenção periódica, estabelecida em cada caso. LIBORIO (1996).

A observação de dois tipos de manutenções é feita por HELENE (1992), citando as manutenções preventiva e corretiva.

A primeira é caracterizada por medidas tomadas com antecedência e previsão, durante o período de uso e manutenção da estrutura, pode ser associado a um custo de cinco a vinte e cinco vezes menor que aquele necessário à correção dos problemas gerados a partir da não intervenção preventiva tomada com antecedência à manifestação explícita de patologia. Já a manutenção corretiva, corresponde aos trabalhos de diagnósticos, prognóstico, reparo e proteção das estruturas que já apresentam manifestações patológicas, ou seja, correção de problemas evidentes. A estas atividades pode-se associar um custo 125 vezes superior ao custo de medidas que poderiam ser tomadas em nível de projeto e que implicariam em um mesmo grau de proteção e durabilidade que se estime da obra a partir da correção.

Ainda citando LIBORIO (1996), o programa de manutenção, por sua vez, estará associado também com a tipologia da obra, visto que no projeto a escolha dos materiais e a composição final do produto, para cada caso, deverá estar associada à responsabilidade e riscos que a obra irá oferecer às pessoas e ao próprio meio ambiente. Por exemplo: os materiais especificados para uma residência não deverão ser os mesmos que para uma central atômica. Nesse último caso, as inspeções serão mais freqüentes, porém os materiais deverão ter um comportamento muito mais estável. Essa situação pode ser representada na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Relação entre desempenho, manutenção e vida útil

Fonte: LICHTENSTEIN, 1985.

É importante que, no instante da tomada de decisão sobre a viabilidade de intervenções e manutenções¹¹, o profissional ou equipe responsável apresentem o conhecimento pleno da relação investimento-desempenho. Muitas vezes grandes investimentos são utilizados para promover um curto período de desempenho aceitável da estrutura ou parte dela, o que do ponto de vista comercial é sinônimo de prejuízo, e má utilização de verbas públicas, no caso de obras municipais, estaduais, etc.

Ainda abordando a questão da durabilidade, diversos autores entendem que a durabilidade de concretos depende muito da facilidade com a qual os fluidos, tanto líquidos como gases, podem ingressar no concreto e se deslocar no seu interior; essa característica é mencionada como a permeabilidade do concreto.

São três os principais fluidos, no que tange à durabilidade, que podem ingressar no concreto: água (pura ou contendo íons agressivos), dióxido de carbono e oxigênio. Eles podem se deslocar através do concreto de três modos diferentes, mas todo deslocamento depende basicamente da estrutura da pasta de cimento hidrato. No

¹¹ Leia-se mais sobre a questão: *RILEM Recommendations TC 71 PSL* (1998), *Systematic Methodology for Service life, Prediction of Building Materials and Components*, Materials and Structures, 22 N. 131; CARTER, P. D. (1989) *Preventive maintenance of concrete of concrete bridges decks*, Int. Concrete, N.11.

caso do concreto o deslocamento dos diversos fluidos se efetua não somente por escoamento através do meio poroso, mas também por difusão e adsorção. NEVILLE (1997).

Muitas vezes, segundo GARCIA (1999), o termo permeabilidade é confundido com porosidade, deste modo é conveniente destacar, através do esquema ilustrativo¹² (Figura 2.5) quatro situações que distinguem os dois conceitos.

Figura 2.5 – Esquema ilustrativo sobre porosidade e permeabilidade

Fonte: OLIVEIRA & HELENE (1991)

Sob esse ponto de vista, é também conveniente conceituar estas duas propriedades:

- **Porosidade:** Característica correlacionada com o volume, distribuição e características de poros que podem ou não ser interconectados. Significando, que no caso da pasta de cimento, podem até haver poros internos, porém se não conectados, não haverá passagem de fluidos.

¹² OLIVEIRA & HELENE (1991) Proteção e manutenção das estruturas de concreto, Rev. Engenharia, N.485. Citados por GARCIA (1999).

- **Permeabilidade:** vazão de um fluido através de um corpo dada uma certa pressão e temperatura. Essa vazão depende do tamanho, da continuidade dos poros e da sua distribuição, e não somente da porosidade em si. GARCIA (1999)

A natureza do sistema poroso da pasta de cimento hidratado é de suma importância para a permeabilidade do concreto, considerando o interior de sua massa e a região de interface com os agregados.

É importante atentar para a questão da porosidade na região da interface pasta/agregado. Sabe-se que esta região tem microestrutura diferente do restante da pasta. Segundo NEVILLE (1997) é na região de interface que ocorrem microfissurações, e por esta razão poderia se esperar que a região de interface contribuísse significativamente para a permeabilidade do concreto.

LARBI (1993)¹³, no entanto, concluiu que apesar da maior porosidade apresentada pela zona de interface, a permeabilidade do concreto é controlada pela pasta de cimento hidratada, que é a única fase contínua do concreto.

Mais aspectos concernentes à zona de interface pasta de cimento/agregado serão abordados com mais detalhes no item 2.6.

Os agregados também podem conter poros, porém estes poros geralmente não possuem uma continuidade, além disso, as partículas dos agregados são envolvidas pela pasta de cimento, desse modo não há contribuição à permeabilidade do concreto.

¹³ LARBI, L. A (1993) *Microstructure of interfacial zone around aggregate particles in concrete*, Heron, N.38

2.2.1. Principais causas de deterioração de estruturas de concreto.

NEVILLE (1997) e MEHTA & MONTEIRO (1994) englobam em dois blocos as principais causas de deterioração, classificando-as em causas de deterioração química e física. A Figura 2.6 ilustra a classificação, citada também por GARCIA (1999).

Figura 2.6 – Classificação das causas de deterioração do concreto

Fonte: MEHTA & MONTEIRO (1994) apud GARCIA (1999).

2.2.1.1. Deterioração do concreto por ações físicas

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), as causas de deterioração de origem física - ou origem mecânica, NEVILLE (1997) - são agrupadas em dois blocos: deterioração devido ao desgaste superficial e devido à fissuração.

- **Deterioração devido ao desgaste superficial**

Este tipo de deterioração que ocorre com a perda de massa a partir da superfície do concreto pode se dar através de três situações.

- a) abrasão: perda de massa em função do atrito. Pode citar o caso dos pavimentos e pisos industriais devido ao tráfego de veículos;
- b) erosão: ação abrasiva de fluidos contendo partículas sólidas em suspensão. No caso de estruturas hidráulicas, como em revestimentos de canais, vertedouros e tubulações para o transporte de água e esgoto;
- c) cavitação: perda de massa pela formação de bolhas de vapor e sua subsequente ruptura devido a mudanças repentinas de direção em águas que fluem com alta velocidade.

- **Deterioração devido à fissuração**

- a) fissuração pela cristalização de sais nos poros: a cristalização de sulfatos nos poros do concreto pode ser responsável por danos consideráveis. Por exemplo, quando um lado de um muro de arrimo ou laje de um concreto permeável está em contato com uma solução salina e o outro lado está sujeito à evaporação, o material pode se deteriorar por tensões resultantes da pressão de sais que cristalizam nos poros.
- b) fissuração devido ao congelamento: quando a água começa a congelar em uma cavidade capilar, o aumento de volume que acompanha o congelamento da água requer uma dilatação da cavidade igual a 9% do volume da água congelada, ou a saída desta água através de fronteiras do material, estão associadas a este fenômeno de expansão, fissurações diversas.

Em relação aos extremos de temperatura, é citada também a situação em que o concreto é submetido ao fogo.

Neste caso, GARCIA (1999) comenta que o concreto, sob a ação do fogo, apresenta perda mais lenta de resistência até aproximadamente 400 °C, caindo depois mais rapidamente à medida que a temperatura se torna mais elevada. Com temperaturas em torno de 800 °C, a resistência do concreto fica reduzida a 25% do seu valor. Outros comentários sobre o fenômeno da fissuração serão feitos na abordagem à sintomatologia.

2.2.1.2. Deterioração do concreto por ações químicas

A resistência do concreto a processos destrutivos iniciados por reações químicas envolve geralmente, mas não necessariamente, interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio externo e os constituintes da pasta de cimento.

MEHTA & MONTEIRO (1994), abordam exceções, como a reação álcali-agregado, que ocorre entre os álcalis da pasta de cimento e certos materiais reativos quando presentes nos agregados; hidratação retardada do CaO e MgO cristalinos, se presentes em quantidades excessivas no cimento Portland, e corrosão eletroquímica da armadura de aço no concreto.

Em se tratando de concreto, qualquer meio que apresente pH menor que 12,5, pode ser qualificado como agressivo, pois a redução da alcalinidade dos fluidos nos poros levaria, no final, a uma desestabilização dos produtos cimentícios de hidratação. Isso por que grandes concentrações de íons de Na^{++} , K^{+} e OH^{-} , dissolvidos no gel dos poros, fornecem à pasta de cimento um pH que varia entre 12,5 a 13,5.

GARCIA (1999) cita as três situações em que reações químicas ocorrem em interação com a pasta de cimento endurecida:

- a) reações envolvendo hidrólise causando a lixiviação do hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 e expondo outros componentes cimentícios a possíveis ataques químicos;
- b) reações por troca de cátions que podem causar três tipos de reações deletérias.

Dentre estas reações são destacadas as que formam sais solúveis, como o cloreto de cálcio, acetato de cálcio, cloreto de alumínio, cloreto de ferro e com maior destaque os ácidos carbônico e sulfúrico.

Ainda podem ser formados sais de cálcio insolúveis e não expansivos (ácido oxálico, tartárico e fluorídrico) e o ataque químico contendo sais de magnésio (cloreto, sulfato ou bicarbonato de magnésio) que ao interagirem com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), transformam-se em silicato de magnésio hidratado (Mg-S-H), que não possui característica cimentícia.

- c) reações formando produtos expansivos fazendo com que ocorram tensões internas que se manifestam pelo fechamento de juntas de expansão, deslocamentos seguidos de fissuração, lascamento e pipocamento da estrutura.

A essas reações expansivas são associados quatro fenômenos:

- c.1) corrosão da armadura de aço do concreto: A corrosão é, genericamente, um processo pelo qual, partes de um material são removidas devido a uma reação química ou eletroquímica.

A substância do material reage com uma substância do meio e é removida como parte de um composto químico resultante. Ataque químico direto, por exemplo, de peças de aço expostas a determinados ácidos resultam em corrosão destas peças. Nestes casos, o meio possibilita a ionização do metal que se toma, assim, mais fácil de ser removido.

No entanto, a forma mais importante de corrosão, que se apresenta mais

freqüentemente, é a corrosão eletrolítica, também denominada eletroquímica ou galvânica. Embora o processo seja muito complexo, pode-se fazer algumas simplificações mostrando aspectos essenciais, cuja compreensão é extremamente importante, como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 - Reação eletroquímica de oxi-redução em um condutor metálico.

A temperaturas próximas à temperatura ambiente, o aço apenas corrói na presença de água, sendo responsáveis por esta corrosão, as seguintes reações:

Existe uma série de fatores que por si só não apresentam risco de corrosão da armadura, mas que depois de desencadeado o fenômeno é responsável pela propagação da corrosão.

O conteúdo de umidade no interior do concreto exerce importante papel sobre a corrosão, quer seja porque a água é necessária para que ocorra a reação catódica de redução do oxigênio, ou porque influi na resistividade do concreto e permeabilidade do oxigênio. O concreto seco possui uma alta resistividade, podendo atingir valores da ordem de 10^{11} ohm.cm quando é submetido a temperaturas de 105°C . Nessas condições, o concreto não permite a mobilidade dos íons. Por outro lado, à medida que

aumenta a umidade interna do concreto, a resistividade ôhmica vai diminuindo e o processo de corrosão pode se desenvolver.

Sem dúvida, a corrosão das armaduras é o problema mais comum relacionado com a deterioração das estruturas de concreto. As causas deste problema são freqüentemente associadas à contaminação por cloretos e à carbonatação.

No caso do concreto armado, essa patologia geralmente leva à transformação do aço metálico em ferrugem, ocorre que, nesta transformação há um aumento no volume no metal original, causa principal em situações de expansão e fissuração no concreto.

A realcalinização e a dessalinização (extração de cloretos) são métodos eletroquímicos e não destrutivos inovadores, que detêm a corrosão e promovem a repassivação das armaduras, ampliando assim a vida útil das estruturas.

Outros procedimentos são utilizados para se evitar a corrosão da armadura de aço no concreto, como a proteção catódica, que envolve a supressão do fluxo da corrente na célula de corrosão, quer pela aplicação externa de um fluxo na direção oposta, quer pelo uso de anodos de sacrifício.

HELENE (1986) é mais específico, e cita ainda mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura:

- **despassivação por carbonatação:** ou seja, por ação de gás carbônico da atmosfera que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto reduzindo o pH dessa solução. A despassivação deletéria só ocorre de maneira significativa em ambientes de umidade relativa abaixo de 98% e acima de 60%, ou em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a instalação da corrosão. O fenômeno de carbonatação propriamente dita, não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto e até aumenta

sua dureza superficial. A identificação da frente ou profundidade de carbonatação requer ensaios específicos. Ao atingir a armadura, dependendo das condições de umidade ambiente pode promover séria corrosão com aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes;

- **despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto):** ou seja, por penetração do cloreto através de processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto que ao superarem, na solução dos poros do concreto, um certo limite em relação à concentração de hidroxilas, despassivam a superfície do aço e instalam a corrosão. Eventualmente, esses teores elevados de cloreto podem ter sido introduzidos, inadvertidamente, durante o amassamento do concreto, geralmente através do excesso de aditivos aceleradores de endurecimento.

O fenômeno não é perceptível a olho nu, não reduz a resistência do concreto nem altera seu aspecto superficial. A identificação da frente ou da profundidade de penetração de certo teor crítico de cloreto requer ensaios específicos. Ao atingir a armadura pode promover séria corrosão com aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos de pedaços de concreto e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes;

c.2) ataque por sulfatos: os sais sólidos não atacam o concreto, mas quando presentes em soluções, segundo NEVILLE (1997), podem reagir com a pasta de cimento endurecida. Algumas argilas contêm, por exemplo, álcalis, sulfato de magnésio e sulfato de cálcio dissolvidos e água freática (subterrânea), no qual, na realidade, a argila é uma solução de sulfatos. A água do mar é também citada como problemática sob esse aspecto. Pode, então ocorrer o ataque do cimento, na reação do sulfato de cálcio com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e com o aluminato tricálcico hidratado. Os produtos dessas

reações, o gesso e o sulfoaluminato de cálcio têm um volume consideravelmente maior do que os compostos iniciais, de modo que as reações com os sulfatos levam à expansão e disgregação do concreto.

O uso de inibidores de corrosão nas armaduras tem sido verificado com mais frequência; como o nitrito de sódio (NaNO_2) que em proporções adequadas no concreto reduz drasticamente o fenômeno de corrosão das barras de aço pelos íons cloreto.

Uma vez que a água, oxigênio e íons agressivos (SO_4^- e Cl^-) desempenham papéis importantes na corrosão da armadura e fissuração do concreto, é óbvio que a permeabilidade é o ponto-chave para controlar os vários processos envolvidos no fenômeno.

c.3) reação álcali-agregado: durante os últimos quarenta anos foram observadas algumas reações prejudiciais entre os agregados e a pasta de cimento que os envolve, cita NEVILLE (1997). Este processo químico é caracterizado quando alguns constituintes mineralógicos dos agregados reagem com os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, algumas adições minerais, agentes internos) dissolvidos na solução dos poros do concreto. O produto dessas reações invariavelmente é um gel higroscópico com característica expansiva. Tal característica é a responsável por movimentações diferenciais nas estruturas, fissurações, pipocamento, redução significativa das resistências à tração e compressão do concreto. Classifica-se em três as reações envolvendo álcalis, GARCIA (1999):

- reação álcali-sílica: envolve a presença de sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) ou artificiais;

- reação álcali-silicato: envolve silicatos presentes nos feldspatos, folhelhos, argilosos, certas rochas sedimentares, metamórficas, ígneas e fundamentalmente a presença do quartzo deformado (tensionado) e minerais expansivos;
- reação álcali-carbonato: envolve certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas presentes nos poros do concreto;

c.4) hidratação do MgO e CaO cristalinos: Numerosos relatórios, inclusive uma revisão feita por Povindar Kumar Mehta¹⁴ indicam que o fenômeno da hidratação, tanto do periclásio (MgO) quanto do CaO, quando presentes em quantidades substanciais no cimento, podem causar expansão e fissuração no concreto.

Atualmente o fenômeno da expansão devido à presença do CaO cristalino no cimento Portland é raro de ocorrer, pois os avanços incorporados no controle da manufatura asseguram que o conteúdo de CaO não combinado ou cristalino não exceda a 1%. Acima de 2,8%, segundo a literatura, há risco de ocorrer expansões consideráveis.

Garcia (1999) aborda a “Sintomatologia” como uma reação das estruturas a um efeito anormal. Esta reação surge na forma de sinais externos que muitas vezes nos permite detectar de imediato qual é o problema. Porém, existem algumas vezes que o sintoma alerta que há algum problema, exigindo entretanto, análises mais minuciosas de especialistas para se chegar a um diagnóstico correspondente ao sintoma observado.

Nesse sentido, é entendido que a fissuração representa um dos sintomas patológicos mais importantes no que diz respeito a estruturas de concreto.

¹⁴ MEHTA, P. K. (1978) ASTM STP 663, pp 35-60

Geralmente, o diagnóstico de uma fissura permite a detecção de todo o problema existente na estrutura, se realizado por pessoas com conhecimento técnico adequado.

GIONGO & SILVA (1994)¹⁵ citam que a ocorrência de fissuras depende de diversas circunstâncias, classificando-as em dois grupos:

- fissuras não produzidas por ações (retração, dilatação térmica);
- fissuras produzidas por solicitações devido ao carregamento.

GARCIA (1999) cita as diversas ocorrências em que o fenômeno da fissuração pode se desenvolver, desde o estado fresco ao estado endurecido:

a) fissuração no estado plástico

- fissura de sedimentação pelo impedimento da armadura;
- fissura de sedimentação pelo impedimento do agregado;
- fissura por movimentação da fundação ou fôrma;
- fissura por movimentos laterais da fôrma.

b) fissuração no estado endurecido

- fissuras por movimentações térmicas;
- fissuras por movimentações higroscópicas;
- fissuras pela atuação de sobrecargas;
- fissuras por deformabilidade excessiva de estruturas de concreto armado;
- fissuras por recalque de fundação;
- fissuras por retração de produtos à base de cimento;
- fissuras por concentração de esforços.

Há que se lembrar também que as fissuras podem ser advindas por causas, como a dissecação interna (ou autógena), expansões por reações químicas, etc.

Outros fenômenos, também notados com uma certa frequência em ocorrências patológicas em estruturas de concreto, são citados a seguir.

- **Desagregação** - a perda do caráter conglomerante do cimento que compõe o concreto, é um possível sinal de ataque químico, por exemplo, ação de sulfatos e/ou cloretos. A consequência mais evidente é que os agregados passam a ficar desprendidos da pasta, levando a perda de coesão no interior do concreto, reduzindo assim suas características mecânicas;
- **Disgregação** - este fenômeno, principalmente causado pela corrosão das armaduras, caracteriza-se pela ruptura do concreto, em geral nas regiões salientes da peça. As tensões de tração originadas no interior das estruturas com armaduras corroídas, quando mais elevadas que a tensão de ruptura, levam o concreto a apresentar fissurações, podendo provocar a expulsão do concreto que haja entre essas fissuras;
- **Eflorescências** – este fenômeno é geralmente entendido como o depósito de sais por cristalização na superfície exterior dos elementos, sendo que esses sais são provenientes dos materiais constituintes de tais elementos em dissolução em água (chuva, umidade relativa do ar, etc.). A água carrega partículas interiores do concreto “lavando-o” e as deposita na superfície, depois evapora. Garcia (1999).

A coloração esbranquiçada dos sais depositados no exterior dos elementos de concreto geralmente acusa a presença de sulfato de cálcio (Ca_2SO_4) ou carbonato de cálcio (CaCO_3). O primeiro é considerado uma das eflorescências mais comuns em concretos e se não trata de um sal facilmente solúvel, exceto em presença de outros

¹⁵ GIONGO J. S. & SILVA R. C. (1994) *Concreto Armado: estados limites de utilização São Carlos/ relatório técnico*

sais, como o sulfato de potássio. O segundo é originado da reação com o hidróxido de cálcio que o concreto libera durante a pega e o anidrido carbônico do próprio ar ao chegar o hidróxido ao exterior.

- Ninhos de concretagem - é comum confundir ninhos de concretagem (vide DF 2.1) com segregação. Porém são diferentes, pois a segregação surge pelo mau planejamento da concretagem (por exemplo, lançamento do concreto de altura inadequado e concreto excessivamente plástico, ocasionando uma separação entre a argamassa e os agregados).

DF 2.1 – Ninho de concretagem em pé de pilar. Fonte: GARCIA (1999)

A diferença está exatamente no ponto abordado acima, já que os ninhos de concretagem podem surgir por mau adensamento, altas taxas de armadura, como por

exemplo, em pé de pilar, ou por incompatibilidade de dimensão do agregado graúdo, impedindo a passagem do concreto em determinadas regiões resultando em espaços sem preenchimento não só de pasta, mas também do agregado graúdo surgindo “buracos” ao longo da peça. GARCIA (1999),

A correção imediata desta patologia é de suma importância para a durabilidade da estrutura, pois através destes “macro-poros” é facilmente instalado um processo de patológico, por exemplo, a corrosão, no caso do concreto armado com aço.

- Carbonatação - este fenômeno, já abordado anteriormente neste trabalho, é associado à reação de gases ácidos presentes na atmosfera (CO e CO_2) com o hidróxido de cálcio presente nos poros e superfícies do concreto. Os produtos dessa reação são um sal, o carbonato de cálcio (CaCO_3), e água, como visto, resumidamente, a seguir: $\text{CO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

O avanço da frente de carbonatação é atenuado pelos próprios produtos das reações responsáveis pela sua ocorrência: o carbonato de cálcio, formado durante as reações anteriormente citadas, por ser um produto de baixa solubilidade, deposita-se nos poros do concreto (ou argamassa) e dificulta o avanço da carbonatação.

- Lixiviação - é caracterizada pela dissolução da pasta de cimento do concreto através da incidência de águas ácidas, águas moles, chuvas ácidas e outros produtos que causem o carreamento dos compostos hidratados. Este fenômeno geralmente está ligado a uma redução significativa do pH do concreto, cita-se a despassivação das armaduras como consequência desta patologia.

2.3. Estrutura da superfície do concreto

O concreto é um material heterogêneo principalmente quando analisado em

escala microscópica. É composto de um conjunto de agregados envoltos e unidos por uma pasta aglomerante.

As superfícies visíveis externas das peças de concreto são essencialmente constituídas por uma pasta de cimento. Esta pasta é responsável pela cor, em geral cinza, da superfície de concreto. Quanto maior é a relação água/cimento da pasta, mais clara é a superfície. HELENE (1992).

Devido ao fenômeno conhecido por “efeito parede”, há uma concentração de argamassa (cimento e grãos de dimensão inferior a 0,2mm) e pasta na superfície. Se através de um desbaste, retirarmos a capa superficial da pasta, aparecerá uma superfície que contém poros e grãos de areia imersos em uma matriz de pasta de cimento. Segundo HELENE (1992), essa característica mantém-se até a espessura de 5mm, a partir da qual começam a aparecer agregados graúdos e uma certa homogeneidade é conseguida somente a partir dos 15mm de profundidade (função da dimensão máxima característica do agregado graúdo).

Outro aspecto importante a ser abordado é que, a “pele” do concreto apresenta uma variação em seu pH em função do tempo. Logo após o lançamento e o período de cura úmida o pH registrado na superfície é alcalino, da ordem de 12,6. A partir da interrupção da cura inicia-se a carbonatação, reduzindo consideravelmente o pH superficial.

HELENE (1992) reuniu os principais mecanismos de deterioração das superfícies de concreto, apresentados na Tabela 2.1.

Como já abordado na introdução deste trabalho, a adoção de critérios, no instante do projeto, que levem em conta a influência do meio ambiente na durabilidade de estruturas de concreto, é de suma importância para garantir a integridade da estrutura em seu desempenho pleno.

Tabela 2.1 - Principais mecanismos de degradação das superfícies de concreto

Fonte: HELENE (1992).

Agressividade		Consequências inerentes ao processo	
Natureza do processo	Condições particulares	Alterações de cor/manchas	Alterações Físico-Químicas
Carbonatação	UR 60% a 85%	Em geral, mais clara	Redução do pH Corrosão das armaduras Fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera ácida, águas moles	Escurece com manchas	Redução do pH Corrosão das armaduras Desagregação superficial
Retração	Molhagem/secagem Ausência de cura	Manchas e fissuras	Fissuração Redução do pH Corrosão das armaduras
Fuligem	Atmosferas urbanas e industriais (zonas úmidas)	Manchas escuras	Redução do pH Corrosão das armaduras
Fungos	Zonas úmidas e salinas	Manchas escuras esverdeadas	Redução do pH Desagregação superficial Corrosão das armaduras
Concentração salina	Atmosferas marinhas e industriais	Branqueamento	Despassivação das armaduras Desagregação superficial

GARCIA (1999) cita a influência do meio ambiente na durabilidade do concreto, e os principais meios agressivos, atentando para que, quando se estuda possíveis formas de deterioração do concreto, é importante salientar que além dos processos químicos e físicos, existem outros fatores que podem agir diretamente e de maneira deletéria no concreto. Classificam-se assim os diversos tipos de atmosferas e os agentes agressivos que podem interferir no concreto:

- atmosfera rural;
- atmosfera urbana;
- atmosfera marinha e água do mar;
- micro-climas;
- águas puras;

- águas de regiões pantanosas ricas em húmus;
- águas residuais ácidas
- graxas e óleos;
- outras substâncias agressivas (armazenamento de ácidos, produtos de limpeza, vinho, sucos de frutas, etc).

2.4. Considerações sobre a reabilitação de estruturas de concreto deterioradas

Atualmente no País, a área de recuperação/reparo/reforço de estruturas de concreto é muito pouco privilegiada no que diz respeito a pesquisas científicas. A inexistência de uma normalização Nacional específica indica que projetos de recuperação/reparo/reforço têm sido executados baseados apenas em experiências pessoais, na expectativa otimista do projetista e/ou na adaptação de materiais e técnicas, ao invés de adoção de critérios específicos normalizados e de materiais e técnicas utilizadas em situações em que estruturas foram recuperadas com sucesso.

Alguns pontos importantes a se considerar, segundo LIBORIO (1996) são:

- **REPARO:** ação executada numa parte da construção com o intuito de que tenha desempenho mínimo aceitável, avaliado em projeto;
- **REFORÇO:** conjunto de ações destinadas a garantir que a construção, ou suas partes, resista às solicitações a que está submetida;
- **RECUPERAÇÃO:** conjunto de ações que visam restituir à construção um grau de desempenho mínimo pré-estabelecido ou pós-determinado.

No sentido da implementação de uma normalização específica para este campo de engenharia, MORENO Jr. & SELMO (2001) citam que está sendo elaborada desde 1987, a norma Europeia EN 1504, que trata da proteção e reparo das estruturas de

concreto. De acordo com KAY & WYATT (1997)¹⁶, o comitê técnico da CEN (Comitê Europeu de Normalização) formado para a realização da EN 1504¹⁷, identificou seis grupos principais relativos a produtos e sistemas de reparo, são eles:

- sistemas de proteção de superfícies;
- argamassas e concretos para reparos estruturais e não-estruturais;
- aderência estrutural
- injeção para concreto;
- grautes para ancoragem de armaduras e para preenchimento de vazios externos;
- prevenção da corrosão das armaduras.

REIS (1999) aborda a existência de um número muito grande de materiais desenvolvidos especificadamente para serem utilizados em trabalhos de reabilitação de estruturas de concreto armado. Dentre eles pode-se citar aditivos que melhoram, em vários aspectos, o desempenho do material utilizado como reparo, proporcionando melhores condições de durabilidade e resistência. Entretanto recomenda-se fazer uma análise individual desses materiais, pois, apesar de existir vasta literatura comercial a respeito desses produtos, nem sempre as informações se baseiam em pesquisas aprofundadas.

ANDRADE (1992)¹⁸ citado por GARCIA & CLÍMACO (2000), agrupa os sistemas de reparo para estruturas de concretos, conforme a composição, em três famílias: materiais à base de cimento, convencionais ou não; materiais com aglomerante orgânico à base de polímeros termoestáveis; materiais com aglomerantes mistos formados por cimento portland e polímeros termoplásticos. Os sistemas à base

¹⁶ KAY, T. & WYATT, B. (1997) *European standards for protection and repairs. Concrete.*

¹⁷ Leia-se mais sobre a EN 1504 em MEDEIROS, M. H. F. & SELMO, S. M. S. (2001) *Desempenho de argamassas para reparos localizados em estruturas de concreto com corrosão das armaduras* 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO-REIBRAC-IBRACON, Foz do Iguaçu. Anais.

¹⁸ ANDRADE, C. (1992) *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras* Pini, São Paulo. 104p

de cimento, em sua maioria contêm aditivos com a finalidade de melhorar suas propriedades, como retração, exsudação, consistência, tempo de pega, etc.

Em relação aos aditivos químicos utilizados em sistemas à base de cimento, destacam-se os superplastificantes, plastificantes, aceleradores ou retardadores de pega, expansores, inibidores de corrosão, etc. Existe ainda uma diversidade de produtos utilizados na proteção superficial do concreto.

É importante ressaltar a importância das condições superficiais da região a ser recuperada. Não haverá vantagem alguma em utilizar um material de reparo de última geração se as condições superficiais do substrato em nada favorecer a ligação.

Os procedimentos de preparo e limpeza do substrato são tão importantes que alguns autores o consideram responsáveis por 50% ou mais do sucesso de uma recuperação ou reforço. Particularmente considera-se que um preparo e limpeza inadequados podem comprometer integralmente um reparo ou reforço, por melhor e mais adequado que sejam os materiais e os sistemas empregados. HELENE (1992).

O preparo do substrato é entendido como um conjunto de procedimentos efetuados antes da limpeza superficial e da aplicação propriamente dita dos materiais e produtos de correção, ou seja, são os tratamentos prévios da superfície dos componentes a serem recuperados.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns procedimentos citados por HELENE (1992) para preparo do substrato, tanto no caso de concreto como para o aço.

Em situações de recuperação de estruturas, é muito importante que o profissional ou equipe envolvidos tenham o conhecimento de que existem alguns fatores que afetam a durabilidade dos materiais de reparo, e interferem na compatibilidade entre o material de reparo e o substrato. Esta compatibilidade pode ser definida como o balanço das propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e

dimensionais entre o substrato e o material de reparo, que irão garantir que diante de solicitações de tensões provocadas por variação de volume, ou sob efeitos de deterioração de agentes externos, o material utilizado como reparo irá manter-se estável.

Tabela 2.2 - Alguns procedimentos de limpeza e preparo de substratos

Fonte: HELENE (1992).

Procedimento	Procedimento mais adequado para tratamento de			
	Concreto com superfície		Aço com superfície	
	seca	úmida	seca	úmida
Escarificação manual	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Disco de desbaste	aceitável	adequado	aceitável	aceitável
Escarificação mecânica	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Demolição	adequado	adequado	inadequado	inadequado
Lixamento manual	inadequado	aceitável	adequado	aceitável
Lixamento elétrico	adequado	aceitável	adequado	aceitável
Escovamento manual	adequado	aceitável	adequado	aceitável
Pistola de agulha	inadequado	inadequado	adequado	adequado
Jato de areia seco ou úmido	adequado	adequado	adequado	aceitável
Disco de corte	aceitável	adequado	adequado	adequado
Queima controlada	adequado	inadequado	inadequado	inadequado
Remoção de graxa e óleo impregnados	inadequado	adequado	inadequado	adequado
Máquina de desbaste superficial	aceitável	adequado	inadequado	inadequado

A Figura 2.8 apresenta a seqüência de interdependência executiva de fatores que afetam a durabilidade dos concretos de reparo

Figura 2.8 - Fatores que afetam a durabilidade dos concretos para reparos.

Fonte: (MORGAN, 1996).

Em situações de recuperações em estruturas do tipo concreto velho x concreto novo, como no caso desta pesquisa, a aderência entre os diferentes concretos pode ser profundamente afetada pelas diferentes retrações eventualmente apresentadas pelos dois materiais e pelo fato de existir ou não a cura.

São apresentadas a seguir considerações importantes sobre este assunto.

- **A cura e a retração do concreto**

Segundo AITCIN (2000), a retração do concreto endurecido não curado com água corresponde à soma de sua retração térmica (caso exista), da sua retração autógena e da sua retração hidráulica (ou por secagem).

É conveniente, portanto, definir estas três situações:

- a) **retração térmica:** ocorre principalmente durante o ganho de resistência (reações de hidratação) e em interações com o meio;
- b) **retração autógena:** ocorre na medida em que algumas partículas de cimento continuam a se hidratar ou até que a pressão parcial do vapor de água no interior

dos capilares caia abaixo dos 80%, como descoberto por POWERS (1947)¹⁹ – é observada com mais atenção em concretos de elevado desempenho. AİTCIN (2000);

- c) retração por secagem: ocorre com a evaporação da água no interior e na superfície do concreto (causada principalmente pela falta de cura).

O objetivo da CURA, segundo NEVILLE (1997), é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível de saturado, até que os espaços da pasta de cimento fresca, inicialmente preenchidos com água, tenham sido preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento até uma condição desejável. No caso do concreto de obras, quase sempre a cura é interrompida bem antes que tenha ocorrido a máxima hidratação possível. A inobservância a esta recomendação pode gerar retrações indesejáveis e nocivas ao concreto.

Ao se calcular a retração total de um concreto considera-se que a retração térmica é positiva quando o concreto está esfriando e negativa quando a temperatura do concreto está subindo. A retração autógena pode ser igual a zero, se o concreto é curado com água, e a retração hidráulica é igual a zero se o concreto é coberto com uma membrana impermeável, de tal forma que nenhuma das suas moléculas de água possa deixá-lo. Entretanto as retrações autógena e hidráulica não podem ser ambas iguais a zero, exceto se o concreto é sempre curado sob a água. AİTCIN (2000).

Em termos reais, a situação de uma cura perfeita (concreto sob a água) ou uma cura considerada adequada (aspersão de água na superfície por no mínimo 7 dias após a concretagem) são consideradas inexistentes. A questão de “quando parar a cura?” é muito discutida em termos de literatura e em termos práticos (projetos e canteiros de obra); seria difícil dar uma resposta precisa a tal questão, mas um bom

¹⁹ POWERS, T.C (1947) *A discussion of cement hydration in the relation to the curing of concrete*. Proceeding of the

conhecimento do modo pelo qual o cimento se hidrata como cada uma das retrações elementares se desenvolvem, ajuda em cada caso particular a escolher as condições de cura que resultarão em redução de retração quando a cura com água é interrompida.

A questão da cura é muito importante, também, quando se trata da produção de concretos de elevado desempenho. Segundo AİTCIN (2000), erra quem pensa que pelo fato do CAD possuir uma quantidade de cimento um pouco maior do que os concretos usuais, a retração apresentada seja maior. Assim como os concretos usuais, se o concreto de elevado desempenho é curado sob água tão logo a hidratação do cimento se inicie, observa-se um pequeno aumento no seu volume aparente nas fases iniciais de hidratação. Então, não serão observadas outras variações subseqüentes no volume aparente do concreto, exceto quando a relação água/aglomerante é tão baixa que o sistema de poros pode tornar-se descontínuo à medida que a hidratação prossegue. Por conseguinte, a retração do concreto é essencialmente ligada à cura, e não ao teor de cimento.

No concreto usual a retração final é essencialmente de origem térmica devido à secagem, enquanto que no CAD, uma retração severa pode se desenvolver, a saber:

- no estado plástico, devido à velocidade muito baixa de exsudação do concreto de alto desempenho. SAMMAN, MIRZA & WAFA (1996)²⁰ apud AİTCIN (2000);
- no estado endurecido, devido à auto-secagem que se segue ao desenvolvimento rápido intenso da hidratação do cimento. TAZAWA & MYAZAWA (1996)²¹ apud AİTCIN (2000);

highway, Reserch Board, 27

²⁰ SAMMAN, T.A., MIRZA, W.H. & WAFA, F.F (1996) *Plastic shrinkage of normal and high-strength concrete: a comparative study*. ACI Materials Journal, 93, 36-40.

²¹ TAZAWA, E. & MYAZAWA, S. (1996) *influence of autogenous shrinkage on cracking in high-strength concrete*, 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High performance concrete, Paris, ISBN, 2-85878-258-3.

- no estado endurecido devido aos gradientes térmicos criados pelo desenvolvimento não homogêneo da temperatura dentro da massa do concreto durante o resfriamento.

Uma das principais causas do descolamento do material de recuperação da superfície original deve-se à retração diferencial na junta de ligação, devido à diferença entre os materiais em relação ao módulo de elasticidade, e não à capacidade de aderência do material novo ao substrato.

O fator-chave para uma melhor transferência de tensões é a melhoria da qualidade da interface material de reparo/concreto velho. O mecanismo de transferência de esforços de cisalhamento pela superfície de contato é semelhante à transferência de esforços da barra de aço para o concreto, por aderência, e pode ser dividido em três parcelas:

- adesão;
- atrito;
- ação mecânica.

A Figura 2.9 ilustra a distribuição de tensões em torno de uma área reabilitada de uma estrutura de concreto utilizando materiais com diferentes módulos de elasticidade. Segundo REIS (1999), nesse caso ocorreu uma perda de aderência na junta devido a efeitos de retração, fazendo com que o material de reforço recebesse pouca ou nenhuma carga, gerando sobrecargas no substrato e prejudicando ainda mais a estrutura que necessitava ser reabilitada.

Figura 2.9 – Desvio de tensões em uma peça reforçada - Fonte: REIS (1999)

MORENO Jr. & SELMO (2001) comentam que, para que o reparo apresente um bom desempenho, é necessário que as propriedades do material de reparo e as do substrato sejam corretamente combinadas. Isso deve assegurar que o material de reparo possa resistir às tensões resultantes do carregamento das mudanças de volume da estrutura, em um meio ambiente específico sem apresentar sinais de deterioração precoce por fissuras ou destacamento do substrato.

Arelada à problemática da combinação de propriedades entre os dois diferentes materiais, está a distribuição de tensões, ou melhor, a redistribuição de tensões, levando em conta a realização de um reforço estrutural.

O projeto de reabilitação de uma estrutura de concreto armado deve ser executado de modo a atender às condições de segurança em relação aos estados limites últimos e de utilização aos critérios de durabilidade. Segundo REIS (1999), é importante a consideração dos seguintes itens:

- coeficientes de segurança;
- características mecânicas residuais;

- hipóteses de dimensionamento mais adequadas para cada situação.

De acordo com o CONCRETE REPAIR GUIDE - ACI Committee 546 (1997), existe uma diversidade de métodos de reparo/reforço de estruturas de concretos, bem como métodos de remoção do concreto deteriorado, tratamento de superfície e composição de materiais para o reparo. Caberá ao profissional responsável pelos serviços a escolha adequada do método e materiais a serem utilizados no reparo ou recuperação.

Existem também diversos métodos para avaliação da aderência de materiais de reparo, muitos destes ensaios já normalizados. Acontece que, em certas situações de avaliação, o material de reparo é posto em uma condição de teste distante da realidade, o que certamente trará problemas durante e após a recuperação da estrutura, em função de incompatibilidades, refletindo diretamente no desempenho do reparo.

CLÍMACO (1991) cita que os ensaios utilizados na avaliação da aderência devem simular um estado de tensões que represente, o melhor possível, as condições de serviço; devem fornecer baixo coeficiente de variação, sendo sensível à propriedade medida e devem possuir um procedimento de teste de simples reprodução.

Cita-se a seguir alguns ensaios para a avaliação da aderência de sistemas de reparo:

- resistência de aderência à tração direta (AFNOR/NF P 18-853)²²;
- resistência de aderência à tração na flexão;
- resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão;
- resistência de aderência ao cisalhamento direto;

- resistência de aderência ao cisalhamento na flexão (AFNOR/NF P 18-851)²³.

2.5. A utilização do concreto de elevado desempenho como material de reparo

Em situações de recuperação de estruturas de concreto, a maioria dos procedimentos adotados na ligação entre concreto novo x concreto velho, pressupõe a utilização de adesivos poliméricos criando-se uma ponte de ligação. O procedimento adotado requer a utilização de mão-de-obra qualificada e a efetividade da ligação depende também de uma avaliação prévia das condições da aplicação do material.

Com o desenvolvimento de novos materiais têm surgido várias outras possibilidades de se estabelecer e fortalecer essa ligação. Dois desses novos materiais, as sílicas ativas advindas de ligações Fe-Si e aquela extraída da casca do arroz podem proporcionar novos horizontes na resolução da problemática, visto que adicionadas em proporções adequadas na produção de concretos, podem conferir a este compósito propriedade singular sob diversos aspectos.

Associado ao uso de superplastificantes, é agora possível produzir pastas, argamassas e concretos com relação água/aglomerante muito baixa, dessa forma eles são tão impermeáveis como as mais duráveis rochas. Segundo AITCIN (2000), o uso do concreto de alto desempenho (CAD) está crescendo rapidamente em todo o mundo. A densa microestrutura do CAD além de conferir-lhe alta resistência, reduz a sua permeabilidade, o que resulta numa durabilidade mais elevada do que a do concreto usual. Entretanto o CAD não é um material à prova de erros, devendo ser curado de

²² ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION (1986) *produits ou systèmes de produits destinés aux applications superficielles sur béton durci*. AFNOR

²³ ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION (1992) *produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci*. AFNOR.

forma adequada para apresentar o desempenho esperado, além de exigir procedimentos de ensaios especiais.

A durabilidade do concreto, que foi correlacionada com a resistência do concreto por tanto tempo, não pode mais ser associada a ela, devido ao progresso da tecnologia do cimento e do concreto, acontecido ao longo das últimas décadas. A durabilidade do concreto está ainda associada com a relação água/aglomerante, como sempre tem estado, pois a relação água/aglomerante representa o parâmetro real que reflete a compactidade do concreto e a sua permeabilidade aos agentes agressivos.

Também, a utilização de adições, como a sílica ativa de diversas fontes tem proporcionado avanços significativos nesse sentido.

Conforme MELO (2000), avaliando o refinamento de poros em pastas de cimento Portland, com e sem a utilização de superplastificante e sílica ativa, concluiu que ocorre um grande refinamento de poros, com diminuição de volume, conforme apresentado nas figuras 2.10 e 2.11.

Figura 2.10 – Resultado da porosidade por intrusão de mercúrio, em pastas de cimento Portland, com relação $a/c = 0,45$, sob regime de cura normal - Fontes: MELO (2000) & LIBORIO & MELO (1996) - Proc. FAPESP 96-00357-9

Figura 2.11 – Resultado da porosidade por intrusão de mercúrio, em pastas de cimento Portland, com relação $a/agl = 0,45$, com adição de 10% de sílica ativa e 1% de superplastificante, sob regime de cura normal - Fontes: MELO (2000) & LIBORIO & MELO (1996) - Proc. FAPESP 96-00357-9

Com isso, uma das principais características do concreto de elevado desempenho comparado ao concreto convencional é a microestrutura da pasta presente mais uniforme e homogênea. Quando o cimento Portland é combinado com partículas ultrafinas de sílica amorfa, com baixa relação água/cimento (a/c), a microestrutura de tais sistemas consiste principalmente de hidratos pouco cristalinos, formando uma matriz mais densa de baixa porosidade, isto é, uma alta compacidade, promovendo inclusive uma ausência da exsudação interna, na interface pasta-agregado. LIBORIO (1999).

A questão abordada acima por LIBORIO (1999) é um ponto muito importante sob o ponto de vista da recuperação de estruturas de concreto. A necessidade de pouca ou nenhuma porosidade do material de reparo é evidente, visto que a área a ser preenchida ou ligada estará mais vulnerável a ataques.

Na Figura 2.12 apresenta-se uma micrografia, retratando a porosidade típica em amostras de concreto. Esta característica microestrutural pode ser reduzida drasticamente com a utilização de adições e aditivos, como no caso do concreto de elevado desempenho.

Figura 2.12 - Porosidade capilar em concreto - Fonte: MELO (2000)

Atualmente, a existência de uma normalização Nacional facilita a escolha de um cimento adequado para fins específicos. Cada cimento possui características particulares, como: adições, composição química, finura, calor de hidratação, etc.

No caso de reparos em estruturas de concreto, a adequada composição de materiais e o amplo conhecimento sobre os mesmos podem resultar na confecção de um concreto de elevado desempenho, apresentando não só uma expectativa muito otimista no que diz respeito à durabilidade do reparo frente a agentes agressivos, mas também, de acordo com as condições do substrato, uma condição de aderência satisfatória.

Segundo AMARAL FILHO apud REIS (1999), o uso de concretos de alto desempenho está tornando obsoleto o uso de reparos feitos à base de resinas epóxi, pois sobre a superfície do substrato limpa, rugosa e úmida, consegue-se uma aderência de até 100%.

A limitação da utilização deste concreto diferenciado não está apenas na construção de obras atuais e ditas modernas, do ponto de vista construtivo, os horizontes de utilização são vastos. Na recuperação de estruturas como vertedouros, bacias de dissipação, represas, e outros que apresentem desgaste superficial causado pelo impacto e movimentação de águas, atualmente, é quase que obrigatório o uso do concreto de elevado desempenho.

Em outras estruturas como pontes, piers e decks de zona portuárias, onde há variação de marés, ataques de íons cloretos, íons sulfato, desgaste superficial, torna-se também necessário à utilização de um material que corresponda às expectativas quanto à segurança e durabilidade, sob este aspecto, o concreto de elevado desempenho apresenta uma boa adequação.

REIS (1999) cita ainda que no exterior, o concreto de elevado desempenho tem sido utilizado também em recuperações de pavimentos e túneis.

2.6. Considerações a respeito da zona de interface em concretos

De uma maneira simples, o concreto é geralmente modelado como um material composto de duas fases, normalmente o agregado e a pasta de cimento. Entretanto, para melhor compreender e controlar o comportamento da resistência e a propriedade de transporte dos fluidos (permeabilidade), é interessante entender o concreto como um material composto de três fases. A terceira fase é a região interfacial entre a pasta de cimento e as partículas de agregado graúdo. SILVA (2000).

MEHTA & MONTEIRO (1994) fazem os seguintes questionamentos:

- porque o concreto é frágil sob tração, porém dúctil em compressão?

- porque os constituintes do concreto ensaiados separadamente à compressão uniaxial permanecem elásticos, até a ruptura, enquanto que o concreto mostra um comportamento elasto-plástico?
- porque a permeabilidade de um concreto, mesmo contendo um agregado miúdo denso será maior por uma ordem de magnitude do que a permeabilidade de uma pasta de cimento?

A resposta a essas e muitas outras questões sobre o comportamento do concreto encontra-se na zona de transição. Embora constituída dos mesmos elementos que a pasta, a estrutura e as propriedades da zona de transição diferem das da matriz da pasta. Conseqüentemente, ratifica-se a necessidade em tratar a zona de transição como uma fase distinta da estrutura do concreto.

Os primeiros estudos relacionados à zona de interface entre pasta e agregados foram realizados por Jacques Farran²⁴, em 1956, observando características distintas nesta região em vista da diferente microestrutura apresentada em relação à matriz.

Esta zona representa a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta de cimento, sendo uma camada delgada, tipicamente de 10µm a 50µm de espessura, é geralmente a parte mais fraca em comparação com os outros dois componentes principais do concreto, e conseqüentemente, exerce uma forte influência no seu comportamento mecânico.

Nas primeiras idades, especialmente quando ocorreu exsudação interna considerável (parte da água de amassamento se concentra ao redor dos agregados), o tamanho e o volume de vazios da zona de transição são maiores do que no interior da pasta ou da argamassa. O tamanho e a concentração dos compostos cristalinos, tais

²⁴ FARRAN, J. (1956) *Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés* Revue des matériaux des constructions, (490) 491-92 apud GENGIYNG, L., HUICAI, X., GUANGJING, X. (2001) *Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders* Cement & Concrete composites, nº 23.

como o hidróxido de Cálcio (CH) e a etringita (AFt) são também maiores na zona de transição. As fissuras formam-se facilmente nesta região. Tais efeitos são responsáveis pela resistência desta zona, em geral mais baixa do que a da matriz de pasta no concreto. A zona de transição, geralmente o “elo mais fraco” da corrente, é considerada a fase de resistência limite do concreto. É devido à presença desta região que o concreto rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais. MEHTA & MONTEIRO (1994).

A Figura 2.13 apresenta uma microscopia da zona de transição em um concreto de baixa resistência (17,5 MPa). A fase agregado (AG) está bem distinta dos cristais de hidróxido de cálcio. É justamente nesta região que se dá a ruptura do concreto.

Figura 2.13 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da zona de transição em concreto de baixa resistência. Fonte: AÏTCIN (2000)

Segundo SILVA (2000), na zona de transição, os cristais de hidróxido de cálcio estão orientados de modo que seus planos basais de clivagem sejam, aproximadamente perpendiculares à superfície do agregado.

A utilização de aditivos químicos (superplastificantes) e adições minerais (sílicas ativas) contribuem significativamente em alterações microestruturais benéficas no interior do concreto, tanto em termos de resistência quanto à durabilidade.

Estudos realizados por VIVEKANADAM & PATNAYKUNY (1997), mostram que a espessura da zona de transição entre agregados e a pasta, em concretos de elevado desempenho foi verificada em torno $15\mu\text{m}$, enquanto que em concretos convencionais a espessura da zona de transição pode chegar até $50\mu\text{m}$.

Essa característica é comprovada através da Figura 2.14, onde se percebe a presença de C-S-H denso em contato com o agregado, e ausência de uma zona intermediária.

Figura 2.14 - MEV - interface pasta de cimento/agregado em um concreto de elevado desempenho. Fonte: AITCIN (2000)

Para melhor ilustrar o efeito de adições de sílicas ativas em concretos, apresenta-se na Figura 2.15 o esquema de atuação dessas partículas na interface pasta-agregado.

Figura 2.15 - Atuação da sílica ativa na interface agregado-pasta dos concretos.

FONTE: ALMEIDA (1996) apud SILVA (2000)

Situação **A**: concreto fresco sem sílica ativa, com grande espaço preenchido pela água em torno do agregado (agg), devido à exsudação e ao empacotamento deficiente dos grãos de cimento Portland (pc) na interface.

Situação **B**: Zona de transição do mesmo sistema em estágio de maior maturidade, mostrando o preenchimento com hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Nota-se ainda, a presença de vazios alguns dos quais preenchidos com materiais aciculares, provavelmente etringita.

Situação **C**: concreto fresco com sílica ativa, no caso da Figura acima, representada por SF, cujas partículas preenchem o espaço em torno dos agregados, ocupado na fase A pela água.

Situação **D**: em um estágio de maior de maturidade, percebe-se uma zona de transição bem menos porosa, obtida com o sistema C.

O fato apresentado acima confere ao concreto de elevado desempenho uma outra vantagem em relação ao concreto convencional, já que, se utilizado como material de reparo, irá apresentar um melhor desempenho quanto à durabilidade e resistência, muitas vezes superior àquele de um concreto sem os materiais suplementares utilizados, garantindo assim, um acréscimo na durabilidade da área reparada.

2.7. Considerações a respeito do estudo de dosagem e dos materiais utilizados

A dosagem do concreto pode ser entendida como sendo o proporcionamento adequado dos materiais constituintes – cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água, e eventualmente aditivos e adições.

O processo de dosagem é bastante abrangente, exigindo amplo conhecimento das propriedades dos concretos tanto no estado fresco quando no estado endurecido.

Segundo HELENE & TERZIAN (1992), admite-se que um concreto é econômico quando consegue atender às exigências de projeto, condições de exposição e operação, técnicas de execução com o mínimo consumo de cimento, uma vez que, em geral os cimentos têm custos várias vezes superiores ao dos agregados e água.

A busca do consumo mínimo de cimento pode não ser, em alguns casos, o único fator de barateamento do concreto, como no emprego de aditivos, por exemplo, pois alguns têm preço equivalente ao do cimento, por unidade de volume de concreto.

Em geral, em se tratando de agregados, é sempre preferível e mais econômico empregar agregados graúdos de maior dimensão característica possível. Isso também pode não ser mais econômico onde haja dificuldade de obtenção de agregados

gráudos, como por exemplo, na Amazônia. Neste caso pode ser conveniente aumentar a proporção de areia e cimento a fim de obter-se assim um concreto mais econômico.

HELENE & TERZIAN (1992)

A compatibilidade entre as características ótimas do concreto fresco para uma dada situação e aquelas exigidas não é facilmente obtida. Na Tabela 2.3, HELENE & TERZIAN (1992) enfatizam a necessidade entre o ótimo e o possível, uma vez que parâmetros importantes evoluem em sentidos opostos, segundo se pretenda satisfazer as exigências para concreto fresco ou para concreto endurecido.

Tabela 2.3 - Sentido da evolução de diversos parâmetros da dosagem em função da trabalhabilidade, da resistência mecânica e do custo.

Fonte: HELENE & TERZIAN (1992)

Parâmetros de dosagem do concreto	Concreto fresco para uma boa trabalhabilidade	Concreto endurecido para uma boa resistência	Para redução do custo
Granulométrica do agregado miúdo	de preferência fina	de preferência grossa	a maior possível
Relação gráudo/miúdo	a diminuir	a aumentar	a aumentar
Consumo de água	a aumentar até um certo ponto	a diminuir	a disponível
Granulometria total	Preferível contínua	preferível descontínua	a disponível
Dimensão máxima característica do agregado	de preferência média	de preferência pequena	a maior possível
Geometria do grão do agregado	de preferência esférica (seixo)	de preferência irregular (brita)	esférica (seixo)

A seguir apresentam-se algumas considerações a respeito dos materiais utilizados nesta pesquisa. São apresentadas também informações relativas à produção e influência de cada um dos materiais aqui utilizados na durabilidade, resistência e comportamentos gerais do concreto, nos estados fresco e endurecido.

2.7.1. Cimento Portland

Cimento, na acepção da palavra, pode ser considerado como todo material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. NEVILLE (1997).

O composto oriundo da mistura de um aglomerante hidráulico e água é chamado de pasta, enquanto que a mistura resultante de pasta e areia recebe o nome de argamassa.

A fabricação do cimento Portland comporta seis operações principais:

- extração da matéria-prima;
- britagem;
- moedura e mistura;
- queima;
- moedura do clínquer;
- expedição.

A produção mundial de cimento no ano de 2000²⁵ foi de 1,56 bilhões de toneladas; cerca de um terço desse total é produzido na China. O Brasil²⁶ ocupa a 6ª posição (2,30%) na produção de cimento no mundo, ficando atrás apenas da China (33,84%), Índia (5,58%), Estados Unidos (5,42%), Japão (4,55%) e Coreia do Sul (2,94%). A China destaca-se como maior produtor mundial com uma produção de 576.000t/ano.

No Brasil, a região Sudeste concentra 53,51% da produção nacional, destacando-se o Estado de Minas Gerais (22,8%), seguida pelas regiões Nordeste

²⁵ Fonte: World Business Council for Sustainable Development 2000. Leia-se mais:

www.wbcsceement.org/concrete/misc.asp

²⁶ Fonte: DNPM – DIRIN, MDIC, SNIC, Sindiscon, Mineral commodity Summaries 2001. Leia-se mais:

www.dnppm.gov.br/suma2001/cimento_revisado.doc

(18,56%), Sul (14,97%), Centro-Oeste (10,02%) e Norte (2,95%).

Em termos nacionais, o consumo aparente de cimento no ano de 2000 registrou um decréscimo de 3,58% em relação ao ano anterior, passando de 40.637.199t para 39.179.754t. O consumo de cimento no Brasil está na faixa de 267kg/habitante/ano, bem abaixo da Espanha (681kg/hab), Japão (621kg/hab), Itália (586kg/hab), Alemanha (419kg/hab), China (404kg/hab) e Estados Unidos (359/kg/hab). Em 2000, grande parte da produção brasileira foi consumida nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Bahia, Paraná, Santa Catarina e Pernambuco.

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico constituído em sua maior parte de silicatos e aluminatos, é o produto resultante da moagem do clínquer, obtido pela clinquerização da mistura de proporções adequadas de calcário e argila.

O clínquer é constituído pela mistura das seguintes fases:

- fase silicato: alita (C_3S) e belita (C_2S);
- fase intersticial: fase aluminato (C_3A) e a fase ferrita (C_4AF).

Na Tabela 2.4 apresentam-se as propriedades dos quatro principais componentes do cimento.

Tabela 2.4 - Propriedades dos quatro principais componentes do cimento.

Fonte: LIBORIO (1999)

Propriedades	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Resistência em pequenas idades	Boa	Fraca	Boa	Fraca
Resistência em idades posteriores	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Velocidade de reação com a água (hidratação)	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Quantidade de calor gerado na hidratação	Média	Pequena	Grande	Média
Resistência a águas agressivas	Média	Boa	Fraca	Fraca

De acordo com MELO (2000), a velocidade de hidratação para cada composto do clínquer é diferente e sua reatividade tem aproximadamente a seguinte ordem: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$. Vários fatores afetam essas reatividades, dentre eles: fabricação (tempo e temperatura do forno), finura, composição de fase líquida, temperatura de cura, presença de aditivos, etc.

A formação dessas 4 fases ocorre no interior de um forno de produção de cimento. A Tabela 2.5 apresenta informações sobre as transformações de fase que ocorrem no interior do forno.

Tabela 2.5 - Transformações de fases que ocorrem em um forno de produção de cimento. Fonte: MELO, A.B. & LIBORIO, J.B.L (1998)

Zona do forno	Temperatura	Reações
Secagem	até 100°C	perda de umidade
Pré-aquecimento	500°C - 600°C	Perda de água de constituição da argila
Calcinação	600°C - 700°C	Início de reação da argila com o calcário → precipitação C_2S
	900°C	Decomposição do calcário
	1200°C	Início de formação do $C_3A + C_4AF$ β' - C_2S máximo
Clinkerização	1400°C - 1500°C	A fase líquida atinge 20-30%; Sólido: βC_2S Formação C_3S (CaO_{livre})

Na moagem do clínquer, adiciona-se um teor mínimo de sulfato de cálcio para controlar o tempo de pega, ou seja, o tempo de início das reações do aglomerante com a água.

2.7.1.1. Hidratação do cimento Portland

LE CHATELIER (1904) foi o primeiro pesquisador a propor o mecanismo pelo qual a pasta de cimento se hidrata, havendo primeiramente o fenômeno químico de hidratação dos compostos, em seguida o fenômeno físico de cristalização dos hidratos, e logo após, o entrelaçamento de fibras cristalinas.

O mecanismo da hidratação através de dissolução-precipitação envolve a dissolução dos compostos anidros produzindo uma solução e, devido à sua baixa solubilidade, em uma eventual precipitação de hidratos provenientes da solução supersaturada. Em geral, segundo MELO (2000), a duração desta fase corresponde a 30% da hidratação, entre 3 horas e 24 horas.

No instante em que a mobilidade iônica torna-se restrita, a hidratação da partícula residual do cimento ocorre por reação no estado sólido ou topoquímica. Estas reações ocorrem diretamente na superfície do cimento anidro sem que entre em solução, fenômeno conhecido como deslocamento de interface. Esta etapa independe da temperatura de cura. MELO (2000).

É entendido que a pasta de cimento hidratado contida em concreto convencional é constituída das seguintes fases sólida C-S-H, etringita ou trissulfoaluminato de cálcio (AF_t), monosulfoaluminato de cálcio (AF_m) e hidróxido de cálcio ou portlandita (CH). Deve-se ressaltar que as reações de hidratação do cimento Portland são influenciadas pela finura do mesmo, pela temperatura na qual se desenvolvem as reações e pela composição do clínquer utilizado. LIBORIO (1999).

Levando-se em conta que o cimento é composto de uma mistura heterogênea de vários compostos, o processo de hidratação consiste de reações simultâneas ocorrendo entre os compostos anidro e a água, porém os compostos não hidratam com

mesma velocidade. PAULON (1991), cita que os aluminatos, por exemplo, hidratam bem mais cedo do que os silicatos. A perda de consistência e a pega da pasta de cimento estão diretamente ligadas às reações envolvendo os aluminatos. Os silicatos por sua vez, têm um papel nas características do endurecimento da pasta.

O mecanismo de hidratação do cimento Portland pode ser representado como indicado na Figura 2.16. É muito importante atentar para o fato de que alterações nesse processo, por exemplo, um processo inadequado de cura, poderá significar um desenvolvimento inadequado da microestrutura.

Figura 2.16 - Mecanismo de hidratação do cimento Portland.

Fonte: SCRIVENER (1984)²⁷ apud TAYLOR (1997)

Na figura 2.16, idealizada por SCRIVENER (1984), pode ser observado:

a) seção de um grão polifásico (escala da fase intersticial exagerada);

²⁷ SCRIVENER, K.L. (1984) *PhD Thesis* University of London

- b) a fase aluminato tricálcico (C_3A) inicia a sua reação com o sulfato em solução. Forma-se um gel amorfo na superfície e se inicia a formação de bastões curtos de etringita (AFt) na interface gel-solução;
- c) reação da Alita (C_3S) - conformação de camada externa de Silicato de Cálcio hidratado (C-S-H) sobre os bastões de AFt. Forma-se um vazio de $1\mu m$ entre a superfície do grão e a camada externa (grão de Hadley);
- d) hidratação secundária de C_3A produzindo bastões longos de AFt. O C-S-H interno começa a se formar internamente pela continuação de hidratação do C_3S ;
- e) C_3A reage com AFt da camada interna formando placas hexagonais de AFm. A formação do produto interno reduz a separação entre o grão anidro e a camada externa;
- f) formou-se C-S-H suficiente para preencher o espaço vazio ao redor do grão. A camada externa torna-se fibrosa.

A dimensão da partícula de cimento Portland é um importante fator durante a hidratação, pois na medida em que essa dimensão aumenta, aumenta também o tempo para que essa partícula hidrate. A Tabela 2.6 apresenta informações referentes a esta relação.

Tabela 2.6 - Relação entre a dimensão das partículas de cimento Portland e o tempo de hidratação - Fonte (TAYLOR, 1997).

Dimensão da partícula (μm)	Tempo de hidratação (dias)
0,43 a 0,47	1
1,7 a 2,6	7
3,5 a 5,4	28
6,1 a 8,9	150
> 45	Difícil
> 75	Nunca se hidrata

As reações dos constituintes do cimento Portland com a água são exotérmicas, em grandeza que depende do componente e quantidade. Tem sido relatado que o calor de hidratação típico das fases componentes foi verificado em: $C_3S = 120\text{cal/g}$, $C_2S = 60\text{cal/g}$, $C_3A = 320\text{cal/g}$, $C_4AF = 100\text{cal/g}$.

As principais características que se observa na liberação do calor de hidratação do cimento são as seguintes:

- a) período de pré-indução: hidratação do silicato tricálcico e molhagem das partículas finas - pequeno desenvolvimento de calor nos primeiros minutos;
- b) período de indução ou dormente: precedência da reação química de hidratação - não há desenvolvimento de calor;
- c) aceleração da hidratação: rápido desenvolvimento de calor - início de pega;
- d) difusão controlada da hidratação - desenvolvimento lento - durante semanas, meses e anos.

Nos ensaios 01, 02 e 04 utilizou-se o cimento Portland composto CP II F 32 (NBR 11578), a escolha deste cimento foi feita no intuito de utilizar o mesmo cimento utilizado na maioria das usinas de concreto da região da cidade de São Carlos - SP. Este é o único tipo de cimento fornecido a granel na região.

2.7.1.2. Adições presentes em cimentos Portland

De acordo com a ABNT, diversos cimentos produzidos no País apresentam adições em sua composição. As propriedades e características fornecidas ao cimento devido a essas adições são interessantes, tanto do ponto de vista econômico, quanto de desempenho e durabilidade.

A utilização de adições em cimentos Portland surgiu com necessidades específicas advindas de cada caso de utilização; logo, as variações na composição

química dos cimentos foram realizadas no sentido de adequar este material às diversas composições.

Apresenta-se a seguir, na Tabela 2.7, a classificação de cimentos normalizados pela ABNT, no País, fazendo-se uma correspondência com os cimentos normatizados de acordo com a ASTM, normatização Norte Americana.

Tabela 2.7 - Correspondência entre cimentos (ABNT x ASTM)

Cimento	Norma	Cimento	Norma
Portland Comum - CPI	NBR – 5732	<i>Portland I / I</i>	ASTM C 150
Portland Comum com Adição CPI-S		---	---
Portland Composto com Escória - CP II E	NBR – 11578	<i>Slag-Modified Portland/ I(SM)</i>	ASTM C 595
Portland Composto com Pozolana - CP II Z		<i>Pozzolan-Modified Portland /I(MP)</i>	ASTM C 595
Portland Composto com Filler CP II F		---	---
Portland de Alto Forno - CP III	NBR – 5735	<i>Portland Blastfurnace Slag /IS</i>	ASTM C595
Portland Pozzolânico - CP IV	NBR – 5736	<i>Portland Pozzolan/IP</i>	ASTM C 595
Portland de Alta Resistência Inicial - CP V ARI	NBR – 5733	<i>Portland with high early strength /III</i>	ASTM C 150
Portland Resistente a Sulfatos CP I RS; CP I-S RS; CP II-E RS; CP II-Z RS; CP II-F RS; CP III RS; CP IV RS	NBR – 5737	<i>Pozzolan- Modified Portland Moderate sulphate resistance I (PM) MS</i>	ASTM C 595

Como visto na tabela 2.7, durante a moagem do clínquer permite-se adicionar materiais pozolânicos: cinzas volantes, sílica ativa, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, em teores adequados e especificados.

O cimento CP II F 32, que foi utilizado nesta pesquisa nos ensaios 01, 02 e 04, contém uma quantidade de filler calcário em sua composição. A adição deste material carbonático ao clínquer na composição de alguns cimentos Portland oferece ao

fabricante vantagens econômicas do ponto de vista comercial. além disso, segundo a literatura, esta adição cumpre a missão de combater a formação de AFtS (etringita secundária).

Segundo KUZEL (1996)²⁸, a presença de carbonato de cálcio reativo nos cimentos evita a formação de AFm, nas idades iniciais, e a conseqüente formação da AFt secundária, como um primeiro passo da carbonatação do AFm nas idades mais avançadas, o que foi comprovado por MELO (2000).

Observações importantes serão feitas a respeito das adições de escória de alto-forno, em vista de que um dos cimentos utilizados durante o estudo experimental (CP V ARI RS) apresenta em sua composição adições deste material (em torno de 30%).

Outras considerações serão feitas acerca da utilização de sílica ativa (Fe-Si)²⁹ na composição de concretos, também desenvolvidos ao longo do estudo experimental.

• Escória de alto-forno

A escória ou escória de alto-forno finamente granulada, como ela deveria ser adequadamente chamada, segundo AITCIN (2000), é o subproduto da manufatura do ferro-gusa em um alto forno. Todas as impurezas contidas no minério de ferro e no coque passam para a escória..

De acordo com a ABNT (NBR 11.172/89), a escória é definida como um material vítreo que possui propriedades hidráulicas latentes, ou seja, quando finamente moída e misturada com água é capaz de reagir e endurecer, sendo que essa reação ocorre após algum tempo. Trata-se de adição mineral com propriedades cimentantes e

²⁸ KUZEL, H. (1996) apud MELO (2000) *Initial hydration reactions and mechanisms of delayed ettringite formation in Portland cement* Cement and Concrete Composites, 18. Pg 195-203.

²⁹ Existem cimentos comercializados com adições de sílica ativa desde a fábrica, porém nesta pesquisa a sílica ativa foi adicionada no instante de mistura dos materiais na betoneira.

consiste essencialmente de partículas finas de silicato vítreo, modificado consideravelmente pela presença de grandes quantidades de íons cálcio, magnésio e alumínio. MELO (2000)

Na presente pesquisa, nas composições das pastas de cimento e dos concretos de reparo, utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial - resistente a sulfatos (CP V ARI RS - NBR 5733/NBR 5737); embora contemplado pela ABNT como norma separada do cimento comum, é na verdade um tipo particular deste, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências iniciais já nos primeiros dias de aplicação.

A composição do cimento CP V ARI RS apresenta uma porcentagem de escória de alto forno em torno de 30%, essa porcentagem é adicionada em substituição à parte do clínquer.

De acordo com MELO (2000), o mecanismo de hidratação da escória presente no cimento utilizado ocorre de modo semelhante ao do cimento sem adições, ou seja, por dissolução-precipitação nas reações iniciais e por difusão iônica no prosseguimento.

SARKAR et al. (1990) apud MELO (2000) cita que a partícula de escória ativada pelo cimento Portland mostra sinais de início de reação aos 7 dias de hidratação. O C-S-H produzido por esta reação (entre CH e escória) tem característica de cristal curto acircular. Há também sinais de reação na borda do grão de escória que se torna mais clara com o progresso da hidratação, e na superfície da partícula, pela presença de cobertura esponjosa.

O consumo de hidróxido de cálcio na reação com a escória, implica em um aumento significativo na durabilidade de concretos compostos a partir destes cimentos frente a ambientes sulfatados e ácidos.

Segundo SCRIVENER & LEWIS (1997)³⁰, matrizes de cimento Portland com adições de escória de alto forno parecem não expandir, mesmo quando há aumento significativo na quantidade de sulfato no cimento.

MEHTA & MONTEIRO (1994) citam que em cimentos com alto teor de escória a quantidade de hidróxido de cálcio é tão baixa que mesmo escórias com grande quantidade de alumina reativa podem ser empregadas para produzir cimentos resistentes a sulfatos.

Os vazios deixados pela partícula de escória completamente reagida resultam em uma fase muito porosa, embora não contribuam para a permeabilidade da pasta, porque esses poros são isolados uns dos outros.

LIBORIO et al. (1998) afirmam que para o cimento Portland CP V ARI RS, a presença da escória de alto forno demonstrou uma diferença acentuada na evolução da resistência à compressão comparativamente ao CP V ARI Plus (cimento sem escória). A reação da escória é mais lenta e é mais destacada entre 28 dias e 91 dias.

De acordo com a literatura há modificações nos produtos gerados com cimento Portland na presença de escória. Por exemplo, a morfologia fibrilar da camada de C-S-H (mais rico em íons de Mg e Al e menos Ca) modifica-se com a presença da escória, sendo gradualmente substituída pela morfologia de folhas finas. Esta última mais efetiva no preenchimento dos espaços vazios sem deixar grandes poros. MELO (2000).

³⁰ SCRIVENER, K. L. & LEWIS, M (1997) apud MELO (2000) *A Microstructure and a microanalytical study of heat cured mortars and delayed ettringite formation* Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol.4. Gothenburg, Sweden, June 2-6.

- **Sílica ativa**

A sílica ativa é um produto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício. O silício e suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso, onde o quartzo é reduzido na presença de carvão (e ferro durante a produção das ligas de Fe-Si). A sílica ativa produzida durante a fabricação do silício metálico geralmente contém mais de 90% de SiO_2 . A sílica ativa produzida durante a fabricação de uma liga de 75% de Fe-Si possui teor superior a 85%.

Há cerca de 40 anos este material vem sendo considerado uma pozolana de alta reatividade com os produtos da hidratação do cimento, atuando de duas maneiras no concreto:

- efeito físico - causando um efeito de preenchimento de vazios no concreto, o efeito filler, que produz um significativo aumento na coesão e na compacidade tanto na fase pasta quanto na ligação agregado-pasta;
- efeito químico - as partículas de sílica reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, um produto da hidratação do cimento Portland, que é considerado frágil e solúvel em presença de umidade, dando origem a silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), produtos estes resistentes e bem menos solúveis, porém morfologicamente diferentes daquele C-S-H produzido na hidratação do cimento Portland.

Na presença de umidade, a sílica reage com o hidróxido de Cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzido durante a reação de hidratação do cimento Portland formando produtos com capacidades cimentantes. Contribuem para a atividade pozolânica a área específica, a natureza amorfa da estrutura, o teor de pureza e a baixa granulometria, portanto, nem todas as sílicas ativas disponíveis têm a mesma eficiência. A introdução de uma adição (> 8%) de sílica ativa de boa qualidade traz de imediato um acréscimo apreciável na

coesão da pasta, evitando sobremaneira o fenômeno da exsudação, mormente aquela interna.

MELO (2000) cita que a sílica ativa reage muito mais rápido se comparada à escória. Com 1 dia de hidratação, é comum observar partículas de sílica sem sinais de reação em presença de outras já com algum sinal de reação iniciada. Aos 7 dias, a dissolução da sílica ativa é tão avançada que as partículas começam a perder sua morfologia esférica, formando um aglomerado de gel rico em sílica.

Dados experimentais³¹ mostram que até a idade de 7 dias, a influência da sílica ativa na resistência do concreto pode ser atribuída principalmente ao efeito físico, devido ao tamanho da partícula. Entre 7 e 28 dias, ambos os efeitos, o físico e o pozolânico, tornam-se importantes.

A área específica superficial é um importante parâmetro para a classificação dos pós, já que pode indicar diretamente a reatividade de um determinado material. Para determinar-se a área específica das partículas de sílica ativa, atualmente o método mais utilizado é o BET (BRUNAUER, EMMETT & TELLER) .

Este método consiste em medir a quantidade de nitrogênio adsorvida pela superfície das partículas do material (pós muito finos). O gás é adsorvido pelas partículas do material e a medição fornece resultados consistentes sobre a extensão de aglomeração das partículas.

De acordo com PAPWORTH (1997), os resultados indicam que os valores típicos de área superficial das sílicas ativas (Fe-Si) analisadas variam em torno de $20\text{m}^2/\text{g}$. Este valor indica a presença de partículas de dimensão média de $0,15\mu\text{m}$, assumindo que as partículas de SA são esféricas. Esta técnica é útil para análise rotineira de tamanho de partícula.

A Figura 2.17 apresenta uma microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicando a distribuição das partículas de sílica ativa.

Figura 2.17 - MEV indicando a distribuição das partículas de sílica ativa de Fe-Si.
Fonte: (PAPWORTH, 1997).

A produção de concretos estruturais com a utilização de sílicas ativas envolveria um consumo elevado de água, devido à finura dos dois materiais, em vista disso, a mistura necessita de outros ingredientes para seu processamento, de modo que a quantidade de água seja reduzida a valores mínimos. Para que esta redução ocorra é necessária à utilização de aditivos.

Os aditivos redutores de água, os superplastificantes, carregam as partículas de cimento Portland com carga elétrica negativa ocasionando uma repulsão entre elas, tornando o material menos viscoso. Tais aditivos serão abordados mais detalhadamente no item seguinte

Esse fenômeno proporciona uma redução de até 30% do total de água necessária para a confecção do concreto, permitindo processamentos com relação água/aglomerante em teores menores que 30%.

³¹ DETWILER, R.J & MEHTA, P.K (1989) *Chemical and physical affects of silica fume on the mechanical behavior of concrete* ACI Materials Journal, V. 86 nº 6.

Com a introdução de sílicas ativas de qualidade, produz-se uma matriz com características que proporcionam uma diminuição dos poros e suas interligações, tornando após o endurecimento, um material menos poroso.

Também, a associação da sílica com outras adições, (produzindo composições binárias e ternárias), promove uma significativa melhoria na matriz, verificando-se grandes alterações na distribuição dos poros para os cimentos que contém escória na sua composição quando comparada com cimento sem adição de escória.

LIBORIO et al. (1998) fazem uma importante observação, que se relaciona diretamente com a composição de materiais utilizados nos concretos da presente pesquisa: “A sinergia das duas adições (escória de alto forno e sílica ativa) é importante porque elas diminuem drasticamente a quantidade de CH (hidróxido de cálcio) ou afetam a morfologia dos seus cristais no concreto e isto deve ter tanta importância no desenvolvimento de resistência do concreto, quanto tem a maior formação de C-S-H resultante da própria reação pozolânica”.

Os papéis dos dois materiais cimentícios suplementares, sílica ativa e escória, são complementares no sentido de que a sílica ativa contribui para o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais, considerando que a progressiva hidratação da escória, bem mais lenta, contribui para a resistência nas idades mais avançadas. Existem também dados que confirmam o efeito das duas adições na redução do tamanho e continuidade dos poros.

Ainda citando LIBORIO et al. (1998), para o cimento Portland CP V ARI RS, a presença da escória de alto forno demonstrou uma diferença acentuada na evolução da resistência à compressão comparativamente ao CP V ARI Plus (cimento sem escória). A reação da escória é mais lenta, e é mais destacada entre 28 dias e 91 dias.

Um outro aspecto relativo à sílica ativa é que, sua influência na microestrutura de todas as matrizes de cimento resulta num aumento no volume de poros gel e diminuição no volume de poros capilares, ou seja, num acentuado refinamento dos poros, além da redução na porosidade total, influenciando de forma determinante na redução da permeabilidade e por associação uma maior durabilidade do concreto, visto que restringe o transporte de massas, como os movimentos de líquidos e gases para o seu interior.

De outra maneira, uma pasta assim constituída, produz uma resistência à abrasão de até 4 vezes maior, quando comparada às pastas convencionais, constituídas pelos cimentos Portland com altos teores de escória (destinados às obras que requerem resistência aos sulfatos e baixo calor de hidratação, por exemplo, as galerias de esgoto doméstico, instalações industriais, barragens, etc) e, até 3 vezes com aqueles cimentos Portland comum.

A permeabilidade dos concretos de obras convencionais (edifícios projetados com resistência característica de 18MPa) apresenta um coeficiente de permeabilidade em torno de 7×10^{-11} m/s, enquanto que um bom concreto projetado com sílica ativa e aditivo superplastificante poderia apresentar uma resistência da ordem de 60MPa e coeficiente de permeabilidade de 3×10^{-13} m/s, isto é, uma redução de em torno de 240 vezes, podendo, em outros casos, apresentar uma redução de até 700 vezes.

Um concreto composto com 10% de sílica ativa proporciona uma redução de 5 vezes na permeabilidade, comparado com o mesmo concreto, com adição de 5% de sílica ativa, considerando-se ambos com uma relação água/cimento = 0,6kg/kg.

No concreto, a corrosão do aço se dá em meio aquoso (caráter eletroquímico), ocorrendo uma diferença de potencial elétrico entre dois metais ou entre diferentes

partes do metal. Essa corrosão pode ser afetada pela presença eventual de agentes agressivos (Cl^- e SO_4^{2-}).

Nos concretos com sílica ativa (10%), a difusão de cloretos, é diminuída em até 6 vezes e, a resistividade do concreto é aumentada em 5 vezes, permitindo assim um excelente comportamento em meios ambientes marinhos. Além disso, pela própria característica pozolânica, a resistência ao sulfato praticamente é negligenciável na maioria das aplicações que requeiram o realce desse parâmetro.

A importância da sílica ativa na engenharia civil é tão grande atualmente, que se torna difícil imaginar a realização de obras com concretos de elevado desempenho, recuperação de estruturas ou concretos duráveis, sem a inclusão das sílicas ativas em adição (ou substituição) ao cimento no estudo do projeto.

2.7.2. Aditivos

De acordo com a NBR - 11768/EB - 1763/92, os aditivos são produtos empregados para modificar as propriedades dos concretos e argamassas, proporcionando a estes uma elaboração mais adequada ao trabalho e ao manuseio.

Segundo MELO (2000), distingue-se pela ação principal, três grupos de aditivos: ação física, ação química e ação físico-química. As substâncias ativas das formulações dos aditivos podem ser orgânicas ou inorgânicas, distribuídas num veículo líquido, pastoso ou sólido. Elas pertencem aos seguintes grupos: sais minerais, sais ácidos orgânicos, resinas, tensoativos, dispersores, umectantes, emulsionantes orgânicos, naturais ou sintéticos.

Os aditivos são classificados pela sua função principal e aqueles produtos que são adicionados ao cimento em doses de até 5% podem ser considerados aditivos. De acordo com a NBR - 11768/EB – 1763/92, classificam-se os aditivos da seguinte forma:

- tipo P: plastificantes;
- tipo R: retardador;
- tipo A: acelerador;
- tipo PR: plastificante retardador;
- tipo PA: plastificante acelerador;
- tipo IAR: incorporador de ar;
- tipo SP: superplastificantes;
- tipo SPR: superplastificantes retardador;
- tipo SPA: superplastificantes acelerador;

Nesta pesquisa utilizaram-se 2 tipos de aditivos: aditivos plastificante e aditivo superplastificante. Este último é classificado, dentre os aditivos químicos redutores de água, como de alta eficiência, pois em comparação a um aditivo redutor de água (plastificante) apresenta uma eficiência bem maior, devido à maior capacidade de redução de água de um traço de concreto.

Segundo AITCIN (2000), existem quatro famílias principais de superplastificantes comerciais, são elas:

1. sais sulfonados de policondensados de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados polinaftalenos sulfonados, ou mais simplesmente superplastificantes de naftaleno;
2. sais sulfonados de policondensados de melanina e formaldeído, usualmente denominados de polimelaninas sulfonadas, ou mais simplesmente superplastificante de melanina;

3. lignossulfonatos com teores muito baixos de açúcar e surfactantes;
4. poliacrilatos

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), quando adsorvido pelas partículas de cimento, o tensoativo presente em alguns aditivos confere uma forte carga negativa, a qual auxilia a reduzir consideravelmente a tensão superficial da água circundante e aumentar acentuadamente a fluidez do sistema.

Em estudos realizados pelo laboratório de construção civil da EESC-USP no ano de 1995, tanto em condições laboratoriais quanto em situações de campo, dependendo do tipo de aditivo e temperatura, observou-se uma forte influência no tempo de início de pega do cimento do cimento Portland, com grandes retardamentos, além de variações significativas na trabalhabilidade. MELO (1996).

Ainda citando MELO (1996), em síntese, os parâmetros microestruturas e químicos medidos indicam que altas dosagens de superplastificantes não apenas tem um efeito no processo de hidratação nas primeiras idades, mas também no desenvolvimento da microestrutura para idades mais avançadas, isto é, os efeitos retardadores associados ao superplastificante, para idades iniciais ainda são percebidos aos 28 dias de idade. Para a mesma para a mesma relação água/cimento, a microestrutura da pasta contendo superplastificante desenvolve-se a uma taxa muito menor do que as pastas controle (sem superplastificante).

É importante ressaltar que o custo adicional imposto pela utilização dos aditivos nos concretos pode resultar em uma significativa economia no custo final de uma estrutura, exemplos práticos desta economia podem estar no custo do trabalho necessário para o adensamento, na possibilidade da redução do teor de cimento na mistura ou mesmo na melhoria da durabilidade deste material.

2.7.3. Agregados

Os agregados antes eram tidos com materiais inertes dispersos por entre a pasta de cimento principalmente por razões econômicas. No entanto é possível adotar um ponto de vista oposto e considerar o agregado como um material de construção em um todo coesivo por meio de uma pasta de cimento, como uma construção de alvenaria. Na verdade o agregado não é inerte na exata acepção da palavra e suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes também químicas têm influência no desempenho do concreto. NEVILLE (1997).

O estudo dos agregados deve ser visto como um dos principais pontos de um processo de dosagem de concretos, sobretudo se levarmos em conta, por um lado, que esse é o material menos homogêneo com que lidamos na fabricação de argamassas e concretos.

No Brasil, a pedra britada é o agregado graúdo mais corrente e o seu uso, seguramente, corresponde à bem mais de 50% do consumo total de agregado graúdo para concreto, principalmente nos grandes centros.

Quanto à dimensão máxima característica, segundo HELENE (1992), quanto maior, mais econômico será o concreto; esta característica está relacionada a trabalhabilidade do concreto fresco, portanto, depende das fôrmas, do espaçamento entre as armaduras e do processo de transporte do concreto.

Outra característica de caráter relevante e um importante fator de resistência, especialmente da resistência à flexão, é a aderência entre a brita e a pasta de cimento, esta aderência é devido, em parte, ao intertravamento do agregado e da pasta de cimento hidratada, devido à sua forma (angulosa) e textura superficial (áspera). No entanto, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a forma e textura das partículas dos

agregados influenciam mais nas propriedades do concreto fresco do que endurecido; comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto aumento o custo do concreto.

Nesta pesquisa, optou-se pela composição entre as duas classes de pedra britada de origem basáltica ($D_{máx}=19\text{mm}$ e $D_{máx}=25\text{mm}$) na produção de concretos que serviram como substratos para reparos. Esta composição tem a finalidade de diminuir o custo do concreto, reduzindo assim os espaços entre os agregados, espaços estes ocupados pela argamassa. A descrição desta etapa consta no capítulo 4.

A seleção de agregados particularmente resistentes não é necessária para a produção do concreto usual. De acordo com AITCIN (2000), Geralmente é apenas necessário verificar se as exigências de desempenhos das normas para os agregados estão sendo atendidas. De outro lado, no concreto de elevado alto desempenho, a pasta hidratada de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes que, se os agregados particularmente os grãos, não forem suficientemente resistentes, eles podem tornar-se o elo mais fraco dentro concreto, uma situação similar àquela encontrada no caso dos agregados leves.

No caso da produção de concretos de alto desempenho, os agregados mais adequados são areia natural, pedra britada ou cascalho. As partículas de areia, geralmente, são constituídas por um único mineral, em geral o quartzo. Naturalmente, encontram-se também grãos de outros minerais procedentes da desintegração das rochas, porém sempre em pequenas porcentagens os mais freqüentes sendo os feldspatos e as argilas deles derivadas; em ordem de importância decrescente encontramos ainda partículas lamelares de mica, e grãos escuros de minerais de ferro.

A natureza das rochas matriz determinará a resistência dos agregados; tal

natureza foi determinada através de vários processos climáticos ao longo dos tempos. Nada, portanto, há que se possa fazer para melhorar a resistência dos agregados naturais.

A otimização da granulometria dos agregados é uma observação muito importante a ser levada em conta em um estudo de dosagem de concretos de elevado desempenho.

O agregado graúdo utilizado para compor um dos concretos utilizados nesta pesquisa, no caso, os concretos de elevado desempenho que foram utilizados como material de reparo em ensaios, foi de origem basáltica, apresentando $D_{\text{máx}} \leq 6,3\text{mm}$. A escolha deste agregado foi feita em observação ao fenômeno da exsudação interna que é minimizada em função da utilização de agregado graúdo com dimensões reduzidas e com melhor índice de forma. Quanto maior a dimensão do agregado, maior a possibilidade de ocorrerem defeitos na britagem e conseqüente retenção de água na superfície inferior deste, enfraquecendo assim a zona de transição.

Em uma situação de reparo estrutural, no caso de concreto armado com aço, existe também um problema relacionado com a área ocupada pela seção de cada barra de aço inserido no elemento, por exemplo, em uma área de traspasse de armadura (ligação pilar pavimento inferior - laje - pilar pavimento superior), existe uma alta taxa de armadura, conseqüentemente o espaço entre barras é reduzido, dificultando assim, em uma concretagem, a homogeneidade de concretos compostos com agregados graúdos com $D_{\text{máx}} > 6,3\text{mm}$, justificando desta forma a utilização deste material nesta pesquisa.

Realizou-se também uma outra composição entre agregados graúdos (pedra britada de origem basáltica) e miúdo (areia de origem quartzosa). Desta vez na produção dos concretos de elevado desempenho (material de reparo). Definindo-se

assim proporções adequadas de cada material na mistura. Esta composição além de ter a finalidade de diminuir o custo do concreto (reduzindo os espaços entre os agregados), apresenta também um aspecto mais favorável quanto à trabalhabilidade e consistência do concreto. (detalhes desta etapa constam no capítulo 6).

2.7.4. Água

A utilização de água não potável ou águas não comprovadas como água de amassamento em concretos ou argamassas, pode gerar, do ponto de vista patológico, uma série de problemas a curto e longo prazo.

Em concretos armados com aço, o emprego de água com quantidade de íons cloreto superior a 500mg/l, aliado a outros fatores, pode desencadear o processo de corrosão das armaduras. ANDRADE (1992).

A limitação de sulfatos na água é muito importante também, pois a reação entre estes e o C_3A presente no cimento, dará como produto a etringita expansiva, produto este responsável por expansões, fissurações e lascamento do concreto.

Deve-se também evitar águas que contendo açúcares, glicose e outros hidratos de carbono, pois estes podem impedir ou interferir na pega do cimento. GARCIA (1999).

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Neste capítulo apresentam-se as principais propriedades e características dos materiais utilizados nesta pesquisa. São apresentadas também informações relativas à origem e produção de cada um dos materiais.

A caracterização dos materiais é baseada em ensaios normalizados, informações obtidas através de literatura e informações comerciais.

3.1. Cimentos

Nos ensaios 01 (estudo de dosagem), ensaios 02 (produção de concretos que serviram de substrato ao material de reparo) e ensaios 04 (produção de concretos que serviram de substrato ao estudo de recuperação de ninhos de concretagem utilizaram-se o cimento Portland composto CP II F 32 – (NBR 11578), Fabricante: Itaú S/A).

Apresenta-se a seguir, nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 algumas características baseadas em análises químicas e físicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1 - Análises Químicas - CP II F 32

Fonte: Grupo Votorantim – Cimento Itaú, 2000.

Características	Teor (%)
Perda ao fogo	3,70
MgO	5,2
CaO	0,77
K ₂ O	1,0
SO ₃	3,1

Tabela 3.2 - Ensaios Físicos - CP II F 32

Fonte: Grupo Votorantim – Cimento Itaú, 2000.

Características	Determinações
Resíduo na peneira # 0.075mm	0,70%
Resíduo na peneira # 200mm	3,3%
Resíduo na peneira # 325mm	15,1%
Massa específica	3,10kg/dm ³
Tempo de início de pega	205min
Tempo de fim de pega	291min
Blaine	332m ² /kg
Expansibilidade a quente	0,3mm
Resistência à Compressão (média)	3dias 22,9MPa
	7dias 28,3MPa
	28dias 35,9MPa

Tabela 3.3 - Teores dos componentes - CP II F 32 (EB 2138)

Proporções em massa (%)	CP II F 32
Clínquer + sulfatos de cálcio	90 - 94
Sulfatos de cálcio=SO ₃ x1,7	5,27
Filler calcário=2,27x CO ₂ /0,96 pureza=96%	6 - 10

Utilizou-se o cimento Portland de alta resistência inicial - Resistente a sulfatos CP V ARI RS - (NBR 5733 e NBR 5737), para composição de pastas de cimento e concretos de reparos, durante os ensaios 03 e 04.

Características fornecidas pelo fabricante:

- alta resistência inicial;
- resistência aos sulfatos;
- resistente a expansão devido à reação álcali-agregado;
- moderado calor de hidratação, com resistência à compressão acima de 50MPa aos 28 dias de idade;
- clínquer de alta eficiência, derivado de calcário da mais alta pureza e homogeneidade, com adição de escória de alto-forno e sulfato de cálcio.

Algumas indicações de utilização deste cimento são:

- Preparo de concreto de elevado desempenho;
- concreto simples, armado, protendido, projetado, elementos pré-moldados e artefatos de concreto;
- peças de concreto submetidas à cura térmica;
- pisos industriais de concreto;
- pavimentos de concreto;
- argamassa armada, argamassas industriais, argamassas e concretos submetidos ao ataque de meios agressivos como estações de tratamento de água e esgotos, barragens, obras em regiões litorâneas etc.

Apresentam-se, a seguir nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6, algumas características físicas e químicas deste cimento.

Tabela 3.4 – Ensaio físicos- CP V ARI RS

Fonte: Grupo Holdercim Brasil S/A, 2000.

Características		Determinações
Peneira # 200mm		0
Peneira # 325mm		1,65
Massa específica		3,10kg/dm ³
Tempo de início de pega		132min
Tempo de fim de pega		194min
Blaine		4509cm ² /g
Resistência à Compressão (média)	3dias	40,8MPa
	7dias	46,7MPa
	28dias	56,5MPa

Tabela 3.5 – Ensaio químicos- CP V ARI RS

Fonte: Grupo Holdercim Brasil S/A, 2000.

Análise	teor (%)
Perda ao fogo	2,41
Al ₂ O ₃	6,43
SiO ₂	23,86
MgO	1,92
CaO	59,11
K ₂ O	0,65
CO ₂	2,15
SO ₃	2,60

Tabela 3.6 – Teores dos componentes- CP V ARI RS

Fonte: Grupo Holdercim Brasil S/A, 2000.

Proporções em massa (%)	CP V ARI RS
Clínquer	60,4
Escória	29,61
Sulfatos de cálcio=SO ₃ x1,7	4,91
Filler calcário=2,27x CO ₂ /0,96 pureza=96%	5,08

3.2. Agregados

3.2.1. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no estudo experimental desta pesquisa é, procedente do Rio Mogi-Guaçu, Estado de São Paulo, e é classificada como areia quartzosa³². A seguir apresentam-se algumas características e considerações a respeito da influência deste material na dosagem do concreto.

a) Granulometria

Segundo HELENE & TERZIAN (1992), a composição granulométrica, isto é, a proporção relativa expressa em forma de porcentagem (%) em que se encontram os grãos de um certo agregado, tem importante influência na qualidade dos concretos agindo na compactidade e resistência. A seguir é apresentada, na Tabela 3.7 e na Figura 3.1, a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos.

Tabela 3.7 – Determinação da composição granulométrica de agregados miúdos (NBR – 7217/ABNT).

Série Normal e Série Intermediária - NBR 7217						
Peneira # (mm)	M1 = 500g		M2 = 500g		Médias	
	M. Retida	% Retida	M. Retida	% Retida	% Retida	% R. Ac.
9.5	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,0	0,0%	0,0	0,0%	0%	0%
4.8	1,1	0,1%	0,5	0,1%	0%	0%
2.4	7,0	1,4%	8,5	1,7%	2%	2%
1.2	32,0	6,5%	36,0	7,2%	7%	9%
0.6	131,0	26,5%	126,0	25,4%	26%	34%
0.3	189,0	38,2%	192,5	38,7%	38%	73%
0.15	128,5	26,0%	125,0	25,2%	26%	98%
Fundo	6,5	1,3%	8,5	1,7%	2%	100%
Soma	495,1	100,0%	497,0	100,0%	100%	316%

³² A areia quartzosa é constituída quase que totalmente por sílica pura, quando bem graduadas, constituem as melhores areias para concretos.

Por meio do ensaio granulométrico do agregado miúdo determina-se o diâmetro máximo deste agregado. $D_{\text{máx}}=2,40\text{mm}$

Figura 3.1- Limites granulométricos para areia fina (zona 2 – NBR 7217)

b) Módulo de Finura - MF

Esta característica tem influência direta na quantidade de água de molhagem para uma certa consistência, devido estar relacionada com a área superficial do agregado. Através da Tabela 3.8 (NBR 7211) determinou-se que a areia em utilização se enquadrou na zona 2, ou seja, areia fina. $MF=2,16$.

Tabela 3.8 - Valores de norma (NBR – 7217/ABNT)

Porcentagens acumuladas em massa				
Peneiras (mm)	Zona1 (Muito fina)	Zona 2* (Fina)	Zona 3 (Média)	Zona4 (Grossa)
6,3	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8	0 a 5	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4	0 a 5	0 a 15	0 a 25	5 a 40
1,2	0 a 10	0 a 25	10 a 45	30 a 70
0,6	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3	50 a 85	60 a 88	70 a 92	80 a 95
0,15	85 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100

- c) **Massa Específica** (NBR 9776)= $2,62\text{g/cm}^3$
- d) **Massa unitária** (NBR 7251)= $1,48\text{kg/dm}^3$
- f) **Teor de material pulverulento** (NBR-7219)= 0,44%.
- g) **Teor de argila em torrões nos agregados** (NBR 7218): 0,20%

3.2.2. Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na composição de todos os concretos desta pesquisa é de origem basáltica, classificada como uma rocha ígnea³³, e considerada nacionalmente, segundo a NBR 9935/87 (Agregados - Terminologia) como um agregado artificial, pois passa por um processo de trituração em equipamentos mecânicos (britagem).

A seguir, na Tabela 3.9 apresentam-se algumas características das rochas basálticas.

Tabela 3.9 - Algumas características de rochas basálticas.

Fonte: Silva, M.R. (1985).

Tipo de rocha	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica (kg/m^3)	Dureza	Absorção e porosidade	Ataque por álcalis	Durabilidade
Basalto	200	2200 a 3100	17,1	Baixa a moderada	Insignificante	Boa

A pedra britada (brita) utilizada no estudo experimental foi extraída na jazida (Pedreira) INDERP, situada às proximidades da cidade de Ribeirão Preto - SP.

Optou-se pela utilização de duas faixas granulométricas, diferenciadas assim apenas pelo diâmetro máximo característico, pedra britada nº1 e pedra britada nº2.

³³ Rochas ígneas - formadas pelo resfriamento de material rochoso em fusão acima, abaixo, ou próximo da superfície terrestre.

Já nos ensaios 03 e 04 utilizou-se um agregado graúdo com dimensões reduzidas para compor os concretos de reparo (CAD).

Apresenta-se na Tabela 3.10 algumas características físicas dos agregados graúdos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3.10 - Características físicas dos agregados graúdos

Agregado graúdo	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (kg/dm ³)	Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura
Brita nº1	2,90	1,97	19	7,01
Brita nº2	2,90	1,55	25	7,27
Pedrisco	2,90	1,30	6,3	4,82

3.3. Aditivos

Nos ensaios 01 e 02 utilizou-se o aditivo plastificante para concretos MASTERMIX® 281-N (Master Builders Technologies®).

Seguindo recomendações do fabricante realizou-se a dosagem em 0,4l (aditivo) para cada 100kg de cimento do traço. Este aditivo apresenta-se na forma líquida, pronta para uso, com características de plastificante de pega normal. Atende aos requisitos das normas brasileiras (tipo P), e ASTM C 494 tipo a, e é compatível com diversos tipos de cimentos, inclusive o CP II F 32, utilizado nos ensaios 01, 02 e 04.

• Propriedades

Com o uso correto do MASTERMIX® 281-N obtêm-se os seguintes benefícios nos concretos:

- redução de água de amassamento (7% aproximadamente);

- melhoria da trabalhabilidade;
- aumento na coesão;
- redução na segregação;
- maior facilidade de acabamento;
- melhor aspecto;
- menor permeabilidade;
- maior durabilidade;
- redução dos custos de produção e acabamento.

O MasterMix® 281-N é recomendado para obtenção de maior plasticidade da mistura e redução da quantidade de água de amassamento, sem alteração do tempo de pega. Recomenda-se também para facilitar o bombeamento do concreto. É indicado para concreto protendido.

A plastificação do concreto facilita muito a concretagem de peças com armaduras densas, reduzindo consideravelmente a ocorrência de falhas e ninhos de concretagem.

- **Características do Aditivo**

Função principal: plastificante

Estado: líquido

Cor: castanho escuro

Massa específica: $1,08 \pm 0,001 \text{ kg/dm}^3$

pH: 8 ± 1

Utilizou-se o aditivo superplastificante Sikament® 300 – SIKA S/A nos ensaios 03 e 04 na produção de CED. Este produto é um aditivo superplastificante de alta performance, declarado pelo fabricante como, de pega normal e constituído por

polímeros de formaldeído-melanina sulfonada. Possui altíssimo efeito redutor, sendo recomendado especialmente para concretos de alta resistência inicial, e em casos que seja necessária a redosagem do concreto, em função das dificuldades de lançamento. Atende a EB 1763 (Tipo SP) e é classificado segundo as especificações da ASTM-C494 como tipo F.

Na caracterização deste aditivo, que consta no banco de dados do LMABC-SET-ESSC-USP - LIBORIO & MELO (2000), foram realizados os seguintes ensaios:

- a. espectroscopia no infravermelho (FT-IR);
- b. microscopia eletrônica de varredura (MEV) com microanálise;
- c. teor de sólidos por secagem em estufa.

O resultado de FT-IR indicou tratar-se de uma resina de melanina formaldeído, pela avaliação das principais bandas no infravermelho, onde se percebeu a similaridade entre os espectros da amostra avaliada e de um padrão de melanina formaldeído. Através da técnica de MEV com microanálise, pôde-se fazer a determinação qualitativa e semi-quantitativa dos principais elementos presentes na amostra de SP (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Resultado qualitativo e semi-quantitativo por MEV com microanálise na amostra de SP.

Elementos	%
C	4,1
O	38,2
Na	35,4
S	19,5
K	2,7

A determinação de teor de sólidos foi realizada, utilizando-se o método da estufa, em que aproximadamente 1g de amostra (referentes aos períodos de 1994 e

1997) foi colocado em estufa a 105°C, por tempos seqüenciais, até atingir massa constante. Assim, ficou comprovado que o teor de sólidos encontrado foi de 39%, considerado um alto teor, comparado com outros tipos de superplastificantes encontrados no mercado. MELO (2000).

- **Dosagem**

Como superplastificante e/ou redutor de água, o Sikament® 300 é dosado de 0,6% a 3% em peso de cimento, podendo ser lançado direto no concreto ou juntamente com a água de amassamento.

A permanência do efeito superfluidificante é mantida num período de até 50 minutos, dependendo da temperatura ambiente e temperatura do concreto.

- **Características do Aditivo**

Função principal: Superplastificante

Estado: líquido

Cor: castanho

Massa específica: $1,08 \pm 0,001 \text{ kg/dm}^3$

pH: 9 a 11

3.4. Sílica ativa

A sílica ativa (Fe-Si) utilizada nesta pesquisa é fornecida pela empresa Elken-Microsílica S/A; este material atende às especificações das normas NBR13956 e NBR13957 da ABNT e da norma ASTM C-1240/93.

A seguir apresentam-se algumas características deste material - (Tabelas 3.12 e 3.13)

Tabela 3.12 - Composição química – sílica ativa de ferro-silício

Fonte: Elken Microsilica – Tecnologia Indústria e Comércio Ltda

Óxidos	Valores Médios (%)
Teor de sílica amorfa (SiO ₂)	95,25
Ferro (Fe ₂ O ₃)	0,345
Alumina (Al ₂ O ₃)	0,040
Cálcio (CaO)	0,170
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,17
Manganês (MnO)	0,11
Magnésio (MgO)	0,49
Sódio (Na ₂ O)	0,22
Potássio (K ₂ O)	1,33

Tabela 3.13 - Outras características importantes deste material

Fonte: Elken Microsilica – Tecnologia Indústria e Comércio Ltda

Características	Determinações
Teor mínimo de sílica amorfa	85%
Diâmetro médio das partículas primárias	0,15µm
Perda ao fogo máxima	6%
Teor de umidade máximo	3%
Retido na peneira # 325 (máximo)	10%
Área específica	20m ² /g

3.5. Água de amassamento

Utilizou-se a água de abastecimento público como água de amassamento em todas as produções de concretos desta pesquisa, tendo em vista que essa mesma água é utilizada na produção regional de concretos.

4. ENSAIOS 01- Estudo de Dosagem de concretos

O estudo experimental desta pesquisa teve início de seu desenvolvimento nas instalações do Laboratório de Construção Civil (LCC) - Departamento de Arquitetura e Urbanismo-ESSC-USP, e a complementação final foi desenvolvida no Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento (LMABC) - Departamento de Engenharia de Estruturas-ESSC-USP.

A apresentação deste estudo está estruturada em 04 etapas: ensaios 01, 02, 03 e 04. Primeiramente apresentam-se as atividades executadas durante os ensaios 01

Nesta etapa da pesquisa executou-se um estudo de dosagem no qual foram geradas curvas de dosagem para concretos compostos com cimento CP II F 32, agregados regionais, sem adições e utilizando aditivo plastificante na dosagem: 0,4l de aditivo para cada 100kg de cimento do traço.

Como já citado, a opção pela utilização da composição entre as duas classes de pedra britada (nº1 e nº2), tem a finalidade de diminuir o custo do concreto, reduzindo assim os espaços entre os agregados, espaços estes ocupados pela argamassa. A seguir apresenta-se este procedimento.

4.1. Determinação adequada da mistura entre duas faixas granulométricas de agregados

Para a determinação adequada da mistura entre duas faixas granulométricas de pedras britadas, Utilizou-se o método da NBR 7810 - Agregado em estado compactado seco - Determinação da massa unitária.

A Tabela 4.1 apresenta na primeira coluna a variação adotada (%) na mistura dos dois agregados. A segunda e terceira apresentam a quantidade de agregados necessária para obter a proporção correspondente e ser suficiente para encher o recipiente de ensaio. A coluna de acréscimo de pedra britada nº1 é correspondente à massa desse agregado, necessária para passar de uma composição (%) para a seguinte. A escolha da composição "ideal" baseia-se no maior valor obtido para a massa unitária no estado compactado, no caso desta pesquisa, a composição ideal determinada foi de 50%(brita nº1) / 50%(brita nº2).

Tabela 4.1 - Determinação da composição "ideal" entre pedra britada nº1 e nº2

Fonte: HELENE & TERZIAN (1992)

Composição entre os agregados nº 2/1	Quant. de pedra britada nº2 (kg)	Quant. de pedra britada nº1 (kg)	Acréscimo de pedra britada nº1 para obter a composição desejada (kg)	Massa total do recipiente (agregado + tara) (kg)	Massa unitária no estado compactado (kg/dm ³)
100/0	30	—	—	—	1,66
90/10	30	3,33	+ 3,33	33,75	1,67
80/20	30	7,50	+ 4,17	33,90	1,68
70/30	30	12,86	+ 5,36	33,90	1,68
60/40	30	20,00	+ 7,14	34,15	1,69
50/50	30	30,00	+ 10,00	34,50	1,72 *
40/60	30	45,00	+ 15,00	33,95	1,68

No estudo de dosagem parte-se do princípio de que são necessários três pontos para poder montar o diagrama de dosagem que correlaciona a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento.

Alguns conceitos, a saber:

f_{ck} = resistência característica do concreto à compressão, é o valor de referência que o projetista adota como base de cálculo;

f_{cj} = resistência característica do concreto à compressão à j dias de idade.

Partiu-se então da avaliação preliminar, com mistura em betoneira do traço 1:5,0 (cimento: agregados secos totais, em massa) traço chamado normal. Baseado nas informações obtidas desta mistura, confeccionou-se mais três (03), com os traços definidos em 1:3,5 (traço chamado rico), 1:6,5 (traço chamado pobre) e 1:7,5 (traço chamado muito pobre).

4.2. Determinação do teor ideal de argamassa (α) para o traço 1:5,0

Esta é uma das fases mais importantes do estudo de dosagem, pois é a que determina adequabilidade do concreto quando lançado às fôrmas.

Segundo HELENE & TERZIAN (1992), a falta de argamassa na mistura acarreta porosidade ou falhas de concretagem. O excesso proporciona um concreto de melhor aparência, porém aumenta o custo por metro cúbico como, também o risco de fissuração por origem térmica e por retração de secagem.

O objetivo é determinar o teor ideal de argamassa na mistura do concreto (mínimo possível). Para tal, através de variações no teor de argamassa da mistura, com o traço estabelecido em 1:5,0, determinou-se a proporção adequada por tentativas e observações práticas. Utilizando informações do *"manual de dosagem e controle do*

concreto” - HELENE & TERZIAN (1992), determinou-se o teor de 51% como sendo o teor ideal de argamassa para o traço estabelecido. De acordo com a Tabela 4.2 (HELENE, 1992), temos então o traço unitário normal - 1:2,06:2,94 - (1: areia: pedra) e os traços auxiliares.

Tabela 4.2 - Traços auxiliares
Fonte: HELENE & TERZIAN (1992)

Teor de argamassa (%)	Traço 1:3,5	Traço 1:5,0	Traço 1:6,5
	Traço unitário individual rico 1: a _n :p _n	Traço unitário individual normal 1: a _n :p _n	Traço unitário individual pobre 1: a _n :p _n
47	1: 1,12: 2,38	1: 1,82: 3,18	1: 2,53: 3,97
49	1: 1,21: 2,29	1: 1,94: 3,06	1: 2,68: 3,82
51	1: 1,30: 2,20	1: 2,06: 2,94	1: 2,83: 3,67
53	1: 1,39: 2,11	1: 2,18: 2,82	1: 2,98: 3,52

O índice de consistência (medido no ensaio de tronco de cone - NBR 7223) adotado foi de 70±10mm; o concreto apresentou uma consistência plástica em todas as moldagens. A resposta deste ensaio depende da consistência do concreto, podendo-se adotar as tolerâncias indicadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tolerâncias admitidas para consistências do concreto através do abatimento do tronco de cone.

Consistência	Abatimento (mm)	Tolerâncias (mm)
Seca	0 a 20	± 5
Medianamente plástica	30 a 50	± 10
Plástica	60 a 90	± 10
Fluida	100 a 150	± 20
Líquida	≥ 160	± 30

A obtenção dos traços auxiliares foi feita mantendo-se fixo o teor de argamassa (α) e o abatimento do tronco de cone, determinados para o traço de 1:5,0.

- **Obtenção do traço mais rico (em teor de cimento)**

Adotou-se o traço: 1:3,5 (1: m)

- $a + p = 3,5$

$$\frac{1+a}{1+a+p} = \alpha \quad a = \alpha (1+3,5) - 1 \quad \rightarrow \quad a = 1,30$$

- $p = 3,5 - a \rightarrow p = 2,20$

Definição $\rightarrow$ traço adotado: 1: 3,5 (1: 1,30: 2,20)

Onde:

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

α = teor de argamassa seca; deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

p = relação agregados graúdo secos/cimento em massa, em kg/kg.

a = relação agregados miúdo secos/cimento em massa, em kg/kg.

- **Obtenção do traço pobre (em teor de cimento):**

Adotou-se o traço: 1: 6,5 (1: m)

- $a + p = 6,5$

$$\frac{1+a}{1+a+p} = \alpha \quad a = \alpha (1+6,5) - 1 \quad \rightarrow \quad a = 2,83$$

- $p = 6,5 - a \rightarrow p = 3,67$

Definição $\rightarrow$ traço adotado: 1: 6,5 (1: 2,83: 3,67)

O traço 1:7,5 não consta na *tabela 6.7 – traços experimentais* do “Manual de dosagem e controle do concreto” - HELENE & TERZIAN (1992), e foi introduzido neste estudo com o objetivo de se contribuir com o conhecimento sobre o comportamento dos concretos considerados pobres em teor de cimento, ampliando assim, a faixa de parâmetros e valores relacionados às curvas de dosagem deste tipo de concreto; obtido utilizando a mesma seqüência de cálculos.

- **Obtenção do traço muito pobre** (em teor de cimento):

Adotou-se o traço: 1: 7,5 (1:m)

- $a_p + p_p = 7,5$

$$\frac{1+a}{1+a_p + p_p} = \alpha \quad a = \alpha (1+7,5) - 1 \quad \rightarrow \quad a = 3,33$$

- $p = 7,5 - a \rightarrow p = 4,17$

Definição → Traço adotado: 1: 7,5 (1: 3,33: 4,17)

O aditivo plastificante, na dosagem de 0,4litros por 100kg de cimento, foi adicionado somente nos traços 1:3,5 e 1:5,0; estes traços além de possuírem uma quantidade maior de cimento, em relação aos traços 1:6,5 e 1:7,5, ainda possuem uma relação água/cimento inferior, o que torna a mistura, do ponto vista de trabalhabilidade, menos plástica. Com a utilização do aditivo plastificante pode-se compensar a quantidade de água necessária e obteve-se o mesmo índice de consistência (70±10mm) para os 04 traços estudados.

4.3. Moldagens

Foram moldados 12 corpos-de-prova cilíndricos (10cmx20cm) de acordo com a NBR 5738, para ruptura às idades de: 3dias, 7dias, 28dias, para cada traço.

A desmoldagem é feita 24 horas após a moldagem, e os corpos-de-prova são transportados imediatamente à câmara úmida para que sejam curados (UR=95%).

4.4. Ensaios mecânicos

Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto - NBR 5739.

O equipamento utilizado para a execução dos ensaios é uma prensa hidráulica com capacidade para 100t (marca: A.J. AMSLER).

Com o objetivo de nivelar a área de contato entre o topo e a base do corpo-de-prova e as faces dos pratos da prensa, foi executado um capeamento com enxofre, dessa maneira há redução na concentração de tensões em determinados pontos das áreas (topo e base) do corpo-de-prova a serem comprimidas.

4.5. Resultados obtidos e montagem de curvas de dosagem

A Tabela 4.4 apresenta informações sobre esta etapa de moldagens e ensaios.

Tabela 4.4 - Características dos traços em massa executados.

TRAÇO EM MASSA		1 : 3,5	1 : 5,0	1 : 6,5	1 : 7,5
Teor de argamassa (%)		51			
Relação água/cimento		0,37	0,45	0,66	0,70
Consumo de cimento/m ³		513	383	298	262
Aditivo plastificante (ml)		49	37	—	—
Massa específica (ρ) (kg/dm ³)		2,50	2,47	2,43	2,41
Abatimento (mm)		70 $\pm$ 10			
Resistência média à compressão f_c (MPa)	03dias	37,2	26,8	18,4	9,10
	07dias	41,9	31,1	21,5	13,9
	28dias	51,7	40,1	31,0	20,3

A partir dos resultados obtidos referentes a cada traço foram geradas curvas de dosagem relacionando alguns parâmetros observados em cada um dos quatro traços estudados (Figura 4.1).

As curvas executadas têm por objetivo ampliar e auxiliar os estudos referentes à dosagem de concretos, observando, é claro, a metodologia e as condições específicas determinadas em cada um dos traços.

Figura 4.1 – Curvas de dosagem

Os resultados apresentados nas curvas de dosagem acima demonstram que, independente do traço utilizado e da idade de ensaio, na medida em que se aumenta a relação a/c a resistência à compressão axial do concreto sofre reduções significativas.

A quantidade de água em excesso induz a ocorrência do fenômeno da exsudação superficial e exsudação interna, fragilizando a zona de transição, fenômenos já comentados anteriormente, além de contribuir para o surgimento de poros, o que torna, de certa forma, o concreto mais suscetível à ruptura por esforços mecânicos.

Já bastante divulgado no meio científico, é de conhecimento geral que a relação a/c, que é a relação da água empregada na mistura e a massa do cimento no traço, atua com efeito inverso na resistência mecânica e na durabilidade dos concretos. Se a quantidade de água de amassamento exceder àquela necessária à hidratação do cimento pode-se ter uma situação de surgimento de poros devido à evaporação da água não utilizada. Em termos quantitativos, a água, ou mais precisamente a relação água/cimento, interfere diretamente na resistência mecânica e na durabilidade do concreto.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a água pode estar presente de várias formas na pasta de cimento e é classificada baseada no grau de dificuldade ou de facilidade com a qual ela pode ser removida. São citadas:

- água capilar;
- água adsorvida;
- água interlamelar;
- água quimicamente combinada.

O que se percebe é que, existe uma relação inversa entre porosidade e resistência, segundo MELO (1996), a resistência está baseada na parte sólida de um

material, conseqüentemente os vazios são prejudiciais à resistência mecânica. O volume de vazios capilares na pasta depende da quantidade de água misturada com o cimento no início da hidratação e do grau de hidratação do cimento. Quando se dá a pega, a pasta adquire um volume estável, aproximadamente igual ao volume de cimento mais o volume de água.

A qualidade de um compósito depende diretamente da qualidade dos materiais componentes, portanto é de suma importância que se promova um rigoroso controle na seleção destes materiais, mantendo as proporções adequadas no instante da mistura.

Estudos de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) em pastas de cimento hidratado, com diferentes relações a/c e em várias idades, mostram que a redução da porosidade capilar total está associada à redução de poros grandes na pasta. Deve-se notar que as porosidades representadas pelo espaço interlamelar do C-S-H e pequenos capilares não contribuem para a permeabilidade da pasta. Na pasta é notada uma relação direta entre permeabilidade e o volume de poros maiores que 100nm, isto porque, provavelmente a porosidade formada principalmente de pequenos poros tende a tornar-se descontínua. MEHTA & MONTEIRO (1994).

O concreto confeccionado com traço rico (1:3,5) apresentou uma relação a/c igual a 0,37, segundo ALMEIDA (1996), em geral, os fatores a/c utilizados em CED estão entre 0,20 e 0,40. Embora não tenha sido utilizada a sílica ativa ou outra superpozolana, nem aditivo superplastificante, o concreto com traço rico apresentou um comportamento frente a esforços mecânicos semelhante a de um concreto de elevado desempenho. Não se obteve valores quanto à porosidade desse concreto, mas com a utilização do aditivo plastificante conseguiu-se reduzir a quantidade de água de amassamento, levando assim o concreto a possuir uma rede porosa um pouco mais refinada do que a dos concretos de traço normal e traço pobre.

5. ENSAIOS 02 - Execução de substratos de concreto

Esta etapa da pesquisa apresenta resultados referentes à execução de modelos prismáticos de concreto, que serviram de substrato para ensaios e avaliações referentes à aplicação de concreto de elevado desempenho como material de reparo.

Para a confecção dos corpos-de-prova prismáticos de concreto foram primeiramente determinadas as resistências características de cada concreto. Optou-se por uma faixa mais ampla de resistências características neste ensaio, já que nos ensaios 01, apenas 4 traços foram estudados.

A escolha de traços com baixa, média e alta resistência possibilita uma aproximação maior na avaliação de diversas questões referentes à problemática da aderência concreto novo x concreto velho. Foram determinadas as seguintes resistências características (f_{ck}): 15MPa; 18MPa; 21MPa; 25MPa; 30MPa; 40MPa; 50MPa.

5.1. Dosagens

Utilizaram-se as curvas de dosagem determinadas nos ensaios 01 como base para as determinações necessárias às composições dos traços de cada concreto, utilizando-se também os mesmo materiais atrás utilizados. O procedimento para determinação dos traços teve início com a análise gráfica das curvas de dosagem de modo a correlacionar todos os componentes, como o fator a/c, consumo de cimento, resistência, etc.

- **Cálculo da resistência de dosagem**

Durante esta etapa faz-se a correlação com a resistência de projeto, aplicando-se a equação (NBR 6118):

$$f_{cdj} = f_{ck} + 1,65 \cdot s_d$$

Onde:

s_d = Desvio padrão de dosagem, referida à idade (28 dias). Utilizou-se um valor para s_d de 4,0 MPa, de acordo com a NBR 12655

f_{cdj} = Resistência à compressão de dosagem, a 28 dias de idade (f_{c28})

Ex.: No caso do modelo de concreto projetado com resistência característica de 15Mpa:

$$f_{cdj} = f_{ck} + 1,65 \times s_d$$

$$f_{cdj} = 15 + 1,65 \times 4,0$$

$$f_{cdj} = 21,6 \text{ MPa}$$

A partir deste valor inicia-se a correlação entre f_{cdj} e o fator a/c, encontrando-se, o valor de 0,70 para o fator a/c, que durante a moldagem foi corrigido para 0,68.

A correção do fator a/c para cada traço foi feita recalculando-se a massa de água utilizada durante a mistura para que se obtivesse o abatimento adequado durante

cada ensaio. Utilizando as curvas de dosagem, procedendo a correlação com o fator a/c tem-se a quantidade de agregados secos totais (m).

O cálculo para as quantidades de areia e pedra é semelhante ao cálculo já apresentado durante os ensaios 01, mantendo-se fixo o teor de argamassa de 51% na mistura.

Na Tabela 5.1 apresentam-se os traços unitários em massa (cimento: areia: pedra), e os valores de f_{ck} e de f_{cdj} correspondentes após correlações entre parâmetros:

Tabela 5.1 - Traços unitários em massa e f_{cdj}

Traços unitários	f_{ck} (MPa)	f_{cdj} (MPa)
1: 7,5 (1:3,34:4,16)	15	21,6
1: 7,1 (1:3,13:3,97)	18	24,6
1: 6,9 (1:3,03:3,87)	21	27,6
1: 6,4 (1:2,77:3,63)	25	31,6
1: 5,6 (1:2,37:3,23)	30	36,6
1: 4,15 (1:1,63:2,52)	40	46,6
1: 2,9 (1:0,99:1,91)	50	56,6

Obs. : As quantidades de agregados foram obtidas utilizando a mesma seqüência de cálculos dos ensaios 01.

5.2. Moldagens

Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com a NBR 5738:

- 12 corpos-de-prova prismáticos (0,15mx0,15mx0,50m) para ruptura à tração na flexão à idade de 28dias, para cada traço.
- 04 corpos-de-prova cilíndricos (0,10mx0,20m) para ruptura por compressão axial à idade de 28dias, para cada traço.

- 02 corpos-de-prova cilíndricos (0,10mx0,20m) para ruptura por compressão diametral para as idades de 28dias, para cada traço. Nesse caso é verificada a resistência à tração do concreto. A desmoldagem, nos três casos, é feita 24horas após a moldagem, e os corpos-de-prova são transportados imediatamente à câmara úmida para que sejam curados (UR=95%).

5.3. Ensaios mecânicos

Nesta etapa, para determinação das respectivas resistências nos vários tipos de corpos-de-prova, utilizam-se os seguintes ensaios:

1. compressão simples - cilíndricos - NBR 5739;
2. tração por compressão diametral - cilíndricos - NBR 7222;
3. tração na flexão - prismáticos - NBR 12142;

A resistência à tração é também uma importante propriedade do concreto. Outras características, tais como, a contribuição do concreto para resistir ao esforço cortante e a torção, a aderência entre concreto e armadura e evolução de uma fissura estão relacionados com sua resistência de tração. CARBONARI & CARBONARI (1998).

O conceito “resistência à tração” inclui três modalidades diferentes de medidas de resistências: tração na flexão, tração por compressão diametral e tração pura axial.

A resistência à tração do concreto costuma ser mais dispersa do que a resistência à compressão, dispersão essa que pode ser influenciada pela forma e textura dos agregados e pode ser afetada pelos efeitos ambientais.

No caso do ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, o resultado será obtido pela seguinte expressão:

$$f_{t,d} = \frac{2.F}{\pi.d.L}$$

Onde:

$f_{t,d}$ = Resistência à tração por compressão diametral, expresso em MPa, com aproximação de 0,05 MPa.

F = Carga máxima obtida no ensaio (kgf)

d = Diâmetro do corpo-de-prova (cm)

L = Altura do corpo-de-prova (cm)

O ensaio de tração na flexão consiste em submeter um corpo-de-prova prismático de concreto à flexão, proveniente de duas cargas ($p/2$) aplicadas nos eixos que dividem o C.P. em 3 partes de comprimentos semelhantes ($l/3$); neste caso, os corpos-de-prova prismáticos serão solicitados até a ruptura completa, ou seja, até a divisão do corpo-de-prova em duas partes (na condição de flexão pura) conforme esquema estático ilustrado na Figura 5.1 .

Figura 5.1 - Diagrama de esforços solicitantes do corpo-de-prova prismático de concreto.

Caso a ruptura ocorra no terço médio da distância, a resistência à tração na flexão é calculada pela expressão - NBR 12142:

$$f_{ctM} = P.l / (b.d^2)$$

Onde:

f_{ctM} = resistência à tração na flexão, em MPa;

P = carga máxima aplicada, em N;

l = distância entre cutelos de suporte, em mm;

b = largura média do corpo-de-prova na seção de ruptura, em mm;

d = altura média do corpo-de-prova, na seção de ruptura;

d' = 25mm

O equipamento utilizado para a execução dos ensaios é uma prensa hidráulica A.J. AMSLER com capacidade para 100t, utilizando-se também um módulo especial acoplado à prensa, específico a este tipo de ensaio.

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, a uma distância deste não superior a 5% de l, a resistência à tração na flexão é calculada pela expressão:

$$f_{ctM} = 3. P.a / (b.d^2)$$

Onde:

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, obtida com a aproximação de 1mm, mediante tomada de, pelo menos, três medidas ($a \geq 0,283 l$). No caso da ruptura ocorrer além dos 5% citados, o ensaio não terá validade. (As outras letras têm o mesmo significado que a relação anterior).

Apresenta-se a seguir, no Documento fotográfico 5.1 (DF 5.1), dois momentos do ensaio de tração na flexão (28 dias).

DF 5.1 – A- início de carregamento, B- momento da ruptura do corpo-de-prova

Durante os ensaios de tração na flexão, nenhum dos 84 corpos-de-prova apresentou ruptura fora do terço médio.

5.4. Resultados obtidos e montagem de curvas de dosagem

A Tabela 5.2 contém todas as informações sobre esta etapa de moldagens e ensaios.

Tabela 5.2 - Determinações para ensaios 02

TRAÇO EM MASSA	1:2,9	1:4,15	1:5,6	1:6,4	1:6,9	1:7,1	1:7,5
Teor de Argamassa (%)	51						
Relação água/cimento	0,33	0,40	0,49	0,53	0,58	0,65	0,68
Consumo de Cimento por m ³	591	447	348	308	283	277	258
Massa Específica (ρ) (kg/dm ³)	2,50	2,48	2,47	2,44	2,40	2,38	2,37
Consistência (mm)	70 $\pm$ 10						
Resistência à compressão (NBR 5739) f_{c28} (MPa)	56,7	46,7	38,9	36,7	32,3	28,9	22,5
Resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222) $f_{t,d,28}$ (MPa)	4,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,7	2,5
Resistência à tração na flexão (NBR 12142) $f_{ctm,28}$ (MPa)	5,7	4,6	4,0	3,8	3,7	3,3	2,9

A partir dos resultados obtidos referentes a cada traço foram geradas curvas de dosagem relacionando alguns parâmetros observados em cada um dos quatro traços estudados (Figura 5.2).

Figura 5.2 – Curvas de dosagem

6. ENSAIOS 03 - Ligação concreto novo x concreto velho

Nesta etapa apresenta-se a sequência de ensaios relacionados à utilização do material de reparo “concreto novo”. Os procedimentos de verificação do comportamento do concreto de elevado desempenho como material de reparo estão baseados em 4 etapas:

- preparo do substrato;
- aplicação de pasta de cimento de elevado desempenho (PED), na superfície tratada do corpo-de-prova;
- concretagem da junta de ligação entre as partes do corpo-de-prova utilizando concretos de elevado desempenho (CED), desmoldagem e cura;
- ensaios mecânicos e resultados;

A partir da ruptura dos corpos-de-prova prismáticos nos ensaios 2 iniciou-se o procedimento de ligação com o preparo do substrato.

6.1. Preparo do substrato

Nesta etapa, é feito um tratamento superficial na área de contato entre concreto novo x concreto velho com o objetivo de melhorar a aderência entre as partes do corpo-de-prova; tal tratamento é baseado na escarificação manual da superfície de contato para que o agregado graúdo esteja livre de camadas de pasta, aumentando assim a contribuição à ligação mecânica (aderência mecânica) que é efetivada pelo intertravamento entre a superfície do agregado e os cristais resultantes da hidratação do cimento Portland. Já a aderência química é realizada entre os produtos de reação da hidratação do cimento e a superfície do agregado.

O procedimento de escarificar o substrato foi realizado radialmente, das arestas para o centro (DF 6.1), evitando golpes que pudessem lascas as arestas e contornos da região sã. Outra observação importante nesse instante foi a escolha (através de ensaios acessórios) do ferramental mais adequado; as talhadeiras com cortes mais finos proporcionaram melhor resultado, tendo em vista o proporcionamento de menor área de impacto.

DF 6.1 - Escarificação manual

À medida que se fez esse tratamento, retirava-se todo o material solto, mal compactado e segregado até que se atingisse um concreto de boa qualidade, obtendo-se assim uma superfície rugosa e coesa, propiciando boas condições de aderência.

Nos casos de grandes recuperações ou de situações em que a recuperação será efetuada em locais de difícil acesso, deve-se prever cimbramentos adequados.

Neste tipo de adesão entre concretos, pode-se verificar ainda, uma ligação por continuidade da estrutura cristalina, tal ligação ocorre quando existe uma interação entre o agregado e os produtos hidratados do cimento por crescimento epitáxico com ou sem formação de soluções sólidas intermediárias. Nesta ligação os cristais dos componentes do cimento hidratado ligam-se aos do agregado, surgindo assim uma única rede cristalina entre as fases, fortalecendo a ligação.

O crescimento epitáxico de um cristal é um caso especial de nucleação heterogênea. No caso do concreto, o fenômeno ocorre com o crescimento de cristais produzido pela hidratação do cimento, orientados ao longo da superfície do substrato, no caso, os agregados. Este crescimento segue um padrão no qual os cristais de produtos hidratados de cimento tendem a adotar paralelamente à mesma orientação e textura da superfície na qual vai ser depositado.

Segundo FURNAS (1997), existem 4 condições na variação higrométrica de um agregado gráudo, são elas: seco em estufa, seco ao ar, saturado superfície seca e, úmido. Para efeito de dosagem, caracterização de propriedades e fabricação de concreto, o agregado deve ser considerado na condição saturado superfície seca (SSS), que é a condição em que não absorve nem libera água livre em sua superfície e pode alterar a quantidade de água de amassamento do concreto.

Seguindo esta recomendação, após a escanificação e retirada de partes soltas da superfície de contato, os corpos-de-prova prismáticos foram depositados em

recipientes contendo água, durante o período de 24h, para que a superfície escarificada apresentasse um estado de saturação considerável.

Com o término do período de imersão, os corpos-de-prova foram retirados do recipiente e aguardou-se o período de 1h para a secagem superficial.

Com a secagem superficial da face escarificada teve início a próxima etapa no procedimento de ligação, a aplicação de pasta de cimento de elevado desempenho.

6.2. Aplicação de pasta de cimento

O objetivo de se imprimir a superfície de contato de concreto do corpo-de-prova rompido com a pasta de cimento, que devido a seus componentes é considerada uma pasta de cimento de alto desempenho (PED), é simplesmente, de obter-se uma ponte de ligação solidária às duas partes a serem ligadas.

A seguir, na Tabela 6.1, são apresentados os materiais componentes da pasta de cimento.

Tabela 6.1 - Materiais componentes da pasta de cimento

Traço da pasta de cimento: 1: x=0,37: SP=1,5% : SA= 10%	
Materiais³⁴	Descrição
Cimento Portland	CP V ARI RS – Grupo Holdercim Brasil S/A.
Aditivo Superplastificante (1,5%)	Sikament® 300 – SIKA S/A
Adição (10%)	Sílica ativa (Fe-Si) – Microsilica S/A
Fator a/c	0,37 Kg/Kg

Para minimizar o efeito da temperatura, tanto na pasta (reação exotérmica) quanto à temperatura ambiente, a temperatura da água de amassamento foi mantida

³⁴ A adição referente à sílica ativa (10%) é calculada em substituição à massa absoluta de cimento do traço, já o aditivo superplastificante (1,5%), é adicionado em função do total de aglomerantes, em massa.

próxima a 0°C, com o objetivo ^{de} retardar as reações iniciais de hidratação da pasta, e proporcionar um tempo em aberto adequado à concretagem do material de reparo.

A aplicação da PED foi realizada com um pincel (DF 6.2). Em testes realizados durante os ensaios, esta ferramenta mostrou não absorver a água da pasta durante a aplicação e, além disso, pôde-se preencher mais facilmente as micro-cavidades da superfície escarificada, ao contrário de outras ferramentas, como rolos, por exemplo.

DF 6.2 - Aplicação de pasta de cimento na superfície rompida

6.3. Concretagens de ligação

Imediatamente a partir da aplicação da pasta de cimento, teve início as concretagens das juntas utilizando o CED. Antes, porém, é conveniente fazer algumas considerações sobre este material.

O concreto utilizado como material de reparo na ligação entre as duas partes dos corpos-de-prova é classificado como um concreto de elevado desempenho (alta durabilidade e alta resistência), e apresenta uma composição diferente daquela do substrato. Este concreto apresenta características distintas do concreto convencionais, já comentadas anteriormente.

Através de um estudo de dosagem foram determinados os traços unitários, em massa, para a confecção dos concretos de reparo. Este estudo de dosagem baseou-se principalmente na consistência (fluidez) apresentada pelo concreto no decorrer dos ensaios. Em vista da variação do teor de sílica ativa, e com a finalidade de manter a mesma relação água/aglomerante, variou-se o teor de aditivo. Na Tabela 6.2 são apresentados os vários traços.

Tabela 6.2 - Traços em massa - material de reparo (1:areia:pedrisco)

1:3,0 (1:1,5:1,5)		
CP V A R I R S		
Areia fina		
Pedrisco $D_{\text{máx}} \leq 6,3\text{mm}$		
Sílica ativa (5%)	Sílica ativa (10%)	Sílica ativa (15%)
a/aglomerante: 0,38kg/kg		
Superplastificante (1,5%)	Superplastificante (1,8%)	Superplastificante (2,0%)
Consistência (mesa de abatimento) $k = 230\text{mm} \pm 10\text{mm}$		

Os traços definidos serviram para a produção de concretos que foram utilizados como material de ligação em todos os corpos-de-prova prismáticos rompidos. (Obs.: A porcentagem de sílica ativa foi adicionada em substituição à massa absoluta de cimento, o fator água/aglomerante foi fixado em 0,38kg/kg em todos os traços).

Durante as concretagens de ligação foram executadas 12 juntas entre os corpos-de-prova prismáticos rompidos, para cada um dos 07 traços.

O concreto foi lançado com conchas de aço, de modo a fluir expulsando todo o ar, em duas camadas as quais foram adensadas com haste de socamento normalizado (30 golpes/camada). No DF 07 exemplifica-se um preenchimento das juntas de ligação executada em corpos-de-prova prismáticos pré-rompidos.

A seguir passou-se à moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, de 10cm de diâmetro por 20cm de altura, de acordo com a NBR 5738:

- 04 corpos-de-prova para ruptura por compressão axial à idade de 28 dias, para cada traço;
- 02 corpos-de-prova para ruptura por compressão diametral à idade de 28 dias, para cada traço.

A desmoldagem foi feita 24h após a mistura dos materiais (DF 6.3), e os corpos-de-prova foram transportados imediatamente à câmara úmida (UR = 95%.) para que fossem curados.

DF 6.3 – A - Concretagem de ligação, B - Corpo-de-prova recuperado (1dia)

6.4. Ensaios mecânicos

Após a cura, e na idade de 28 dias, realizou-se novamente o ensaio de resistência à tração na flexão (os corpos-de-prova prismáticos foram solicitados até a ruptura completa novamente, na condição de flexão pura), em conjunto com os ensaios de controle - resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

6.5. Resultados obtidos e discussões

Apresenta-se na Tabela 6.3 valores referentes a resultados mecânicos obtidos de ensaios com o material de reparo (referência).

Tabela 6.3 - Resultados mecânicos (material de reparo)

Concretos com adição de Sílica ativa (Fe-Si)	Resistência média à compressão axial (NBR 5739) (MPa)	Resistência média à tração por compressão diametral (NBR 7222) (MPa)
5%	71,5	4,5
10%	78,8	4,2
15%	73,3	4,9

Já na Figura 6.1, apresenta-se uma análise comparativa entre os valores obtidos através de ensaios de determinação da resistência à tração na flexão, realizada antes e depois da ligação dos corpos-de-prova. Os valores de referência são associados a resultados obtidos nos ensaios dos corpos-de-prova antes do reparo, ou seja, à primeira ruptura, e os demais valores relacionam-se a cada adição de sílica ativa (SA) feita aos concretos de reparo.

Figura 6.1 - Resistência à tração na flexão x traços (1:m)

Analizando-se os valores apresentados na Figura 6.1, percebe-se que os concretos com adições de 5% e 15% de SA apresentaram valores de resistências à tração na flexão bem razoáveis em comparação com os de referência, ou seja, a aderência dos concretos de reparo (aliado à ponte de aderência), ao substrato foi tão significativa que em alguns traços observou-se até valores acima dos valores de referência.

Percebe-se também que os concretos com 10% S.A. de adição não apresentaram resultados tão satisfatórios quanto aos outros dois traços, entretanto ainda se pode afirmar que o desempenho destes concretos é relevante, no sentido de que mesmo obtendo resultados, na grande maioria dos casos, menores do que os outros traços estudados, ainda sim a ruptura ocorreu no concreto velho.

Na maioria dos traços estudados, a adição de 5% de sílica ativa (Fe-Si) mostrou-se mais eficaz na ligação com concretos, somente em traços muito pobres em cimento (1:7,5 e 1:7,1); a porcentagem de 15% forneceu melhores resultados.

Na avaliação geral dos resultados, percebeu-se que o comportamento do sistema de ligação (PED + CED) foi muito eficaz no que tange à aderência aos diversos substratos de concreto. A melhoria da zona de interface entre os diferentes materiais foi crucial para o sucesso desta adesão.

É fato que, tal melhoria na zona de interface foi alcançada com a adoção de diversos critérios, os quais vão desde o tratamento no substrato a ser ligado até a utilização de materiais suplementares nos dois componentes do sistema de ligação (PED + CED).

O que se percebe é que na medida em que é gerado o hidróxido de cálcio, durante a hidratação do cimento Portland, ele é consumido pela reação pozolânica

com a sílica ativa, o que fortalece a ligação, já que o produto desta reação é um C-S-H bem mais resistente e bem menos solúvel, tornando assim a matriz mais densa.

Também consta do Banco de Dados do LMABC-SET-EESC-USP que para misturas contendo 10% de sílica ativa e cimento CP V ARI RS, com cerca de 30% de escória, mesmo após cura por 28 dias, há ainda uma reserva de portlandita para garantia da passivação da armadura de reforço. Mesmo que houvesse o consumo total de CH, o pH da água de poro não é inferior a 11,5.

LIBORIO (2002), em pesquisa ainda não divulgada, realizou uma avaliação da intensidade da reação pozolânica entre o CH e sílica de Fe-Si ou silício metálico, em misturas compostas com 1 parte de CH e 2 partes de sílica ativa, com relação $a/agl = 1$. Parte dessas análises estão apresentadas nos difratogramas apresentados nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4.

Figura 6.2 – Avaliação da intensidade de reação do CH e sílica de Fe-Si, para diferentes idades – Fonte: LIBORIO (2002) – pesquisa não divulgada.

Figura 6.3 – Avaliação da intensidade de reação do CH e sílica de Fe-Si – amostras anidra e curadas por 28dias – Fonte: LIBORIO (2002) – pesquisa não divulgada

Figura 6.4 – Avaliação da intensidade de reação do CH e sílica de Fe-Si – amostras anidra e curadas por 6dias – Fonte: LIBORIO (2002) – pesquisa não divulgada

Através dessas análises, pode-se comprovar a efetividade da reação pozolânica entre o CH e a sílica ativa de Fe-Si, com consumo de quase todo CH.

Já na idade de 6dias observa-se este fenômeno.

Esse fato indica a importância da cura e da condição “sss” em agregados a ser implementada em substratos a serem tratados através dessa técnica. A fim de evitar a ocorrência da dissecação interna na PED, possivelmente há uma absorção da água contida no substrato e no concreto de ligação. Também, a princípio, há evidências que o CH não foi consumido até a idade de 3dias, devendo, portanto a cura estender-se por pelo menos 7dias. LIBORIO (2002).

6.6. Conclusões parciais

De acordo com os resultados obtidos durante estes ensaios observou-se que:

- a pasta de cimento Portland utilizada como ponte de ligação entre concreto novo x concreto velho mostrou-se eficaz. Sob as condições climáticas locais, a temperatura da água para a mistura deve ser otimizada, retardando desta forma as reações de hidratação, já que o tempo entre aplicação da pasta e concretagem não deve exceder 5min;
- os esforços a que são submetidos os corpos de prova reparados não representam em sua totalidade os esforços a que são submetidos os reparos em estruturas de concreto, porém o ensaio de tração por flexão da área ligada entre concretos é um bom parâmetro para que se possa adotar estes materiais aqui apresentados como materiais de reparo, já que em quase que 100% dos corpos-de-prova ensaiados a ruptura ocorreu na área do concreto velho (vide DF 6.4). Em algumas rupturas, corpos-de-prova apresentaram presença do material de reparo aderido à superfície

tratada (DF 6.5), sem que se pudesse perceber a presença da pasta de ligação, levando a crer que, o tratamento efetuado na superfície aliada à utilização de uma pasta servindo como ponte de ligação a um concreto de elevado desempenho apresentaram sucesso em sua utilização;

DF 6.4 - Corpo-de-prova após ruptura (28dias)

DF 6.5 - Detalhe da área de ruptura (28dias)

- é importante ressaltar o fato de que dois corpos-de-prova apresentaram rupturas na região de ligação - pasta de cimento x concreto novo, com $f_{ctm} = 1,6\text{MPa}$ (1:3,0 com 10% SA) e $f_{ctm} = 1,8\text{MPa}$ (1:3,0 com 10% de SA), enquanto as resistências à tração na flexão, para os concretos de referência, foram respectivamente de $f_{ctm} = 2,9\text{MPa}$ e $f_{ctm} = 5,7\text{MPa}$ (resultados constam nos anexos). No DF 6.6 - B percebe-se três regiões diferentes em uma mesma face: **1** - concreto velho (presença de agregados graúdos maiores), **2** - concreto novo (presença de agregados graúdos menores) e **3** - pasta de cimento. Este fato ocorreu devido ao tempo em aberto da pasta de cimento (5min) ter sido ultrapassado no decorrer das concretagens destes dois exemplares, portanto não havendo interação entre os diferentes materiais. Isso remete à necessidade de proteção do substrato durante o reparo (sombreamento para diminuir a temperatura e ações de vento). Também o fato da rápida absorção da água da pasta pelo substrato poderá ter criado uma zona com muitas partículas de sílica, comportando-se apenas como agregado sem ocorrência da reação pozolânica.

DF 6.6 - A - Corpo-de-prova apresentando ruptura na região pasta de cimento x concreto novo, **B** - detalhe da área de ruptura.

Provável engano na numeração das páginas.

- no que se refere à composição de materiais (concreto novo-CED) para os casos de ligações entre concretos para pequenas idades (concretagem contínua) e ligações entre concretos de diferentes idades (ampliações), os traços estudados neste trabalho apresentam boa adequação. As composições de materiais dosadas em cada traço permitiram uma análise da influência de cada componente no produto final, no caso, concreto de elevado desempenho-CED. A utilização de uma material suplementar à mistura, a sílica ativa, é de suma importância para garantir durabilidade ao concreto de ligação. Esta durabilidade é garantida também com a utilização de aditivo superplastificante, adequadamente dosado, evitando assim a presença de água de amassamento excessiva ao traço. A reação pozolânica em conjunto com o refinamento dos poros, ambos gerados pela presença da adição de sílica ativa garantem também uma melhoria considerável com relação à capacidade de adesão na região da zona de interface entre concretos. Através dos ensaios de tração na flexão realizados em corpos-de-prova recuperados foi possível constatar o grande potencial de utilização deste sistema de reparo nos casos citados já que os traços de concretos estudados apresentaram desempenhos satisfatórios em uma grande faixa de resistências utilizada em situações práticas.

7. ENSAIOS 04 - Recuperação de ninhos de concretagem

Nesta última etapa do estudo experimental apresenta-se a conclusão da seqüência de ensaios relacionados à utilização do concreto de elevado desempenho como material de reparo.

Desta vez o material de reparo foi utilizado na complementação da seção e no preenchimento de ninhos de concretagens em corpos-de-prova cilíndricos de concretos convencionais. Os ninhos de concretagens são problemas patológicos que se caracterizam pela ausência de concreto em determinadas regiões da peça concretada.

Um diferencial em relação ao ensaio anterior foi que desta vez os corpos-de-prova recuperados foram submetidos a outro tipo de solicitação (compressão axial simples), o que permitiu avaliar o comportamento do material de reparo frente a outros esforços.

7.1. Procedimento executivo

O procedimento consistiu em utilizar corpos-de-prova cilíndricos (10cmx20cm) de concretos como substrato para a aplicação do sistema pasta/concreto, de elevado

desempenho.

Primeiramente foram escolhidos 02 traços unitários em massa que serviram de substrato para o material de reparo. Em ambos utilizou-se o cimento CP II F 32.

Os traços escolhidos para esta análise foram: 1:2,9 (muito rico) e 1:7,5 (muito pobre). A escolha destes dois concretos para servirem substratos foi proposital, no sentido de que permitiu uma análise mais completa do comportamento do material de reparo em substratos com características bem diferentes.

7.1.1. Moldagens

Os corpos-de-prova foram moldados de acordo com a NBR 5738:

- 04 para ruptura por compressão axial à idade de 28dias – referência;
- 04 com preenchimento de meia seção da fôrma com concreto, para ruptura por compressão axial à idade de 56dias (28dias após a confecção da primeira etapa, aguardando-se 28dias para maturação);
- 04 apresentando ninhos de concretagem, para ruptura por compressão axial à idade de 56dias.

Os ninhos de concretagem nos corpos-de-prova cilíndricos foram criados utilizando-se um preenchimento com isopor de parte do corpo-de-prova, que fixado na parede da fôrma permitiu uma concretagem normal do corpo-de-prova. Após 24h, com a desmoldagem do corpo-de-prova, foi feita a retirada desse isopor e os corpos-de-prova foram levados à câmara úmida.

Este procedimento permitiu uma simulação bem próxima do que acontece na realidade em situações de falta de preenchimento de concreto em determinados pontos das estruturas. Um cuidado tomado no instante da preparação desses locais a serem preenchidos foi o de manter aquele local praticamente com o mesmo volume e

massa, variando-se apenas sua posição ao longo da altura do corpo-de-prova.

O DF 7.1 apresenta detalhes da superfície dos corpos-de-prova antes da recuperação.

DF 7.1 – A e B - Detalhes do ninho de concretagem, C - corpo-de-prova em meia seção.

Após 28 dias, os corpos-de-prova foram retirados da câmara para que fosse feito o procedimento de recuperação.

Novamente foi feita a escarificação manual na superfície a ser tratada, porém desta vez como a peça a ser escarificada apresentava dimensões menores do que o corpo-de-prova prismático antes tratado, os golpes para lascamento e tratamento da superfície dos agregados foram aplicados tendo-se o cuidado de não provocar a ruptura da seção transversal do corpo-de-prova, já que no caso dos corpos-de-prova (10cm x 20cm) recuperados, na região do ninho de concretagem a seção transversal foi reduzida quase que pela metade (ver DF 7.1). O mesmo procedimento de escarificação foi feito nos corpos-de-prova com meia seção.

Logo após a escarificação os corpos-de-prova foram imersos em água para saturá-los, porém mantendo a superfície seca.

7.1.2. Moldagens (recuperação de corpos-de-prova)

A recuperação dos corpos-de-prova teve início como a aplicação da pasta de cimento, processo semelhante ao do ensaio anterior, e em um processo de moldagem no qual, tanto no caso dos corpos-de-prova com ninhos de concretagem como nos corpos-de-prova com meia seção, o concreto de reparo foi aplicado em camadas e adensado adequadamente.

Em vista de seu excelente desempenho como material de reparo nos ensaios anteriores adotou-se para tal recuperação o traço 1:3,0 (cimento CP V ARI RS/10%S.A. e 1,8% S.P).

No DF 7.2 apresentam-se os corpos-de-prova cilíndricos recuperados logo após a desmoldagem (1dia).

DF 7.2 - A, B e C - Detalhes dos corpos-de-prova reconstituídos

7.1.3. Ensaio mecânicos e resultados obtidos

Passados 28 dias da moldagem de recuperação, foram então realizados os ensaios mecânicos através da determinação da resistência à compressão axial

simples. A seguir, nas Tabelas 7.1 e 7.2, são apresentados os resultados mecânicos dos ensaios com corpos-de-prova: de referência, recuperados e do material de reparo.

Tabela 7.1 - Resultados mecânicos - resistência à compressão axial simples
(substrato/traço 1:7,5 - CP II F 32, concreto de reparo/traço 1:3,0 - CP V ARI RS,
10%S.A. e 1,8% S.P)

CP	f_{c28} (MPa) Referência	f_{c56} (MPa) CP Seccionado/ reparo	f_{c56} (MPa) CP ninho de concretagem/ reparo	f_{c28} (MPa) CP material reparo
01	23,6	28,0	25,9	83,4
02	23,3	30,0	23,2	81,3
03	22,6	31,2	24,5	74,4
04	21,9	30,1	---	79,7

Durante a etapa de preparação do substrato um dos corpos-de-prova que apresentava ninho de concretagem foi inutilizado. Em vista da ruptura acidental durante sua preparação, um dos resultados referente a este corpo-de-prova não foi apresentado.

Tabela 7.2 - Resultados mecânicos - resistência à compressão axial simples
(Substrato/Traço 1:2,9 - CP II F 32, concreto de reparo/traço 1:3,0 - CP V ARI RS,
10%S.A. e 1,8% S.P)

CP	f_{c28} (MPa) Referência	f_{c56} (MPa) CP Seccionado/ reparo	f_{c56} (MPa) CP ninho de concretagem/ reparo	f_{c28} (MPa) CP material reparo
01	54,1	55,5	55,7	78,6
02	56,7	56,5	57,1	73,5
03	55,9	59,3	56,2	82,3
04	54,4	54,1	54,2	79,5

7.1.4. Conclusões parciais

De acordo com os resultados obtidos durante estes ensaios observou-se que:

- a pasta de cimento Portland utilizada como ponte de ligação entre concreto novo x concreto velho novamente mostrou-se eficaz; o mesmo acontecendo com o concreto de reparo, que apresentou resistência satisfatória quando solicitado em ligação com os dois tipos de substrato;
- durante o processo de concretagem do ninho de concretagem o concreto de reparo apresentou grande trabalhabilidade facilitando desta forma o lançamento e adensamento, não necessitando de grandes vibrações. Em uma situação de recuperação ou reparo, esta é uma característica indispensável ao material de reparo, pois existem situações em que o local a ser reparo apresenta empecilhos quanto ao adensamento deste material;
- todos os corpos-de-prova recuperados apresentaram resultados quanto às resistências à compressão axial excelentes em comparação aos de referência de cada traço.
- um importante fato percebido durante os ensaios de compressão axial foi que, em corpos-de-prova com ninhos de concretagem recuperados não foi percebido desvio de tensões ao longo da altura do corpo-de-prova recuperado. Analisando o modo de ruptura (colunar) pôde-se perceber claramente que o material de reparo não só participou da solicitação de cargas, mas também contribuiu, como no caso do traço 1:7,5, em um acréscimo de resistência mecânica. A Figura 7.1 ilustra esta situação.

Figura 7.1 - Distribuição de tensões no corpo-de-prova cilíndrico recuperado.

- no que se refere à composição de materiais (concreto novo-CED) para casos de recuperação de estruturas (colapso e reforço), os traços estudados neste trabalho apresentam boa adequação. Na realização de ensaios mecânicos envolvendo recuperação de ninhos de concretagem, o desempenho do concreto de reparo (CED) foi considerado excelente no que diz respeito à adesão e resistência mecânica. Neste tipo de ligação é recomendado que o concreto de preenchimento apresente baixa porosidade, nesse sentido a composição de materiais dos traços de CED estudados indica, sob uma produção controlada, uma vantagem em relação aos concretos convencionalmente produzidos. A adição de sílica ativa favorece a ocorrência de uma reação pozolânica (consumo de hidróxido de cálcio disponível gerando C-S-H) fortalecendo desta forma a ligação. Sob um ponto de vista patológico, a utilização do CED em situações de recuperação de estruturas é extremamente benéfico já que a vulnerabilidade aos mais diversos ataques é evidente na área a ser recuperada. Lembrando que a remoção do concreto deteriorado e a preparação da superfície são o primeiro passo para o sucesso de uma recuperação.

8. CONCLUSÕES FINAIS

A utilização do concreto de elevado desempenho está crescendo rapidamente em todo o mundo. As características apresentadas por este material, como alta resistência e baixa permeabilidade, o que do ponto de vista de durabilidade é excelente, atraem cada vez mais os diversos setores da engenharia.

Esta necessidade da conscientização no que tange à durabilidade surgiu com o crescimento do custo de reposição de estruturas e a ênfase crescente no custo do ciclo de vida útil, em vez do custo inicial.

Neste trabalho realizou-se além de uma avaliação de um sistema de reparos, superficiais e estruturais, para estruturas de concreto, também o desenvolvimento de técnicas de continuidades de concretagens e ligações entre concretos de diferentes idades, utilizando pastas de cimento modificadas e concretos, de elevado desempenho.

A durabilidade do concreto, discutida diversas vezes nesta pesquisa, é fruto de observações simples, mas muitas vezes não aplicadas no dia-a-dia dos canteiros de obras. Um estudo de dosagem, levando em conta as propriedades de cada material

envolvido, um planejamento adequado de concretagem e sua continuidade, além de um processo de cura correto são, sem dúvida, fatores preponderantes e necessários para garantir qualidade e vida útil de uma estrutura de concreto.

A partir dos ensaios e determinações realizados ao longo deste trabalho pôde-se concluir que:

1. a simples aplicação de um concreto em contato com outro, de diferentes idades, no sentido de recuperar uma estrutura, dar continuidade a concretagens ou ampliar construções, não é um procedimento adequado, mas na maioria das vezes é praticado;
2. a terapia ou procedimentos de concretagens depois de concluída uma obra ou sua continuidade deve ser avaliado em cada caso porém, em todos eles, é marcante a necessidade de um tratamento anterior;
3. a utilização de sílicas amorfa (de qualquer procedência) pode melhorar substancialmente a zona de transição entre pasta x agregado, devendo no entanto o usuário da técnica ter em mente que a simples utilização dessas adições podem ter efeitos indesejáveis, se a técnica não for compreendida;
4. a refrigeração das superfícies a serem ligadas contribui no desenvolvimento das propriedades projetadas, assim como, a montagem do próprio material de recuperação (evitar expor agregados a serem utilizados na confecção do material de ligação à insolação direta);
5. a ligação de superfícies, apesar de ser artesanal, é dotada de grande rigor científico;
6. a utilização de uma ampla faixa de traços de concretos que serviram de substrato aos concretos de reparo permitiu que se avaliasse de forma mais completa o comportamento deste sistema de reparo na ligação com diversos tipos de concreto,

desde os pobres em cimento até os concretos de alta resistência. Este comportamento foi satisfatório em todos os ensaios;

7. o preparo realizado na superfície da área a ser reparada em todos os casos foi crucial para o sucesso do trabalho. As condições de aderência proporcionadas pela clivagem do agregado graúdo e pela criação da condição de variação higrométrica (saturado superfície seca no agregado graúdo) elevaram de forma significativa a capacidade de interação entre o sistema de reparo e os substratos. Embora haja na literatura, pesquisadores que preferem não adotar a condição “saturada superfície seca” (sss) do agregado, em vista de resultados negativos alcançados em suas pesquisas, isto não se comprovou neste trabalho, aliás, a condição (sss) foi fundamental no sucesso do estabelecimento da ligação. Essa condição foi necessária a fim de que a sílica presente na PED, a qual foi aplicada na zona de interface, não perdesse água, em vista da baixa relação água/aglomerantes, que contribuiu para que ocorresse a reação pozolânica e a sílica deixou de se comportar como agregado, inerte;
8. durante o procedimento de preparo dos substratos de concreto, no caso dos corpos-de-prova recuperados neste trabalho, foi promovida a condição de variação higrométrica (sss). Recomenda-se que, em procedimentos de preparo de substrato em situações reais de recuperação, sejam realizadas, após a escarificação, aspersões com água até a saturação da superfície. Feito isso, deve-se aguardar a secagem superficial para prosseguir com a aplicação da pasta de cimento e posterior concretagem.
9. outra observação importante foi que, no que diz respeito à aplicação da pasta de cimento, sob as condições climáticas locais, a temperatura da água para a mistura deve ser otimizada (mantida próxima a 0° C), retardando desta forma as reações

de hidratação, já que o tempo entre aplicação da pasta e concretagem não deve exceder 5min. Isso foi comprovado no instante de ruptura de dois corpos-de-prova prismáticos recuperados, nos quais durante o processo de concretagem foi ultrapassado o tempo em aberto da pasta, não havendo, portanto interação entre pasta e concreto novo. Uma possível utilização de aditivos retentores de água e retardador de pega e endurecimento deve contribuir positivamente na qualidade dessa zona de interface;

10. a combinação de cimento de alta resistência (com adições de escória), adições de sílica ativa e superplastificante é particularmente interessante para situações de reparo/recuperação/reforço de estruturas de concreto. As adições de sílica ativa têm um papel importante na contribuição à resistência mecânica nas primeiras idades, já a escória de alto forno (presente no cimento CP VARI RS) considerando a progressiva hidratação, bem mais lenta, contribui para a resistência nas idades mais avançadas. Existem também dados que confirmam o efeito das duas adições na redução do tamanho e continuidade dos poros. A utilização deste sistema de reparo é indicada, sob muitos aspectos:
 - a) elevada aderência ao substrato devido ao fortalecimento de zona de interface, elevada resistência;
 - b) baixa permeabilidade;
 - c) boa trabalhabilidade devido sua fluidez, em consequência disso não necessitando de grandes vibrações em seu adensamento;
 - d) fácil mistura e aplicação simples;
11. deve-se sempre avaliar a sinergia entre aditivos x adições x cimentos Portland, anteriormente à sua especificação;

12. para dosagens em canteiros de obras, não há restrições específicas quanto ao preparo deste tipo de concreto, pois o roteiro de confecção não difere do atualmente realizado, entretanto estas exigências para a obtenção de elevado desempenho requerem orientação técnica competente.
13. a cura a ser aplicada no tratamento de substratos com a técnica estudada deverá ser por pelo menos 7 dias;
14. a avaliação final do desempenho do sistema de reparo aqui utilizado, proporcionou, no que tange à aderência aos diversos substratos de concretos estudados uma efetiva interação física e química entre as partes. Este fato foi percebido não só durante os ensaios com os corpos-de-prova prismáticos (tração na flexão), mas também durante os ensaios de compressão axial em corpos-de-prova com ninhos de concretagem recuperados, nos quais, analisando-se o modo de ruptura (colunar), não foi percebido desvio de tensões ao longo da altura do corpo-de-prova recuperado. Pôde-se perceber também neste caso, que o material de reparo não só participou da solicitação de cargas, mas também contribuiu, como no caso do traço 1:7,5, em um acréscimo de resistência mecânica. Com relação à resistência mecânica, já se esperava um desempenho notável por parte do CED, o que garante em situações de reparo um desempenho satisfatório na distribuição de esforços;
15. a utilização de traços bem diferentes – substratos e materiais de ligações – obviamente produziu módulos de elasticidade diferentes, porém não se observaram influências nos resultados analisados (tração na flexão e compressão simples), mesmo nos corpos-de-prova em que foram reduzidas as secções transversais em 50%. O que mudou, neste último caso, foi a forma de ruptura. No entanto esse fenômeno deve ser melhor pesquisado.

Assim sendo este sistema de reparos aqui estudado apresenta-se como uma real alternativa para situações de reparos, recuperações, continuidade, ligações e reforços, de elementos estruturais de concreto.

9. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Esta pesquisa tornou possível o desenvolvimento de um sistema de reparos alternativo para estruturas de concreto. O sistema está baseado em um trabalho de tratamento do substrato, preparação da superfície de concreto com a aplicação de pastas de cimento (PED), para posterior recuperação da área afetada com concretos de elevado desempenho. Tentou-se assim, contribuir tanto para a tecnologia dos reparos para estruturas de concreto quanto ao estudo de concretos de elevado desempenho.

Estes assuntos que, na presente pesquisa estão inter-relacionados, ainda oferecem diversas questões à investigação e análise. As dúvidas com relação à técnica mais adequada e/ou materiais mais adequados para trabalhos de recuperação de estruturas de concreto ainda não cessaram, assim como a problemática pertinente à região interfacial entre agregado e a pasta de cimento.

No sentido de ampliar os conhecimentos relativos a estas questões, sugerem-se as seguintes pesquisas:

1. avaliar o desenvolvimento da microestrutura das zonas de interface, PED x substrato e, PED x CED, com adições de diversas origens;
2. testar o processo na ligação entre pré-moldados;
3. avaliar o processo na recuperação de superfícies, com diversas profundidades;
4. avaliar conceitualmente o processo, como possível aplicação a outros subsistemas da construção (revestimentos: argamassados, pedras ornamentais, cerâmicas, porcelanatos, etc).
5. avaliação do comportamento do sistema de ligação aqui utilizado, em ensaios de painéis completos.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AİTCIN, P. C. (2000) *Concreto de alto desempenho*. Pini, São Paulo.
- ALMEIDA, I. R. (1996) *Influências da microssílica e do superplastificante na durabilidade dos concretos*. SEMINÁRIO "O Concreto - A utilização da sílica ativa em sua composição", Rio de Janeiro.
- ALMEIDA, I. R. (1996) *superplastificantes, microssílica e durabilidade dos concretos*. Revista Técnica, n. 24, p 30-33, Set/Out.
- AMARAL, C. K. (1988) *Concreto e argamassa de alta resistência com utilização de microssílica* In: Anais 30º IBRACON-REIBRAC - Instituto Brasileiro do Concreto - Rio de Janeiro.
- AMARAL FILHO, E. M. (1988) *Concreto de alta resistência*. São Paulo,.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) - COMMITTEE 546, (1997) *Concrete Repair Guide*.
- ANDRADE, M.D.C (1992) *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras* Pini São Paulo
- CARBONARI, B. M. T, CARBONARI, G. (1998) *Concreto de alto desempenho: Do laboratório à obra*. ENTAC 98 - Florianópolis,.
- CARLES-GIBERGUES, A., SAUCIER, F., GRANDET, J., PIGEON, M. (1993) *New-to-old concrete bonding - influence of sulfates type of new concrete on interface microstructure* CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, 23: (2) 431-441, MAR.

- CLÍMACO, J.C.T. (1991) *Uma análise crítica dos métodos de avaliação de aderência e do uso de agentes adesivos no reparo de estruturas de concreto* XXV JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, Porto Alegre, Nov.
- DECTER, M. H., KEELEY, C. (1997) *Durable concrete repair – importance of the compatibility and low shrinkage* Construction and Building Materials, vol. 11, nº 5-6.
- FOURÉ, B. (1995) *O concreto dos anos 2000* Encontro de Especialistas, São Paulo, outubro.
- FURNAS (1997) *Concreto: Estrutural, projetado e compactado a rolo. Ensaios e propriedades* Laboratório de concreto. São Paulo, Pini.
- GARCIA, C. C. (1999) *A Incidência de patologias geradas pela falta de controle e de qualidade nos canteiros de obra* Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, dissertação de Mestrado.
- GARCIA S.R.A & CLÍMACO, J.C.T.S (2000) *Eficiência da aderência de materiais de reparo para estruturas de concreto* Encontro nacional do concreto 42º IBRACON – REIBRAC - Instituto Brasileiro do Concreto.
- GENGIYNG, L., HUICAI, X., GUANGJING, X. (2001) *Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders* Cement & Concrete composites, nº 23.
- HELENE, P. R. L. (1983) *La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón*. Barcelona, Revista Hormigón, AATH, n. 10, May / Ago. p. 25-35
- HELENE, P. R. L. (1986) *Corrosão em armaduras para concreto armado* Pini, São Paulo.
- HELENE, P. R. L. (1992) *Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto* Pini, São Paulo.
- HELENE, P. R. L. & TERZIAN, P. (1992) *Manual de dosagem e controle do concreto* Pini, São Paulo.
- ISAIA, G. C. (1995) *Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura* Tese de Doutorado. EPUSP, PCC, São Paulo.
- LACOMBE, P., BEUPRE, D., POULIOT, N. (1999) *Rheology and bonding characteristics of self-leveling concrete as a repair material*, MATERIALS AND STRUCTURE, v.32: (222) 593-600 OCT.
- LE CHATELIER, H. (1904) *De recherches expérimentales sur la construction des liants hydrauliques* Paris, Dunot. Apud PAULON, V.A. (1991) *Estudos da microestrutura da*

zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado Tese de doutorado. EPUSP.

- LIBORIO, J. B. L.; SOUZA, M. F.; SILVA, I. J. & BRÁZ DE MELO, A (1997) *Concreto de alto desempenho uma idéia do futuro inovando no presente* Palestra - 67º ENIC - ENCONTRO NACIONAL DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO - Foz do Iguaçu - PR - Outubro, 15.
- LIBORIO, J.B.L. & SOUZA, M.F & MELO, A.B & SILVA, I.J. (1998) *A sílica ativa na produção de concretos resistentes* - In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA & 4º IBERO AMERICANO DE CERÂMICA, VIDRIOS Y REFRACTÁRIOS - Poços de Caldas/MG.
- LIBORIO, J. B. L. (1999). *Notas de aula - Disciplina: Patologia nas construções* Curso de pós-graduação - ESSC -USP
- LIBORIO, J.B.L. (2002) *Concretos estruturais com adições de sílicas ativa (Fe-Si, silício metálico e extraídas da casca do arroz) – pesquisa não divulgada – LMABC-SET-EESC-USP.*
- LICHTENSTEIN, N. B. (1985) *Patologia das Construções: Procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações*. Dissertação de Mestrado, EPUSP.
- LICHTENSTEIN, N. B. (1986) *Patologia das Construções* Boletim técnico, EPUSP.
- MELO, A.B. & LIBORIO, J.B.L. (1998) *Notas de Aula - SAP-5847 Patologia na construções Civil I* ESSC -USP.
- MELO, A. B. (2000) *Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland*,. Tese de doutorado, Interunidades em Ciência e engenharia de Materiais, USP, São Carlos.
- MELO, A. B. & LIBORIO, J. B. L. & SOUZA, M. F. & SILVA, I. J. (1998) *Influência do teor de adição de sílica amorfa (de ligas Ferro-Silício) nas propriedades mecânicas em pastas de cimentos Portland de alta resistência inicial* - In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA & 4º IBERO AMERICANO DE CERÂMICA, VIDRIOS Y REFRACTÁRIOS - Poços de Caldas/MG.
- METHA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. (1994) *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais* Pini, São Paulo.

- MORENO Jr., R. & SELMO S. M. S. (2001) *Reparos localizados superficiais em estruturas de concreto – Análise da aderência segundo métodos de ensaios distintos*. 43º IBRACON-REIBRAC - Instituto Brasileiro do Concreto.
- MORGAN, D. R. (1996) *Compatibility of concrete repair materials and systems* Construction and Building Materials, vol. 10, nº 01.
- NEVILLE, A.M. (1997) *Propriedades do concreto* Pini, São Paulo.
- PAPWORTH, F. (1997) *Production Of Silica Fume*.
- PAULON, V. A. (1991) *Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado* Tese de doutorado. EPUSP.
- REAL, C. ALCALÁ, M. D. & CRIADO, J. M. (1996) *Preparation of Silica from Rice Husks* J. Am. Ceram. Soc. 79 [8] 2012-16.
- REIS, A P.A (1998) *Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho*. Dissertação de mestrado. SET-ESSC-USP.
- SILVA, I. J. (2000) *Contribuição ao estudo dos concretos de alto desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade, microestrutura*. Tese de doutorado. Interunidades em ciência e Engenharia de Materiais-EESC-USP.
- SILVA, I. J. & LIBORIO, J. B. L. & SOUZA, M. F. & MELO, A. B. & AMARAL, C. K. (1998) *A influência do teor de adição e do tipo de sílica ativa nas propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland* In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA & 4º IBERO AMERICANO DE CERÂMICA, VIDRIOS Y REFRACTÁRIOS - Poços de Caldas/MG.
- LIBORIO, J. B. L. (1999) *Notas de Aula SAP-5847 Patologia na Construção civil I* Curso de pós-graduação - ESSC - USP.
- SILVA, M. R. (1985) *Materiais de Construção*, Pini, São Paulo.
- TAYLOR, H. F. W. (1992) *The chemistry of cements* Ed. Academic Press. London.
- TOZAKI, A. et al (1990). *Manual Técnico de Manutenção e Recuperação. Fundação para o desenvolvimento da Educação FDE*, São Paulo.
- VIVEKANDAM, K., PATNAYKUNY, I. (1997) *Transition zone in high performance concrete during hydration* Cement and concrete research, vol 27.

Bibliografia consultada

- BATRAKOV, V. G.; KAPRIELOV, S. S., SHEINFELD, A V. (1992) *Influence of different types of silica fume having varying silica content on the microstructure and properties of concrete*. In: Proceedings of the 4th international conference on the use of fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, may 3-8, Istanbul, Turkey.
- CAMERATO C. R. & HERMAN, E. (1988) *Estudos e aplicações de Concretos de Alta Resistência com Microssilica no Brasil*. In: Anais 30º REIBRAC - Instituto Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro.
- CARVALHO, R. F. (2000) *Tração por Flexão em Concretos reforçados com Fibras de Aço* Seminário de disciplina - SAP5820-3 - A Utilização de Novos Materiais na Tecnologia dos Concretos. EESC - USP.
- CUSSON, D., MAILVAGANAN, N. (1996) *Durability of repair materials* Concrete International V.18, nº3, Mar
- DO, M. T., CHANVILLARD, G., LUPIEN, C., AITCIN, P.C. (1992) *Laboratory study on adhesion of concrete overlay to old slab* CANADIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, 19: (6) 1041-1048 DEC.
- GAGNE, R., OLLIVIER, J. P., LATREILLE, Y. (1998) *Effects of superplasticizer, retarding agent, and silica fume on the air permeability of high-performance concrete* CEMENT CONCRETE AND AGGREGATES, 20: (2) 248-256 DEC.
- LIBORIO, J. B. L. & SOUZA, M. F & SILVA, I. J. & MELO, A. B & YAMAMOTO, P. S. B. (1998) *Silica da casca de arroz em concreto de alto desempenho* In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA & 4º IBERO AMERICANO DE CERÂMICA, VIDRIOS Y REFRACTÁRIOS - Poços de Caldas/MG.
- POON, C. S., LAM, L., WONG, Y. L. (1999) *Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete* JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, - 11: (3) 197-205 AUG.
- ROCHA, C.C. (1995) *Compatibilizando o novo material com o local da recuperação* Revista RECUPERAR Jul/Ago.
- SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO (1995) *Normas para elaboração de dissertações e teses – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais*. EESC-IFSC-IQSC-USP.

TOMAZ, E. (1989) *Trincas em edifícios – causas prevenções e recuperação* Pini São Paulo.

ANEXOS

Na depuração dos resultados de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão das dosagens avaliadas de concreto, foi aplicado o critério de "Chauvenet". Tal critério indica que, em uma série de medidas, a probabilidade de ocorrência de um desvio de valor "x" é menor que $1/2n$, conforme a seguinte fórmula: $P_x < 1/2n$

Sendo:

P_x = a probabilidade de o desvio ser "x"

n = o nº de medidas

Dessa forma, a medida que apresentar desvio acima do estabelecido deve ser rejeitada.

Neste trabalho, foram adotados os seguintes valores:

Ensaio	Nº de exemplares	P_x
Resistência à compressão axial - NBR 5739	04/idade	12,5%
Resistência à tração por compressão diametral - NBR 7222.	02/idade	25%
Resistência à tração na flexão - NBR 12142	12/idade	4,17%
	04/idade	12,5%

Anexo A – Resultados referentes aos Ensaios 01 (Estudo de dosagem de concretos)**Ensaio de compressão axial simples em corpos-de-prova de concreto - NBR 5739****Traço unitário individual - 1:3,5 (1: 1,30 : 2,20)**

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	26/09/00	29/09/00	3	30200	38.5
2	70 ± 10	26/09/00	29/09/00	3	29200	37.2
3	70 ± 10	26/09/00	29/09/00	3	28300	36.0
4	70 ± 10	26/09/00	29/09/00	3	29100	37.1
5	70 ± 10	26/09/00	03/10/00	7	33000	42.0
6	70 ± 10	26/09/00	03/10/00	7	33500	42.7
7	70 ± 10	26/09/00	03/10/00	7	32600	41.5
8	70 ± 10	26/09/00	03/10/00	7	32400	41.3
9	70 ± 10	26/09/00	24/10/00	28	41000	52.2
10	70 ± 10	26/09/00	24/10/00	28	40500	51.6
11	70 ± 10	26/09/00	24/10/00	28	40400	51.4
12	70 ± 10	26/09/00	24/10/00	28	40500	51.6

Traço unitário individual - 1:5,0 (1: 2,06 : 2.94)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	02/10/00	05/10/00	3	21300	27.1
2	70 ± 10	02/10/00	05/10/00	3	20700	26.4
3	70 ± 10	02/10/00	05/10/00	3	20500	26.1
4	70 ± 10	02/10/00	05/10/00	3	21500	27.4
5	70 ± 10	02/10/00	09/10/00	7	24100	30.7
6	70 ± 10	02/10/00	09/10/00	7	24700	31.4
7	70 ± 10	02/10/00	09/10/00	7	24100	30.7
8	70 ± 10	02/10/00	09/10/00	7	25000	31.8
9	70 ± 10	02/10/00	30/10/00	28	31700	40.4
10	70 ± 10	02/10/00	30/10/00	28	30600	39.0
11	70 ± 10	02/10/00	30/10/00	28	32100	40.9
12	70 ± 10	02/10/00	30/10/00	28	31500	40.1

Traço unitário individual - 1: 6,5 (1: 2,83 : 3,67)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	03/10/00	06/10/00	3	14600	18.6
2	70 ± 10	03/10/00	06/10/00	3	14000	17.9
3	70 ± 10	03/10/00	06/10/00	3	14400	18.3
4	70 ± 10	03/10/00	06/10/00	3	14800	18.8
5	70 ± 10	03/10/00	10/10/00	7	17100	21.8
6	70 ± 10	03/10/00	10/10/00	7	17400	22.2
7	70 ± 10	03/10/00	10/10/00	7	16600	21.1
8	70 ± 10	03/10/00	10/10/00	7	16500	21.0
9	70 ± 10	03/10/00	31/10/00	28	24500	31.2
10	70 ± 10	03/10/00	31/10/00	28	23200	29.5
11	70 ± 10	03/10/00	31/10/00	28	24800	31.6
12	70 ± 10	03/10/00	31/10/00	28	25000	31.8

Traço unitário individual - 1: 7,5 (1: 3,33 : 4,17)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	10/10/00	13/10/00	3	7000	8.9
2	70 ± 10	10/10/00	13/10/00	3	7400	9.4
3	70 ± 10	10/10/00	13/10/00	3	6800	8.7
4	70 ± 10	10/10/00	13/10/00	3	7500	9.5
5	70 ± 10	10/10/00	17/10/00	7	11000	14.0
6	70 ± 10	10/10/00	17/10/00	7	10500	13.4
7	70 ± 10	10/10/00	17/10/00	7	11000	14.0
8	70 ± 10	10/10/00	17/10/00	7	11000	14.0
9	70 ± 10	10/10/00	09/11/00	28	15700	20.0
10	70 ± 10	10/10/00	09/11/00	28	16500	21.0
11	70 ± 10	10/10/00	09/11/00	28	16200	20.6
12	70 ± 10	10/10/00	09/11/00	28	15500	19.7

Anexo B - Resultados referentes aos Ensaio 02 (Execução de substratos de concreto)

- Ensaio de compressão simples em corpos-de-prova de concreto - NBR 5739

Traço - 1:7,50 (1: 3,34 : 4,16)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	17500	22,3
2	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	17600	22,4
3	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	18000	22,9
4	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	17500	22,3

Traço - 1:7,10 (1: 3,13 : 3,97)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	23000	29,3
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	22500	28,6
3	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	22700	28,9
4	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	22500	28,6

Traço - 1:6,90 (1: 3,03 : 3,87)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	25000	31,8
2	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	26400	33,6
3	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	24500	31,2
4	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	25500	32,5

Traço - 1:6,40 (1: 2,77 : 3,63)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	28400	36,2
2	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	28600	36,4
3	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	29300	37,3
4	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	29000	36,9

Traço - 1:5,60 (1: 2,37 : 3,23)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{cl} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	30800	39,2
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	31100	39,6
3	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	30300	38,6
4	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	30000	38,2

Traço - 1:4,15 (1: 1,63 : 2,52)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{cl} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	36600	46,6
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	36700	46,7
3	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	36700	46,7
4	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	36600	46,6

Traço - 1:2,90 (1: 0,99 : 1,91)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{cl} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	28400	36,2
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	28600	36,4
3	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	29300	37,3
4	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	29000	36,9

- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova de concreto – NBR 7222.

Traço - 1:7,50 (1: 3,34 : 4,16)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{cj} (MPa)
1	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	8000	2,6
2	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	7500	2,4

Traço - 1:7,10 (1: 3,13 : 3,97)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{cj} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	8200	2,6
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	8800	2,8

Traço - 1:6,90 (1: 3,03 : 3,87)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{cj} (MPa)
1	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	9500	3,0
2	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	9300	3,0

Traço - 1:6,40 (1: 2,77 : 3,63)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{cj} (MPa)
1	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	10000	3,2
2	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	9600	3,1

Traço - 1:5,60 (1: 2,37 : 3,23)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{cj} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	9200	2,9
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	10600	3,4

Traço - 1:4,15 (1: 1,63 : 2,52)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{ci} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	10200	3,2
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	10600	3,4

Traço - 1:2,90 (1: 0,99 : 1,91)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{ci} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	14200	4,5
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	13700	4,4

- Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos - (NBR 12142).

Traço - 1:7,50 (1: 3,34 : 4,16)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2100	2,8
2	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2200	2,9
3	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2300	3,1
4	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2000	2,7
5	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2300	3,1
6	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2400	3,2
7	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2000	2,7
8	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2400	3,2
9	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2000	2,7
10	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2400	3,2
11	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2000	2,7
12	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2100	2,8

Traço - 1:7,10 (1: 3,13 : 3,97)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	2200	2,9
2	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	2600	3,5
3	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	2300	3,1
4	70 ± 10	11/04/00	09/05/00	28	2400	3,2
5	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2300	3,1
6	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2500	3,3
7	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2600	3,5
8	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2500	3,3
9	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2500	3,3
10	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2600	3,5
11	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2500	3,3
12	70 ± 10	09/04/00	07/05/00	28	2700	3,6

Traço - 1:6,90 (1: 3,03 : 3,87)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2600	3,5
2	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2600	3,5
3	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2700	3,6
4	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2900	3,9
5	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2700	3,6
6	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2700	3,6
7	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2600	3,5
8	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	3000	4,0
9	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2900	3,9
10	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2600	3,5
11	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	3000	4,0
12	70 ± 10	16/04/00	14/05/00	28	2900	3,9

Traço - 1:6,40 (1: 2,77 : 3,63)

CP - n°	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f _{ci} (MPa)
1	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	3400	4,5
2	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	3000	4,0
3	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	2600	3,5
4	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	2500	3,3
5	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	3200	4,3
6	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	2700	3,6
7	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	2700	3,6
8	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	2900	3,9
9	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	2700	3,6
10	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	3000	4,0
11	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	2900	3,9
12	70 ± 10	18/04/00	16/05/00	28	3000	4,0

Traço - 1:5,60 (1: 2,37 : 3,23)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{ci} (MPa)
1	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3100	4,1
2	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	2600	3,5
3	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3100	4,1
4	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3200	4,3
5	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3000	4,0
6	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3400	4,5
7	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3300	4,4
8	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3100	4,1
9	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	2600	3,5
10	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3100	4,1
11	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	3000	4,0
12	70 ± 10	20/04/00	18/05/00	28	2900	3,9

Traço - 1:4,15 (1: 1,63 : 2,52)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{ci} (MPa)
1	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3100	4,1
2	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3200	4,3
3	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3400	4,5
4	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3800	5,0
5	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3700	4,9
6	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3500	4,7
7	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3400	4,5
8	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3700	4,9
9	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3500	4,7
10	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3300	4,4
11	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3600	4,8
12	70 ± 10	23/04/00	21/05/00	28	3100	4,1

Traço – 1:2,90 (1: 0,99 : 1,91)

CP - nº	Abatimento (mm)	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kgf)	f_{ci} (MPa)
1	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4500	6,0
2	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4000	5,3
3	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4200	5,6
4	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4100	5,5
5	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4200	5,6
6	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4200	5,6
7	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4100	5,5
8	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	3900	5,2
9	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4500	6,0
10	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4300	5,7
11	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4600	6,1
12	70 ± 10	25/04/00	23/05/00	28	4500	6,0

Anexo C - Resultados referentes aos Ensaio 03 (Ligação concreto novo x concreto velho)

- Ensaio de compressão axial simples em corpos-de-prova de concreto - NBR 5739 (Concreto de ligação - CED)

Traço 1:3,0 (1,5:1,5)

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{ci} (MPa)
5%	01	10/09/01	08/10/01	28	562,0	71,6
	02	10/09/01	08/10/01	28	550,4	70,1
	03	10/09/01	08/10/01	28	579,6	73,8
	04	10/09/01	08/10/01	28	399,2	50,8
5%	01	11/09/01	09/10/01	28	584,2	74,4
	02	11/09/01	09/10/01	28	593,0	75,5
	03	11/09/01	09/10/01	28	597,4	76,1
	04	11/09/01	09/10/01	28	550,8	70,1
5%	01	12/09/01	10/10/01	28	567,3	72,2
	02	12/09/01	10/10/01	28	512,6	65,3
	03	12/09/01	10/10/01	28	527,5	67,2
	04	12/09/01	10/10/01	28	553,5	70,5

Traço 1:3,0 (1,5:1,5)

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{ci} (MPa)
10%	01	13/09/01	11/10/01	28	633,3	80,6
	02	13/09/01	11/10/01	28	641,0	81,6
	03	13/09/01	11/10/01	28	647,6	82,5
	04	13/09/01	11/10/01	28	566,7	72,2
10%	01	18/09/01	16/10/01	28	607,5	77,3
	02	18/09/01	16/10/01	28	366,2	46,6
	03	18/09/01	16/10/01	28	591,2	75,3
	04	18/09/01	16/10/01	28	621,8	79,2
10%	01	19/09/01	17/10/01	28	616,3	78,5
	02	19/09/01	17/10/01	28	635,9	81,0
	03	19/09/01	17/10/01	28	626,5	79,8
	04	19/09/01	17/10/01	28	432,8	55,1

Traço 1:3,0 (1,5:1,5)

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{ci} (MPa)
15%	01	20/09/01	18/10/01	28	570,4	72,6
	02	20/09/01	18/10/01	28	579,5	73,8
	03	20/09/01	18/10/01	28	558,4	71,1
	04	20/09/01	18/10/01	28	537,2	68,4
15%	01	24/09/01	22/10/01	28	631,9	80,5
	02	24/09/01	22/10/01	28	600,7	76,5
	03	24/09/01	22/10/01	28	617,4	78,6
	04	24/09/01	22/10/01	28	614,5	78,2
15%	01	25/09/01	23/10/01	28	583,4	74,3
	02	25/09/01	23/10/01	28	588,4	74,9
	03	25/09/01	23/10/01	28	549,2	69,9
	04	25/09/01	23/10/01	28	477,4	60,8

- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova de concreto – NBR 7222.

Traço 1:3,0 (1,5:1,5)

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{cd} (MPa)
5%	01	10/09/01	08/10/01	28	146,3	4,7
	02	10/09/01	08/10/01	28	151,9	4,9
5%	01	11/09/01	09/10/01	28	130,8	4,2
	02	11/09/01	09/10/01	28	106,0	3,4
5%	01	12/09/01	10/10/01	28	160,6	5,1
	02	12/09/01	10/10/01	28	137,4	4,4

Traço 1:3,0 (1,5:1,5)

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{cd} (MPa)
10%	01	13/09/01	11/10/01	28	146,9	4,7
	02	13/09/01	11/10/01	28	92,1	3,0
10%	01	18/09/01	16/10/01	28	173,7	5,5
	02	18/09/01	16/10/01	28	120,4	3,8
10%	01	19/09/01	17/10/01	28	144,1	4,6
	02	19/09/01	17/10/01	28	113,4	3,6

Traço 1:3,0 (1,5:1,5)

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{cd} (MPa)
15%	01	20/09/01	18/10/01	28	121,7	3,9
	02	20/09/01	18/10/01	28	149,9	4,8
15%	01	24/09/01	22/10/01	28	144,1	4,6
	02	24/09/01	22/10/01	28	199,1	6,3
15%	01	25/09/01	23/10/01	28	184,9	5,9
	02	25/09/01	23/10/01	28	111,7	3,6

- Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos - (NBR 12142).

Traço – 1: 7,50

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{ci} (MPa)
5%	01	10/09/01	08/10/01	28	19,8	2,6
	06	10/09/01	08/10/01	28	17,4	2,3
	08	10/09/01	08/10/01	28	21,0	2,8
	12	10/09/01	08/10/01	28	22,9	3,1
10%	02	13/09/01	11/10/01	28	21,7	2,9
	03	13/09/01	11/10/01	28	21,7	2,9
	07	13/09/01	11/10/01	28	21,5	2,9
	11	13/09/01	11/10/01	28	11,7	1,6
15%	04	24/09/01	22/10/01	28	21,6	2,9
	05	24/09/01	22/10/01	28	21,3	2,8
	09	25/09/01	22/10/01	28	21,2	2,8
	10	25/09/01	22/10/01	28	26,9	3,6

Traço – 1:7,10

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{ci} (MPa)
5%	03	11/09/01	09/10/01	28	23,4	3,1
	04	11/09/01	09/10/01	28	21,7	2,9
	09	11/09/01	09/10/01	28	23,9	3,2
	11	11/09/01	09/10/01	28	Sem registro	
10%	10	13/09/01	11/10/01	28	21,7	2,9
	01	18/09/01	16/10/01	28	17,6	2,3
	06	18/09/01	16/10/01	28	22,7	3,0
	08	18/09/01	16/10/01	28	21,3	2,8
15%	02	20/09/01	18/10/01	28	25,9	3,5
	05	20/09/01	18/10/01	28	29,7	4,0
	07	20/09/01	18/10/01	28	22,2	3,0
	12	20/09/01	18/10/01	28	22,4	3,0

Traço – 1:6,90

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{ci} (MPa)
5%	01	12/09/01	10/10/01	28	31,6	4,2
	03	12/09/01	10/10/01	28	24,3	3,2
	07	12/09/01	10/10/01	28	21,5	2,9
	08	12/09/01	10/10/01	28	20,2	2,7
10%	05	19/09/01	17/10/01	28	22,8	3,0
	06	19/09/01	17/10/01	28	28,3	3,8
	09	19/09/01	17/10/01	28	22,5	3,0
	12	19/09/01	17/10/01	28	23,5	3,1
15%	02	25/09/01	23/10/01	28	19,2	2,6
	04	25/09/01	23/10/01	28	24,8	3,3
	10	25/09/01	23/10/01	28	27,3	3,6
	11	25/09/01	23/10/01	28	21,9	3,0

Traço – 1:6,40

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{ci} (MPa)
5%	09	10/09/01	08/10/01	28	33,4	4,5
	03	11/09/01	09/10/01	28	26,7	3,6
	05	11/09/01	09/10/01	28	31,2	4,2
	08	11/09/01	09/10/01	28	26,6	3,6
10%	01	18/09/01	16/10/01	28	19,6	2,6
	06	18/09/01	16/10/01	28	21,3	2,8
	07	18/09/01	16/10/01	28	19,8	2,6
	10	18/09/01	18/10/01	28	18,7	2,5
15%	02	24/09/01	22/10/01	28	25,7	3,4
	04	24/09/01	22/10/01	28	26,8	3,6
	11	24/09/01	22/10/01	28	29,9	4,0
	12	24/09/01	22/10/01	28	22,4	3,0

Traço – 1:5,60

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{cj} (MPa)
5%	01	10/09/01	08/10/01	28	27,5	3,7
	02	10/09/01	08/10/01	28	25,7	3,4
	03	10/09/01	08/10/01	28	32,3	4,3
	05	10/09/01	08/10/01	28	30,9	4,1
10%	08	13/09/01	11/10/01	28	19,9	2,7
	09	13/09/01	11/10/01	28	26,9	3,6
	10	13/09/01	11/10/01	28	23,4	3,1
	11	13/09/01	11/10/01	28	24,6	3,2
15%	04	20/09/01	18/10/01	28	28,8	3,8
	06	24/09/01	22/10/01	28	24,2	3,2
	07	24/09/01	22/10/01	28	24,7	3,3
	12	24/09/01	22/10/01	28	29,6	3,9

Traço – 1:4,15

Adição Sílica	CP- n°	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f _{cj} (MPa)
5%	08	11/09/01	09/10/01	28	27,8	3,7
	10	11/09/01	09/10/01	28	29,4	4,0
	05	12/09/01	10/10/01	28	24,3	3,2
	07	12/09/01	10/10/01	28	29,3	3,9
10%	04	19/09/01	17/10/01	28	28,1	3,7
	09	19/09/01	17/10/01	28	24,8	3,3
	11	19/09/01	17/10/01	28	27,0	3,6
	12	19/09/01	17/10/01	28	28,7	3,8
15%	01	20/09/01	18/10/01	28	25,6	3,4
	02	20/09/01	18/10/01	28	26,2	3,5
	03	20/09/01	18/10/01	28	29,7	4,0
	06	20/09/01	18/10/01	28	29,3	3,9

Traço – 1:2,90

Adição Sílica	CP- nº	Data de moldagem	Data de ruptura	Idade (dias)	Carga (kN)	f_{cj} (MPa)
5%	01	10/09/01	08/10/01	28	36,6	4,9
	06	10/09/01	08/10/01	28	33,5	4,5
	08	10/09/01	08/10/01	28	30,5	4,1
	12	10/09/01	08/10/01	28	29,1	3,9
10%	02	18/09/01	16/10/01	28	28,6	3,8
	05	18/09/01	16/10/01	28	28,4	3,8
	09	19/09/01	17/10/01	28	13,5	1,8
	10	19/09/01	17/10/01	28	26,9	3,6
15%	03	25/09/01	23/10/01	28	25,2	3,4
	04	25/09/01	23/10/01	28	28,9	3,9
	07	25/09/01	23/10/01	28	26,9	3,6
	11	25/09/01	23/10/01	28	34,7	4,6

Anexo D - Resultados referentes aos Ensaio 04 (Recuperação de ninhos de concretagem).

Substrato/traço 1:7,5 - CP II F 32, concreto de reparo/traço 1:3,0 - CP V ARI RS,
10%SA. e 1,8% SP

CP	f_{c28} (MPa) Referência	f_{c56} (MPa) CP Seccionado/ reparo	f_{c56} (MPa) CP ninho de concretagem/ reparo	f_{c28} (MPa) CP material reparo
01	23,6	28,0	25,9	83,4
02	23,3	30,0	23,2	81,3
03	22,6	31,2	24,5	74,4
04	21,9	30,1	---	79,7

Substrato/Traço 1:2,9 - CP II F 32, concreto de reparo/traço 1:3,0 - CP V ARI RS,
10%SA. e 1,8% SP

CP	f_{c28} (MPa) Referência	f_{c56} (MPa) CP Seccionado/ reparo	f_{c56} (MPa) CP ninho de concretagem/ reparo	f_{c28} (MPa) CP material reparo
01	54,1	55,5	55,7	78,6
02	56,7	56,5	57,1	73,5
03	55,9	59,3	56,2	82,3
04	54,4	54,1	54,2	79,5