

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Flavio Vassallo Mattos

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ARGAMASSAS
DE RECUPERAÇÃO SUPERFICIAL EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Vitória
2002

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Flavio Vassallo Mattos

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ARGAMASSAS DE
RECUPERAÇÃO SUPERFICIAL EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Fernando Lordêllo dos Santos Souza, MSc. e João Luiz Calmon Nogueira da Gama, Dr. Ing.

Vitória
2002

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO SUPERFICIAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Flavio Vassallo Mattos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 22/04/2002 por:

Prof. Dr.Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
UFES (Orientador)

Prof. M.Sc. Fernando Lordêllo dos Santos Souza.
UFES (Co-orientador)

Prof. Dr.Ing. Marcel Olivier Ferreira de Oliveira.
UFES (Examinador Interno)

Prof. D.Sc. Oswaldo Cascudo Matos.
UFG (Examinador Interno)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória-ES, Abril de 2002.

FICHA CATALOGRÁFICA

Mattos, Flavio Vassallo (1972)

Contribuição ao Estudo de Argamassas de Recuperação Superficial em Estruturas de Concreto Armado [Vitória, 2002].

..... 297mm (UFES, M. Sc., Engenharia Civil, 2002)

Dissertação, Universidade Federal do Espírito Santo, PPGEC.

1. Argamassas de recuperação estrutural

I. PPGEC/UFES

II. Título (série)

Com tempo e paciência, a folha da amoreira se transforma em seda.

(Provérbio Chinês)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A meus pais, Márcia e Augusto, meu irmão Fábio, minha avó Alcy, minha namorada Giovana e minha cunhada Luciana, sem os quais este trabalho não teria acontecido.

Ao meu avô Godofredo Vassallo, meu tio Rogério Encarnação e a Henrique José de Mello, os quais, mesmo não estando fisicamente presentes, deram exemplos de vida a serem seguidos.

Ao orientador, Prof. João Luiz Calmon Nogueira da Gama, pessoa incansável em suas convicções e braço forte nos momentos de desespero.

Ao co-orientador, Prof. Fernando Lordêllo Santos Souza, toda sua paciência e ajuda dispensadas, principalmente no trabalho laboratorial.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LEMAC, do Centro Tecnológico da UFES nas pessoas do Carlos Izoton, Márcio Loss, Jorge, Loriato e Tião, e aos demais laboratoristas do Centro Tecnológico: Miguel Caxias e Paulo César.

A Furnas Centrais Elétricas nas pessoas do Walton Pacelli de Andrade, Elcio Guerra e o Brito, como às demais pessoas envolvidas nas análises necessárias para realização dos ensaios destinados a esta dissertação.

À professora Eliana Zandonade que me ajudou na parte estatística.

A Cimento Nassau, na pessoa do Sr. João Zamir, que doou o cimento necessário à realização do trabalho e à Microssílica que doou a sílica ativa.

À pessoa do seu João de Souza, que com boa vontade contribuiu com materiais e experiência profissional na elaboração desta pesquisa.

À Argalite, indústria da região, que teve interesse em apoiar o peneiramento da quantidade de areia que fosse necessária para a produção das argamassas com sílica ativa.

Aos meus Professores e Colegas do Mestrado em Engenharia Civil, principalmente a: Fernando Avancini, Georgia Serafim e ao Maurício Lordêllo, que muito me apoiaram. Não podendo esquecer do ex-secretário do mestrado Roberto, que muito ajudou nos pequenos problemas do dia-a-dia e de Laura e Wilton que muito colaboram nos dias de hoje.

Os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse desenvolvido.

RESUMO

O concreto armado é um sistema construtivo de utilização mundialmente conhecido. Isso se deve à facilidade de compor formas e dimensões, que são de grande importância para produzir detalhes arquitetônicos e estruturais.

Porém, devido a problemas na concepção, construção ou utilização das edificações ou obras de arte, as mesmas podem apresentar problemas patológicos, sendo necessárias intervenções para reabilitar a estrutura. Neste contexto, entram as argamassas para recuperação estrutural, materiais utilizados para reabilitar a estrutura, mantendo ou aumentando a vida útil da mesma.

Assim sendo, esta dissertação apresenta uma contribuição ao estudo de argamassas de recuperação estrutural superficial, através do levantamento e comparação de propriedades entre seis argamassas para este fim. Quatro argamassas são dosadas em laboratório, com uso de sílica ativa, um aditivo redutor de retração e um aditivo superplastificante; as outras duas são argamassas com adição de polímeros encontradas no comércio local.

No levantamento bibliográfico, foi dada ênfase: nas características desejadas para uma argamassa de recuperação, nas faixas de valores para propriedades importantes e nas argamassas com uso de sílica ativa.

Executaram-se ensaios mecânicos e físicos nas seis argamassas, dentre eles: consistência, resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade e por imersão, retração livre e restringida, resistência de aderência à tração e ao cisalhamento da junta inclinada.

Finalmente apresentam-se os resultados dos ensaios das argamassas, comparando-os entre si e com valores dessas propriedades citadas por outros autores, mostrando onde as argamassas com sílica ativa devem melhorar para aumentar a sua qualidade.

ABSTRACT

The reinforced concrete is a world wide known constructive system, due to the easiness in composing forms and dimensions, which are of great importance to produce structural and architectural details.

However, problems in conception, construction or use of constructions lead to pathological problems, and the interventions to rehabilitate the structure are necessary. In this context, mortars for structural repair are one of the materials used to rehabilitate the structures, keeping or increase its service life.

This dissertation presents a contribution to the study of mortars for structural repair, through the survey and matching of properties among six mortars for this purpose. Four of the mortars are dosed in laboratory with addition of silica fume, and another two of them are polymers modified cement mortars found in the local commerce.

The bibliographical survey focuses the properties and characteristics of the repair materials and silica fume mortars.

Mechanicals and physicals tests were heeded in the six mortars, such as: i) compressive strength, ii) capillarity and immersion absorption, iii) elastic modulus, iv) free and restrained shrinkage, v) bond strength by slant shear test and vi) adhesion strength to concrete.

Finally, the results of the tests for the mortars were presented, through a comparison among themselves and between other authors results, showing where mortars with silica fume must improve to increase their quality.

SUMÁRIO

Página

Lista de tabelas	
Lista de quadros	
Lista de figuras	
Lista de fotografias	
Lista de equações	
Lista de símbolos e abreviações	
Lista de compostos e elementos	
Resumo	
Abstract	

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Fundamentação	21
1.2 Objetivo da dissertação	25
1.2.1 Objetivo geral	25
1.2.2 Objetivo específico	25
1.3 Hipóteses e variáveis	26
1.4 Limitações do estudo	27
1.5 Estrutura da dissertação	27

CAPÍTULO 2 – PROBLEMAS PATOLÓGICOS

2.1 Introdução	30
2.2 Corrosão de armadura	34
2.2.1 Mecanismo da corrosão	36
2.2.2 Atuação dos cloretos	39
2.2.2.1 Teor de cloretos	40
2.2.2.2 Meio ambiente	42
2.2.3 Carbonatação	43
2.2.3.1 Velocidade de carbonatação	44
2.2.3.2 Fatores que influenciam a carbonatação	45
2.2.3.3 Influência do tipo de cimento	47
2.2.3.4 Determinação da profundidade de carbonatação	47
2.2.3.5 Meio ambiente	48
2.2.4 Cuidados visando à melhoria da durabilidade do concreto armado	49

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS USADOS EM RECUPERAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS

3.1 Introdução	52
3.2 Classificação dos materiais de reparo	52
3.3 Propriedades requeridas dos materiais de reparo	56
3.3.1 Propriedades que devem ser analisadas para as argamassas de recuperação	57
3.3.2 Valores de algumas propriedades dos materiais de recuperação	59
3.4 Locais de utilização de alguns dos materiais de reparo	65
3.5 Mão-de-obra	67
3.6 Cura	68

CAPÍTULO 4 – CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES PARA UM BOM FUNCIONAMENTO DAS ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO

4.1 Introdução	73
4.2 Aderência	73
4.2.1 Avaliação da resistência de aderência	75
4.3 Tipo de cimento	77
4.4 Retração	79
4.4.1 Ensaios de retração	82
4.5 Módulo de deformação	84
4.6 Penetração de cloretos	87
4.7 Coeficiente de dilatação térmica	89

CAPÍTULO 5 – ARGAMASSAS COM SÍLICA ATIVA

5.1 Introdução	92
5.2 Sílica ativa	92
5.3 Superplastificante	93
5.4 Influência da sílica ativa na melhoria de propriedades dos concretos e argamassas	94
5.4.1 Resistência a ácidos orgânicos	94
5.4.2 Retração e expansão	95
5.4.3 Migração de íons cloretos	96
5.4.4 Resistência a sulfatos e ácido sulfúrico	97
5.4.5 Porosidade	100
5.4.6 Resistência à compressão	101
5.5 Alguns usos em reparos de barragens	106
5.6 Dissertações envolvendo estudos de argamassas com sílica ativa	111
5.7 Considerações finais	121

CAPÍTULO 6 – PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Introdução	123
6.2 Escolha das argamassas e materiais constituintes	124
6.3 Caracterização dos materiais	126
6.3.1 Cimento	126
6.3.2 Areia	127
6.3.3 Sílica ativa	129
6.3.4 Aditivos	130
6.3.5 Água	130
6.4 Argamassas e concretos utilizados	130
6.4.1 Argamassas industrializadas	131
6.4.2 Argamassas com sílica ativa	132
6.4.3 Concreto base	133
6.5 Procedimentos de ensaio	134
6.5.1 Mistura	134
6.5.2 Compactação	135
6.5.3 Condições de cura	135
6.6 Ensaio executados	136
6.6.1 Determinação da consistência, ar incorporado e da retenção de consistência	136
6.6.2 Massa específica no estado fresco	138
6.6.3 Resistência à compressão	138
6.6.4 Resistência à tração por compressão diametral	138
6.6.5 Módulo de deformação	139
6.6.6 Absorção de água por imersão e por capilaridade	141
6.6.7 Retração livre	142
6.6.8 Retração restringida	143
6.6.9 Resistência de aderência à tração	145
6.6.9 Resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada	147
6.6.10 Coeficiente de dilatação térmica linear	149
6.6.11 Condutividade térmica na argamassa	149
6.6.12 Ensaio de durabilidade	149
6.7 Análise estatística	151

CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1 Introdução	153
7.2 Ensaio no estado fresco	153
7.2.1 Consistência, ar incorporado e da retenção de consistência	153
7.2.2 Massa específica	154
7.3 Ensaio no estado endurecido	155
7.3.1 Resistência à compressão axial	155
7.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	157
7.3.3 Módulo de deformação	159
7.3.4 Absorção de água por capilaridade	161
7.3.5 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios	163

7.3.6 Retração livre	164
7.3.7 Retração restringida	166
7.3.8 Resistência de aderência à tração	167
7.3.9 Resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada	169
7.3.10 Coeficiente de dilatação térmica linear	171
7.3.11 Condutividade térmica na argamassa	172
7.3.12 Ensaio de durabilidade	173
7.4 Comparação entre dados obtidos nesta pesquisa com os dos fabricantes	174

CAPÍTULO 8 – RECOMENDAÇÕES FINAIS

8.1 Síntese	177
8.2 Conclusões específicas	177
8.2.1 Ensaio no estado fresco	177
8.2.2 Ensaio no estado endurecido	178
8.3 Conclusões gerais	179
8.4 Sugestões para futuros trabalhos	180

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliográficas	182
Referências bibliográficas das normas técnicas e métodos	191

ANEXO A	194
----------------	-----

LISTA DE TABELAS

Página

	Página
Capítulo 1	
Tabela 1.1 – Custos de recuperação de estruturas de concreto armado no Estado de Pernambuco (ANDRADE, 1997, p. 124)	21
Capítulo 2	
Tabela 2.1 – Índices de patologias em estruturas de concreto armado no Brasil (DÓREA & SILVA, 1999, p. 615)	30
Capítulo 3	
Tabela 3.1 – Granulometria dos materiais (MANGAT & LIMBACHIYA, 1997)	62
Tabela 3.2 – Resistência à compressão, flexão e módulo de deformação (MANGAT & LIMBACHIYA, 1997, P. 606)	62
Tabela 3.3 – Deformações de retração e expansão nos materiais na idade de 120 dias ($\times 10^{-6}$) (MANGAT & LIMBACHIYA, 1997, P. 610)	63
Tabela 3.4 – Densidade, permeabilidade e coeficiente de difusão (MANGAT & LIMBACHIYA, 1999)	63
Tabela 3.5 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão (adaptada de HASSAN <i>et al</i> , 2000)	70
Capítulo 4	
Tabela 4.1 – Análise das expressões para obtenção do módulo de deformação	86
Capítulo 5	
Tabela 5.1 – Resultados encontrados (AMARAL & TEZUCA, 1992)	94
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios (RAO, 1998, p. 1508)	95
Tabela 5.3 – Traços utilizados e propriedades físicas a 28 dias das argamassas estudadas (adaptada de TORII & KAWAMURA, 1994)	98
Tabela 5.4 – Misturas e algumas propriedades da Série I ($a/c = 0,417$) (RAO, 2001b, p. 9)	103
Tabela 5.5 – Misturas e algumas propriedades da Série II ($a/c = 0,5$) (RAO, 2001b, p. 9)	103
Tabela 5.6 – Resultados de resistência à compressão, módulo de deformação da Série I (adaptada de RAO, 2001b)	104
Tabela 5.7 – Resultados de resistência à compressão, módulo de deformação da Série II (adaptada de RAO, 2001b)	104
Tabela 5.8 – Traços utilizados e resistências à compressão axial e à tração na flexão (adaptada de BARONIO <i>et al</i> , 1990)	106
Tabela 5.9 – Resultados de resistência à compressão (GOULART NETO <i>et al</i> , 1995)	107
Tabela 5.10 – Resultados de resistência à compressão e ar incorporado (KULAKOWSKI, 1994)	112
Tabela 5.11 – Carga total passante e teor de cloretos retidos total (em relação ao peso de cimento) (KULAKOWSKI, 1994)	113

Tabela 5.12 – Resultados de resistência à compressão e tração na compressão diametral (SCHULER, 1998)	115
Tabela 5.13 – Resultado do ensaio de compressão-cisalhamento da junta inclinada (adaptada de SCHULER, 1998)	116
Tabela 5.14 – Determinação da resistência de aderência à tração (adaptada de SCHULER, 1998)	116
Tabela 5.15 – Resultados dos ensaios de módulo de deformação e profundidade de carbonatação (SCHULER, 1998)	117
Tabela 5.16 – Resultados de resistência à compressão, tração e módulo de deformação (FIGUEIREDO, 1998)	119

Capítulo 6

Tabela 6.1 – Ensaio físicos no cimento	127
Tabela 6.2 – Ensaio químicos no cimento	127
Tabela 6.3 – Análise granulométrica da areia de jazida	128
Tabela 6.4 – Caracterização da areia de jazida	128
Tabela 6.5 – Análise química da sílica ativa	129
Tabela 6.6 – Granulometria das argamassas industrializadas	131
Tabela 6.7 – Médias de temperatura e umidade relativa do ar	136

Capítulo 7

Tabela 7.1 – Índice de consistência base e ar incorporado nas argamassas	153
Tabela 7.2 – Massa específica no estado fresco	155
Tabela 7.3 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial (NBR 7215 (1996))	156
Tabela 7.4 – Resultado do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222 (1994))	158
Tabela 7.5 – Valores do módulo de deformação para os corpos-de-prova	159
Tabela 7.6 – Altura capilar medida nos cp _s após o período de ensaio	162
Tabela 7.7 – Absorção de água por capilaridade em 72 h	162
Tabela 7.8 – Resultado de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	163
Tabela 7.9 – Valores de retração livre para 28 dias	165
Tabela 7.10 – Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração	167
Tabela 7.11 – Resultados do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada	169
Tabela 7.12 – Resultados do ensaio de coeficiente de dilatação térmica linear	171
Tabela 7.13 – Resultados dos ensaio de condutividade térmica	172
Tabela 7.14 – Intensidade de corrente que passava pelos cp _s	173
Tabela 7.15 – Análise entre os resultados do fabricante e os resultados obtidos nesta pesquisa – argamassa A	174
Tabela 7.16 – Análise entre os resultados do fabricante e os resultados obtidos nesta pesquisa – argamassa B	175

LISTA DE QUADROS

Página

	Página
Capítulo 1	
Quadro 1.1 – Sugestões para escolha da argamassa de reparo em função das condições de uso (LEVY & HELENE, 2000, p. 55)	24
Capítulo 2	
Quadro 2.1 – Causas da deterioração das estruturas de concreto armado (adaptada de COLLEPARDI, 1999)	32
Quadro 2.2 – Classes de agressividade ambiental (HELENE, 1997, p. 6)	36
Quadro 2.3 – Classes de agressividade do ambiente em função das condições de exposição (HELENE, 1997, p. 7)	36
Quadro 2.4 – Limite de Normas para teor total de cloretos (adaptado de HELENE, 1993)	41
Quadro 2.5 – Concentrações de CO ₂ em função da localização (HELENE, 1993)	48
Quadro 2.6 – Fatores intervenientes no processo de corrosão, carbonatação e contaminação por cloretos (HELENE, 1993, p. 158)	50
Capítulo 3	
Quadro 3.1 – Propriedades de argamassas para reparos em estruturas de concreto com corrosão de armadura, e sugestões para a sua aplicação no controle tecnológico de fornecedores (MEDEIROS & SELMO, 2001, p. 7)	58
Quadro 3.2 – Propriedades dos sistemas de reparo para qualificação de fornecedores (MEDEIROS & SELMO, 2001, p. 7)	59
Quadro 3.3 – Propriedades de argamassas de recuperação (LAMB, 1989, p. 149)	60
Quadro 3.4 – Propriedades de materiais para recuperação (adaptado de LAMB, 1989)	60
Quadro 3.5 – Propriedades mecânicas típicas para materiais de reparo (MAYS & WILKINSON, 1987 apud MORGAN, 1996, p. 59)	61
Quadro 3.6 – Critérios de desempenho preliminares (adaptado de EMMONS <i>et al</i> , 2000)	63
Quadro 3.7 – Níveis mínimos para propriedades das argamassas de reparo (SILVA JUNIOR, 2001)	64
Quadro 3.8 – Propriedades características das argamassas e concretos de reparo mais utilizados (GEHO, 1989 apud SILVA JUNIOR, 2001, p. 109)	65
Quadro 3.9 – Escolha do material de reparo (adaptado de OLIVEIRA, 1989)	66
Capítulo 4	
Quadro 4.1 – Tipos de cp _s usados em ensaios de retração	83
Quadro 4.2 – Estudos de retração utilizando placas (adaptado de TANESI, 1999)	84

Capítulo 5	
Quadro 5.1 – Composição das argamassas em kg (AMARAL & TEZUCA, 1992, p. 5)	94
Quadro 5.2 – Traços utilizados (HISADA <i>et al</i> , 1999, p. 444)	96
Quadro 5.3 – Misturas utilizadas no ensaio de variação dimensional (GASTALDINI & ISAIA, 1998a, p. 48)	99
Quadro 5.4 – Misturas utilizadas para o ensaio de porosidade (adaptado de GASTALDINI & ISAIA, 1998b)	100
Quadro 5.5 – Traços das argamassas usadas (GOULART NETO <i>et al</i> , 1995)	107
Quadro 5.6 – Traço das argamassas, em proporções (KULAKOWSKI, 1994, P. 73)	112
Quadro 5.7 – Traços usados (adaptado de SCHULER, 1998)	114
Quadro 5.8 – Traços utilizados (FIGUEIREDO, 1998, p. 51)	119
Capítulo 6	
Quadro 6.1 – Determinação e proporção das argamassas com s.a.	132
Quadro 6.2 – Consumo de material em cada traço	132
Capítulo 7	
Quadro 7.1 – Resultados obtidos no ensaio de retração restringida	166

LISTA DE FIGURAS

Página

Capítulo 1	
Figura 1.1 – Fatores que afetam a durabilidade do sistema de reparo (EMMONS & VAYSBURD, 1996, p. 71)	23
Capítulo 2	
Figura 2.1 – Diagrama de POURBAIX (1987) apud FORTES & ANDRADE (2000, p. 3), para o sistema Fe – H ₂ O, a 25°C a 1atm, no concreto	35
Figura 2.2 – Formação de uma pilha de corrosão no aço imerso (adaptada de SERRA, 1992)	38
Figura 2.3 – Reação na fase aquosa e relação entre a espessura carbonatada em função do tempo e da umidade do ambiente (ANDRADE, 1992, p. 30)	44
Figura 2.4 – Relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão de concretos após 2 anos de exposição ao ar, UR=65% (NEVILLE, 1997, p. 499)	46
Capítulo 3	
Figura 3.1 – Classificação do material – base cimento (adaptada de ANDRADE, 1992)	52
Figura 3.2 – Classificação do material – base polimérica ou resina (adaptada de ANDRADE, 1992)	53

Figura 3.3 –	Classificação do material – Mistos (adaptada de ANDRADE, 1992)	54
Capítulo 4		
Figura 4.1 –	Configuração do corpo-de-prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão, unidades em mm (MORENO & SELMO, 2001, p. 5)	76
Figura 4.2 –	Teste de compressão-cilhamento de prismas compostos com junta diagonal, abaixo o detalhe das fôrmas (GARCIA & CLIMACO, 2001, p. 3)	76
Figura 4.3 –	Configuração do prisma para o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão, unidades em mm (MORENO & SELMO, 2001, p. 4)	77
Capítulo 6		
Figura 6.1 –	Argamassas em estudo	123
Figura 6.2 –	Programa laboratorial	126
Figura 6.3 –	Curvas granulométricas das areias e das argamassas industrializadas	133
Figura 6.4 –	Corpo-de-prova para o ensaio de aderência ao cisalhamento oblíquo	147
Capítulo 7		
Figura 7.1 –	Resultado do ensaio de perda de consistência nas argamassas	154
Figura 7.2 –	Resultados do módulo de deformação	160
Figura 7.3 –	Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade	161
Figura 7.4 –	Resultados dos ensaios de retração livre nas argamassas	164
Figura 7.5 –	Tipos de rupturas no ensaio de arrancamento	168

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Página

Capítulo 6		
Fotografia 6.1 –	Equipamento utilizado na mistura e local de armazenamento das argamassas.	134
Fotografia 6.2 –	Mesa para obtenção do índice de consistência	137
Fotografia 6.3 –	Aparelho para obtenção do volume de ar incorporado na argamassa	137
Fotografia 6.4 –	Registro dos cp_s 5x10 cm antes e depois de rompidos à compressão axial	139
Fotografia 6.5 –	Detalhe da base de medida em um lado de um cp 5x10 cm	141
Fotografia 6.6 –	Exemplifica a ação de encaixe e posterior medida da deformação	141
Fotografia 6.7 –	Aparato montado para execução do ensaio de absorção capilar	142

Fotografia 6.8 –	Corpos-de-prova rompidos à tração por compressão diametral, visando à verificação da altura capilar	142
Fotografia 6.9 –	Aparelho usado na determinação da retração livre	143
Fotografia 6.10 –	Avaliação do aparecimento de fissuras	144
Fotografia 6.11 –	Verificação do deslocamento da argamassa após a ruptura	144
Fotografia 6.12 –	Forma usada para moldar as “pastilhas” de argamassa	146
Fotografia 6.13 –	Os cp_s de argamassa com as placas metálicas coladas na sua superfície	146
Fotografia 6.14 –	Corpos-de-prova durante o ensaio de resistência de aderência à tração	146
Fotografia 6.15 –	Tipos de ruptura: em uma das interfaces (a), e nas interfaces passando pela argamassa (b) e (c)	148
Fotografia 6.16 –	Detalhes do ensaio de durabilidade das argamassas	151

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página
Equação 2.1	37
Equação 2.2	38
Equação 2.3	38
Equação 2.4	38
Equação 2.5	39
Equação 2.6	39
Equação 2.7	43
Equação 2.8	45
Equação 4.1	85
Equação 4.2	85
Equação 4.3	85
Equação 4.4	87

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Símbolo ou Abreviação Significado

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AFNOR	Association Francaise de Normalisation
ASTM	American Society and Testing of Materials
AJ2	Argamassa com Areia de Jazida
a/c	Água/cimento
a/aglo	Água/aglomerante

ARI	Alta Resistência Inicial
BSI	British Standards Institution
CEB	Comite Euro-Internacional du Beton
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CP	Cimento Portland
cp	Corpo-de-prova
cp _s	Corpos-de-prova
CV	Coefficiente de Variação
φ	Diâmetro
DIN	Deutscher Institut für Normung
DMC	Dimensão Máxima Característica
e ⁻	Elétron
Ec	Módulo Tangente
EVN	European Committee for Standardization
f _{ck}	Resistência à compressão axial do concreto a 28 dias
f _c	Resistência à compressão axial
FDE	Fundação para Desenvolvimento da Educação
GPa	Giga Pascal
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IPT030	Argamassa com Areia do IPT e Relação a/aglo = 0,30
IPT035	Argamassa com Areia do IPT e Relação a/aglo = 0,35
IPT034	Argamassa com Areia do IPT e Relação a/aglo = 0,40
LEMAC	Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção
mA	Mili ampère
MPa	Mega Pascal
#	Peneira
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Cloreto de Polivinila
Prof	Profundidade
s	Desvio Padrão
s.a.	Sílica Ativa
SiO ₂	Sílica Amorfa
RS	Resistente a Sulfato
SBR	Estireno Butadieno
SP	Super Plastificante
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UR	Umidade Relativa
~	Aproximadamente
V	Volts

LISTA DE COMPOSTOS E ELEMENTOS QUÍMICOS

$4\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido féérico - ferrugem
CaCO_3	Carbonato de cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
C_3A	Aluminato tricálcico
CO_2	Dióxido de carbono
Cl^-	Cloro
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido ferroso
Fe^{++}	Ferro
Fe_2O_3	Óxido féérico
Fe_3O_4	Óxido ferroso - Magnetita
FeCl_2	Cloreto ferroso
H_2O	Água
H_2S	Gás sulfídrico
H_2SO_4	Ácido Sulfúrico
Na_2SO_4	Sulfeto de Sódio
MgSO_4	Sulfato de Magnésio
HCl	Ácido clorídrico
KOH	Hidróxido de potássio
NaOH	Hidróxido de sódio
O_2	Oxigênio
OH^-	Hidroxila
SO_2	Dióxido de enxofre
SO_4^{--}	Sulfato

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1.1 Fundamentação e justificativa

Neste momento, em algum lugar do mundo, deve existir alguma estrutura de concreto armado sendo reparada. Isso é resultado dos problemas durante a gestação (projeto), execução ou, posteriormente, durante a vida da estrutura (conservação e manutenção) (FERNANDEZ CÂNOVAS, 1988).

Portanto, faz-se necessário o uso de sistemas/materiais de recuperação adequados para reabilitar a estrutura, visando manter ou aumentar a vida útil da mesma.

WHITEWAY (2000) relata que 600.000 pontes rodoviárias nos Estados Unidos estão listadas para serem reparadas, a um custo estimado de 200 bilhões de dólares – quatro vezes mais o custo da construção.

LEVY & HELENE (2000) em convênio com a Fundação para Desenvolvimento da Educação (FDE) prestaram consultoria visando vistoriar e reformar escolas estaduais de São Paulo. Das 27 escolas vistoriadas, 96% tinham problemas de carbonatação, o que causa ou virá a causar problemas de corrosão de armadura e, por conseguinte, necessidade de intervenções.

Com relação ao montante de recursos gastos em reparos de estruturas, pode-se citar o trabalho de ANDRADE (1997) referente ao levantamento de manifestações patológicas no Estado de Pernambuco. Na Tabela 1.1 são apresentados os custos de recuperação pelo tipo de obra, abrangendo 146 das 189 obras analisadas. Esse autor também salienta que quanto mais tempo se passa para recuperar uma estrutura, mais aumenta o grau de deterioração da estrutura e, por conseguinte, maiores serão os gastos envolvidos.

Tabela 1.1 – Custos de recuperação de estruturas de concreto armado no Estado de Pernambuco (ANDRADE, 1997, p. 124)

Tipo de Obra	Custos (US\$)	Número de Obras	Média¹ (US\$)
Residenciais	988,145.54	96	10,293.18
Comercial/Serviços	344,064.72	24	14,336.03
Industrial	807,379.65	13	62,106.13
Institucional	674,954.75	13	51,919.60
TOTAL:	2,814,544.66	146	19,277.70

Nota: (1) Equivale aos custos de um determinado tipo de edificação dividido pelo número de obras.

Analisando o exposto, dentre outros casos, reforça-se a idéia de que o mercado de recuperação de estruturas está em expansão, havendo necessidade de projetistas capacitados, escolha correta dos materiais a serem utilizados e controle rigoroso na hora da execução.

O início do programa de reparo se dá pelo diagnóstico ou conhecimento da evolução do dano na estrutura, passa pela escolha do método e materiais a serem utilizados, terminando na correta preparação do local a ser reparado e aplicação do produto. Todavia, deve-se considerar também o tempo durante o qual o local da estrutura a ser reparada vai ficar interditado, e a expectativa de vida do reparo e, por conseguinte, da estrutura (CZARNECKI *et al*, 2000).

Entretanto, a falta de um bom projeto de reparo, o uso de uma mão-de-obra inadequada e um ambiente agressivo, normal em recuperações, propiciam a prematura deterioração do reparo (CZARNECKI *et al*, 2000; VAYSBURD & EMMONS, 2001).

EMMONS & VAYSBURD (1996) destacaram, dentre outras, a necessidade de o material de reparo ser compatível com o substrato, podendo essa compatibilidade ser dividida em: dimensional, química, eletroquímica e de permeabilidade. Esses autores também destacaram, na Figura 1.1, os fatores que afetam a durabilidade do sistema de reparo, onde se pode verificar a influência das propriedades dos materiais.

Sendo assim, afirmar que um reparo irá ficar correto baseado nas propriedades do material de recuperação por si só é errôneo. O reparo terá bom desempenho e qualidade se o sistema de reparo for adequado, este pode ser entendido como o levantamento e posterior análise de todos os elementos envolvidos durante o processo de reparo.

Para a escolha do material de reparo, o engenheiro encarregado deve se basear em alguma coisa, ou seja, conhecer a maior quantidade de informações das propriedades de diferentes tipos de materiais, locais onde os mesmos foram usados com sucesso, experiência de outros profissionais com esses materiais, dentre outras informações. Isso é o que o ajudará.

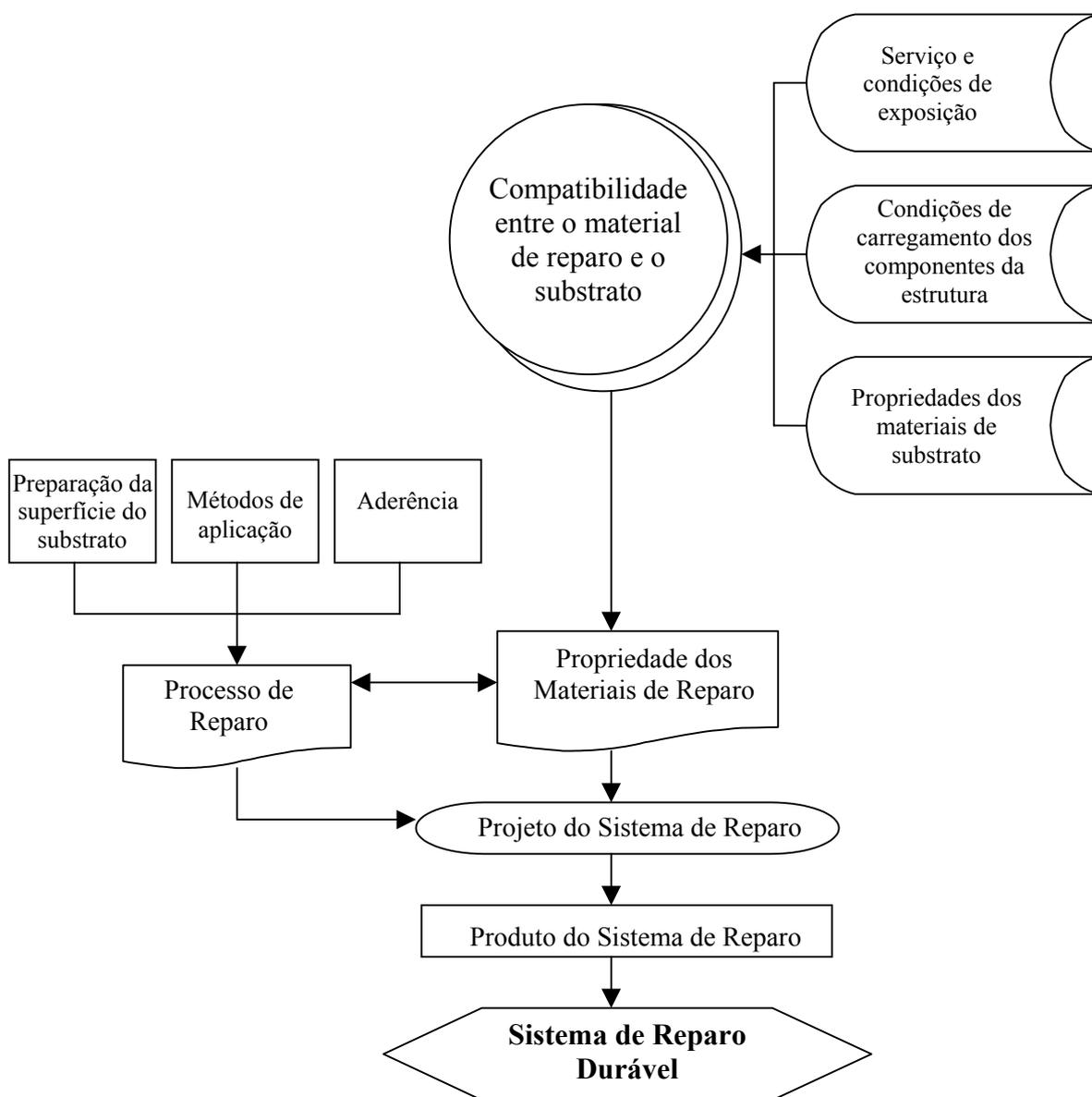


Figura 1.1 – Fatores que afetam a durabilidade do sistema de reparo (EMMONS & VAYSBURD, 1996, p. 71).

Neste contexto, entram as argamassas para recuperação estrutural, um dos muitos materiais usados na reparação de estruturas. Essas podem ser divididas em base cimentícia, base polimérica ou resina e mistos (ANDRADE, 1992).

No quadro 1.1, LEVY & HELENE (2000) fazem sugestões para a escolha das argamassas de reparo, em função da profundidade e do meio ambiente de exposição.

Quadro 1.1 – Sugestões para a escolha da argamassas de reparo em função das condições de uso (LEVY & HELENE, 2000, p. 55)

Tipo de argamassa	Uso recomendado: quando o ambiente apresenta	Profundidade do reparo recomendada
Argamassa base cimento modificada com polímeros base acrílica	Baixa a moderada agressividade, região rural ou urbana	1,0 a 5,0 cm
Argamassa e graute base epóxi	Elevada agressividade, ambientes industriais ou cidades litorâneas	0,5 a 1,5 cm
Argamassa base poliéster	Elevada agressividade, ambientes industriais ou cidades litorâneas	0,5 a 1,5 cm
Argamassa seca isenta de retração com agregados graúdos	Baixa a moderada agressividade, região rural ou urbana	3,0 a 10,0 cm
Graute base cimento com adição de brita “0” ou pedrisco (microconcreto)	Baixa a moderada agressividade, região rural ou urbana	> 5 cm

Analisando o exposto, verifica-se que argamassa de base cimentícia é uma das alternativas que podem ser usadas em recuperação estrutural. Porém, segundo EMMONS & VAYSBURD (1996), materiais com base cimentícia não possuem estabilidade volumétrica, têm alto módulo de deformação, são materiais frágeis e susceptíveis à fissuração.

Com relação a benefícios desse tipo de argamassa, MORGAN (1996) destacou que argamassas de cimento comum, provavelmente, possuem propriedades mais próximas do substrato de concreto, o que favorece a compatibilidade entre ambos. Contudo, esse autor também destacou a “fragilidade” das mesmas em ambientes agressivos com alta abrasão e ataques químicos, aplicações em tetos e não ter ganho rápido de resistência, dentre outras.

Por outro lado, autores como KULAKOWSKI (1994), SCHULER (1998) e FIGUEIREDO (1998), dentre outros, fizeram a adição de sílica ativa (s.a.) em argamassas de cimento comum, obtendo melhoras significativas em algumas propriedades das mesmas. Isso fez com que a argamassa com sílica ativa fosse avaliada como material de reparo, mostrando, assim, que essa pode ser mais uma alternativa no campo da recuperação.

Outro problema enfrentado por engenheiros de recuperação e pesquisadores é estabelecer se as propriedades de uma certa argamassa estão compatíveis com níveis mínimos (ou máximos) que atestem sua qualidade, bem como qual o “melhor” ensaio para determinar tal propriedade.

Neste sentido, por exemplo, pode-se destacar EMMONS *et al* (2000) e SILVA JUNIOR (2001) que vincularam níveis de valores para certas propriedades das argamassas, como também relataram ensaios os quais podem ser usados para se obter essas propriedades. A CONCRETE REPAIR ASSOCIATION (2001) e MEDEIROS & SELMO (2001) também relatam quais e os tipos de ensaios a serem realizados nas argamassas para recuperação.

No entanto, a normalização nacional para especificar os métodos de ensaio para argamassas de recuperação é inexistente (SILVA JUNIOR, 2001). Como consequência, uma boa parte do conhecimento de propriedades das argamassas é fornecida pelos fabricantes, baseada, comumente, em normas internacionais.

Analisando o exposto, viabilizou-se esta pesquisa como forma de se levantar mais informações de argamassas de recuperação estrutural, bem como contribuir para uma futura normalização nacional de ensaios para materiais de recuperação.

1.2 Objetivos do trabalho

1.2.1 Objetivo geral

- O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o comportamento das argamassas cimentícias com adição de sílica ativa para reparos superficiais, através da comparação com argamassas base cimento modificadas com polímeros para o mesmo fim.

1.2.2 Objetivos específicos

- Levantamento de mais dados experimentais a respeito das propriedades das argamassas de recuperação estrutural;

- Avaliação das propriedades das argamassas com sílica ativa através da variação da sua relação água/aglomerante (a/aglo);
- Verificação das conseqüências do uso de uma areia de granulometria mais grossa e outra mais fina nas argamassas com s.a.;
- Desenvolvimento e adaptação de metodologia para os ensaios do material em questão;
- Levantamento e comparação, com as argamassas deste trabalho, de valores recomendados pela bibliografia para as propriedades das argamassas utilizadas em recuperação.

1.3 Hipóteses e variáveis

Antes da execução dos experimentos e obtenção dos resultados, algumas hipóteses devem ser levantadas visando orientar e, por conseguinte, facilitar o desenvolvimento desde trabalho:

- As argamassas com uso de sílica ativa terão resistências mecânicas maiores que as argamassas base cimento modificadas com polímeros;
- Uma areia com granulometria montada no laboratório pode produzir argamassas com melhor qualidade do que se as mesmas fossem feitas com essa areia na forma natural;
- Relações água/aglomerantes menores e uso da sílica ativa podem produzir argamassas com propriedades equivalentes a argamassas industrializadas;
- Um aditivo redutor de retração diminui as retrações livre e restringida das argamassas com sílica ativa;
- O acréscimo de água em argamassas base cimento modificadas com polímeros vai afetar muito suas propriedades físicas e mecânicas.

As variáveis independentes:

- Tipos de argamassas;
- Relação água/aglomerante.

Variáveis dependentes:

- Ensaios físicos, mecânicos e de durabilidade.

1.4 Limitações do estudo

O presente trabalho não faz mais de uma areia de granulometria montada em laboratório, devido à não disponibilidade de areias divididas em frações na região da Grande Vitória e o custo elevado da areia do IPT usada nessa operação.

Não foi estudado o efeito de outros tipos de superplastificante nas argamassas com sílica ativa, devido à necessidade do uso de um superplastificante que fosse compatível com o aditivo redutor de retração.

Não foram realizados ensaios mais elaborados com o objetivo de avaliar a corrosão das armaduras e a penetração de cloretos.

1.5 Estrutura da dissertação

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, ele foi estruturado por esta INTRODUÇÃO em que se apresentam a concepção e a justificativa do tema, objetivos gerais e específicos, e mais sete capítulos.

No CAPÍTULO 2, discutem-se os tipos de patologias mais encontradas, dando ênfase à corrosão de armadura, suas principais causas: a carbonatação e a penetração de cloretos, e formas de minimizar o efeito da corrosão.

Como os materiais de reparo podem ser classificados estão no CAPÍTULO 3, sendo destacadas algumas de suas propriedades encontradas na bibliografia, tipos de controles tecnológicos a serem realizados e locais para sua utilização. Comenta-se brevemente sobre a mão-de-obra e a cura, muitas vezes esquecidas, porém essenciais num bom trabalho de recuperação.

No CAPÍTULO 4, foi dada ênfase a algumas características e propriedades importantes para um bom funcionamento das argamassas de recuperação, devido a uma não uniformidade de utilização de certos materiais constituintes e métodos de ensaio.

O levantamento bibliográfico de argamassas com uso de sílica ativa recebeu um capítulo separado – CAPÍTULO 5, onde são apresentados alguns trabalhos científicos e dissertações que utilizaram esse tipo de argamassa, sendo destacadas algumas propriedades de importância para este trabalho.

A metodologia e as características dos materiais constituintes utilizadas nesta pesquisa estão no CAPÍTULO 6, onde, também, foi justificada a utilização de certos materiais constituintes e métodos de ensaio.

O CAPÍTULO 7 é reservado à apresentação dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e algumas comparações desses valores com dados de trabalhos de outros autores. Isso tem como objetivo verificar alguma disparidade de algum (s) valor (es) encontrados nesta pesquisa em relação a trabalhos anteriores.

No CAPÍTULO 8, são apresentadas as conclusões do trabalho científico, assim como colocam-se propostas para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2
PROBLEMAS PATOLÓGICOS

2.1 Introdução

As recuperações nas estruturas de concreto são resultado de manifestações patológicas indesejáveis para a edificação, as quais devem ser sanadas para aumentar ou manter a vida útil das estruturas.

Vários trabalhos, entre eles os desenvolvidos por: HELENE (1992); AGUADO et al, (1996); ANDRADE (1997); BEZERRA (1998) e DÓREA & SILVA (1999), destacam que a origem dos problemas patológicos está geralmente relacionada com as seguintes etapas do processo construtivo: Projeto, Planejamento, Execução, Materiais Utilizados e Uso.

Autores como AGUADO et al, (1996); ANDRADE (1997) e BEZERRA (1998) relatam que muitos dos problemas patológicos têm sua origem quando da etapa de projeto, situando-se entre 40% e 50% do total dos problemas.

Já DÓREA & SILVA (1999) apresentam um resumo das origens das patologias em estruturas de concreto armado em várias regiões brasileiras, onde se constata que a fase de execução é a principal responsável pelas mesmas (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Índices de patologias em estruturas de concreto armado no Brasil.
(DÓREA & SILVA, 1999, p. 615)

Regiões/ Estados	Sudeste 1988	Norte/ Nordeste (Amazônia) 1994	Centro- Oeste GO, Ms e MT 1996	Centro - Oeste DF (Brasília) 1996	Nordeste (Pernambuco) 1998	Média
Nº de casos	709	348	155	246	189	
Origem das falhas	%	%	%	%	%	%
Planejamento /Projeto	18	30	22	24	44	28
Materiais	6	5	9	1	3	5
Execução	52	39	48	46	41	45
Uso	14	26	2	3	12	11
Manutenção	7	-	1	25	-	7
Outras	3	-	6	1	-	2

Portanto, deve-se dar mais atenção às etapas de projeto e execução, responsáveis pela quase totalidade da origem dos problemas patológicos, visando à melhoria da qualidade das estruturas.

HELENE (1997) exemplificou que a gerência do problema da durabilidade das estruturas de concreto implica em adequada resposta às seguintes questões:

- 1- Quais os mecanismos de envelhecimento das estruturas de concreto armado e protendido?
- 2- Como classificar o meio ambiente quanto à sua agressividade à armadura e ao concreto?
- 3- Como classificar o concreto quanto à sua resistência aos diferentes meios agressivos?
- 4- Qual a correspondência entre agressividade do meio e a resistência aos diferentes meios agressivos?
- 5- Qual a definição de vida útil?
- 6- Quais são os métodos de previsão da vida útil?
- 7- Quais devem ser os critérios de projeto arquitetônico e estrutural?
- 8- Como deve ser a dosagem e a produção do concreto?
- 9- Quais os procedimentos adequados de execução e controle da estrutura?
- 10- Quais os procedimentos e critérios para bem exercer a vistoria, o monitoramento e a manutenção das estruturas?

Não é objetivo deste trabalho pormenorizar essas questões, bem como dar muita ênfase à durabilidade da estrutura de concreto armado. Cabe aqui resumir causas, mecanismos e alguns dos principais agentes de deterioração, visando melhorar o entendimento da necessidade de futuras intervenções na estrutura. Porém, fica o registro do autor mencionado e a pertinência das questões no sentido da obtenção da durabilidade requerida.

COLLEPARDI (1999), analisando algumas maneiras de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado, classificou as principais causas da deterioração em: negligência humana e vulnerabilidade inerente à estrutura de concreto armado (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Causas da deterioração das estruturas de concreto armado.
(adaptado de COLLEPARDI, 1999)

Negligência humana	
Primeiro tipo	Segundo tipo
Materiais Inadequados: - cimento, - agregados, - aditivos químicos e minerais. Impropriedade da especificação da mistura: - relação água/cimento, - ar incorporado. Projeto inadequado: - cobrimento da armadura, - posicionamento e densidade das barras, - forma e tamanho dos elementos. Descuidos das técnicas de execução: - abatimento e perda de abatimento, - lançamento, - adensamento, - cura.	Falta de monitoramento da reação álcali-agregado na prática de campo: - agregados reativos, - cimentos altamente alcalinos. Modificações induzidas pela formação retardada de etringita: - clínquer com alto teor de sulfatos, - microfissuração, - exposição à água.
Vulnerabilidade inerente à estrutura de concreto armado	
Concreto	Armadura de aço
- Baixa resistência à tração, - Alto módulo de deformação, - Fissuração produzida na secagem pela contração térmica e pela retração por secagem, - Microfissuras como caminho preferencial para agentes ambientais agressivos (ar úmido, íons Cl^- e SO_4^{2-}).	- Corrosão quando exposta à umidade do ar ou penetração de íons Cl^- , - Natureza expansivo-desagregadora do processo de corrosão causando fissuras no cobrimento de concreto.

Os mecanismos de deterioração podem ser divididos em: (a) preponderantes de deterioração relativos ao concreto, (b) preponderantes de deterioração relativos à armadura e (c) de deterioração da estrutura propriamente dita. (HELENE, 1997)

a) Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto:

- Lixiviação: por ação de águas puras, carbônicas agressivas e ácidas que provocam a dissolução e carreamento dos compostos hidratados da pasta de cimento;
- Expansão resultante da ação de águas e solos que contenham ou estejam contaminados por sulfatos que dão origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado;
- Expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos compostos e agregados reativos.

- Reações deletérias superficiais de certos agregados decorrentes de transformação de produtos ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica.

b) Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura:

- Despassivação por carbonatação, resultado da diminuição do pH da solução dos poros do concreto pela ação do gás carbônico (CO_2), que penetra por difusão e reage com os hidróxidos alcalinos resultantes da hidratação do cimento;
- Despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto), que penetra no concreto através dos processos de difusão e de absorção capilar. Esse íon ao superar, na solução dos poros do concreto, um certo limite em relação à concentração de hidroxilas (OH), despassiva a superfície do aço e instala a corrosão na armadura.

c) Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita:

- São aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, fadiga, fluência (deformação lenta), relaxação, dentre outros.

ANDRADE (1997), em sua dissertação de mestrado, analisou os diferentes tipos de edificações no estado de Pernambuco: residencial, comercial, industrial e obras públicas, e verificou que a corrosão de armadura é a patologia mais encontrada. Essa patologia cria problemas de ordem estrutural e estética, implicando em intervenções na estrutura onde normalmente se fará uso do material de recuperação em estudo neste trabalho.

LEVY & HELENE (2000), em trabalho de análise e recuperação de patologias em escolas estaduais do estado de São Paulo, focaram seus esforços nas manifestações patológicas provocadas pela corrosão de armadura, pois, segundo esses autores, são as que acarretam maior dano às estruturas. Sendo a carbonatação a causa mais freqüente de corrosão.

Analisando o exposto por ANDRADE (1997) e LEVY & HELENE (2000), verifica-se a importância da corrosão das armaduras, sendo necessários então mais detalhes do seu

aparecimento, enfocando duas importantes causas que levam ao aparecimento da mesma, que são: a carbonatação e a penetração de íons cloretos.

2.2 Corrosão de armadura

O concreto é um material que possui como principal característica a sua elevada resistência à compressão, porém sua resistência à tração é baixa (em torno de 10% da resistência à compressão). O uso do aço fornece essa resistência ao concreto, criando, assim, o concreto armado. Este material é largamente empregado, pois fornece condições para execução de estruturas de várias formas e tamanhos.

Por muito tempo, o concreto foi especificado para as obras simplesmente pela sua resistência característica à compressão aos 28 dias (f_{ck}), contudo a agressividade do meio não era avaliada, ou não se tinha como avaliá-la, e a durabilidade da estrutura ficava então em segundo plano, ocasionando assim vários problemas patológicos.

Um dos principais reflexos da preocupação com a durabilidade foi a atenção dada pela comunidade técnica internacional, nos últimos 25 anos, aos problemas de corrosão de armaduras, buscando melhores caminhos para a especificação de projetos de novas obras, execução de reparos, reforços e reconstruções (HELENE, 1993).

O aço ficará bem protegido quando o concreto for bem executado, levando-se em conta dois aspectos: físico e químico. A proteção física é devida à qualidade e à espessura do cobrimento. E a proteção química é resultante do pH elevado proporcionado pelo concreto, permitindo assim a formação de uma fina película protetora, conhecida como camada de passivação (FORTES & ANDRADE, 2000).

POURBAIX (1987) apud FORTES & ANDRADE (2000) mostra, em seu diagrama potencial x pH, Figura 2.1, que o aço encontra-se em um estado passivo para um pH entre 10,5 a 12,5, considerando-se potenciais de corrosão entre +0,1 e -0,5V (relativo ao potencial normal de hidrogênio). Nesta condição de alcalinidade, que o concreto proporciona, o filme de óxido formado sobre o aço é aderente e estável, impedindo o prosseguimento da corrosão.

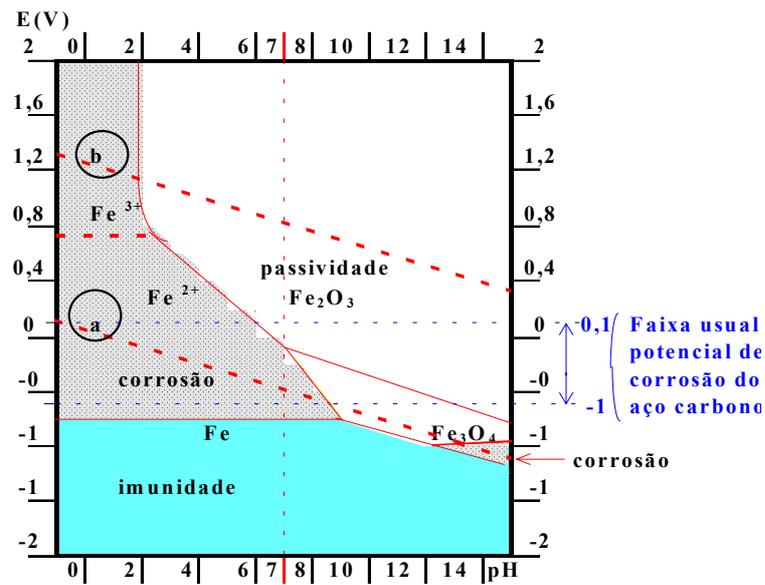


Figura 2.1 – Diagrama de POURBAIX (1987) apud FORTES & ANDRADE (2000, p. 3), para o sistema Fe - H₂O, a 25°C a 1 atm, no concreto.

Contudo, para a execução de uma estrutura durável de concreto armado, existe a necessidade de um estudo do local e do ambiente da edificação, para se fazer a análise de quanto a corrosão será significativa durante a vida útil da estrutura. Dentre os itens que devem ser analisados destacam-se: (SERRA, 1992)

- Solo (natural ou aterro; ácido ou alcalino; resistividade elétrica)
- Água (doce, salobra; variações do nível do lençol freático, zonas de respingo ou névoa; grau de poluição)
- Clima (temperatura; umidade; vento predominante)
- Atmosfera (industrial; urbana; marinha)
- Outros (correntes de fuga; exposição a agentes químicos)

Já em 1997, HELENE realizou uma síntese sobre a agressividade ambiental, definindo classes de agressividade, visando a sua utilização na elaboração de projetos (Quadro 2.2). Propôs, também, a utilização do Quadro 2.3 para avaliação da agressividade do meio ambiente em relação à estrutura ou de suas partes, conforme seu grau de exposição.

Quadro 2.2 – Classes de agressividade ambiental (HELENE, 1997, p. 6)

Classe de agressividade	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Insignificante
II	Média	Pequeno
III	Forte	Grande
IV	Muito forte	Elevado

Quadro 2.3 – Classes de agressividade do ambiente em função das condições de exposição (HELENE, 1997, p.7)

Macro-clima	Micro-clima			
	Interior das Edificações		Exterior das Edificações	
	Seco ¹ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ² de molhagem e secagem	Seco ³ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ⁴ de molhagem e secagem
Rural	I	I	I	II
Urbano	I	II	I	II
Marinho	II	III	-	III
Industrial	II	III	II	III
Específico	II	III ou IV	III	III ou IV
Respingo de maré	-	-	-	IV
Submerso ≥ 3m	-	-	-	I
Solo	-	-	Não agressivo, I	Úmido e agressivo, II, III ou IV

Notas:

1 – Salas, dormitórios ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura;

2 – Vestiários, banheiros, cozinhas, garagens, lavanderias;

3 – Obras no interior do nordeste do país, partes protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos;

4 – Incluindo ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazém de fertilizantes, indústrias químicas.

Tendo em vista que a corrosão gera conseqüências desastrosas, o estudo do processo de corrosão é importante para os projetistas saberem a maneira como ela atua e terem condições de evitá-la.

2.2.1 Mecanismo da corrosão

O aço sofre corrosão visto que não é um material encontrado em seu estado natural. O minério de ferro da natureza sofre processo de fundição e melhora na sua composição química, transformando-se em aço. Sob determinadas condições, o aço perde esta energia e volta ao seu estado natural. O nome dado a essa perda de energia é corrosão.

(RODRIGUES, 1994). A corrosão pode ser dividida em dois tipos de processos: o denominado de corrosão eletroquímica, o qual será evidenciado neste trabalho, e o de oxidação direta (HELENE, 1993).

No processo de corrosão eletroquímica, o fenômeno ocorre como resultado da formação de pilhas ou células de corrosão devido à presença de umidade. Neste estágio existe a necessidade de quatro condições básicas: existência de um eletrólito, diferença de potencial de eletrodo entre áreas anódicas e catódicas, umidade e a presença de oxigênio. Ao iniciar o processo de corrosão, vai existir: um ânodo, um cátodo, um eletrólito e a presença de um condutor elétrico. Nas regiões catódicas, o ataque à armadura pode ser considerado desprezível, porém, nas regiões anódicas, ocorre a dissolução do aço (HELENE, 1993; CASCUDO, 1997).

Com relação à oxidação direta, esta ocorre quando o ar atmosférico reage diretamente com o aço. Este tipo de corrosão é lento à temperatura ambiente, podendo ser significativo somente em altas temperaturas. Normalmente provoca uma corrosão uniforme em toda a superfície da armadura (HELENE, 1993).

Segundo NEVILLE (1997), o processo da corrosão eletroquímica pode ser resumido como segue: existindo uma diferença de potencial entre 2 pontos da armadura (aço) no concreto, gera-se uma célula eletroquímica. Neste momento existe, então, uma região anódica e uma região catódica ligadas pelo eletrólito na forma de água (H₂O) nos poros da pasta de cimento endurecida. Os íons de ferro, Fe⁺⁺, com cargas elétricas positivas no ânodo, passam para a solução (concreto), enquanto os elétrons livres, e⁻, com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo. No cátodo, os elétrons são combinados com a água e o oxigênio e formam íons de hidroxila (OH⁻). Estes íons migram para o ânodo, através do eletrólito, onde vão combinar com os íons ferrosos, formando hidróxido ferroso, que por outra oxidação vai se transformar em hidróxido férrico (ferrugem). (vide Figura 2.2)

Algumas reações do processo de corrosão podem ser descritas como se segue: (CASCUDO, 1997)

Zonas anódicas (reações de dissolução do ferro – oxidação):



Zonas catódicas (reações de redução do oxigênio):



Zonas intermediárias entre o ânodo e o cátodo, inclusive podendo ocorrer em regiões próximas do cátodo. Isto devido ao OH^- possuir menor mobilidade iônica que o Fe^{++} , resultado de seu maior tamanho e massa comparado ao íon de ferro:



Zonas iguais a anterior, porém em locais mais aerados:



A transformação do aço metálico para ferrugem é acompanhado por um aumento no volume o qual, dependendo do estado de oxidação, pode chegar a ser de até 600% do metal original, causando, assim, fissuras nas peças de concreto armado (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

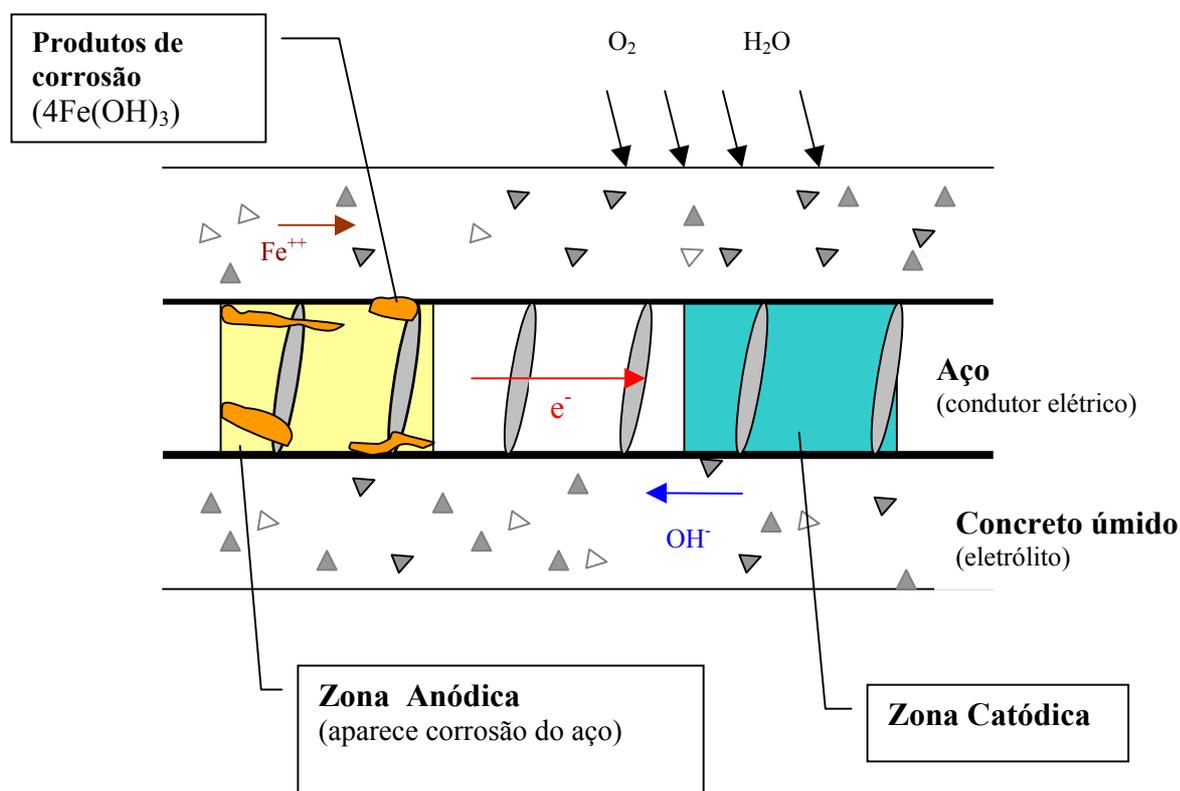


Figura 2.2: Formação de uma pilha de corrosão no aço imerso (adaptada de SERRA, 1992).

Analisando as reações, verifica-se a necessidade da água para a continuidade do processo de corrosão, portanto não há corrosão no concreto seco, provavelmente com umidade relativa abaixo de 60%. E também não existe corrosão em concretos completamente imersos, exceto quando a água pode reter ar (oxigênio), como por exemplo, pela ação de ondas. Umidades relativas entre 70% e 80% são ótimas para a corrosão. Em umidades relativas mais altas, a difusão do oxigênio através do concreto é consideravelmente mais reduzida (NEVILLE, 1997).

As diferenças de potencial eletroquímico podem ser geradas por diferenças de ambiente a que o concreto armado está exposto. Cita-se, por exemplo, para o caso de macrocélulas ou macropilhas, quando o concreto estiver com uma parte permanentemente imersa em água do mar e outra exposta a molhagem e secagem alternadas. Outra situação semelhante a essa é quando a armadura, conectada eletricamente, estiver com diferenças de espessura de revestimento ao longo da peça estrutural. As células eletroquímicas também podem ser formadas por causa de diferenças de concentração salina na água dos poros ou por causa do acesso desuniforme do oxigênio na estrutura (NEVILLE, 1997).

2.2.2 Atuação dos cloretos

O primeiro passo para o início da corrosão é a destruição da camada protetora de passivação na superfície do aço envolto pelo concreto. Esse filme é constituído por uma mistura de dois óxidos de ferro ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ e Fe_3O_4), formados logo após o início da hidratação do cimento, em condições de pH elevado (> 12). Enquanto existir essa camada passivadora, o aço não se deteriorará. No entanto, a principal ação dos cloretos no concreto armado é destruir essa camada, com a presença de água e oxigênio, dando origem à corrosão.

Os íons cloretos ativam a superfície do aço formando o ânodo, sendo o cátodo a superfície passivada. As reações são as seguintes: (NEVILLE, 1997)



O Cl^- (cloro) é regenerado de modo que a ferrugem não contém cloreto, embora se forme cloreto ferroso no estágio intermediário.

2.2.2.1 Teor de cloretos

Normalmente os cloretos penetram no concreto por duas maneiras: são levados com seus componentes (aditivos, água, brita ou areia) ou provenientes do exterior, por penetração, através da rede de poros, como no caso de ambientes marinhos (maresia ou névoa salina) (ANDRADE, 1992; CASCUDO, 1997).

HELENE (1993) resumiu a presença dos cloretos no concreto de três formas: como cloretos livres (na forma de íons na água dos poros), combinados quimicamente (formando o cloroaluminato de cálcio, conhecido por sal de Friedel: $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ou retidos por adsorção física às paredes dos poros capilares. A soma dos livres e “retidos” é denominada cloretos totais.

De acordo com ANDRADE (1992), embora os cloretos solúveis sejam os “únicos” que possam vir causar corrosão, é conveniente saber a quantidade de cloretos totais, pois praticamente todas as normas estabelecem o limite de cloretos em termos de cloretos totais.

A necessidade de se saber a quantidade de cloretos (totais ou livres) os quais podem causar corrosão na armadura é muito importante, porém estabelecer um limite único é extremamente difícil. A quantidade de cloretos depende de vários fatores como, por exemplo, tipo de cimento (alcalinidade, teor de C_3A – aluminato tricálcico), finura, teor de gesso, traço do concreto e relação água/cimento (a/c).

Segundo ANDRADE (1992), um valor médio aceito, geralmente, para o teor de cloretos é de 0,4% em relação à massa de cimento ou 0,05% a 0,1% em relação à massa de concreto. Em análise do livro da referida autora, esta leva a crer que se trata do teor de cloretos totais.

HELENE (1993) apresentou alguns valores (Quadro 2.4) normalizados por diferentes países, que podem ser tomados como referência na quantidade máxima de cloretos.

Quadro 2.4 – Limite de Normas para teor total de cloretos
(adaptado de HELENE, 1993)

País	Norma	Limite Máximo ¹ de Cl para		Limite Referido a
		Concreto Armado	Concreto Protendido	
Brasil	NBR 7197 ²		0,05%	água de amassamento
	NBR 9062 ³		0,05%	
Espanha	EH-88 ⁴	0,40%		cimento
	EP-80 ⁵		0,10%	cimento
Estados Unidos	ACI 222 ⁶	≤ 0,20%	≤ 0,08%	cimento
	ACI 201 ⁷	≤ 0,20%	≤ 0,08%	cimento
	ACI 318 ⁸	≤ 0,30% ambiente normal ≤ 0,15% ambiente cloretos ≤ 1,00% ambiente seco	≤ 0,06%	cimento
Europa	CEB ⁹	≤ 0,05%	≤ 0,025%	concreto
	CEB – FIP ¹⁰	≤ 0,40%	≤ 0,20%	cimento
	EVN 206 ¹¹	≤ 1,00% ambiente simples ≤ 0,40%	≤ 0,20%	cimento
Inglaterra	CP – 110 ¹²	95% ≤ 0,35% 100% ≤ 0,50%	100% ≤ 0,06%	cimento
Japão	JSCE SP-2 ¹³	≤ 0,60 kg/m ³	≤ 0,30 kg/m ³	concreto

Notas:

- (1) % de íon cloro (Cl) . 1,648 = % equivalente de NaCl – cloreto de sódio
% de íon cloro (Cl) . 1,565 = % equivalente de CaCl₂ – cloreto de cálcio

Normas Referenciadas por HELENE (1993, p. 170):

- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto Protendido. Procedimento. NBR 7197. Rio de Janeiro, 1989.
- (3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Procedimento. NBR 9062. Rio de Janeiro, 1988.
- (4) ESPANHA, Ministério de Obras Públicas y Urbanismo. Comisión Permanente del Hormigón. Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado EH-88. Madrid, 1988.
- (5) ESPANHA, Ministério de Obras Públicas y Urbanismo. Comisión Permanente del Hormigón. Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón Pretensado EP-80. Madrid, 1980.
- (6) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Corrosion of Metals in Concrete: reported by ACI Committee 222. In: – . ACI Manual of Concrete Practice. Detroit, 1991. v.1.
- (7) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201. ACI Material Journal, v.88, n. 5, p. 544 -582, sept/oct. 1991.
- (8) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for Reinforced Concrete: reported by ACI Committee 318. In: – . Manual of Concrete Practice. Detroit, 1992. v.3.
- (9) COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. Durable Concrete Structures. Design Guide. Lausanne, Thomas Telford, 1992. p. 75.
- (10) COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. CEB – FIP Model Code 1990: final draft. Lausanne, 1991. (Bulletin d'Information, 205).
- (11) EUROPEAN COMMITTEE for STANDARDIZATION. Concrete. Performance, Production, Placing and Compliance Criteria. ENV 206. s.l., CEN, 1991.
- (12) BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Code of Practice for the Structural Use of Concrete. CP 110. London, 1972.
- (13) JAPAN SOCIETY of CIVIL ENGINEERS. Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures. Tokyo, 1986. Part 2, p.17. (SP-2) p.17.

Quanto à ação dos cloretos, quando estes são adicionados à mistura, tendem a se distribuir uniformemente, possuindo assim menor tendência à formação de pilhas de concentração. Por outro lado, no caso da penetração de íons cloretos a partir da superfície dos concretos endurecidos, a concentração junto ao aço não é uniforme devido às diferenças de permeabilidade do concreto. Esse fato propicia a formação de macrocélulas de concentração, com o agravante de existir uma relação desfavorável entre as áreas anódicas e catódicas (SERRA, 1992).

Com relação aos mecanismos de transporte, pode-se afirmar que, basicamente, a maioria dos casos se dá por absorção capilar ou por difusão iônica. O primeiro se dá em camadas superficiais do concreto, geralmente locais sujeitos à molhagem e secagem, e o segundo é marcante no interior do concreto onde a presença do eletrólito é mais constante (CASCUDO, 1997).

2.2.2.2 Meio ambiente

O microclima e a atmosfera em que a estrutura está inserida influenciam a profundidade de penetração e o teor de cloretos. Normalmente as regiões de variação e respingos de maré são as mais afetadas, pois têm cloretos, água e oxigênio suficientes para manter o processo de corrosão (HELENE, 1993).

De acordo com HELENE (1993), ciclos de molhagem e secagem, característicos de zonas de respingos de maré, concentram os cloretos dentro da estrutura, ao mesmo tempo que essas zonas mostram-se mais atacadas por corrosão. Isso é avaliado tanto por observação visual quanto por mapeamento a partir dos potenciais de corrosão.

Nas regiões litorâneas, as direções preferenciais do vento caracterizam, de forma diferenciada, as fachadas as quais são abrangidas pelo mesmo. O vento carrega partículas de água do mar, contendo sais dissolvidos (inclusive cloretos), e as depositam por impacto nas superfícies das estruturas de concreto. Esta ação causa maior grau de ataque nessas fachadas. A evaporação da água do mar não carrega cloretos, porém águas agitadas e ventos favorecem a suspensão na atmosfera de partículas de água e névoa salina, colaborando com o seu transporte (HELENE, 1993).

LIAM *et al* (1992) apud HELENE (1993) verificaram que a temperatura também tem papel muito importante no processo de penetração de cloretos. Sendo constatado que um aumento de temperatura de 15°C para 30°C praticamente dobra o coeficiente efetivo de difusão de cloretos.

2.2.3 Carbonatação

Carbonatação é o nome dado ao processo que transforma, pela ação do gás carbônico – CO₂, compostos hidratados do cimento em carbonatos; ele ocorre lentamente de acordo com a seguinte reação simplificada:



“ O hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂ é menos solúvel que os outros álcalis do cimento, o hidróxido de sódio – NaOH e o hidróxido de potássio – KOH. Dessa forma o hidróxido de cálcio encontra-se, na solução presente nos poros do concreto, normalmente na forma de cristais enquanto os outros estão dissolvidos na forma de íons. Como a solubilidade do Ca(OH)₂ depende da concentração de OH⁻ na solução intersticial, a reação de carbonatação começa através dos álcalis NaOH e KOH passando a seguir ao Ca(OH)₂. A longo prazo, os silicatos e aluminatos também podem ser atacados e transformados em carbonatos cálcicos, alumina e sílica hidratada, deteriorando ainda mais a pasta de cimento Portland. A chamada frente de carbonatação comporta então uma série de reações complexas e intermediárias, sendo o carbonato de cálcio (CaCO₃) o produto preponderante no final do processo, assim como o produto característico do fenômeno”. (HELENE, 1993, p. 99)

A principal consequência da carbonatação é a redução do pH, passando o ambiente de extremamente alcalino, pH ≥ 13, para um ambiente com pH < 9. Esse valor de pH reduz substancialmente as condições de estabilidade química da película passivadora, dando início ao processo de corrosão de armadura. Essa redução de pH também pode ser causada por outros gases além do CO₂, como por exemplo: o dióxido de enxofre - SO₂ e o gás sulfídrico - H₂S (HELENE, 1993).

A porosidade do concreto influencia consideravelmente a carbonatação, pois o transporte de CO₂ se dá pelo sistema de poros da pasta de cimento endurecida. O CO₂ mesmo em pequenas concentrações, 0,03% em volume, as quais ocorrem normalmente em ambiente rural, pode provocar a carbonatação do concreto. Em grandes cidades, o teor de CO₂ pode chegar a 0,3% e, excepcionalmente, a 1% (NEVILLE, 1997).

2.2.3.1 Velocidade de Carbonatação

A velocidade de carbonatação no concreto decresce com o tempo, pois o CO₂ tem que se difundir através do sistema de poros, incluindo a região carbonatada na superfície do concreto. Quando os poros da pasta de concreto hidratada estiverem preenchidos com água, a difusão é mais lenta, pois a difusão do CO₂ através da água é quatro ordens de grandeza mais lenta do que no ar. Porém, se não existir água suficiente nos poros, o CO₂ continuará na forma de gás e não reagirá com o cimento hidratado. Isso faz com que a velocidade de carbonatação dependa do teor de umidade do concreto (ver Figura 2.3) (NEVILLE, 1997).

A velocidade máxima de carbonatação ocorre a umidades relativas entre 50% e 70% (NEVILLE, 1997).

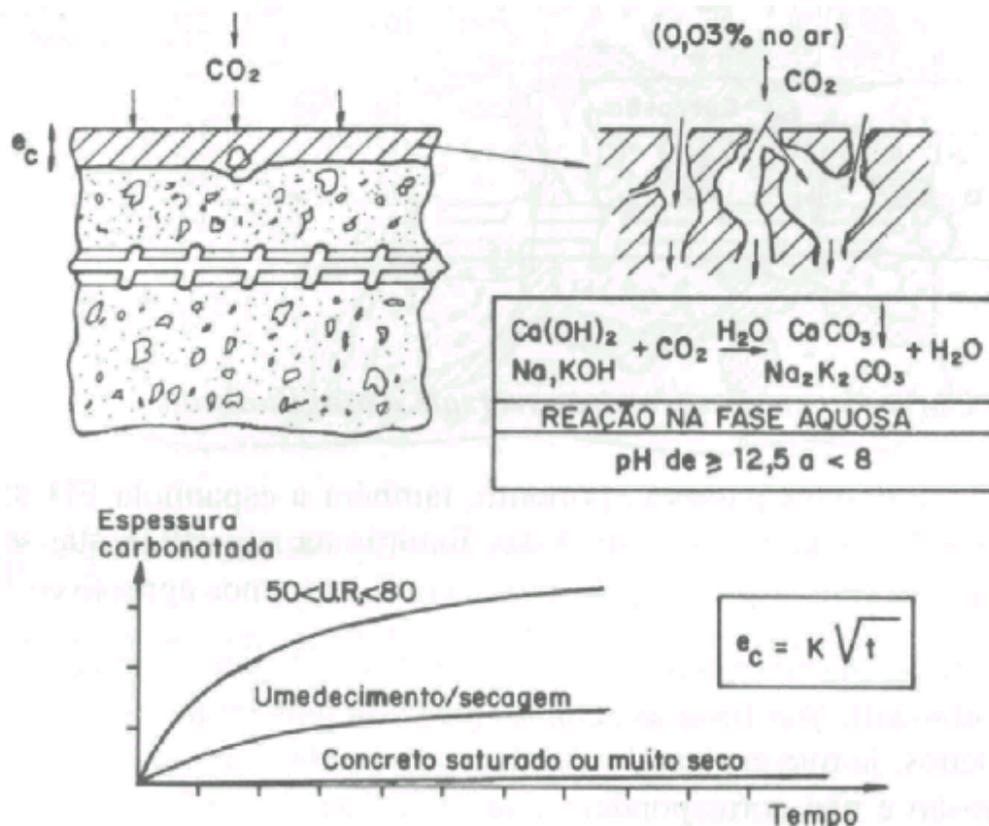


Figura 2.3 – Reação na fase aquosa e relação entre a espessura carbonatada em função do tempo e da umidade do ambiente (ANDRADE, 1992, p. 30).

É possível representar o avanço da carbonatação, D , em mm, pela seguinte expressão:

$$D = K.t^{0,5} \quad (\text{equação 2.8})$$

K = coeficiente de carbonatação, mm/ano^{0,5}

t = tempo, em anos

O coeficiente de carbonatação depende de vários fatores relacionados com a qualidade do concreto (tipo de cimento, consumo de cimento, relação a/c, etc.) e da umidade natural (ANDRADE, 1992).

Para concretos de baixa resistência os valores de K são freqüentemente maiores que 3 mm/ano^{0,5} ou 4 mm/ano^{0,5}. Para se ter um enfoque geral do assunto, pode-se dizer que um concreto com relação a/c de 0,60 atinge uma profundidade de carbonatação de 15 mm após 15 anos, mas o mesmo concreto com relação a/c de 0,45, só atingirá 15 mm de carbonatação após 100 anos (NEVILLE, 1997).

2.2.3.2 Fatores que influenciam a carbonatação

Praticamente a carbonatação é controlada pela difusibilidade do CO₂ na pasta de cimento hidratada, sendo esta função do sistema de poros da pasta de cimento durante o período em que ocorre a difusão do CO₂. Portanto, o tipo de cimento, a relação água/cimento e o grau de hidratação são extremamente importantes para explicar o fenômeno da carbonatação (ANDRADE, 1992; NEVILLE, 1997).

A cura influenciará consideravelmente a carbonatação. Pode-se verificar tal afirmativa através da Figura 2.4, que mostra a profundidade de carbonatação de concretos com resistência aos 28 dias (cubos padronizados) entre 30 MPa e 60 MPa, utilizando-se as seguintes curas: a- cura realizada durante 28 dias, e b- cura ao ar com umidade relativa (UR) de 65%; depois de curados os corpos-de-prova foram mantidos à temperatura de 20°C e UR = 65%. É considerável o efeito da falta de cura por molhagem, que resulta em um concreto com elevada porosidade. Através de resultados de várias pesquisas, verifica-se que, aumentando a duração da cura por molhagem de 1 dia para 3 dias, reduz-se a profundidade de carbonatação em cerca de 40% (NEVILLE, 1997).

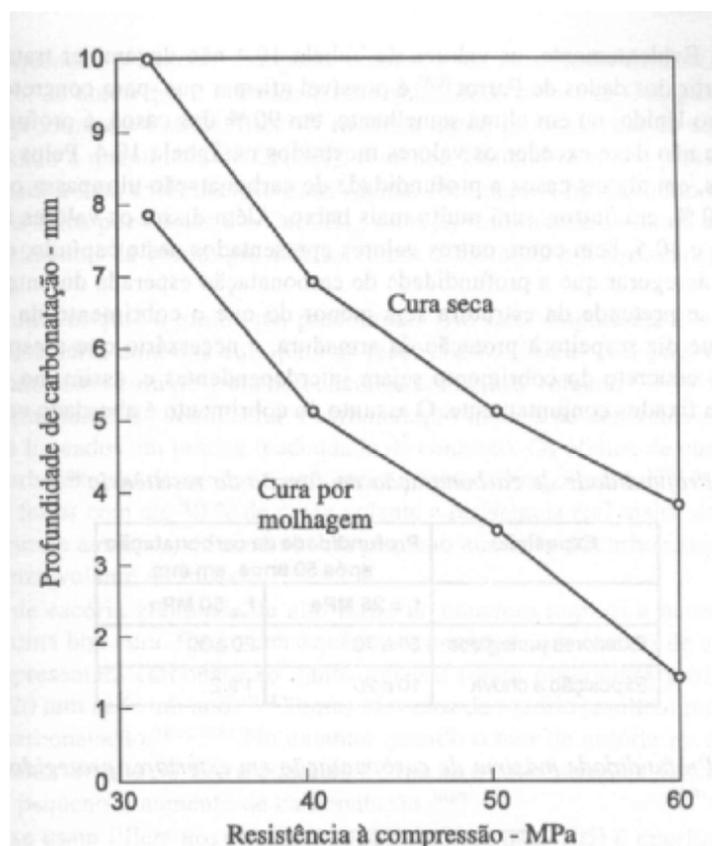


Figura 2.4 – Relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão de concretos após 2 anos de exposição ao ar, UR = 65% (NEVILLE, 1997, p.499).

À medida que o concreto superficial é exposto a períodos frequentes ou prolongados de elevada umidade, ocorrerá uma cura natural dessas partes do concreto. Porém, caso a cura inicial do concreto não tenha sido adequada, a microestrutura da pasta de cimento facilitará a difusão do CO_2 , diminuindo a qualidade da “barreira”, perante a carbonatação, da parte superficial do concreto (NEVILLE, 1997).

Para se evitar a corrosão, existe a necessidade de que a espessura do cobrimento da armadura e a qualidade do concreto sejam interdependentes. Isso visa poder, no estágio de projeto, fixá-los conjuntamente tendo em vista o ambiente a que a estrutura será submetida. O projeto de revisão da NBR 6118 (2001) vislumbra esse detalhe, colocando a qualidade do concreto e o cobrimento da armadura em função das classes de agressividade do ambiente (Quadro 2.2).

2.2.3.3 Influência do tipo de cimento

Segundo ANDRADE (1992), o cimento Portland sem adições é o que proporciona maior quantidade de reserva alcalina. Visto que o hidróxido de cálcio será menos consumido em comparação a cimentos Portland com adições, supõe-se um “coeficiente de segurança” frente ao ataque dos concretos à carbonatação.

Com relação aos cimentos com adição, a maioria destas reagem com o Ca(OH)_2 resultante da hidratação do cimento Portland. Isso resulta em uma pasta de cimento hidratada com menor quantidade de Ca(OH)_2 , necessitando de uma menor quantidade de CO_2 para carbonatar o concreto. BIER (1987) apud NEVILLE (1997), mostrou que a profundidade de carbonatação é maior quando a quantidade de Ca(OH)_2 é menor. Porém, o resultado da reação das adições do cimento com o Ca(OH)_2 é uma estrutura mais densa da pasta de cimento, resultando em uma redução na difusividade com conseqüente diminuição da velocidade de carbonatação (NEVILLE, 1997).

Nos concretos com uso de escórias granuladas de alto forno, a cura é fator importante, pois proporcionará concretos menos permeáveis. Uma cura mal feita pode acarretar profundidades de carbonatação de 10 mm a 20 mm após um ano. Contudo, quando o teor de escória no cimento não passa de 50%, e o concreto é exposto a concentrações de CO_2 de 0,03% (a cidade apresenta teores 10 vezes maiores), o aumento da carbonatação é muito pequeno (NEVILLE, 1997).

Cimentos que têm por finalidade elevada resistência a sulfatos conduzem a profundidades de carbonatação 50% maiores que cimentos Portland comum (MEYER, 1968 apud NEVILLE, 1997). Isto implica na necessidade de um maior cobrimento, bem como cuidados na relação a/c e cura do concreto.

2.2.3.4 Determinação da profundidade de carbonatação

A espessura do concreto carbonatado pode ser medida através da utilização de um indicador apropriado, que muda de cor ao ser aplicado em locais com pH menor que os demais locais em estudo. Como exemplo de indicador, pode-se utilizar uma solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em álcool etílico. Esta solução é incolor em pH inferior a

~ 8,3. Para valores superiores a 9,5 torna-se vermelho-carmim. E entre 8,0 e 9,5 ela possui uma coloração variável de rosa a vermelho-carmim (ANDRADE, 1992).

Na prática, essa solução pode ser composta de 1g de indicador dissolvido em 50g de álcool e 50g de água destilada (ANDREZ, 1989).

A medida pode ser realizada em “testemunhos” ou pedaços do concreto, sendo realizada a partir da superfície para o interior da amostra. A medida também pode ser realizada em um orifício perfurado. Em ambos os métodos, o material a ser submetido à solução de fenolftaleína deve estar seco.

A medida deve ser realizada com o material imediatamente após a sua retirada, pois a fratura recente pode se carbonatar rapidamente. Portanto, no caso de testemunhos extraídos, o ensaio deve ser feito o mais breve possível. Caso a linha de troca de cor for levemente ondulada, deve-se tomar pelo menos dez medidas em pontos diferentes e calcular a média aritmética e a profundidade máxima (ANDRADE, 1992).

2.2.3.5 Meio ambiente

A carbonatação é muito influenciada pela atmosfera e o microclima que envolve a estrutura, podendo, assim, explicar diferentes níveis de carbonatação entre diversas partes da obra. No Quadro 2.5, apresentam-se exemplos de concentração de CO₂ em função da localização da estrutura.

Quadro 2.5 - Concentrações de CO₂ em função da localização (HELENE, 1993)

Localização	Teor de CO ₂ (%)
Atmosferas rurais	0,03 a 0,05
Locais de tráfego pesado	0,1 a 1,2
Silos de certos materiais a granel	1,8 (máximo)

Existe uma diferença na difusão de CO₂ entre a fase líquida e gasosa da ordem de $\sim 10^4$, o que significa que a velocidade ou taxa de carbonatação é gradualmente influenciada pelo teor de umidade do concreto. Sendo a umidade, em última instância, função do ambiente e do microclima no qual está inserida a estrutura. (HELENE, 1993)

Em regiões densamente povoadas e/ou industrializadas existe uma geração de grande quantidade de gases ácidos para a atmosfera, os quais, por sua vez, são dissolvidos pela água da chuva (chuva ácida) e esta ao se precipitar impregna as estruturas de concreto. O principal componente da chuva ácida é o ácido sulfúrico, que é absorvido pelos poros ou por microfissuras existentes no concreto por ação capilar, ação da gravidade, energia cinética das gotas de chuva e a ação dos ventos. Essa impregnação contribui para a diminuição da alcalinidade original do concreto, promovendo a aceleração do processo de carbonatação (STORE, 1991).

2.2.4 Cuidados visando à melhoria da durabilidade do concreto armado

A durabilidade das estruturas de concreto armado está vinculada a diversos fatores, sendo estes em função das etapas de construção da edificação e, por fim, dos critérios de manutenção. Durante a execução da obra, é necessário um controle mínimo dos seguintes itens:

- Escolha do tipo de cimento adequado ao meio ambiente ao qual a obra será inserida, dentre os tipos existentes no mercado da região;
- Relação água/cimento (a/c) adequada à agressividade do ambiente;
- Água de amassamento e agregados isentos de agentes agressivos;
- Trabalhabilidade do concreto adequada para o tipo de concretagem a ser efetuada, resultando assim em um concreto bem compactado e menos heterogêneo;
- Cura bem feita, evitando a secagem superficial do concreto por ventos;
- Cobrimento adequado às condições do ambiente em que a peça ficará exposta.

No Quadro 2.6 é apresentado um resumo dos fatores determinantes da corrosão, bem como maneiras de evitá-los (HELENE, 1993).

Quadro 2.6 – Fatores intervenientes no processo de corrosão, carbonatação e contaminação por cloretos (HELENE, 1993, p. 158)

O tempo necessário à despassivação pode ser aumentado com:	A taxa de corrosão pode ser reduzida com:	A carbonatação pode ser reduzida com:	A penetração de cloretos no concreto pode ser reduzida com:
Aumento da espessura de cobrimento	Aumento da espessura de cobrimento	Aumento da espessura de cobrimento	Aumento da espessura de cobrimento
Redução da relação a/c	Redução da relação a/c	Redução da relação a/c	Redução da relação a/c
Secagem do concreto	Secagem do concreto	Secagem do concreto	Secagem do concreto
Redução da umidade relativa do ambiente	Redução da umidade relativa do ambiente	Redução da umidade relativa do ambiente	Redução da umidade relativa do ambiente
Redução da temperatura	Redução da temperatura	Redução da temperatura	Redução da temperatura
Aumento do tempo de cura	Aumento do tempo de cura	Aumento do tempo de cura	Aumento do tempo de cura
-	-	Redução do teor de escória de alto forno	Aumento do teor de escória de alto forno
-	-	Redução do teor de pozolana	Aumento do teor de pozolana
-	-	Redução do teor de sílica ativa	Aumento do teor de sílica ativa
Aumento do teor de C ₃ A	Aumento do teor de C ₃ A	-	Aumento do teor de C ₃ A
Saturação do concreto	Saturação do concreto	Saturação do concreto	-

CAPÍTULO 3

MATERIAIS USADOS EM RECUPERAÇÃO E SUAS CARACTERÍSTICAS

3.1 Introdução

Este capítulo tem por função abordar alguns materiais de recuperação estrutural, bem como algumas de suas propriedades. Enfoque será dado a materiais que são utilizados para recompor a peça estrutural, no lugar do concreto deteriorado. Sendo assim, haverá necessidade de uma rápida classificação dos mesmos, função de seus componentes ou de suas propriedades.

3.2 Classificação dos materiais de reparo

ANDRADE (1992) classifica os materiais de reparo para aplicação manual ou com o auxílio de formas em:

a) Materiais base cimento (Figura 3.1)

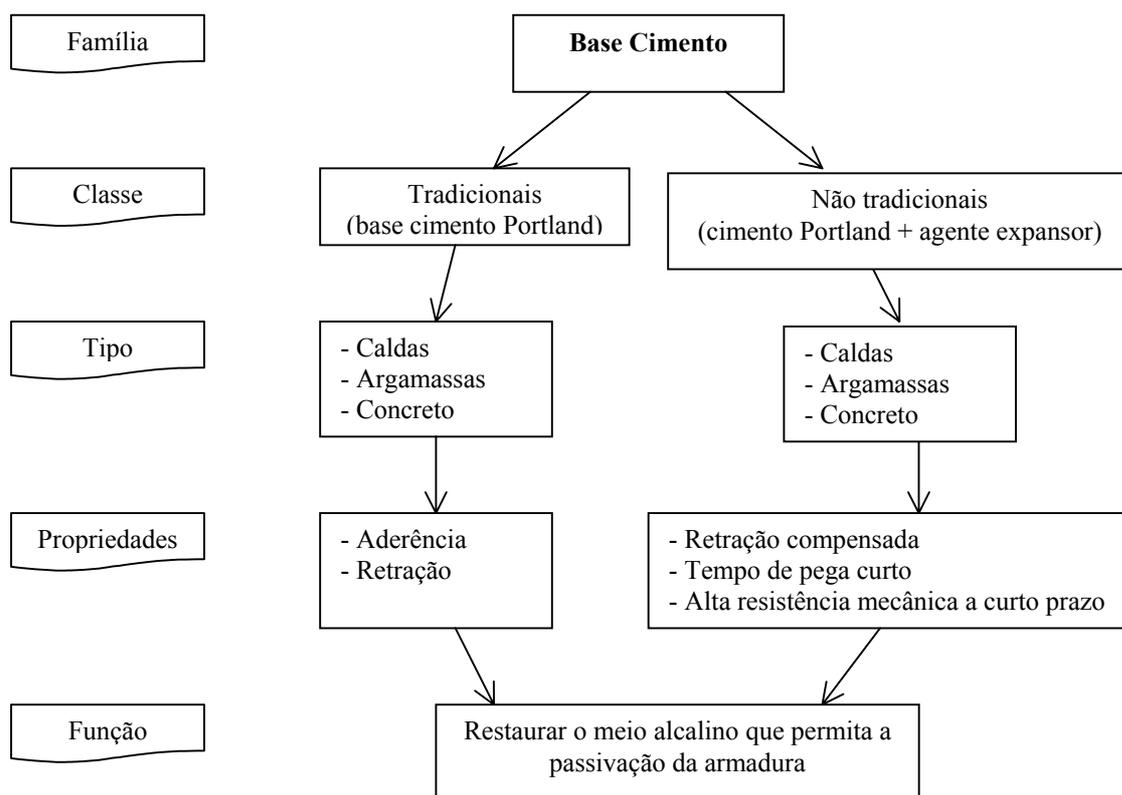


Figura 3.1 – Classificação do material base cimento (adaptada de ANDRADE, 1992).

b) Materiais de base polimérica ou resina (Figura 3.2)

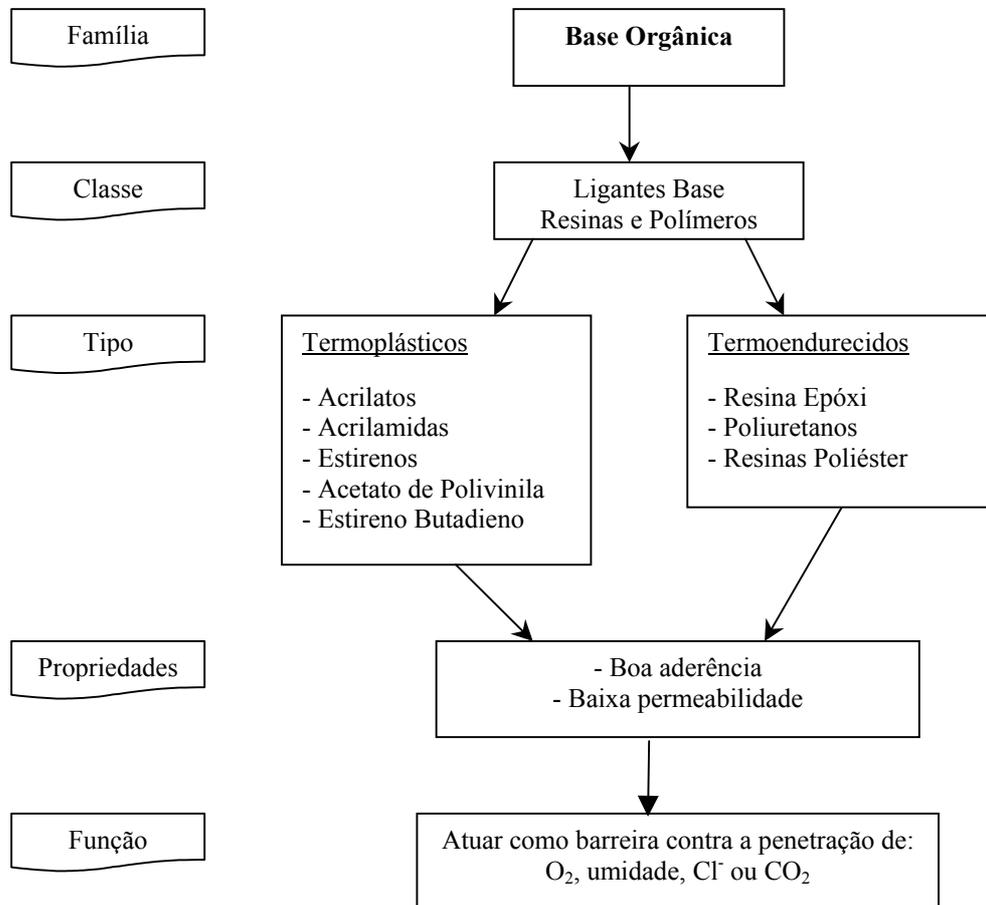


Figura 3.2 – Classificação do material base polimérica ou resina (adaptada de ANDRADE, 1992).

c) Materiais mistos (Figura 3.3).

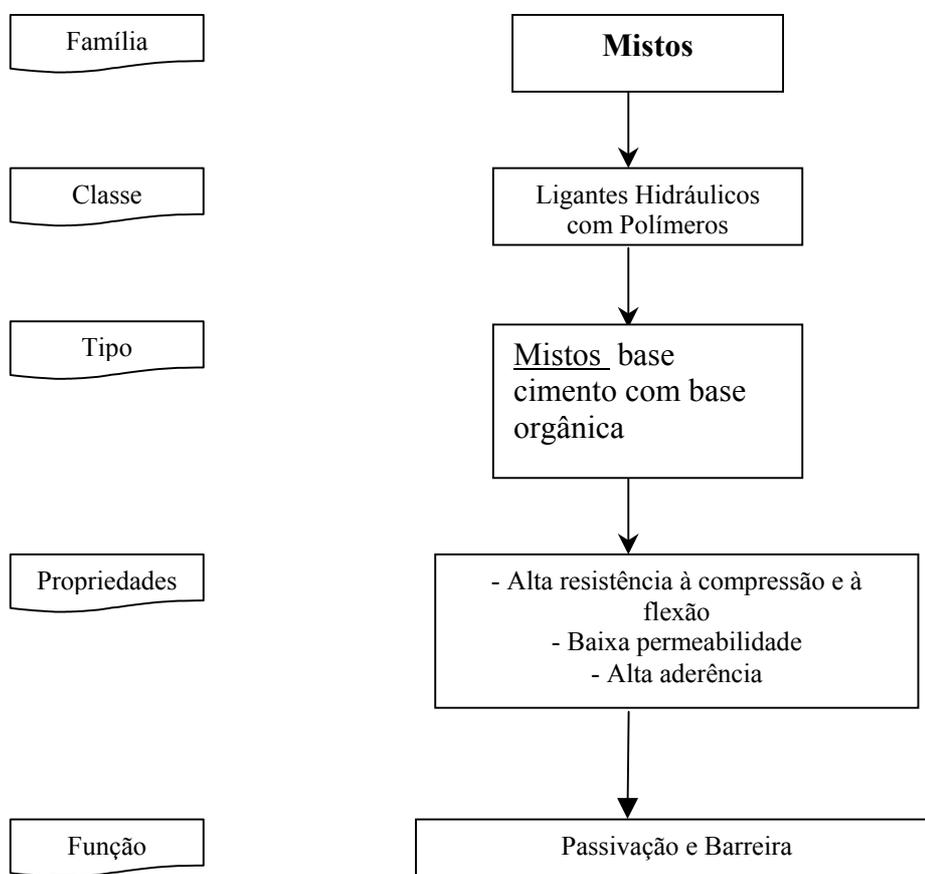


Figura 3.3 – Classificação do material misto (adaptada de ANDRADE, 1992).

Uma outra forma de classificar os materiais de recuperação seria com respeito a sua trabalhabilidade e método de mistura utilizados na hora da aplicação; sendo assim, os materiais podem ser classificados em: (BENNISON, 1994)

- Projetados;
- Aplicados à mão;
- Fluidos.

No caso dos materiais projetados, os concretos são os mais usuais, podendo ser via seca ou úmida. O via seca é quando a água é adicionada no final do mangote, poucos segundos antes da projeção, sendo a mistura dos componentes realizada sem a presença da mesma. No via úmida, o material que percorre o sistema já é o concreto propriamente

dito, com a água já misturada. Este método tem sua aplicação privilegiada quando de grandes áreas e volumes de reparos a serem realizados (BENNISON, 1994).

Segundo BENNISON (1994), a argamassa retrata bem o tipo de material aplicado à mão. Sua constituição é basicamente de um agregado miúdo e de um aglomerante, sendo o uso de um aditivo superplastificante quase que imprescindível quando do uso de uma pozolana tipo sílica ativa. Normalmente possui uma baixa relação água/aglomerante (a/aglo) e são materiais usados para médios/pequenos reparos, como também para a aplicação de uma membrana protetora.

As argamassas podem ser divididas em base mineral ou base orgânica. A principal diferença para o graute é que aquela normalmente é aplicada à mão ou com colher de pedreiro. São recomendadas para aplicação em locais com profundidades menores que 7 cm (pequenas áreas e/ou espaçadas). Não se pode executar um reparo com camadas de argamassas muito espessas, devendo estar na faixa de 2 cm (REPETTE *et al*, 1990).

Como exemplo de material fluido tem-se o graute, que apesar de uma baixa relação água/aglomerante, possui uma alta fluidez, sendo capaz de preencher locais de difícil acesso aos outros materiais. Seu principal problema é a retração, que deve ser evitada, bem como a segregação.

Pode-se dividir os grautes em: de base mineral e de base orgânica. (FIGUEIREDO, 1989; HELENE, 1992 e OLIVEIRA *et al*, 1992)

Grautes de base mineral: são constituídos de cimento Portland CP 32, CP 40 ou ARI, agregados selecionados de granulometria adequada, aditivos expansores (visando compensar a retração) e aditivos superplastificantes (proporcionar alta fluidez ao produto, aumentar a aderência do material ao substrato). Os grautes podem receber adições de polímeros, que têm como função melhorar certas características como: baixar a permeabilidade e melhorar a aderência ao substrato.

Grautes de base orgânica: os mais utilizados são à base de resina epóxi, combinados com endurecedores à base de aminas e poliamidas, agregados selecionados de granulometria adequada. Normalmente possuem elevada

resistência mecânica e química, tendo sua aplicação favorecida em ambientes de alta agressividade.

3.3 Propriedades requeridas pelos materiais de reparo

A argamassa de reparo deve ter compatibilidade mecânica com o concreto de reparo. Portanto, é recomendável que as argamassas de reparo tenham a resistência à compressão e à tração, módulo de deformação, coeficiente de dilatação térmica, dentre outras propriedades, compatíveis ao concreto (substrato) onde ela será aplicada. É recomendado também que a argamassa tenha uma boa aderência ao substrato e que tenha alcalinidade semelhante ao concreto (CABRAL; DAL MOLIN; BAUER, 2000).

Com relação aos grautes, a formulação deve ser feita de modo a proporcionar um material fluído e auto-adensável no estado fresco e aderente, resistente no estado endurecido, sem que esteja sujeito à retração (FIGUEIREDO, 1989).

Segundo OLIVEIRA (1989), o material de reparo deve possuir boa aderência ao substrato, estabilidade volumétrica (compensar a retração), conforme for a sua natureza, possuir impermeabilidade a líquidos, vapores e gases e, em muitas vezes, atingir elevadas resistências iniciais e finais.

Um material de reparo que tenha baixa retração, alta fluência e baixo módulo de deformação, seria desejável, principalmente para promover um baixo risco de fissuração (EMMONS & VAYSBURD, 1996).

Analisando as propriedades citadas acima, verifica-se que os seguintes aspectos são importantes num material de reparo:

- Estabilidade volumétrica;
- Coeficiente de dilatação térmica;
- Módulo de deformação;
- Permeabilidade;
- Aderência;

3.3.1 Propriedades que devem ser analisadas para as argamassas de recuperação

Para uma argamassa ser considerada de reparo, a mesma deve possuir certas propriedades que a tornem capacitada a essa função. Na Europa, o grupo de trabalho 2 (WG2), do subcomitê 8 (SC8) do TC104, Grupo da CEN (Comitê Europeu de Normalização), estuda os materiais para reparos estruturais e não estruturais (ROBERY & SHAW, 1997).

Para obter essas propriedades, pode-se analisar o desempenho de grautes, argamassas e concretos usados em recuperação da maneira abordada por ROBERY & SHAW (1997).

Os mesmos dividiram a análise em 5 blocos:

- Composição;
- Aplicabilidade ;
- Física;
- Estrutural;
- Barreira de proteção.

Na composição granulométrica analisa-se: granulometria, composição do cimento, adições, quantidade de cloretos solúveis e álcalis;

Na aplicabilidade: tempo de pega (*stiffening time*), ar incorporado, trabalhabilidade (consistência), dentre outros;

Nas propriedades físicas destacam-se: a retração, a compatibilidade térmica e a resistência de aderência (*pull-off adhesion strength*);

Como propriedades estruturais estão: resistência à compressão, módulo de deformação e fluência;

E com relação a barreiras de proteção, tem-se: resistência à carbonatação e à penetração de cloretos, absorção de água por capilaridade e resistência a sulfatos.

MEDEIROS & SELMO (2001), analisando as propriedades requeridas para argamassa de reparos, baseados nas Normas da série EN 1504 (também do Comitê Europeu de Normalização), exemplificaram as seguintes: granulometria, densidade de massa, pH, teor de álcalis e de cloretos solúveis, consistência, tempos de pega, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de deformação, retração por secagem, deformações cíclicas por umidade ou temperatura, capilaridade e

permeabilidade à água, resistência à carbonatação e difusão de íons cloretos, resistividade elétrica, resistência de aderência, entre outras, que vão ao encontro do que simplificou ROBERY & SHAW (1997).

Ainda MEDEIROS & SELMO (2001) resumiram em dois Quadros (3.1 e 3.2) o que consideram factíveis de controle para argamassas e sistemas de reparo, baseados nas tabelas da EVN 1504-9.

Quadro 3.1 – Propriedades de argamassas para reparos em estruturas de concreto com corrosão de armadura, e sugestões para a sua aplicação no controle tecnológico de fornecedores (MEDEIROS & SELMO, 2001, p. 7)

Argamassa	Propriedade	Controle Tecnológico		
		(1)	(2)	(3)
<i>Estado anidro ou granular</i>	Densidade de massa aparente	x		
	Resíduo insolúvel	x		
	Granulometria		x	
	Teor de álcalis		x	
	Cloretos solúveis		x	
<i>Estado fresco</i>	Massa específica	x		
	Manutenção de trabalhabilidade		x	
<i>Estado endurecido</i>	Resistência à compressão	x		
	Resistência à tração na flexão		x	
	Retração por secagem		x	
	Sucção capilar de água		x	
	Módulo de deformação		x	
	Variações dimensionais cíclicas			x
	Resistência à carbonatação			x
Resistividade elétrica			x	

Notas:

- (1) Controle normal do fornecedor, com maior frequência,
- (2) Controle especial de fornecedor, com menor frequência,
- (3) Controle adicional em obras de arte ou em condições mais críticas de exposição.

Quadro 3.2 – Propriedades dos sistemas de reparo para qualificação de fornecedores
(MEDEIROS e SELMO, 2001, p. 7)

Sistema de Reparo		Propriedade	Controle (Partes do sistema a que se aplica)	
			(1)	(2), (3)
Propriedades físicas	Estado fresco	Adesão e extensão de aderência	(A)	
	Estado endurecido	Retração restringida	(A)	
		Resistência à penetração de agentes agressivos		(A), (B)
		Compatibilidade dimensional com o concreto de base (variação de umidade, temperatura ou carga)		(A), (B)
		Compatibilidade eletroquímica com a armadura (ausência de macrocélula de corrosão)		(A), (B)
Propriedades mecânicas		Resistência de aderência à tração direta, por cisalhamento ou esforços mistos		(A), (B)
		Resistência de aderência após ciclos de umidade, carga ou temperatura		(A), (B)

Notas:

- (1) Controle normal do fornecedor, com maior frequência,
- (2) Controle especial de fornecedor, com menor frequência,
- (3) Controle adicional em obras de arte ou em condições mais críticas de exposição.

(A) Substrato + Argamassa

(B) Substrato + Argamassa + Proteção final

Isso mostra que o material de reparo deve ser concebido, ajustado, testado e aprovado para o desempenho de sua função, sendo necessário relacionar todos os ensaios a que o material deve ser submetido e a faixa de valor que deve obedecer para cada propriedade.

Sendo assim, algumas propriedades devem ser relatadas, bem como valores das mesmas obtidos para certos materiais de reparo, visando melhorar o entendimento dessas propriedades.

3.3.2 Valores de algumas propriedades dos materiais de recuperação

Como o objetivo principal deste trabalho é comparar argamassas produzidas em laboratório com argamassas industrializadas, buscaram-se, na literatura, resultados de certas propriedades dos materiais de recuperação, visando a futuras comparações das faixas de valores.

LAMB (1989) relata, em trabalho científico, a densidade, resistência à compressão e à flexão, o coeficiente de dilatação térmica (Quadro 3.3), o coeficiente de difusão de dióxido de carbono e cloretos (Quadro 3.4), para materiais de recuperação.

Quadro 3.3 – Propriedades de argamassas de recuperação (LAMB, 1989, p. 149)

Parâmetros	Tipo de Argamassa			
	Alta espessura, modificada com polímero (a/p = 0,175) ¹	Alta resistência, modificada com polímero (a/p = 0,13)	Microconcreto fluido, (a/p = 0,13)	Argamassa 1:3 ³ (cimento : areia), (a/p = 0,12)
Espessura máxima para aplicações verticais (mm)	80	25	-	25
Densidade da argamassa fresca (kg/m ³)	1400	2200	2300	2200
Resistência à compressão (N/m ²) ²	25	65	65	20-45
Resistência à flexão (N/m ²) ²	3,5	9,6	10,0	5,8
Coef. de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	10	7	10	6-12

Notas:

- (1) a/p = relação água/pó (em massa)
- (2) Pela norma BS 6319, 20°C e 65% de UR.
- (3) Relação em massa

Quadro 3.4 - Propriedades de materiais para recuperação (adaptada de LAMB, 1989)

Tipo de Argamassa	Parâmetros			
	Razão água/pó	Coeficiente de difusão de dióxido de carbono (m ² /s)	Espessura de concreto equivalente a 20 mm de argamassa (mm) ¹	Coeficiente da difusão de cloretos (x 10 ⁻¹² m ² /s)
Alta espessura, modificada com polímeros	0,175	5,8 x 10 ⁻⁹	182	< 0,01
Alta resistência, modificada com polímero	0,11	2,1 x 10 ⁻⁹	504	0,11
Microconcreto fluido	0,133	5,3 x 10 ⁻⁹	200	0,01

Nota:

- (1) Determinado indiretamente por cálculo proveniente da razão da difusão de oxigênio

Já MORGAN (1996), em trabalho sobre a compatibilidade de materiais de reparo para concreto e sistema de reparos, citou uma Tabela de MAYS & WILKINSON (1987) que mostra propriedades mecânicas típicas de alguns tipos de argamassas para recuperação (Quadro 3.5).

Quadro 3.5 – Propriedades mecânicas típicas para materiais de reparo
(MAYS & WILKINSON, 1987 apud MORGAN, 1996, p. 59)

Propriedades	Argamassas de resinas	Argamassas de cimento modificadas com polímeros	Argamassa de cimento comum
Resistência à compressão (MPa)	50 - 100	30 - 60	20 - 50
Resistência à tração (MPa)	10 - 15	5 - 10	2 - 5
Modulo de deformação na compressão (GPa)	10 - 20	15 - 25	20 - 30
Coefficiente de expansão térmica ($/C^{\circ}$)	$25 - 30 \times 10^{-6}$	$10 - 20 \times 10^{-6}$	10×10^{-6}
Absorção de água (% por massa)	1 - 2	0,1 - 0,5	5 - 15
Temperatura máxima de serviço ($^{\circ}C$)	40 - 80	100 - 300	> 300

MANGAT & LIMBACHIYA (1997) levantaram algumas propriedades para três materiais de recuperação estrutural industrializados e um concreto; neste trabalho os referidos autores apresentaram a resistência à compressão (avaliadas em cubos de 10 cm), a resistência à flexão, o módulo de deformação, a retração (usando prismas de 10x10x50 cm) e a granulometria dos materiais. Já em 1999, MANGAT & LIMBACHIYA (1999) voltaram a estudar os mesmos materiais do trabalho de 1997, sendo então levantadas outras propriedades como: a massa específica no estado fresco, o coeficiente de permeabilidade e a faixa de valores para coeficiente de difusão. Os materiais são:

- A: material à base de cimento Portland, dimensão máxima de agregado = 5,0 mm, uso de aditivos para evitar a retração, relação água/pó = 0,13.
- B: material de base mineral, não possui agregado graúdo, relação água/pó = 0,16.
- C: argamassa de cimento com sílica ativa, fibras, polímeros e relação água/pó = 0,16.

- Concreto de referência: concreto de dimensão máxima característica = 10,0 mm, traço em massa = 1:2,24:3,22 (cimento:areia:brita), relação água/cimento = 0,56 e consumo de cimento = 343 kg/m³.

Nas Tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam-se as propriedades levantadas por MANGAT & LIMBACHIYA (1997 e 1999).

Tabela 3.1 – Granulometria dos materiais (MANGAT & LIMBACHIYA, 1997)

Granulometria (% que passa) ¹			
Material			
Peneiras (mm)	A	B	C
5,0	93	100	100
2,4	73	100	100
1,2	65	100	100
0,6	58	87	81
0,3	48	61	69
0,15	37	29	47

Nota: (1) Dados retirados de um gráfico de curva granulométrica.

Tabela 3.2 – Resistência à compressão, flexão e módulo de deformação (MANGAT & LIMBACHIYA, 1997, p. 606)

Materiais	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à flexão (MPa) (a 28 dias)	Módulo de deformação (GPa) (a 28 dias)
	Idade			
A	3 dias	36,20	7,74	31,98
	7 dias	46,30		
	14 dias	56,75		
	28 dias	63,70		
B	3 dias	25,10	4,21	19,10
	7 dias	29,90		
	14 dias	31,30		
	28 dias	33,00		
C	3 dias	31,00	3,69	19,30
	7 dias	39,70		
	14 dias	41,95		
	28 dias	44,00		
Concreto	28 dias	40,60	4,40	19,00

Tabela 3.3 – Deformações de retração e expansão nos materiais na idade de 120 dias ($\times 10^{-6}$) (MANGAT & LIMBACHIYA, 1997, p. 610)

Materiais de reparo	Retração a 20°C e umidade relativa de:			Expansão (20°C e UR = 100%)
	55%	45%	30%	
A	879	945	970	214
B	984	1115	1165	138
C	1028	1308	1551	287
Concreto	541	600	747	119

Tabela 3.4 – Densidade, permeabilidade e coeficiente de difusão (MANGAT e LIMBACHIYA, 1999)

Material	Densidade no estado fresco (kg/m^3)	Coefficiente de permeabilidade (m/s) (28 dias) ¹	Coefficiente de difusão de cloretos ($\times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$) (após 180 dias) ²
A	2069	$2,5 \times 10^{-13}$	25,7
B	1575	$6,6 \times 10^{-11}$	84,9
C	1700	$1,3 \times 10^{-13}$	96,0
Concreto	2100	$1,1 \times 10^{-12}$	3,60

Notas:

- (1) Coeficiente de permeabilidade à água obtido pela Lei de Darcy;
 (2) Cura inicial de 24 horas na forma.

EMMONS *et al* (2000), através de resultados de pesquisa, estabeleceram alguns critérios preliminares para o desempenho de materiais de reparo. Critérios esses aplicáveis para reparos em superfície de material com base cimentícia, submetidos a cargas e ambientes normais, não se aplicando a condições especiais (ver Quadro 3.6).

Quadro 3.6 – Critérios de desempenho preliminares (adaptado de EMMONS *et al*, 2000)

Propriedades	Método de ensaio	Requisitos
Tensão de tração mínima aos 7 dias	ASTM C78 (ASSTM, 1994 c) ¹	2,0 MPa
Tensão de tração mínima aos 28 dias	ASTM C496 (ASTM, 1994 j) ²	2,75 MPa
Módulo de deformação máximo	ASTM C469 (ASTM, 1994 h) ³	25 GPa
Retração por secagem, máxima a 28 dias	ASTM C 157 (modificada) (ASTM, 1994 e) ⁴	0,04 %
Fissuração aos 28 dias	Anel de Coutinho ⁵	0
	Ângulo Alemão ⁶	0
	Indicador de mudança de volume (SPS ensaio Plate) ⁶	0
Coefficiente de dilatação térmica máximo	CDR – C 39-81	$11,7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

Quadro 3.6 – Critérios de desempenho preliminares (continuação) (adaptada de EMMONS *et al*, 2000)

Nota: Normas e referências utilizadas por EMMONS *et al* (2000) para realização dos ensaios

- (1) ASTM C78 – *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*;
- (2) ASTM C496 – *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*;
- (3) ASTM C469 – *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*;
- (4) ASTM C157 – *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*;
- (5) SHAH, S. P., KARAGULAR, M. E., SARIGAPHUTI, M. *Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained cracking of concrete*. ACI Materials Journal, v.89, n. 3, maio-junho, 1992. p. 289-295.
- (6) EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M. *Performance criteria for concrete repair material, Phase I, Technical Report REMR CS-47 U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, vicksburg, Mass.* 1995. 123 p.

SILVA JUNIOR (2001) sugere que as argamassas de reparo, de uma forma mais abrangente, devam possuir os níveis mínimos apresentados no Quadro 3.7, para as suas propriedades mais importantes.

Quadro 3.7 – Níveis mínimos para propriedades das argamassas de reparo (SILVA JUNIOR, 2001)

Propriedades	Valor mínimo
Resistência à compressão	10,0 MPa
Resistência à flexão	2,0 MPa
Resistência à tração	1,0 MPa
Módulo de deformação	5,0 GPa
Coefficiente de expansão térmica	$7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Absorção de água (%) massa	0,1
Temperatura máxima de serviço	40 °C

O Grupo Español del Hormigon – GEHO (1989) (apud SILVA JUNIOR, 2001), depois de estudos realizados com argamassas europeias, sugeriu as especificações e os limites das propriedades das argamassas para reparo apresentadas no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Propriedades características das argamassas e concretos de reparo mais utilizados (GEHO, 1989 apud SILVA JUNIOR, 2001, p. 109)

Propriedades	Concretos e argamassas à base de cimento	Sistemas à base de cimentos-polímeros	Concretos e argamassas executadas à base de resinas epóxi	Concretos e argamassas executadas à base de poliéster
Resistência à compressão (MPa)	20 - 70	10 - 60	55 - 110	55 - 110
Módulo de deformação (GPa)	20 - 30	1 - 30	0,5 - 20	2 - 10
Resistência à flexão (MPa)	2 - 5	6 - 15	9 - 29	8 - 17
Resistência à tração (MPa)	1,5 - 3,5	2 - 8	9 - 29	8 - 17
Alongamento de ruptura (%)	0	0 - 5	0 - 15	0 - 2
Coefficiente de dilatação linear (por °C)	$7 - 22 \times 10^{-6}$	$8 - 20 \times 10^{-6}$	$25 - 30 \times 10^{-6}$	$25 - 30 \times 10^{-6}$
Absorção de água 7 dias a 25 °C (%)	5 - 15	0,1 - 0,5	0 - 1	0,2 - 0,5
Temperatura máxima de uso sob carga (°C)	Acima de 300 °C, depende da dosagem	100 - 300	40 - 80	50 - 80
Tempo de desenvolvimento de resistência a 20 °C	1 - 4 dias	1 - 7 dias	6 - 48 horas	2 - 6 horas

3.4 Locais de utilização de alguns dos materiais de reparo

OLIVEIRA (1989) salientou a importância da correta escolha do material de reparo, que deve ser em função da natureza do problema, das características geométricas da região a ser reparada, tipo da região (ambiente) em que a estrutura esteja sujeita, prazo para a liberação da estrutura, elemento que está sendo reparado, dentre outros. Com o objetivo de correlacionar o tipo de material com o seu campo de aplicação, esse mesmo autor apresentou um quadro, (Quadro 3.9), onde ainda descreve algumas propriedades de certos materiais de reparo.

Quadro 3.9 – Escolha do material de reparo (adaptado de OLIVEIRA, 1989)

Descrição	Principais características	Campo de aplicação	Limitações geométricas
<i>Argamassas e Grautes</i>			
Argamassa cimentícia modificada com polímero	<ul style="list-style-type: none"> • Tixotropia • Baixa permeabilidade • Não retrátil • Altas resistências mecânicas • Ótima aderência ao concreto 	Reparos superficiais e revestimentos estruturais em geral	Reparos com qualquer dimensão, com espessuras de 5 mm a 25 mm
Argamassa seca à base de cimento (“dry pack”)	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa retração • Altas resistências mecânicas • Exige substrato saturado, ou com adesivo epóxi 	Preenchimento de cavidades localizadas (“dry pack”)	Reparos localizados com espessuras de até 60 mm
Argamassa à base de cimento com agregado de alta dureza	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa retração • Altas resistências mecânicas e à abrasão • Exige substrato saturado com adesivo base SBR ou acrílico ou substrato seco com adesivo epóxi 	Reparos em pisos industriais	Reparos com dimensões máximas de (3,00 x 3,00) m ² , com espessura de 15 mm a 30 mm
Argamassa à base de poliéster	<ul style="list-style-type: none"> • Tixotrópica • Baixa permeabilidade • Altas resistências mecânicas e à abrasão • Alta resistência ao ataque químico • Não retrátil • Ótima aderência ao concreto e ao aço • Endurecimento rápido 	Reparos rápidos. Reparos em elementos sujeitos ao ataque químico	Reparos com dimensões máximas de (5,00 x 5,00) m ² , com espessura de 5 mm a 15 mm
Graute à base de cimento	<ul style="list-style-type: none"> • Alta fluidez • Altas resistências mecânicas • Não retrátil • Ótima aderência ao concreto 	Reparos e reforços em elementos estruturais em geral. Reparos em bases de equipamentos	Reparos e reforços, com qualquer dimensão, com espessuras de 10 mm a 60 mm

Quadro 3.9 – Escolha do material de reparo (cont.) (adaptado de OLIVEIRA, 1989)

Descrição	Principais características	Campo de aplicação	Limitações geométricas
Graute à base de epóxi	<ul style="list-style-type: none"> • Alta fluidez • Altas resistências mecânicas • Não retrátil • Ótima aderência ao concreto e ao aço • Alta resistência ao ataque químico • Endurecimento rápido 	Reparos e reforços rápidos. Reparos em elementos sujeitos ao ataque químico. Injeção de fissuras passivas com aberturas de 0,3 mm a 70 mm	Reparos e reforços, com qualquer dimensão, com espessuras de 10 mm a 70 mm
<i>Adesivos</i>			
Adesivo à base de SBR (estireno butadieno) ou acrílico	<ul style="list-style-type: none"> • Alta aderência ao concreto • Altas resistências mecânicas 	Reparos superficiais. Aditivo para modificar a argamassa à base de cimento	Reparos com qualquer dimensão com espessura de 5 mm a 25 mm
Adesivo à base de epóxi	<ul style="list-style-type: none"> • Alta aderência ao concreto • Altas resistências mecânicas 	Reparos e reforços estruturais, em geral	Reparos e reforços com qualquer dimensão e qualquer espessura

3.5 Mão-de-obra

Não basta a melhor escolha do material de recuperação para a situação de reparo se a aplicação do mesmo for inadequada. O produto escolhido pode ser o mais sofisticado, porém nessa situação se comportará como o de pior qualidade ou, em último caso, totalmente inadequado à situação.

Devem-se ter cuidados especiais na manipulação e aplicação do material de reparo, pois como são materiais especiais, qualquer mudança no seu traço original pode acarretar variações nas suas propriedades.

Autores como BICKLEY (1996) e EMMONS & VAYSBURD (1996), comentam a importância da mão-de-obra envolvida, pois dela depende o desempenho futuro do material aplicado. BICKLEY (1996) defende um forte envolvimento e supervisão do engenheiro quando da execução, já que o pessoal (mão-de-obra) e as condições ambientais podem influenciar o material de reparo.

Os trabalhadores envolvidos no serviço de recuperação devem ser treinados para executar, dentre outras tarefas, as seguintes especificamente:

- Delimitar e escarificar o local a ser reparado;
- Limpar o local preparado, que inclui o concreto e as ferragens; estas eventualmente podem ser substituídas ou acrescentadas;
- Aplicar o (s) material (ais) de reparo;
- Cura do local reparado;
- Limpeza e aplicação de produto para proteção superficial (caso necessário).

Essas medidas visam melhorar a qualidade, bem como aumentar a velocidade do processo de recuperação.

AGUADO *et al* (1996) citam causas mais comuns que podem provocar resultados indesejáveis, sendo que dentre elas podem-se destacar algumas referentes a problemas gerados pela mão-de-obra:

- Erro na preparação da superfície;
- Dosagem incorreta dos materiais;
- Tempo inadequado entre a aplicação de diferentes camadas, gerando uma pobre adesão entre elas.

Em se tratando das argamassas estudadas neste trabalho, os aplicadores devem ser orientados para as “apertarem” firmemente contra o substrato. Isto visa a assegurar o preenchimento total do espaço a ser recuperado (BEZZERA, 1998).

3.6 Cura

A cura é importante para sistemas que levam o cimento como material aglomerante. Como a presente dissertação trata de materiais de recuperação à base de cimento, também serão comentadas curas em concretos e pastas de cimento, visando aumentar a quantidade de informações sobre esse assunto e, por conseguinte, aproveitar as recomendações de cura dos concretos e pastas para melhorar as das argamassas de recuperação.

Normalmente recomenda-se uma cura úmida durante 7 dias (no mínimo) ou uma cura com aspersão de produto químico na superfície do concreto ou reparo. Em concretos com sílica ativa, AGOSTINI & NUNES (1996) mostraram a eficiência com selagem em lona plástica e em filme de PVC, que possui eficiência equivalente às curas em imersão em água.

Em se tratando de curas em pastas de cimento, KHATIB & MANGAT (1999) estudaram seu efeito na porosidade e estrutura dos poros. Através dos resultados encontrados, verificou-se que o menor volume de poros e os mais finos foram obtidos nas pastas que passaram por uma cura inicial úmida em comparação às que tiveram uma cura inicial seca. A cura seca foi realizada em temperatura de 45°C e UR = 25%. Já as curas iniciais úmidas foram feitas com o uso de água e proteção dos espécimes com mantas impermeáveis.

Esses efeitos podem ser explicados pela produção de maior quantidade de produtos de hidratação do cimento (Ex.: C-S-H – silicato de cálcio hidratado) na cura úmida, resultando assim em uma matriz mais densa, com menor volume de poros. Ao contrário, nas curas secas, existe menor quantidade de água e por conseguinte menor formação de produtos hidratados. Isto acarreta maior volume de poros, bem como poros de maior dimensão (KHABIT & MANGAT, 1999).

HASSAN *et al* (2000) estudaram o efeito do tipo de cura em algumas propriedades de cinco tipos de argamassas para recuperação, sendo elas:

- OPC: argamassa de cimento Portland, traço 1:2,33 (em massa). Relação água/cimento (a/c) = 0,33;
- FA: argamassa com cinza volante de mesmo traço da OPC, porém com substituição de 30% (em massa) de cimento por cinza volante. Relação $a/aglo$ = 0,30;
- SF: argamassa com sílica ativa, similar à OPC, porém com substituição de 10% (em massa) de cimento por sílica ativa. Relação $a/aglo$ = 0,33;
- PMC: argamassa modificada com polímeros e com uso de fibras. Material industrializado dividido em componentes: A e B;
- EP: argamassa de resina epóxi. Material industrializado dividido em 3 componentes: resina, endurecedor e agregado.

Quando se comparou a resistência à compressão, a 28 dias, dessas argamassas (Tabela 3.5), pode-se observar o quanto a cura influenciou nessa propriedade. Sendo que as argamassas OPC, FA e SF, que têm como base o cimento Portland, foram mais influenciadas, pois tiveram redução da ordem de 50% em suas resistências.

Tabela 3.5 – Influência do tipo de cura na resistência à compressão
(adaptada de HASSAN *et al*, 2000)

Cura	Resistência à compressão (MPa)		Módulo de deformação E (GPa)
	35°C / UR = 45%	20°C / UR = 99%	35°C / UR = 45%
OPC	42,8	83,6	32,3
FA	47,6	88,6	28,6
SF	39,0	90,7	31,4
PMC	65,4	[> 55,0]	41,4
EP	88,8	[> 80,0]	13,2

Nota: [] = cura a 20°C e 65% de UR.

Analisando a permeabilidade à água e a difusão de oxigênio aos 28 dias, as argamassas baseadas em cimento Portland também tiveram seus resultados bastante influenciados pelo tipo de cura. A permeabilidade da OPC, FA e SF foram aproximadamente três vezes maiores que a argamassa com resina epóxi e aproximadamente uma vez e meia maior que a argamassa modificada com polímeros. Com relação à difusão, as argamassas de cimento Portland ficaram aproximadamente duas ordens de grandeza maiores que a argamassa epóxi e uma da argamassa modificada com polímeros (HASSAN *et al*, 2000).

MANGAT e LIMBACHYA (1999) estudaram o efeito da difusão de cloretos para materiais de reparos em concreto, na idade de 28 dias; os tipos de cura usados foram: 24 h no molde, 28 dias em água a 20°C e 28 dias em temperatura de 20°C e UR = 55%. Verificou-se que a concentração de cloretos nos materiais com cura de 24 h no molde é maior do que os curados por 28 dias. Porém, para tempos de exposição maiores que 180 dias, a diferença de concentração de cloretos entre os três tipos de cura é pequeno.

Em se tratando de argamassa com uso de cinza volante, ALHOZAIMY *et al* (1996) estudaram o efeito de três tipos de cura e de idades na penetração de cloretos. Foram utilizados três tipos de cinza volante, três porcentagens de substituição de cimento por

cinza volante, dois períodos de cura úmida a 32°C e duas idades para teste. Os referidos autores concluíram que independente dos outros fatores, os corpos-de-prova com maior tempo de cura (14 dias) sempre obtiveram uma menor penetração de cloretos do que os com menor tempo de cura (7 dias).

Tratando-se das argamassas de recuperação com sílica ativa, a cura será mais importante que nas industrializadas (maioria à base de polímeros), pois tais argamassas possuem relações a/c baixas (em torno de 0,35), e a perda de água para o ambiente poderá provocar escassez de água para a hidratação do cimento e trincas por retração. Porém, mesmo nas argamassas contendo polímeros, deve ser prevenida a rápida secagem, bem como protegê-las do frio, calor e chuva (KAY, 1992).

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES PARA UM BOM FUNCIONAMENTO DAS ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO

4.1 Introdução

Este capítulo tem por finalidade citar algumas características das argamassas de recuperação e do concreto base, devido à sua importância no desempenho do sistema de reparo ao longo de sua vida útil. Dentre outras, dar-se-á atenção à aderência, tipo do cimento usado na produção da argamassa, retração, módulo de deformação e penetração de cloretos.

4.2 Aderência

A aderência é uma propriedade importante, pois depende dela a transferência de esforços entre o concreto antigo e o material de recuperação, sendo essa “ponte” bem feita o reparo se torna parte integrante da estrutura. Porém, o concreto antigo deve oferecer condições favoráveis para receber o reparo (GARCIA, 1998).

Para uma boa aderência, inicialmente deve-se dar atenção à preparação da superfície antes da aplicação do material de reparo. Essa superfície deve estar limpa e apresentar rugosidade adequada (ABU-TAIR *et al*, 2000; MORGAN, 1996). Após a retirada do concreto deteriorado, deve-se promover a retirada das partículas soltas, pó e manchas de óleo ou graxa (HELENE, 1992). Jateamento de escória ou água em alta pressão são os mais recomendados para essa tarefa.

Com relação à umidade da superfície ou substrato, essa está vinculada ao tipo do material de reparo. No caso de uso de resinas epóxi, seu melhor desempenho é alcançado em superfícies secas (CHEN *et al*, 1993).

CLÍMACO (1991) e GARCIA (1998) em seus estudos de aderência entre concretos (base e reparo), utilizando o teste de compressão-cisalhamento da junta inclinada do prisma reconstituído (*slant shear test*), comprovaram que a aderência entre superfícies secas de concreto acarretam melhor desempenho do que as mesmas superfícies quando umedecidas.

CLÍMACO (1991) observou ainda que a aderência de concretos novos aplicados sobre concretos antigos, sem camada adesiva, é eficiente, estando a superfície do substrato

seca e escurificada para expor o agregado. Isso pode ser resultado da penetração de cristais de cimento hidratados na superfície (poros) do concreto velho.

MORGAN (1996), analisando trabalhos de vários autores, relata que materiais de reparo que possuem cimento Portland como base (concretos, argamassas e concretos projetados) possuem uma umidade e temperatura ideais para a superfície do substrato, resultando assim em uma máxima aderência. Baseado em experiência própria, Morgan apresenta como melhor superfície para receber materiais de recuperação produzidos com cimento Portland, um substrato úmido com superfície seca.

O procedimento proposto por MORGAN (1996) tende a ser mais eficaz no caso das argamassas de base cimentícia, pois o objetivo de manter o substrato úmido seria evitar a absorção excessiva de água pelo concreto base. Isto acontecendo, as partículas de cimento situadas na interface da argamassa x substrato de concreto perderiam água necessária à sua hidratação, o que implicaria no enfraquecimento dessa região, provocando assim redução da aderência.

Por outro lado a quantidade de água não deve ser excessiva, pois o substrato deve absorver um mínimo de água para favorecer a “ancoragem” da argamassa. Isto se dá pelo transporte pela água de elementos em hidratação do cimento, que são depositados nos poros do substrato e, com a posterior hidratação dos mesmos, provocam a “ancoragem” da argamassa.

Alguns autores e fabricantes recomendam o uso de uma camada adesiva antes da aplicação do material de reparo. CLÍMACO (1991) observou em seus estudos uma melhora na aderência com o uso de resinas epóxi. Porém muitos desses materiais são caros e sua incorreta escolha/aplicação provoca mais problemas que soluções.

A adesão entre duas superfícies macroscópicas é influenciada por forças de natureza muito variadas, como: de London¹, Van Der Waals, eletrostáticas, estéricas (decorrentes da adesão de polímeros e detergentes), ácido-base, coordenativas, de capilaridade e de oclusão (ou mecânicas) (GALEMBECK, 1985).

¹ Força que explica a atração entre duas moléculas não polares, também chamada de força de dispersão ou interação entre dois dipolos induzidos.

GALLEGOS (1995) destaca, inicialmente, a adesão como forças de atração física e química. Em se tratando de um material composto por uma matriz de cimento, sua ligação com um material de superfície polida e não porosa se dá por forças físicas (Van Der Waals) que promoverão a adesão. Neste caso as forças químicas são desprezíveis, e a resistência de aderência entre os materiais é baixa.

Para a união de materiais com poros capilares e superfícies rugosas, caso desta pesquisa, além da atração física, existe uma união mecânica, responsável, em quase totalidade, pela resistência de aderência entre os materiais. Essa união mecânica acontece após o contato da argamassa com o substrato, através da passagem de água, contendo materiais cimentícios da argamassa para o substrato. Com o passar do tempo, os materiais cimentícios se hidratam e se cristalizam nos poros capilares do substrato (concreto), intertravando os dois materiais em questão (GALLEGOS, 1995).

4.2.1 Avaliação da resistência de aderência

A resistência de aderência do material de reparo pode ser avaliada utilizando-se os seguintes ensaios: (AGUADO *et al*, 1996; MORENO & SELMO, 2001)

- Aderência por tração direta:
 - AFNOR NF P18-852;
 - NBR 13528 (1995).
- Aderência ao cisalhamento na flexão:
 - AFNOR NF P18-851. (vide Figura 4.1)
- Aderência frente a variações cíclicas de temperatura:
 - AFNOR NF P18-853.
- Aderência por cisalhamento oblíquo por compressão axial (ou compressão-cisalhamento da junta inclinada).
 - ASTM C1042-91 (1991);
 - ASTM 882-91 (1991).

No caso dos ensaios de aderência por cisalhamento oblíquo por compressão axial, eles também podem ser baseados nos estudos de CLÍMACO (1991 e 1994) e GARCIA (1998), vide Figura 4.2.

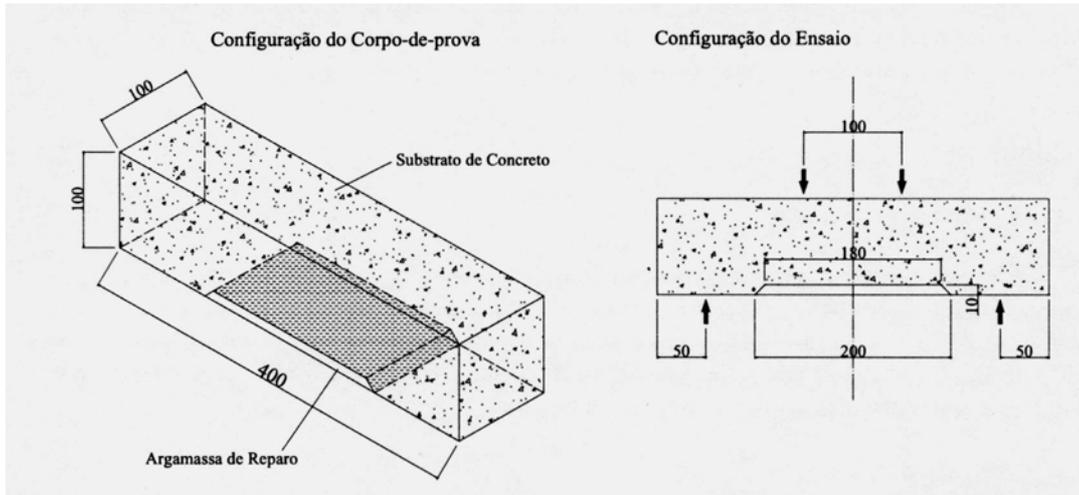


Figura 4.1 – Configuração do corpo-de-prova e do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento na flexão, unidades em mm (MORENO & SELMO, 2001, p. 5).

CLÍMACO (1994) baseia suas análises de aderência em 2 critérios: pela comparação da resistência à compressão medida nos prismas compostos (reconstituídos com a argamassa em estudo) com os prismas sólidos, e através de um critério de ruptura do tipo Coulomb com o ensaio de junta a vários ângulos. Faz-se uso de cp_s prismáticos (para melhor entendimento desta análise vide a dissertação de GARCIA, 1998).

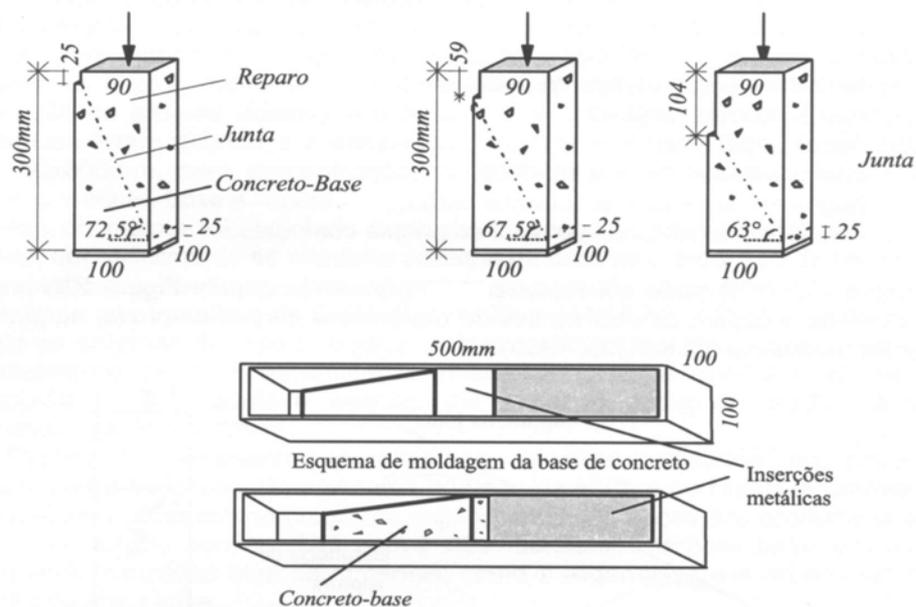


Figura 4.2 – Teste de compressão-cilamento de prismas compostos com junta diagonal, abaixo o detalhe das fôrmas (GARCIA & CLIMACO, 2001, p.3).

Já as Normas: ASTM C1042-91 (1991) e ASTM 882-91 (1991), recomendam a determinação da resistência de aderência através da tensão desenvolvida na área de colagem dos corpos-de-prova. Faz-se uso de cp_s cilíndricos.

MORENO & SELMO (2001) indicam o ensaio de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão, com uso de um cp de 40 mm x 40 mm x 120 mm (Figura 4.3) e um ângulo de inclinação da superfície de aderência de 30°. Também pode-se fazer uso de um cp cilíndrico de 5x10 cm.

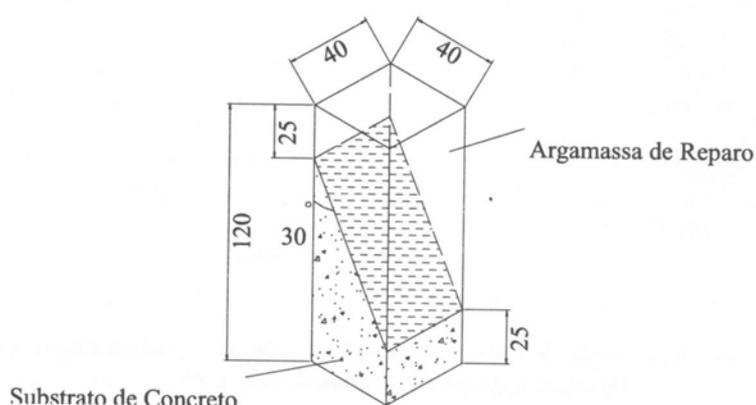


Figura 4.3 – Configuração do prisma para o ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento oblíquo por compressão, unidades em mm (MORENO & SELMO, 2001, p. 4).

4.3 Tipo de cimento

Em certos trabalhos, como por exemplo, as dissertações de KULAKOWSKI (1994) e de SCHULER (1998), o uso do cimento de alta resistência inicial foi predominante, pois a idéia que se faz de uma recuperação é que o material usado deve “secar” rapidamente. Contudo deve-se levar em conta, também, as características favoráveis de outros tipos de cimento, bem como facilidade de obtenção e custo na escolha do tipo de cimento.

Em trabalho realizado por BAUER (1996), estudou-se a adição de escória de alto-forno no cimento frente à corrosão de armaduras. O estudo comprovou que a escória adicionada ao cimento é benéfica em ajudar a evitar a corrosão, pois proporciona um refinamento dos poros. Isto propicia tanto um menor coeficiente de difusão de cloretos quanto de CO₂.

Entretanto, com a diminuição da reserva alcalina da matriz cimentícia, pela adição de escória, a frente de carbonatação pode avançar mais rapidamente. Então, a adição de escória por si só não é suficiente, fazendo-se necessária a redução da relação a/c para promover uma maior redução da porosidade (BAUER, 1996).

Em estudo realizado por MONTEIRO *et al* (1999), analisou-se a influência do tipo de cimento em relação à penetração de íons cloretos. Verificou-se no estudo que concretos com cimentos pozolânicos apresentaram menores teores de cloretos livres aos 65 dias (relação a/c=0,8) do que concretos com cimentos ARI e com filler.

MONTEIRO *et al* (1999) verificaram, também, que o efeito da adição de pozolanas é benéfica, porém não é significativa nas primeiras idades e com altas relações a/c. Sendo uma das principais funções da pozolana, o refinamento dos poros.

Já REGATTIERI *et al* (1996) estudaram tanto a difusão de cloretos como a absorção capilar em concretos plásticos. Através dos resultados obtidos com diferentes tipos de cimento e diferentes relações a/c (0,25;0,50;0,70), verificou-se que os menores coeficientes de difusão de cloretos foram obtidos com os cimentos CP III, CP II E e CP IV; houve uma tendência de aumento do coeficiente de difusão de cloretos com o aumento da relação a/c; e um aumento progressivo na altura de ascensão capilar com o aumento da relação a/c.

Outro estudo que deve ser mencionado é o de GASTALDINI *et al* (1996), o qual verificou a porosidade de pastas de cimento Portland com adições minerais. Como adições, usou-se sílica ativa, cinza volante, cinza da casca de arroz e escória granulada de alto forno. Dentre os resultados apresentados por essa pesquisa, podem-se destacar os seguintes:

- Quando do uso de um mesmo teor de adição, o uso da escória com maior área específica Blaine implica em uma estrutura da pasta mais densa e melhor desenvolvimento da resistência;
- Quando ocorria a substituição de 50% do cimento por alguma adição mineral, quanto maior a reatividade desta adição menores foram os valores de porosidade total e diâmetro médio dos poros;

- As pastas com o uso de cimento, escória (qualquer área específica) e sílica ativa foram as que apresentaram maior refinamento dos poros.

Portanto, em uma de suas conclusões, GASTALDINI *et al* (1996) relataram que adições minerais nas pastas de cimento provocam um aumento no volume de poros de gel e diminuição no volume de poros capilares. Isto resulta em um refinamento dos poros, além da redução da porosidade total, provocando uma menor permeabilidade, pois restringe os movimentos da água, íons e gases para o interior do material.

4.4 Retração

A retração é um fenômeno de redução do volume do material, geralmente comum em produtos cimentícios. Esta redução é função da perda de água ou reações químicas (TANESI, 1999; RAO, 2001c).

Os tipos de retração são basicamente os seguintes:

- Retração Plástica;
- Retração por secagem/hidráulica;
- Retração autógena;
- Retração por carbonatação.

Retração Plástica

É a retração decorrente da perda de água, por exemplo, do concreto para o meio, quando este ainda se encontra no estado plástico. A intensidade da retração plástica é influenciada pela temperatura, umidade e pela velocidade do vento.

Retração Autógena

Retração conseqüente da remoção de água dos poros capilares pela hidratação do cimento ainda não hidratado. Essa é maior em pastas de cimento, pois não existe qualquer agregado para formar um “esqueleto” rígido, para minorar esse fenômeno.

Retração Hidráulica

Retração conseqüente da retirada da água do concreto conservado ao ar não saturado, sendo uma parte dessa variação de volume irreversível.

Retração por Carbonatação

Essa retração tem sua provável causa na dissolução de cristais de Ca(OH)_2 , sob tensão devido à retração hidráulica, e posteriormente deposição do CaCO_3 em espaços não sujeitos à tensão. Sendo assim, é aumentada a compressibilidade da pasta de cimento (NEVILLE, 1997).

A retração é afetada por alguns fatores, dentre eles podem-se destacar:

- Relação água/cimento (a/c);
- Materiais componentes e suas dosagens;
- Adições e aditivos;
- Tempo e umidade;
- Temperatura;
- Cura.

a) Relação a/c

Foi verificado, em pastas de cimento, que quanto maior a relação a/c, maior a retração. Isto se deve ao fato de a mistura possuir maior quantidade de água disponível para a evaporação (NEVILLE, 1997).

Por outro lado, para relações a/c extremamente baixas, a retração pode ser muito alta. Este tipo de retração é consequência da retirada de uma maior quantidade de água dos poros capilares pelo cimento, durante sua hidratação. Como essas misturas terão grande quantidade de cimento, isso implicará em maior retração.

b) Materiais constituintes

Em se tratando de agregados, NEVILLE (1997) mostrou que mudando o tamanho máximo do agregado de 6,3 mm para 15,2 mm (aumentou o teor de agregado de 60% para 80% do volume de concreto), houve um decréscimo da retração para um terço do valor inicial.

No caso das argamassas, RAO (2001c) mostrou que o tamanho do agregado também tem papel significativo na retração por secagem. Esse autor verificou que um aumento no

tamanho do agregado miúdo diminui a retração, sendo essa diminuição baseada na ação de restrição provocada pelo agregado de maior tamanho.

Ainda com relação ao agregado miúdo, uma melhor distribuição granulométrica implica em uma diminuição do volume de vazios da areia. Isso influenciará na quantidade de pasta para ocupar os vazios restantes, que deverão ser menores, diminuindo assim a quantidade de cimento e água e, por consequência, a retração da argamassa.

c) Adições e aditivos

A influência das adições ou aditivos na retração é baseada no fato de que alguns desses constituintes (por exemplo: escória de alto forno e aditivos redutores de água) provocam um refinamento dos poros na matriz hidratada. Como a retração está ligada à água contida em poros pequenos (faixa de 3 nm a 20 nm), algumas adições e certos aditivos fornecem o meio (poros refinados) para o aumento da retração (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

d) Umidade

Um mesmo concreto exposto a ambiente com diferentes condições de umidade possui retrações diferentes. Quanto menor a umidade do meio, maior a retração (NEVILLE, 1997).

BISSONNETTE *et al* (1999), em estudo com materiais cimentantes, verificaram em argamassas que quanto maior era a umidade do meio, menor a retração.

MANGAT & LIMBACHIYA (1995) baseados no estudo de três materiais de reparo e um concreto, chegaram à mesma conclusão, isto é, o aumento da umidade diminui a retração.

e) Tempo (idade)

TROXELL *et al* (1958) apud MEHTA & MONTEIRO (1994) constataram que para uma extensa faixa de dosagem de concreto, tipo de agregado e condições ambientes e de carregamento, aproximadamente 20% a 25% da retração total por secagem, durante 20 anos, ocorre em duas semanas. Em três meses, ocorre aproximadamente 50% a 60% da retração total por secagem e, em um ano, 75% a 80%.

MANGAT & LIMBACHIYA (1995), citados anteriormente, verificaram, também, que a maior parte da retração dos materiais aconteceu nos primeiros 21 dias. Após esta idade, a retração ficou relativamente estável.

Já BISSONNETTE *et al* (1999), em estudo com argamassas e pastas de cimento, verificaram que a velocidade de retração foi rápida. Sendo que, após um dia, os valores de retração representaram 60% ou mais do valor final.

4.4.1 Ensaio de retração

Basicamente a retração de uma argamassa ou concreto pode ser analisada de 2 formas:

- Retração livre;
- Retração restringida.

a) Retração livre

A retração livre é baseada na medição do “encolhimento” de uma das dimensões do corpo-de-prova (cp_s). Normalmente a dimensão a ser avaliada é 3 vezes maior que as outras, dependendo da norma. Os cp_s podem ser cilíndricos, prismáticos, placas ou anéis.

Com esses tipos de cp_s , quanto menor a relação volume/área superficial exposta à secagem, menor o caminho a ser percorrido pela água, resultando assim em uma retração mais rápida (TENESI, 1999).

As condições de cura, como temperatura e umidade, também provocam variações nas medidas de retração (DECTER & KEELEY, 1997), cabendo ao pesquisador adotar a norma que melhor se adapte às suas condições de exequibilidade do ensaio, ao tipo de aplicação a que se destina o material e ao grau de complexidade que a pesquisa exige, dentre outros.

No quadro 4.1 encontram-se alguns pesquisadores e o tipo de cp usado em suas pesquisas.

Quadro 4.1 – Tipos de cp_s usados em ensaios de retração

Autor	Tipo de Corpo-de-Prova	Emprego	Obs.
MANGAT & LIMBACHIYA (1995)	Prisma (100x100x500) mm ³	Concreto/ argamassa	Desmoldado após 24 h; período de tempo em que ficou coberto com uma manta de polietileno.
IGARASHI, KUBO & KAWAMURA (2000)	Prisma (40x40x160) mm ³	Argamassa	Desmoldado após 24 h; com cura em água a 20°C.
RAO (2001c)	Prisma (25x25x250) mm ³	Argamassa	Desmoldado após 24 h.
KANNA, OLSON & JENNINGS (1998)	Prisma (305x76x25) mm ³	Argamassa	Desmoldado após 24 h.
BISSONNETTE, PIERRE & PIGEON (1999)	Prismas: (50x50x400) mm ³ (4x8x32) mm ³	Argamassa/ pasta	Desmoldado após 24 h.

b) Retração restringida

Os ensaios de retração restringida, segundo TANESI (1999), têm como principal objetivo a avaliação da fissuração. Podendo esse ensaio ser de três tipos: ensaio de anéis, ensaios de placas e ensaios lineares.

Em se tratando de ensaios com anéis, destaca-se o ensaio de Anéis de Coutinho. Este consiste em se moldar um “anel” de argamassa (concreto ou outro material) em volta de um anel metálico, utilizando a ajuda de outro anel externo à argamassa para facilitar a moldagem. O anel externo pode ser de PVC ou metal. As condições de cura diferem entre os pesquisadores, conforme observação de TANESI (1999) em sua dissertação.

Segundo essa mesma autora, a sensibilidade que o material possui à fissuração é função dos raios internos e externos do anel feito de pasta, argamassa ou concreto e da relação volume/área superficial, assim como no ensaio de retração livre. Portanto, a fissurabilidade dependerá das condições de restrição e também das condições de secagem do ambiente para um dado material.

Segundo LAMB (1989), os corpos-de-prova submetidos a esse ensaio são mantidos normalmente em condições de temperatura e umidade em torno de 20°C e 65%,

respectivamente. Citando também que argamassas sem aditivo compensador de retração podem apresentar fissuras a partir do 3º dia, sendo mais comum entre o 7º e o 28º dias.

Para TANESI (1999), as principais vantagens do uso desse tipo de ensaio são: a possibilidade de acompanhar o material em estudo desde o momento do lançamento e a grande área de exposição do material ao meio. Essa autora resumiu alguns estudos utilizando placas, relatando as dimensões dos cp_s, material estudado e condições de cura/exposição (Quadro 4.2).

Quadro 4.2 – Estudos de retração utilizando placas (adaptado de TANESI, 1999)

Dimensões das Placas (mm)	Material de ensaio	Temperatura de exposição (°C)	UR de exposição	Velocidade do vento (km/h)
610 x 910 x 19	Argamassa ¹	25°C a 35°C	10 a 25%	11 a 13
750 x 375 x 75	Concreto	40°C a 46°C ³	37 a 68%	Não especificado
		Ambiente de laboratório	Ambiente de laboratório	16 a 23
610 x 910 x 19	Concreto ²	21°C a 24°C	50%	19 a 23
533 x 838 x 38	Concreto com DMC= 13 mm	-	-	-

Notas:

- (1) Argamassas dosadas de acordo com o ACI 211.1, para que representassem o teor de argamassa de concretos com relação a/c = 0,60 e consumo de cimento entre 294 e 347 kg/m³;
- (2) Os pesquisadores que utilizaram esse ensaio recomendam o uso de agregados graúdos de dimensão máxima de 9 mm, apesar deste procedimento introduzir uma restrição desproporcional e pouco real, decorrente da pequena espessura do painel;
- (3) Os corpos-de-prova foram expostos às condições ambientais da Arábia Saudita.

4.5 Módulo de deformação

O módulo de deformação da argamassa de recuperação também é uma propriedade importante, pois influencia como o material de reparo vai trabalhar com a estrutura. Visto que diferentes módulos de deformação implicam em materiais com diferenças, às vezes muito significativas, na deformação dos mesmos (ROCHA, 1997).

Segundo EMMONS & VAYSBURD (1996), um material de recuperação deve possuir baixa retração, alta fluência e baixo módulo de deformação, evitando assim trincas e descolamento do material. Isso implica em materiais que “acompanhem” as movimentações da estrutura, dando ênfase à proteção da peça reparada.

Já MANGAT & O'FLAHERTY (2000), em estudos realizados na recuperação de duas pontes na Inglaterra, mostraram que o uso de um material de recuperação com módulo de deformação maior que o do concreto do substrato é o material mais indicado. Isso é justificado pela maior eficiência na interação do reparo com o substrato da estrutura. As justificativas encontradas foram:

- a) O reparo transfere tensões de retração para o substrato, reduzindo assim o nível de tensões no material;
- b) Outra seria que, ao longo do tempo, tensões externas podem ser transferidas do substrato para o material de reparo.

Ainda segundo aqueles autores, os materiais com módulo de deformação menor que o módulo do substrato não mostram interação com a estrutura. Não possuindo transferência de tensões entre o substrato e o reparo e entre este e a armadura. Isso foi comprovado quando a argamassa escolhida para recuperar a ponte Lawnslane (Inglaterra), com menor módulo e maior resistência à compressão que o substrato, apresentou problemas com o aparecimento de fissuras.

Portanto, um procedimento que pode ser adotado é utilizar um material com módulo de deformação o mais próximo possível do substrato de concreto, o que tornaria o sistema argamassa x concreto mais homogêneo, reconstituindo o monolitismo da estrutura e evitando problemas futuros (CABRAL *et al*, 2000).

Com relação à obtenção do módulo de deformação das argamassas de recuperação, pode-se fazer uso da NBR 8522 (1984), com a escolha do plano de carga: tipo I, II ou III.

Em concretos, pode-se correlacionar a resistência à compressão com o módulo de deformação. A NBR 6118 (1980) apresenta:

$$E_c = 6,6.(f_c)^{1/2} \quad (\text{módulo tangente}) \quad (\text{equação – 4.1})$$

Onde: E_c = módulo de deformação (GPa) e f_c = resistência à compressão.

NEVILLE (1997) cita:

$$E_c = 4,73.(f_c)^{1/2} \quad \text{e} \quad E_c = 3,32.(f_c)^{1/2} + 6,9 \quad (\text{equação – 4.2 e 4.3})$$

Onde: E_c = módulo de deformação (GPa) e f_c = resistência à compressão.

Ambas do ACI 318-89 (revisado em 1992), como expressões para o cálculo do módulo de deformação.

Podem-se avaliar essas expressões, utilizando-se as argamassas e substratos do artigo de MANGAT & O'FLAHERTY (2000) como exemplos, vide Tabela 4.1. Cabe lembrar que os módulos de deformação foram obtidos aos 28 dias conforme a BS 1881, parte 121 (1983).

Tabela 4.1 – Análise das expressões para obtenção do módulo de deformação

Material	Resistência à Compressão (N/mm ²)	Módulo de deformação (kN/mm ²)	$E_c = 6,6.(f_c)^{1/2}$ (GPa)	$E_c = 4,73.(f_c)^{1/2}$ (GPa)	$E_c = 3,32.(f_c)^{1/2} + 6,9$ (GPa)
Substrato	42	28,1	42,77	30,65	28,42
G1	60	31,1	51,12	36,64	32,62
G2	57	17,6	49,83	35,71	31,97
G3	46	23,8	44,76	32,08	29,42
Substrato	45	23,8	44,27	31,73	29,17
L1	60	22,7	51,12	36,64	32,62
L2	60	30,3	51,12	36,64	32,62
L3	35	27,4	39,05	27,98	26,54
L4	60	29,1	51,17	36,64	32,62

Nota: Constituição dos materiais de recuperação:

G1: Cimento de endurecimento rápido ($\geq 400 \text{ kg/m}^3$), acelerador de pega e dimensão máxima do agregado = 5 mm, sílica ativa e polímero;

G2: Cimento de endurecimento rápido, sílica ativa, fibras e polímero;

G3: Mistura dosada em laboratório, com cimento Portland e areia de granulometria média. Relação água/cimento controlada pelo operador do mangote;

L1: Mistura de cimento Portland de baixo teor de álcalis, sílica ativa, agregado calcário, redutor de retração. Relação água/pó = 0,12;

L2: Argamassa modificada com polímero;

L3: Material à base de cimento Portland, agregado de graduação definida, fillers especiais e aditivos químicos. Típica relação a/c = 0,18;

L4: Contém cimento Portland, areia de sílica e fibras plásticas. Tamanho máximo de agregado = 5 mm. Relação a/c = 0,35.

Analisando a Tabela 4.1, pode-se observar que a expressão que gerou valores mais próximos do real foi a equação 4.3. Portanto, em caso de não haver dados pertinentes, o uso dessa expressão fornece números que dão uma “idéia” do valor real do módulo de deformação do material de reparo.

4.6 Penetração de cloretos

Como já mencionado, os cloretos são grandes responsáveis pela deterioração das estruturas de concreto armado. Portanto, evitar ou minimizar a sua penetração na estrutura é uma das funções da argamassa de recuperação.

Dentre os mecanismos de penetração de cloretos na estrutura, podem-se citar:

- Absorção capilar;
- Permeabilidade;
- Migração de íons;
- Difusão.

Absorção capilar

Nesse mecanismo, os íons cloretos são levados para dentro da estrutura através da água, que penetra no concreto (ou argamassa) devido ao efeito da sucção capilar. Esse fenômeno é viabilizado pela rede de poros do material e pela tensão superficial da água.

Uma forma de modelar a ascensão capilar é usando a Lei de Jurin (HELENE, 1993).

$$h = (2 \cdot \mu) / (r \cdot \gamma) \quad (\text{equação - 4.4})$$

onde:

h = altura de penetração capilar (m)

μ = tensão superficial da água – kg/m ($\sim 75 \times 10^{-4}$ kg/m)

r = raio do capilar (m)

γ = massa específica da água – kg/m³ (~ 1 kg/dm³)

Analisando a equação 4.4, verifica-se que, diminuindo o raio do capilar, a altura capilar aumenta. Caso o diâmetro dos poros seja maior, menor a profundidade alcançada, porém maior a quantidade de água absorvida. Portanto, na prática, mais importante é a comunicabilidade dos mesmos, o que não é considerado na maioria dos modelos (HELENE, 1993).

Em se tratando de argamassa de recuperação, a absorção capilar pode ser combatida, dentre outras formas, com o uso de aditivos incorporadores de ar, de hidrofugantes ou de polímeros. No primeiro caso, a resistência do material também pode ser reduzida

devido à incorporação de bolhas de ar na massa, sendo a função dessas de interromper ou dificultar a subida de água nos “tubos” capilares.

Difusão

Nesse mecanismo, o transporte dos íons cloretos, de um meio para o outro, se dá devido a um gradiente formado pela diferença de concentração. As Leis de Fick modelam o fenômeno da difusão (BASHEER *et al*, 2001; KROPP, 1995).

Durante os processos da difusão os íons podem reagir com produtos da hidratação do cimento, ficando certa quantidade de íons retidos nos poros do material. Isso acarreta diminuição na difusividade (HELENE, 1993; BASHEER, 2001). A adição de escória ou sílica ativa também podem reduzir, ainda mais, a difusividade de íons cloretos nos poros do cimento (HELENE, 1993).

Permeabilidade

É definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso (MEHTA & MONTEIRO, 1994). A permeabilidade de um sólido pode ser equacionada pela Lei de Darcy (HELENE, 1993; MEHTA & MONTEIRO, 1994; BASHEER *et al*, 2001).

A permeabilidade a cloretos, como os outros tipos de transporte, está correlacionada com a natureza, distribuição e quantidade total de poros e também com o grau de hidratação da pasta de cimento (KALAKOWSKI, 1994).

Migração

Segundo HELENE (1993), a penetração de cloretos por migração é resultado da ação de um campo elétrico, que pode transportar e concentrar íons.

Fazendo uma analogia com o concreto, verifica-se que certos fatores que influenciam a sua permeabilidade também o fazem para as argamassas. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), quanto maior o diâmetro dos agregados adicionados a uma pasta, maior o coeficiente de permeabilidade.

Pode-se associar também a uma diminuição da permeabilidade: uma baixa relação água/cimento, adequado consumo de cimento, condições apropriadas de adensamento e cura. Nessa mesma linha, deve ser dada atenção à granulometria, forma e dimensão do agregado, às deformações térmicas e de retração por secagem (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Esses cuidados tendem a diminuir a microfissuração na zona de transição, a qual mostra ser uma das causas da permeabilidade nas argamassas.

Mensurando as propriedades citadas anteriormente, concretos de boa qualidade possuem absorção bem menor que 10% (CAMPITELI, 1987; NEVILLE, 1997). Com relação à permeabilidade, bons concretos possuem coeficiente de permeabilidade $< 10^{-12}$ m/s e coeficiente de permeabilidade a gases $< 5 \times 10^{-14}$ m/s (CAMPBELL & ROPER, 1991).

4.7 Coeficiente de dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica é definido como a variação na unidade de comprimento por grau de temperatura. No concreto ele é função do tipo de cimento, dos agregados, do grau de umidade e das dimensões da seção transversal da peça analisada (BAUER, 1987).

MEHTA & MONTEIRO (1994) relatam os seguintes coeficientes lineares de dilatação térmica: para pastas saturadas de cimento Portland com diferentes relações a/c $\sim 18 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, para argamassas de traço 1:6 (cimento/areia natural de sílica) $\sim 12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ e para misturas de concretos com diferentes tipos de agregado \sim de 6 a $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$.

Observando a Figura 1.1, verifica-se que dentre os fatores que influenciam a durabilidade do sistema de reparo está a compatibilidade do material de reparo ao substrato. Portanto, não só a retração e o módulo de deformação, citados anteriormente, mas também a expansão térmica do material possuem importância significativa, pois vão influenciar a compatibilidade dimensional do sistema de reparo (CZARNECKI, 2000; MORGAN, 1996).

POSTON *et al* (2001), estudando o desempenho de materiais para reparo, que incluíam argamassas de cimento comum, concretos, argamassas poliméricas, dentre outros,

obtiveram coeficientes de dilatação na faixa de $10,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $17,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Sendo que os materiais de reparo modificados com polímeros ficaram com suas médias aproximadamente 20% maiores do que os materiais sem polímeros na sua mistura.

Portanto, o uso de materiais de reparo com polímeros que tenham um alto coeficiente de dilatação térmica pode provocar fissuras, deslocamentos e posterior colapso do sistema de reparo, resultado da maior contração ou expansão do material com polímeros em relação ao concreto do substrato. Isto é mais problemático em ambientes com altas variações de temperaturas, sendo também, de importante análise, em reparos de grandes dimensões e/ou espessuras. (USACE, 1995).

CAPÍTULO 5

ARGAMASSAS COM SÍLICA ATIVA

5.1 Introdução

Este capítulo dará enfoque ao produto sílica ativa e às propriedades que esta adição melhora ao ser usada, bem como comentará trabalhos realizados por outros autores no estudo da argamassa com sílica ativa.

5.2 Sílica Ativa (s.a.)

É um subproduto da fabricação de silício ou ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão, em fornos elétricos de eletrodo de arco submerso. Este material também é conhecido como: fumo de sílica condensado, sílica volatilizada, ou simplesmente fumo de sílica. O nome fumo de sílica é devido à forma de obtenção do produto pois, quando o SiO se desprende na forma de gás, oxida-se e se condensa na forma de partículas esféricas extremamente pequenas de sílica amorfa (SiO₂) (NEVILLE, 1997).

A sílica ativa possui diâmetro médio típico menor que 0,1µm. Não se consegue determinar a área específica pelo método Blaine, devido ao tamanho tão pequeno das partículas; por absorção de nitrogênio, obtêm-se valores da ordem de 20000 m²/kg. Comparando com a área específica de outros materiais pozolânicos, ela é de 13 a 20 vezes maior, usando o mesmo método (NEVILLE, 1997).

Em sua ação na matriz cimentícia, a sílica ativa pode atuar tanto como pozolana ou como fíler na microestrutura do material.

- Pozolana – a sílica ativa possui alta reatividade devido à sua grande área específica e à alta concentração de SiO₂. Esta reagirá com o Ca(OH)₂¹ formando um produto mais durável: C-S-H = silicato de cálcio hidratado (SVENKERUD et al, 1990);
- Fíler – devido à sua forma (esférica) e tamanho extremamente pequeno, a sílica ativa pode preencher vazios (poros) (SVENKERUD et al, 1990). Isso colabora para aumentar a coesão e a compacidade tanto da fase pasta quanto da ligação agregado - pasta (ALMEIDA, 1996).

¹ Ca (OH)₂ – hidróxido de cálcio, produto da reação química do cimento.

Portanto, a sílica ativa irá diminuir o volume de vazios, reduzir a porosidade, refinar os poros e melhorar a região de interface agregado x pasta pela troca do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pelo C-S-H. Porém, o uso da sílica em uma argamassa, por exemplo, aumenta a demanda de água para manter uma mesma consistência, e isso faz com que seja necessário o uso de um plastificante ou superplastificante para manter a mesma relação água/aglomerante (a/aglo).

5.3 Superplastificante

O superplastificante ou aditivo redutor de água é um composto usado para aumentar a fluidez do concreto ou argamassa, sem com isso aumentar a água da mistura. Esses aditivos podem ser divididos em 4 categorias: (NEVILLE, 1997)

- condensados sulfonados de melamina-formaldeídos;
- condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos;
- condensados de lignossulfonados modificados;
- ésteres de ácido sulfônico ou carboidratos.

O efeito do superplastificante é o de conferir uma carga elétrica negativa aos grãos de cimento, evitando assim a floculação dos mesmos. Com os grãos de cimento dispersos, a trabalhabilidade do material aumenta, sem contar que com os grãos mais separados a hidratação é melhor (NEVILLE, 1997; PEREIRA & DJANIKIAN, 1995).

Portanto o superplastificante pode ser utilizado visando, basicamente, a dois efeitos: proporcionar um produto com trabalhabilidade muito alta ou um produto com resistência muito alta, ou ambos (NEVILLE, 1997). Pode-se também, aproveitar a melhor hidratação dos materiais cimentícios para aumentar o “desempenho”, do concreto ou da argamassa, consequência de uma diminuição da permeabilidade, porosidade, diâmetro médio dos poros, da profundidade de carbonatação, dentre outros (ALMEIDA, 1996).

5.4 Influência da sílica ativa na melhoria de propriedades dos concretos e argamassas

5.4.1 Resistência a ácidos orgânicos

AMARAL & TEZUCA (1992) estudaram o comportamento de argamassas com e sem sílica ativa frente ao ataque dos ácidos: acético e lático, nas concentrações de 5% e 1%. A avaliação das argamassas foi realizada verificando-se a massa e a dimensão dos corpos-de-prova (cilíndricos de 5 cm x 10 cm) que ficavam imersos nas soluções adotadas. O tempo de imersão era de 120 dias ou até que o cp entrasse em colapso (perda de 25% da sua massa inicial).

O traço estudado foi o 1:2,5 (aglomerante: agregado miúdo - em massa), relação a/aglo = 0,38 e consistência de 180 mm (mesa de consistência). Apresenta-se a composição das argamassas no Quadro 5.1 e os resultados encontrados estão na Tabela 5.1.

Quadro 5.1 – Composição das argamassas em kg (AMARAL & TEZUCA, 1992, p. 5)

Argamassas	Cimento	s.a.	Areia	Água	Aditivo
referência	100	0	250	38	2
com s.a.	91	9	250	38	2

Tabela 5.1 – Resultados encontrados (AMARAL & TEZUCA, 1992)

Ácidos orgânicos	Argamassa com s.a.		Argamassa de referência	
	Colapso (dias)	Perda de Massa (%)	Colapso (dias)	Perda de Massa (%)
Acético (5%)	56	25,6	42	33,3
Acético (1%)	42	26,4	35	26,1
Lático (5%)	28	33,7	21	28,8
Lático (1%)	70	27,7	63	27,5

Conclusões a que chegaram esses autores:

- As argamassas com sílica ativa sofrem uma perda de massa, no tempo de ensaio, menor que as argamassas de referência (sem s.a.), comprovando sua melhor eficiência frente ao ataque dos ácidos: acético e lático;
- Com relação à concentração dos ácidos: no lático, a solução mais concentrada se mostrou mais agressiva e, no acético, a solução mais diluída é que se mostrou mais agressiva.

5.4.2 Retração e expansão

RAO (1998) estudou o efeito da substituição de certas quantidades de cimento por sílica ativa na expansão de pastas e retração de argamassas. A substituição foi de 0, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, de cimento por sílica ativa. A relação a/aglo adotada foi de 0,5 para os dois ensaios. O traço de argamassa estudado foi: 1:3 (aglomerante : agregado miúdo), sendo que a areia usada estava na faixa granulométrica de 1,18 mm a 0,6 mm.

Foi avaliada a expansão em pastas de cimento e sílica ativa – corpos-de-prova cilíndricos de 30 mm x 30 mm, e a retração livre em argamassas - barras de 25 mm x 25 mm x 250 mm. Os resultados desses experimentos estão na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios (RAO, 1998, p. 1508)

Misturas	s.a./B ¹	Expansão – pastas (mm)	Retração por secagem (%)	
			28 dias	405 dias
MSF0	0,00	1,12	0,012	2,648
MSF1	5,00	0,30	0,020	2,652
MSF2	10,00	0,32	0,032	2,728
MSF3	15,00	0,46	0,036	2,720
MSF4	20,00	0,52	0,064	2,720
MSF5	25,00	0,57	0,076	2,640
MSF6	30,00	0,62	0,088	2,520

Nota: (1) B = cimento + sílica ativa (s.a.).

RAO (1998) chegou às seguintes conclusões:

- Quanto maior a substituição da s.a., maior a expansão em pastas de cimento;
- Efeito na retração por secagem em pequenas idades é muito significativo, sendo que, com o aumento da substituição do cimento pela s.a., há um aumento na retração das argamassas;
- Com a adição de s.a., existe um aumento na quantidade de C-S-H e, com isso, um aumento na retração aos 28 dias;
- A reação pozolânica da s.a. é completa em pequenas idades, sendo seu efeito menos significativo em idades mais avançadas.

5.4.3 Migração de íons cloretos

A verificação da migração de cloretos é importante, pois esse íon é um dos principais causadores da despassivação das armaduras do concreto armado. E quando se faz uso de uma argamassa de recuperação, essa deve evitar a passagem do mesmo através de sua matriz.

HISADA *et al* (1999) estudaram a migração de íons cloretos através de argamassas com diferentes relações água/aglomerantes, tipos de adições ao cimento (cinza volante, sílica ativa e escória de alto-forno) e porcentagens de substituição ao cimento (ver Quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Traços utilizados (HISADA *et al*, 1999, p. 444)

Nº	Composto adicionado ao cimento	Porcentagem de substituição ¹	Relação água/aglomerante	Relação areia/cimento
1	-	-	0,3	2,5
2	-	-	0,5	0,3 – 2,5
3	-	-	0,7	2,5
4	cinza volante	30	0,3	2,5
5	cinza volante	30	0,5	2,5
6	cinza volante	40	0,5	2,5
7	cinza volante	30	0,7	2,5
8	escória de alto-forno	50	0,3	2,5
9	escória de alto-forno	50	0,5	2,5
10	escória de alto-forno	50	0,7	2,5
11	escória de alto-forno	40	0,5	2,5
12	escória de alto-forno	70	0,5	2,5
13	sílica ativa	10	0,3	2,5
14	sílica ativa	10	0,5	2,5
15	sílica ativa	40	0,5	2,5
16	sílica ativa	10	0,7	2,5

Nota: (1) % de substituição em relação à massa de cimento.

O objetivo foi de avaliar a influência dessas adições ao cimento, à mobilidade dos íons cloretos através de c_p s de argamassas. Usaram-se células de migração² com corpos-de-prova de argamassa em forma de discos de $\varnothing 100$ mm x 10 mm.

² A concepção desse método é baseada na movimentação de íons cloretos por ação de um campo elétrico. Estes íons, eletricamente negativos, migram para um pólo eletroquimicamente positivo.

Esses autores obtiveram os seguintes resultados no uso da s.a.:

- Para menores relações água/aglomerantes ($\sim 0,3$), a migração é menor do que para relações água/aglomerantes maiores (0,4 e 0,5);
- Quanto maior a substituição de cimento por s.a., menor a mobilidade de íons cloretos;
- Para se produzir uma argamassa com a mesma mobilidade de íons que uma argamassa cujo cimento contém “adições”, é necessário mais cimento, ou melhor, o uso de adições nas argamassas diminui a migração de íons cloretos sem precisar adicionar mais cimento para cumprir essa função.

5.4.4 Resistência a sulfatos e ácido sulfúrico

Dependendo do ambiente em que a estrutura esteja inserida, ela pode vir a ser atacada por sulfatos; isso implica em uma recuperação e, por conseqüência, na necessidade do material de reparo ser resistente a esse agente.

TORII & KAWAMURA (1994) estudaram o efeito da substituição de certas quantidades do cimento por cinza volante ou sílica ativa, em argamassas, frente ao ataque de ácido sulfúrico e sulfatos. Foram estudadas as concentrações de 2% de H_2SO_4 – ácido sulfúrico, 10% de Na_2SO_4 – sulfeto de sódio e de 10% de $MgSO_4$ – sulfato de magnésio.

Os traços estudados e as substituições realizadas estão na Tabela 5.3, sendo a quantidade de água adicionada em função da consistência (= 180 mm). Os corpos-de-prova usados foram barras de 25 mm x 25 mm x 280 mm de argamassa, os quais foram imersos (após 28 dias) nas soluções estudadas. As dimensões e a massa dos mesmos foram medidas durante 3 anos, em intervalos regulares.

Tabela 5.3 – Traços utilizados e propriedades físicas a 28 dias das argamassas estudadas (adaptada de TORII e KAWAMURA, 1994)

Argamassas estudadas		Relação a/c	Relação material cimentício/ areia	Razão entre o volume de poros > que 0,1µm e o volume total (%)	Resistência à compressão (MPa)
Tipo de substituição	Porcentagem de substituição				
-	-	0,55	0,5	17,6	45,3
Cinza volante	10	0,54	0,5	12,5	37,1
Cinza volante	30	0,52	0,5	15,1	35,8
Cinza volante	50	0,50	0,5	16,5	23,8
Cinza volante	70	0,48	0,5	34,6	11,7
Sílica ativa	5	0,55	0,5	13,8	44,4
Sílica ativa	10	0,54	0,5	11,6	45,1
Sílica ativa	20	0,54	0,5	20,7	46,6
Sílica ativa	30	0,53	0,5	21,1	50,2

Podem-se resumir as seguintes conclusões apresentadas pelos autores:

- A melhoria da resistência das argamassas com substituição do cimento por cinza volante ou sílica ativa é, em grande parte, devida à melhor impermeabilidade e à baixa concentração de hidróxido de cálcio, resultado do efeito pozolânico;
- Com relação à solução de 2% H₂SO₄, a substituição de certas quantidades de cimento por cinza volante ou sílica ativa não obtiveram muito efeito na prevenção da escamação e no enfraquecimento das argamassas. Sendo que, nas argamassas com s.a., a substituição de 10% foi a que obteve melhor resultado em prevenir o ataque desse ácido;
- Em se tratando da solução de 10% de Na₂SO₄, a substituição de grande quantidade de cimento por cinza volante (> 30%) foi satisfatório, bem como a substituição de pequena quantidade de s.a. (~ 5%);
- No caso da solução de 10% de MgSO₄, as altas substituições do cimento não tiveram necessariamente uma melhora na prevenção do ataque pelo íon magnésio, devido à maior susceptibilidade do C-S-H formado por reações pozolânicas, ao ataque pelo íon de magnésio.

GASTALDINI & ISAIA (1998a) estudaram o ataque de sulfato de sódio em argamassas com adições minerais de escória de alto forno, sílica ativa, cinza da casca de arroz e cinza volante (vide Quadro 5.3). Essas adições visam melhorar a estrutura da pasta,

aumentando a impermeabilidade, diminuição do teor de C_3A e remoção do $Ca(OH)_2$ com conseqüente redução na formação da gipsita.

O ataque por sulfato de sódio foi analisado através da variação dimensional de cps prismáticos de 25 mm x 25 mm x 285 mm. O traço utilizado foi o 1:3,2:0,6 (aglomerante: areia normal do IPT: relação água/aglomerante – em massa). Os cps tiveram cura de 14 dias em água de cal, sendo em seguida colocados em uma solução de sulfato de sódio a 10%, ficando em ambiente com temperatura de 40 ± 2 °C, durante 42 dias.

Quadro 5.3 – Misturas utilizadas no ensaio de variação dimensional
(GASTALDINI & ISAIA, 1998a, p. 48)

Misturas	CP-ARI (% em massa)	Escória (% em massa)		Sílica ativa (% em massa)	Cinza da C. de arroz (% em massa)	Cinza volante (% em massa)
		400 m ² /kg	700 m ² /kg			
MARI	100	-	-	-	-	-
MCV50	50	-	-	-	-	50
ME45	50	50	-	-	-	-
M4EA32	50	30	-	-	20	-
M4EV32	50	30	-	-	-	20
M4EM32	50	30	-	20	-	-
ME47	30	-	70	-	-	-
M4EA52	30	-	50	-	20	-
M4EV52	30	-	50	-	-	20
M4EM52	30	-	50	20	-	-
MCA20	80	-	-	-	20	-
MM2	80	-	-	20	-	-
ME75	50	-	50	-	-	-
MCA50	50	-	-	-	50	-
MCV20	80	-	-	-	-	20
ME77	30	-	70	-	-	-
M7EA32	50	-	30	-	20	-
M7EM32	50	-	30	20	-	-
M7EV32	50	-	30	-	-	20

Os referidos autores relataram que, em praticamente todos os casos em que as pozolanas foram misturadas com escória de alto forno, verificou-se diminuição na expansão provocada pelos sulfatos, entre 14 a 33 vezes em relação à mistura de referência (sem nenhuma adição mineral). Observaram também que, de um modo geral, quanto mais elevado o teor de adição na mistura, menores foram as expansões observadas.

Outras conclusões significativas valem ser ressaltadas:

- A substituição do cimento por adições minerais provocou substancial alteração no comportamento das argamassas frente ao ataque de sulfato de sódio;
- Analisando os resultados, com exceção das misturas binárias ME45 e ME75, todos os demais traços mostraram níveis de expansão inferiores, entre 3% a 7%, em relação à mistura de referência. Isso evidencia as adições minerais estudadas e as proporções na prevenção da expansão;
- Trabalhar com uma escória mais fina, 700 m²/kg em vez de 400 m²/kg, não resultou em vantagens significativas que justifiquem o acréscimo de custo de moagem.

5.4.5 Porosidade

GASTALDINI & ISAIA (1998b) estudaram também a porosidade de pastas compostas por misturas binárias, citadas anteriormente, visando à verificação da influência de adições minerais na porosidade total e distribuição de tamanho de poros (vide Quadro 5.4).

Esse estudo utilizou a técnica de porosimetria de mercúrio com pressão utilizada de 414 MPa. Os cp_s foram produzidos em moldes plásticos de 2,5 cm x 5,0 cm, sendo curados por 28 e 91 dias. As relações água/aglomerante usadas, nas pastas, foram: 0,4; 0,5 e 0,6.

Quadro 5.4 – Misturas utilizadas para o ensaio de porosidade
(adaptado de GASTALDINI & ISAIA, 1998b)

Misturas	CP-ARI (% em massa)	Escória 400 m ² /kg (% em massa)	Cinza volante (% em massa)	Cinza da Casca de arroz (% em massa)	Sílica ativa (% em massa)
MARI	100	-	-	-	-
MCA50	50	-	-	50	-
ME45	50	50	-	-	-
M4EM32	50	30	-	20	-
M4EV32	50	30	-	-	20
M4EV32	50	30	20	-	-
ME47	30	70	-	-	-
M4EA52	30	50	-	20	-
M4EM52	30	50	-	-	20
M4EV52	30	50	20	-	-

Dentre os resultados encontrados por esses autores, verificou-se que, com a evolução da hidratação, ocorreu uma diminuição na porosidade total e no diâmetro médio dos poros de todas as séries analisadas, implicando assim em um refinamento dos poros. Esse comportamento é mais pronunciado nas misturas contendo sílica ativa, vindo, em seguida, as com cinza da casca de arroz, escória de alto forno e cinza volante.

5.4.6 Resistência à compressão

Apesar da resistência à compressão não ser uma propriedade que, por si só, garanta a qualidade da argamassa com sílica ativa ou do material de recuperação, ela faz parte das características do material e por isso deve ser analisada.

RAO (2001a) estudou o desenvolvimento da resistência à compressão em diferentes idades, utilizando-se de diferentes relações água/aglomerante³ (a/aglo) e quantidades de sílica ativa, em argamassas.

O traço escolhido foi 1:3 (cimento : areia de rio – em massa), sendo a fração de areia estudada: a passante na # 1,18 mm e retida na # 0,6 mm. As relações água / aglomerante foram: 0,35; 0,40; 0,45 e 0,50, e a quantidade de s.a. variou de 0 a 30% em relação ao peso de cimento.

Os cp_s utilizados para verificação da resistência foram cúbicos de 70,7 mm de aresta, nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias. A cura foi de 28 dias em água e o restante em UR = 65 ± 5%, à temperatura de 30 ± 2 °C.

Um dos resultados encontrados por esse autor foi que: em pequenas idades, o ganho de resistência é maior para relações a/aglo menores; já para idades maiores, o maior ganho de resistência se dá para maiores relações a/aglo.

³ Aglomerante, nesse caso = cimento + sílica ativa. (=a/aglo)

RAO (2001a) obteve, dentre outras, as seguintes conclusões:

- Em pequenas idades, 3 a 7 dias, a resistência das argamassas com s.a., em geral, mostra-se alta para qualquer relação a/aglo;
- Para relações a/aglo = 0,35; 0,40 e 0,45; a melhor quantidade de s.a., que implica em uma alta resistência, ficou entre 17,5% e 22,5%. Sendo que essa quantidade cresce com a relação a/aglo para qualquer idade;
- A resistência, a partir de 28 dias, tem crescimento modesto para as relações a/aglo = 0,35 e 0,40, sendo melhor para a relação 0,45;
- A razão entre a resistência à compressão a 3 e 7 dias e a resistência a 28 dias; bem como a razão entre os 3, 7 e 28 dias e a resistência a 90 dias mostraram-se melhores para a relação a/aglo = 0,35, comparada às outras relações a/aglo.

RAO (2001b) também investigou a influência do tamanho e área específica do agregado miúdo na variação da resistência à compressão e no módulo de deformação das argamassas com sílica ativa.

O traço estudado foi o 1:3 (cimento : agregado miúdo), a argamassa com s.a. teve substituição de 10% do cimento. Os cp_s usados para avaliar a resistência à compressão foram cúbicos de 70,7 mm de aresta e os para verificação do módulo de deformação foram cilíndricos de 10 cm x 20 cm.

A área superficial do grão de areia foi calculada, assumindo que as partículas fossem esféricas, sendo a área superficial = $(6 / \rho \cdot d_m)$, onde ρ é a densidade do agregado (2,65 para quartzo) e d_m = a média do diâmetro das frações do agregado.

Nas Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam-se as misturas utilizadas nas séries I e II, respectivamente, sendo que os resultados da resistência à compressão e módulo de deformação estão contidos nas Tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.4 – Misturas e algumas propriedades da Série I
(a/c = 0,417) (RAO, 2001b, p. 9)

Misturas	Proporções de cada fração usada				Tamanho médio do grão (mm)	Módulo de finura	Superfície específica (m ² /kg)
	4,75-2,36 (mm)	2,36-1,18 (mm)	1,18-0,60 (mm)	0,60-0,30 (mm)			
MPC I	1	-	-	-	3,55	5,0	0,637
MSF I	1	-	-	-	3,55	5,0	0,637
MPC II	-	1	-	-	1,71	4,0	1,273
MSF II	-	1	-	-	1,71	4,0	1,273
MPC III	-	-	1	-	0,89	3,0	2,544
MSF III	-	-	1	-	0,89	3,0	2,544
MPC IV	-	-	-	1	0,45	2,0	5,03
MSF IV	-	-	-	1	0,45	2,0	5,03
MPC V	1	1	1	1	1,65	3,50	1,372
MSF V	1	1	1	1	1,65	3,50	1,372
MPC VI	-	4	1	1	1,364	3,50	1,662
MSF VI	-	4	1	1	1,364	3,50	1,662
MPC VII	-	2	1	1	1,19	3,25	1,903
MSF VII	-	2	1	1	1,19	3,25	1,903

Nota: MSF = argamassas com sílica ativa e MPC = argamassa sem sílica ativa.

Tabela 5.5 – Misturas e algumas propriedades da Série II
(a/c = 0,5) (RAO, 2001b, p. 9)

Misturas	Proporções de cada fração usada				Tamanho médio do grão (mm)	Módulo de finura	Superfície específica (m ² /kg)
	4,75-2,36 (mm)	2,36-1,18 (mm)	1,18-0,60 (mm)	0,60-0,30 (mm)			
PCM I	1	-	-	-	3,55	5,0	0,637
SFM I	1	-	-	-	3,55	5,0	0,637
PCM II	-	1	-	-	1,71	4,0	1,273
SFM II	-	1	-	-	1,71	4,0	1,273
PCM III	-	-	1	-	0,89	3,0	2,544
SFM III	-	-	1	-	0,89	3,0	2,544
PCM IV	-	-	-	1	0,45	2,0	5,03
SFM IV	-	-	-	1	0,45	2,0	5,03

Nota: PCM = argamassa de cimento Portland, por conseguinte, sem sílica ativa.

Tabela 5.6 – Resultados de resistência à compressão, módulo de deformação da Série I (adaptada de RAO, 2001b)

Mistura	Resistência à compressão (MPa)			Módulo de deformação (GPa)
	7 dias	28 dias	180 dias	
MPC I	18,00	28,00	38,20	1,54
MSF I	28,20	36,80	46,00	1,55
MPC II	44,00	54,20	50,00	3,6
MSF II	48,00	59,23	56,00	2,11
MPC III	39,60	44,60	44,00	3,44
MSF III	41,80	50,20	48,00	3,64
MPC IV	21,25	35,20	42,00	0,88
MSF IV	26,60	40,60	39,00	2,86
MPC V	48,60	50,70	50,00	2,90
MSF V	50,20	60,70	52,00	4,20
MPC VI	31,13	53,20	50,00	3,0
MSF VI	39,33	58,20	58,00	3,69
MPC VII	30,60	48,00	43,00	2,53
MSF VII	36,00	56,00	50,00	2,70

Tabela 5.7 – Resultados de resistência à compressão, módulo de deformação da Série II (adaptada de RAO, 2001b)

Mistura	Resistência à compressão (MPa)				Módulo de deformação (GPa)
	1 dia	7 dias	28 dias	180 dias	
PCM I	8,60	24,00	39,20	34,80	5,94
SFM I	11,60	25,40	41,20	38,00	3,44
PCM II	12,20	22,40	40,00	39,00	3,75
SFM II	13,60	25,60	43,60	41,00	1,20
PCM III	10,80	16,70	29,20	30,20	2,50
SFM III	16,80	20,40	39,00	40,40	1,85
PCM IV	6,85	17,20	30,00	29,20	0,50
SFM IV	12,30	23,20	36,52	35,60	1,06

Quando se mantém uma mesma quantidade (massa) de areia e relação água/cimento em uma argamassa, o uso de grãos menores ou maiores geram diferentes conseqüências. Grãos menores possuem áreas específicas maiores, portanto a demanda de água aumenta, sendo a água insuficiente para a completa hidratação do material cimentante. Isso causa enfraquecimento da ligação pasta e superfície dos grãos. No caso dos grãos maiores, existe um excesso de água na interface agregado x pasta, aumentando a porosidade e diminuindo a resistência dessa região (RAO, 2001b).

Cabe salientar, entre outras, algumas conclusões significativas provenientes dessa pesquisa:

- A resistência das argamassas aumenta gradualmente e depois diminui com o aumento do tamanho dos grãos de areia;
- A adição de s.a. influencia na resistência à compressão a pequenas idades;
- O aumento na área específica dos agregados resulta em aumento da resistência, inicialmente, decaindo, gradualmente, depois, com o uso de areia com maior área específica;
- Uma tendência similar foi observada com o módulo de finura dos agregados x resistência à compressão; as maiores resistências foram encontradas no intervalo de 3 a 4 de módulo de finura;
- O módulo de deformação das argamassas aumenta à medida que aumenta a resistência à compressão.

Já BARONIO *et al* (1990) fizeram um estudo em argamassas, analisando o efeito da variação da substituição do cimento por s.a. e adição de superplastificante. Essa análise foi baseada em propriedades mecânicas e relativas à durabilidade (carbonatação e permeabilidade).

O traço base foi o 1:3 (aglomerante:agregado), tendo sido usado na argamassa de referência uma relação $a/c = 0,67$. Os demais traços utilizados e as suas respectivas resistências à tração na flexão e compressão axial a 28 dias estão na Tabela 5.8.

Os cp_s usados foram de 40 mm x 40 mm x 160 mm e os de 200 mm x 200 mm x 120 mm. Os primeiros eram cortados virando cubos de aresta ~ 40 mm, sendo usados para testes mecânicos e de carbonatação. O segundo tipo foi usado para o teste de permeabilidade.

A cura foi realizada em ambiente com temperatura = 20 °C e UR = 90%, nas primeiras 24 h, e depois de desmoldados, permaneciam imersos em água por 28 dias.

O ensaio de permeabilidade foi realizado de acordo com a DIN 1048, com início do teste usando 7 atm. O ensaio de carbonatação foi realizado em uma câmara, sendo realizadas análises em 1, 2 e 3 meses de exposição dos cp_s.

Tabela 5.8 – Traços utilizados e resistências à compressão axial e à tração na flexão
(adaptada de BARONIO *et al*, 1990)

Traços	Sílica Ativa ¹ (%)	Aditivo SP (%)	Relação a/aglo	Resistências – 28 dias (MPa)	
				Tração	Compressão
A	-	-	0,67	6,3	36,2
B/5	5	-	0,67	6,7	43,3
B/10	10	-	0,67	6,4	45,3
B/15	15	-	0,67	6,4	48,2
B/20	20	-	0,67	6,5	47,8
C/5	5	0,95	0,48	7,6	62,5
C/10	10	1,17	0,48	8,6	65,7
C/15	15	1,52	0,48	8,4	75,8
C/20	20	1,73	0,48	8,4	80,1
D/5	5	4,69	0,4	5,4	40,7
D/10	10	5,73	0,4	6,2	45,8
D/15	15	7,13	0,4	5,9	45,8
D/20	20	9,56	0,4	5,9	45,2

Nota: (1) Porcentagem de substituição ao cimento

Podem-se citar, dentre outras, as seguintes conclusões da pesquisa:

- O uso de 5%, 10%, 15% e 20% de s.a. aumenta a resistência mecânica das argamassas em todas as idades (1, 2, 7 e 28 dias), enquanto reduz a trabalhabilidade e a permeabilidade;
- Para fixar a trabalhabilidade em uma argamassa com s.a., faz-se necessário o uso de um superplastificante;
- A sílica ativa reduz a carbonatação em cerca de 35%, em relação à argamassa de referência;
- O uso de mais de 15% de s.a. e de mais de 1,5% de superplastificante faz com que a redução do hidróxido de cálcio da argamassa, pela reação pozolânica, prevaleça em comparação à redução por carbonatação;
- A adição de altas porcentagens de superplastificante (~ 10%) diminui a porosidade, porém diminui a resistência mecânica.

5.5 Alguns usos em reparos de barragens

Outras possibilidades do uso de argamassa com sílica ativa são encontradas em reparos de barragens. A argamassa será exigida, em particular, na sua resistência de aderência e abrasão, devido ao atrito da água e outras partículas com a superfície do reparo.

GOULART NETO *et al* (1995) estudaram reparos com o uso de sílica ativa em barragens de Furnas Centrais Elétricas S.A., cujas idades variavam entre 20 e 30 anos. Os traços usados estão no Quadro 5.5, sendo que a s.a. foi usada em adição ao cimento. Foram estudadas as resistências à compressão aos 7, 28 e 90 dias bem como a resistência de aderência argamassa x concreto, com e sem o uso de adesivo (Tabela 5.9).

Na aplicação da argamassa, o substrato teve saturação mínima de 24h. As espessuras de argamassa variaram de 2,0 cm a 2,7 cm, e a cura, em geral, foi úmida com duração mínima de 14 dias.

Quadro 5.5 – Traços das argamassas usadas (GOULART NETO *et al*, 1995)

	UHE de Furnas		UHE de Marimbondo		UHE de Porto Colômbia	Barragem de Chapéu D'Uvas
Relação cimento:areia	1:2,5	1:2,0	1:2,0	1:2,0	1:2,0	1:2,0
Porcentagem de s.a. ¹	12,4	12,6	12,6	7,93	12,6	13,8
Relação a/c ¹	0,47	0,44	0,44	0,44	0,44	0,46
Aditivo Superplastificante (%) ¹	1,2	1,2	1,2	1,1	1,8	1,1
Tipo de cimento	CP III	CP III	CP III	CP II-E	CP III	CP III

Nota: (1) Proporções calculadas a partir da quantidade em m³ de material.

Tabela 5.9 – Resultados de resistência à compressão (GOULART NETO *et al*, 1995)

Ensaio de Resistência à Compressão (MPa)						
Locais:	UHE de Furnas		UHE de Marimbondo		UHE de Porto Colômbia	Barragem de Chapéu D'Uvas
Traços:	1:2,5	1:2,0	1:2,0	1:2,0	1:2,0	1:2,0
7 dias	27,6	35,5	47,7	61,0	39,0	-
28 dias	44,5	53,6	66,2	69,9	54,4	32,3
90 dias	51,5	63,8	76,1	78,7	67,7	41,8
Ensaio de aderência (MPa) na UHE de Furnas						
Ligação argamassa/concreto			Ligação argamassa/adesivo/concreto			
0,33 (7 cps)			1,23 (7 cps)			

No artigo podem-se destacar as seguintes conclusões:

- A utilização do reparo com argamassa de s.a. apresentou-se como uma alternativa viável, tanto do ponto de vista econômico como técnico, porém este deve ser analisado quanto a longos períodos (verificar se o mesmo é durável);
- O reparo deve possuir espessura entre 1,0 cm a 2,5 cm, pois um pequeno reparo feito com espessura de 0,5 cm não obteve resultado satisfatório;
- Argamassas excessivamente secas poderão apresentar falhas na aderência, quando da não utilização de adesivo.

TARRALLO *et al* (1994) também estudaram a utilização de argamassas com sílica ativa no reparo de barragens, sendo primeiramente estudada em laboratório e depois usada em campo. O reparo ocorreu na usina de Porto Primavera, na superfície da soleira do vertedouro.

O traço estudado foi o 1:3,33 (cimento : areia - em massa), com adição de 10% de sílica ativa e 3,2% de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento, com relação $a/c = 0,370$ e consistência de 230 mm a 270 mm. Para verificação da qualidade da argamassa, foi analisada a resistência à compressão e a resistência de aderência, dentre outras.

A aderência foi avaliada através dos ensaios: à flexão de prismas 10 cm x 10 cm x 36 cm, que tinham rebaixos reconstituídos pela argamassa em teste e pelo ensaio de aderência à compressão por cisalhamento oblíquo, usando prismas de 150 cm x 150 cm x 300 cm. Nesse ensaio, o substrato de concreto fica em forma de cunha, e a argamassa, quando aplicada, reconstitui o prisma descrito anteriormente.

Avaliaram-se, também, três processos para melhoria da aderência, que foram utilizados na superfície do substrato, antes da aplicação da argamassa de recuperação:

Saturação da superfície;

Aplicação de calda de cimento espessa à superfície úmida;

Aplicação de resina epoxídica sobre a superfície seca.

Os resultados à compressão foram: 49,1 MPa (7 dias) e 64,6 MPa (28 dias), as resistências dos ensaios de aderência variaram de 80% a 110% em relação ao concreto de referência (100%). Como aqueles autores acharam adequados os resultados, os mesmos optaram pelo uso da saturação da superfície para melhorar a aderência.

No teste de campo, TARRALLO *et al* (1994) optaram pelo traço 1:2,5 (cimento : areia - em massa), com adição de 10% de sílica ativa e 1,0% de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento, com relação água/(cimento+s.a.) = 0,454 e consistência de 200 ± 20 mm. A areia foi passada na # n° 30 e o cimento foi o CP II F - 32.

A espessura máxima reparada foi de 3 cm a 4 cm, sem restrições quanto às dimensões da superfície. A cura era iniciada entre 1 a 2 horas após a aplicação e acabamento da superfície, utilizando-se panos úmidos por um período de 24 h.

Essa argamassa obteve resistências à compressão de: 22,9 MPa (3 dias), 28,4 MPa (7 dias) e 39,1 MPa (28 dias).

Em síntese, algumas conclusões podem ser extraídas do trabalho de TARRALLO *et al* (1994), quando da utilização de argamassa com s.a. em reparos de barragem:

- O peneiramento da areia melhorou as características da argamassa;
- A mistura, lançamento, adensamento e acabamento foram executados de maneira simples e rápida;
- Foi observado que a não aplicação de material para melhorar a aderência simplifica a execução do reparo;
- Analisando os custos: os materiais para produzir as argamassas com sílica ativa foram orçados em US\$ 101.00/m³, e para as argamassas epoxídicas US\$ 4,614.00/m³.

CARNEIRO *et al* (1996) divulgaram o desempenho dos reparos na soleira da UHE de Porto Primavera. O local foi novamente seco e inspecionado, sendo verificados os reparos próximos das juntas de dilatação e na superfície hidráulica – de pequenas (~ 0,5 m² a ~ 2,0 m²) e grandes (~ 3,0 m² a ~ 4,0 m²) dimensões.

Cabe destacar que os resultados de aderência entre o reparo e o concreto velho foram considerados satisfatórios, quando do uso da argamassa com sílica ativa. O desgaste à abrasão foi considerado alto, em relação à expectativa desses autores, sendo provavelmente resultado da presença de cascalho (~ 38 mm), que passava junto com a água, o qual não estava previsto. Com base na avaliação dos reparos, optou-se por reparar os locais próximos das junta de dilatação com argamassa com resina epóxi e continuar usando a argamassa de sílica ativa, nos reparos de grande e pequenas dimensões.

MIRZA & DURAND (1994) não estudaram, unicamente, argamassa com sílica ativa para reparos em obras hidráulicas, porém as mesmas estavam incluídas nos 40 tipos de argamassas estudadas de 13 diferentes procedências.

Do total de material estudado, uma argamassa era de referência, essa possuía relação a/c = 0,46 e relação areia/cimento = 2,75. Foram quatro argamassas com s.a. estudadas, compostas de cimento, areia, superplastificante, e sendo diferenciadas pela variação da substituição do cimento, de 6%, 9%, 12% e 15%, por sílica ativa.

O substrato adotado para a aplicação das argamassas foi o úmido, sendo seco, só para as argamassas base epóxi.

Dando enfoque aos resultados obtidos pelas argamassas com s.a., MIRZA & DURAND (1994) obtiveram, dentre outros, os seguintes resultados:

- A substituição de 6% a 12% de cimento comum por s.a. aumenta a resistência à compressão da argamassa, enquanto a substituição por 15% não obteve muita vantagem;
- Aumento da resistência de aderência e abrasão dessas argamassas, em relação à argamassa de referência;
- Essas argamassas tiveram mais retrações na cura seca e mais expansão na cura úmida, após o endurecimento, em comparação com a argamassa de referência;
- Boa compatibilidade térmica entre a argamassa com s.a. e o substrato de concreto;
- Uso da s.a. resultou em diminuição da permeabilidade;
- O uso de menos ou outro tipo (princípio ativo) de superplastificante, ou a mudança no tipo da areia, podem vir a reduzir a retração dessas argamassas.

Esses autores também verificaram a necessidade de uma boa limpeza e demarcação do local a ser reparado, e de uma cuidadosa cura, não expondo o material diretamente ao sol e ao vento forte.

5.6 Dissertações envolvendo estudos de argamassas com sílica ativa

Esse subitem tem como objetivo salientar algumas dissertações que, em seu escopo, utilizaram a sílica ativa como componente das argamassas para recuperação de estruturas de concreto armado. Tendo como enfoque: traços utilizados, propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido e conclusões obtidas com o uso dessa argamassa.

- a) Em 1994, Marlova Piva Kulakowski estudou a penetração de cloretos em argamassas com sílica ativa para reparos estruturais.

KULAKOWSKI (1994) avaliou a argamassa quanto à penetração de cloretos (ASTM C 1201), teor de cloretos retidos (ASTM C 1152), resistência à compressão – cp_s 5 cm x 10 cm (NBR 7215), teor de ar incorporado (ASTM C 185), peso específico no estado fresco, dentre outros.

Foi escolhido o cimento CP-V, de alta resistência inicial; areia fina de rio, com módulo de finura = 2,17, DMC= 4,8 mm e massa específica aparente de 2,61 g/cm²; sílica ativa nacional e superplastificante à base de formaldeído naftaleno sulfonado.

Os traços utilizados constam do Quadro 5.6 (s.a. em adição ao peso de cimento), sendo que o índice de consistência foi arbitrado em 260 ± 20 mm. Os resultados de ar incorporado e resistência à compressão estão na Tabela 5.10. A cura foi realizada em câmara úmida (temperatura de 23 ± 2 °C), sendo os cp_s para penetração de cloretos curados por 25 dias e os para resistência à compressão por 28 dias.

Quadro 5.6 – Traço das argamassas, em proporções (KULAKOWSKI, 1994, p. 73)

Traço	a/aglo ⁽¹⁾	% s.a.	Cimento : areia (massa)	% aditivo
1	0,35	0	1:2	1,5
2	0,35	5	1:2	2,04 ⁽²⁾
3	0,35	10	1:2	2,27 ⁽²⁾
4	0,35	15	1:2	2,46 ⁽²⁾
5	0,45	0	1:2,5	0,5
6	0,45	5	1:2,5	0,5
7	0,45	10	1:2,5	0,59 ⁽²⁾
8	0,45	15	1:2,5	0,7 ⁽³⁾
9	0,55	0	1:3	-
10	0,55	5	1:3	-
11	0,55	10	1:3	-
12	0,55	15	1:3	-

Notas: (1) % de aditivo e % s.a. sobre o peso do cimento: $a/aglo = (água + 0,6.aditivo)/(cimento + s.a.)$;

(2) Ajuste de água para 1,5% de aditivo;

(3) Ajuste de água para 0,5% de aditivo.

Tabela 5.10 – Resultados de resistência à compressão e ar incorporado (KULAKOWSKI, 1994)

Traço	a/aglo	% s.a.	Resistência à compressão - 28 dias (MPa) ⁽¹⁾	Ar retido - estado fresco (%)
1	0,35	0	66,65	3,92
2	0,35	5	69,58	3,59
3	0,35	10	72,78	3,56
4	0,35	15	69,52	3,08
5	0,45	0	43,04	4,08
6	0,45	5	49,51	4,16
7	0,45	10	50,21	3,44
8	0,45	15	53,09	3,52
9	0,55	0	36,3	4,05
10	0,55	5	39,9	3,99
11	0,55	10	38,74	3,58
12	0,55	15	43,17	3,08

Nota: (1) Média de 3 cp_s.

A partir dos dados de corrente elétrica obtidos durante o ensaio de penetração de cloretos, a autora calculou a carga total passante segundo a ASTM C 1202-91, valores que estão na Tabela 5.11. Nessa tabela, também encontram-se os dados de teor de cloretos (ASTM C 1152-1991), valores esses expressos em relação à massa de cimento.

Cabe lembrar que o cp utilizado nos 2 ensaios descritos anteriormente era o mesmo, um cilindro de 95 mm de diâmetro com 51 mm de altura. O material para verificar o teor de cloretos era extraído através de furos a profundidades (prof) pré-estabelecidas.

Tabela 5.11 – Carga total passante e teor de cloretos retidos total
(em relação ao peso de cimento) (KULAKOWSKI, 1994)

Traço	Carga total passante após 6 horas (C) ⁽¹⁾	Teor de cloretos retidos total prof 10 mm ⁽¹⁾	Teor de cloretos retidos total prof 10 mm a 20 mm ⁽¹⁾	Teor de cloretos retidos total prof 20 mm a 30 mm ⁽¹⁾
1 (0,35/0)	3671,63	1,650	0,917	0,221
2 (0,35/5)	2017,84	1,789	0,268	0,309
3 (0,35/10)	829,40	1,071	0,147	0,284
4 (0,35/15)	597,12	1,006	0,695	0,256
5 (0,45/0)	6832,15	1,730	0,945	0,871
6 (0,45/5)	2528,71	2,306	0,665	0,286
7 (0,45/10)	1273,74	1,600	0,316	0,217
8 (0,45/15)	881,62	1,183	0,184	0,160
9 (0,55/0)	13761,81	0,788	0,555	0,530
10 (0,55/5)	7217,06	1,970	1,012	0,767
11 (0,55/10)	2860,18	2,337	1,266	0,432
12 (0,55/15)	1680,31	2,198	0,300	0,278

Nota: (1) Média de 3 cp_s.

A partir da pesquisa desenvolvida por KULAKOWSKI (1994), apresentam-se algumas conclusões significativas:

- A adição de sílica ativa parece melhorar o comportamento da argamassa frente à penetração de cloretos, pois quando se passou o teor de s.a. de 0 para 15%, a carga total passante reduz, em média, 7 vezes conforme a relação a/aglo;
 - A eficiência da s.a. parece ser maior em argamassas com relações a/aglo mais elevadas, tendo em vista que, para adições de 15%, a argamassa com relação a/aglo = 0,55 reduziu a carga total passante em 8 vezes, enquanto que para a relação 0,35 a redução foi de 6 vezes;
 - O método de ensaio empregado para a penetração de cloretos é um método acelerado, que dificilmente retratará as condições de trabalho de concretos e argamassas. Que devido à diferença de potencial elevada (60 V), o ensaio torna-se um tanto agressivo. Isso reflete na quantidade de cloretos encontrada nas diversas profundidades, superior à recomendada por normas estrangeiras (Quadro 2.4), fazendo a análise do ensaio se tornar qualitativa.
- b) Em 1998, Andréa Schuler caracterizou argamassas com adição de sílica ativa como um material para reparos e reforços de estrutura de concreto armado.

Essa autora estudou algumas propriedades da argamassa, como: resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral, resistência de aderência, módulo de deformação estática. Na questão de durabilidade, verificou profundidades carbonatadas e corrosão acelerada por cloretos. Em um segundo momento, verificou o comportamento da argamassa em situação de uso e, por fim, realizou uma avaliação econômica.

Mantendo a idéia básica deste trabalho, este autor dará ênfase às propriedades obtidas e à análise econômica.

Os materiais componentes foram: cimento CP V – ARI; areia média ou regular, de rio (variou-se a composição durante a pesquisa); sílica ativa em pó, não densificada; e superplastificante à base de formaldeído naftaleno sulfonado.

Apresentam-se os traços escolhidos no Quadro 5.7, sendo que a sílica ativa entra no traço em adição à massa de cimento. O índice de consistência foi padronizado em 250 ± 20 mm.

Quadro 5.7 – Traços usados (adaptado de SCHULER, 1998)

Adição de s.a. (%)	Relação água / aglomerante (cimento + s.a.)	
	0,35	0,55
	(cimento : areia – em massa)	
0	1:1,8	1:3
5	1:1,7	1:3
10	1:1,7	1:3
20	1:1,6	1:2,62

No ensaio à compressão axial, foram utilizados os cp_s cilíndricos de 5 cm x 10 cm, e os resultados aqui apresentados serão da segunda fase, onde se usou mistura mecânica e cura até a data do ensaio (Tabela 5.12), apresentando também a resistência à tração na compressão diametral.

Tabela 5.12 – Resultados de resistência à compressão e tração na compressão diametral (SCHULER, 1998)

Traços	Resistência à compressão axial (MPa)			Resistência à Tração na compressão diametral (MPa)	
	7 dias	28 dias	63 dias	7 dias	28 dias
a/aglo = 0,35 0% s.a.	50,0 (CV: 2,57%)	64,5 (CV: 9,53%)	71,3 (CV: 0,00%)	3,05 (CV: 24,5%)	4,65 (CV: 4,97%)
a/aglo = 0,35 5% s.a.	57,6 (CV: 4,74%)	73,5 (CV: 6,73%)	76,9 (CV: 4,44%)	3,90 (CV: 16,0%)	4,47 (CV: 3,21%)
a/aglo = 0,35 10% s.a.	53,7 (CV: 8,46%)	75,5 (CV: 3,38%)	75,4 (CV: 8,58%)	3,94 (CV: 2,84%)	5,06 (CV: 7,95%)
a/aglo = 0,35 20% s.a.	60,5 (CV: 4,39%)	75,7 (CV: 1,73%)	77,1 (CV: 3,05%)	4,08 (CV: 9,33%)	5,27 (CV: 8,33%)
a/aglo = 0,55 0% s.a.	33,0 (CV: 11,0%)	40,5 (CV: 3,70%)	48,7 (CV: 9,76%)	3,19 (CV: 18,8%)	2,96 (CV: 4,31%)
a/aglo = 0,55 5% s.a.	33,2 (CV: 5,87%)	42,5 (CV: 4,65%)	47,0 (CV: 3,97%)	3,04 (CV: 9,58%)	3,18 (CV: 11,8%)
a/aglo = 0,55 10% s.a.	32,2 (CV: 20,3%)	42,2 (CV: 7,80%)	47,2 (CV: 5,06%)	2,98 (CV: 16,4%)	2,96 (CV: 4,03%)
a/aglo = 0,55 20% s.a.	37,1 (CV: 0,31%)	52,1 (CV: 4,06%)	53,3 (CV: 12,6%)	2,67 (CV: 15,9%)	3,93 (CV: 9,42%)

Nota: CV= coeficiente de variação.

SCHULER (1998) verificou a aderência da argamassa de recuperação de duas formas: compressão cisalhamento à junta inclinada e tração direta. O primeiro ensaio se baseou no trabalho de CLIMACO (1991) e nas normas ASTM C 882 e 1042.

Basicamente, o primeiro ensaio consistia em moldar um cp prismático de 10 cm x 10 cm x 35 cm que, posteriormente, era cortado em um ângulo de 71,5° (ficando em forma de cunha). Após 28 dias, tinha a sua superfície preparada e era moldado o restante do cp com a argamassa em estudo, voltando o corpo-de-prova a suas dimensões originais. Esse então era levado à compressão e a tensão era calculada com base na área da interface argamassa x concreto e na força tangente à mesma (Tabela 5.13).

Já o ensaio de tração direta, pode-se dizer que seguiu a NBR 13528 (1995) – Revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânica – Determinação da resistência de aderência à tração. O substrato adotado foi uma cortina de concreto armado, sendo os cps utilizados de 5 cm de diâmetro (Tabela 5.14).

Tabela 5.13 – Resultado do ensaio de compressão-cisalhamento da junta inclinada (adaptada de SCHULER, 1998)

Traços	Tensão de cisalhamento na junta (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
a/aglo = 0,35 0% s.a.	7,53 (CV: 19,4%)	5,56 (CV: 34,6%)	7,21 (CV: 23,3%)
a/aglo = 0,35 5% s.a.	5,74 (CV: 12,4%)	7,27 (CV: 21,7%)	8,19 (CV: 22,4%)
a/aglo = 0,35 10% s.a.	6,03 (CV: 15,6%)	7,66 (CV: 23,8%)	9,16 (CV: 24,6%)
a/aglo = 0,35 20% s.a.	5,34 (CV: 19,0%)	6,60 (CV: 13,1%)	6,60 (CV: 33,5%)
a/aglo = 0,55 0% s.a.	5,18 (CV: 7,54%)	5,72 (CV: 24,1%)	5,67 (CV: 18,5%)
a/aglo = 0,55 5% s.a.	4,72 (CV: 27,1%)	5,05 (CV: 12,8%)	5,68 (CV: 28,7%)
a/aglo = 0,55 10% s.a.	4,92 (CV: 3,47%)	5,91 (CV: 32,8%)	6,79 (CV: 26,5%)
a/aglo = 0,55 20% s.a.	5,23 (CV: 18,5%)	4,63 (CV: 14,4%)	6,51 (CV: 21,1%)

Tabela 5.14 – Determinação da resistência de aderência à tração (adaptada de SCHULER, 1998)

Traço	Argamassa sem sílica ativa 1:3,04 – a/aglo = 0,60			Argamassa com sílica ativa 1:3,04 – a/aglo = 0,59 (10% s.a.)		
	4 dias	7 dias	21 dias	4 dias	7 dias	21 dias
Média (MPa)	0,1953	0,1848	0,3773	0,3761	0,3304	0,3684
CV (%)	41,34	42,45	19,19	30,00	40,99	20,78

O módulo de deformação foi determinado seguindo o procedimento adaptado da NBR 8522/84, considerando o tipo de carregamento III. Sendo o módulo de deformação secante calculado a 40% de f_c (resistência à compressão de ruptura das argamassas), sendo considerado o intervalo de deformação obtido entre $50 \times 10^{-6} \mu\text{m}/\text{m}$ e $E_{40\%f_c}$ (deformação na tensão de 40% de f_c), e tensão de $f_{50\mu\text{m}/10E-6}$ e $f_{40\%f_c}$, de acordo com a ASTM C 469 (Tabela 5.15).

Para avaliar a durabilidade, SCHULER (1998) verificou a profundidade carbonatada em cp_s 5 cm x 10 cm recém fraturados. Foi utilizada a fenolftaleína para verificar o local carbonatado e um paquímetro para medir a profundidade. As idades foram de 10 e 24 meses, sendo a cura em ambiente de laboratório até a data do ensaio (Tabela 5.16).

Tabela 5.15 – Resultados dos ensaios de módulo de deformação e profundidade de carbonatação (SCHULER, 1998)

Propriedades	Módulo de deformação estático, a 40% de f_c (GPa)	Profundidade carbonatada (mm)	Profundidade carbonatada (mm)
Traços	63 dias	10 meses	24 meses
a/aglo = 0,35 0% s.a.	32,27 (CV: 0,99%)	1,1 (CV: 13,5%)	3,1 (CV: 13,2%)
a/aglo = 0,35 5% s.a.	32,07 (CV: 3,89%)	0,6 (CV: 24,1%)	2,4 (CV: 2,37%)
a/aglo = 0,35 10% s.a.	31,36 (CV: 2,94%)	0,3 (CV: 33,3%)	2,4 (CV: 2,44%)
a/aglo = 0,35 20% s.a.	29,34 (CV: 2,20%)	0,5 (CV: 32,7%)	2,4 (CV: 0,00%)
a/aglo = 0,55 0% s.a.	27,66 (CV: 7,78%)	2,4 (CV: 6,45%)	3,7 (CV: 8,61%)
a/aglo = 0,55 5% s.a.	28,62 (CV: 8,92%)	2,2 (CV: 18,1%)	3,6 (CV: 7,06%)
a/aglo = 0,55 10% s.a.	26,06 (CV: 8,45%)	2,4 (CV: 17,68%)	3,5 (CV: 2,05%)
a/aglo = 0,55 20% s.a.	24,75 (CV: 7,51%)	2,7 (CV: 14,2%)	5,0 (CV: 4,00%)

Algumas conclusões importantes extraídas da primeira parte do trabalho de SCHULER (1998):

- A resistência à compressão e à tração são influenciadas pela adição de sílica ativa, porém os efeitos não são uniformes. Na verificação da resistência à compressão, existe a necessidade de uma boa mistura da argamassa;
- Valores de resistência à compressão e à tração para traços com relação a/aglo = 0,35 podem ser excessivos, considerando que os concretos usuais apresentam resistências de 15 MPa a 20 MPa;
- O efeito da adição da s.a. não foi significativo sobre a resistência de aderência ao cisalhamento com compressão;
- No ensaio de resistência de aderência à tração, a adição de 10% de s.a. na argamassa com relação a/aglo = 0,55, demonstrou ser significativa ao aumentar essa resistência sobre substratos de concreto endurecido, principalmente nas primeiras idades. Aos 21 dias de idade, não se verificou mais diferença significativa entre as argamassas com e sem sílica ativa;

- O módulo de deformação estático foi mais influenciado pela relação a/aglo;
- A profundidade carbonatada nas argamassas foi influenciada pela adição de s.a. Os valores encontrados são, a princípio, bastante baixos e atestam o emprego das argamassas com até 10% de adição de sílica ativa como material passivador das armaduras;
- A autora também chegou a conclusão, após várias análises, de que o traço com 10% de s.a. e relação a/aglo = 0,55 é o que mais reúne aspectos favoráveis ao emprego em reparos de estruturas de concreto armado.

Com relação ao estudo da viabilidade econômica, a argamassa de sílica ativa leva vantagem sobre outros materiais (ex.: concreto convencional e concreto projetado), quando a mesma é aplicada em serviços de pequena e média extensão, ou quando não se possui equipamento ou mão-de-obra especializada no local (SCHULER, 1998).

- c) Também em 1998, Chênia Rocha Figueiredo estudou a capacidade de proteção de argamassas com sílica ativa para reparos estruturais.

Essa autora analisou as seguintes propriedades nas argamassas com sílica ativa:

- Estado fresco: consistência (*flow table*);
- Estado endurecido: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de deformação, absorção por imersão e capilaridade, retração livre e restringida (Anéis de Coutinho); análise da durabilidade do material através da análise do potencial de corrosão; dentre outros.

Os materiais utilizados foram: cimento CP II-F-32; areia média de rio, com módulo de finura = 2,48 e DMC= 4,8 mm; sílica ativa nacional do tipo não densificada e aditivo superplastificante.

Os traços utilizados estão no Quadro 5.8. No estado fresco, a consistência foi estabelecida em 240 ± 10 mm. Foram estudadas 3 condições de cura (1, 7 e 28 dias), e 2 tipos de exposição, após cura: uma em temperatura de laboratório e outra no laboratório com ação de um vento imposto com auxílio de ventilador.

A cura foi realizada em câmara úmida, com temperatura de 20 ± 2 °C e UR = 100%, e as condições normais de laboratório tinham temperatura de 22 ± 3 °C e UR de 38 a 52%

Quadro 5.8 – Traços utilizados (FIGUEIREDO, 1998, p. 51)

Traços	Relação cimento/areia	Teor de adição de s.a. (%) ⁽¹⁾	Aditivo superplastificante ⁽¹⁾
1:2m0%	1:2	0	0,6%
1:2m6%	1:2	6	1,2%
1:2m10%	1:2	10	1,8%
1:2,5m0%	1:2,5	0	3,0%
1:2,5m6%	1:2,5	6	2,9%
1:2,5m10%	1:2,5	10	2,6%

Notas: (1) Massa em relação ao cimento;

Relação água/cimento = 0,40 – constante para todas as argamassas.

No resultado de retenção de consistência, a argamassa 1:2,5m10% foi a que apresentou menor perda de trabalhabilidade –14,2%, após 1 hora.

Os resultados de resistência à compressão, tração e módulo de deformação para as argamassas com 10% de sílica ativa estão na Tabela 5.16, dados esses retirados de gráficos. Os c_p s usados foram os de 5 cm x 10 cm e, no ensaio do módulo de deformação, foi usado o plano de carga III (NBR 8522/1984).

Tabela 5.16 – Resultados de resistência à compressão, tração e módulo de deformação (FIGUEIREDO, 1998)

Traços	Resistência à compressão (MPa) – 28 dias	Resistência à tração por compressão diametral (MPa) – 28 dias	Módulo de deformação (GPa)
1:2m10%	54,0	5,7	25,6
1:2,5m10%	55,5	4,6	25,0

A autora verificou que quanto maior o tempo de cura, maior o módulo de deformação das argamassas.

Com relação à absorção por capilaridade e por imersão, só será analisado o caso de um dia de cura em câmara úmida, e o resto em ambiente de laboratório. A absorção por capilaridade ficou maior com as argamassas sem sílica ativa - média de $1,23 \text{ g/cm}^2$ em

72 h, e a menor com as argamassas com s.a. – média de $0,6 \text{ g/cm}^2$ em 72 h. Já na absorção por imersão, os valores ficaram entre 8,5% e 9,5% para todas as argamassas. Sendo que a absorção principal ocorreu nas primeiras 24 horas.

No ensaio de retração, foram usados os cp_s de 25 mm x 25 mm x 285 mm (NBR 8490/1984). Tendo o mesmo processo de cura anteriormente abordado, as argamassas com adição de 10% de s.a. apresentaram maior retração em praticamente todo o período de observação, sendo a retração a 45 dias de 0,1144% - argamassa 1:2,5m10% e 0,1080% - argamassa 1:2m10%.

No caso da retração restringida, foi utilizado o método dos Anéis de Coutinho em duas espessuras estudadas: 1,12 cm e 1,47 cm, com altura de 5,27 cm e diâmetro externo de $11,55 \pm 0,02$ cm. Os anéis são metálicos e, quando da moldagem da argamassa, recebem a ajuda de um anel externo de PVC, de maior diâmetro. A relação volume/área superficial foi de 0,86 cm para o anel de menor espessura e 1,06 cm para o de maior espessura. A área considerada foi a de contato com o meio ambiente – superfície lateral e superior do anel de argamassa.

Os resultados para cura de 1 dia em câmara úmida e o resto em laboratório mostram que, para a espessura de 1,12 cm, os traços de relação cimento/areia = 1:2 foram mais susceptíveis à fissuração do que o traço 1:2,5. Já para os anéis com 1,47 cm de espessura, observou-se uma tendência de fissuras mais espessas.

A avaliação da durabilidade do material, frente à corrosão de armadura, foi verificada através da técnica de resistência de polarização, visando à obtenção da velocidade de corrosão. Os cp_s usados eram de concreto com dimensões de 7 cm x 9 cm x 30 cm, e o local reparado ficava centralizado em uma das faces com dimensão de 7 cm x 20 cm e com profundidade de 2,14 cm ou 2,52 cm. As barras de aço ficavam imersas no concreto/argamassa paralelas ao plano da superfície reparada.

FIGUEIREDO (1998) obteve, dentre outros, os seguintes resultados: as argamassas com relação cimento/areia de 1:2,5 apresentaram menor tendência à corrosão de armadura do que as argamassas de proporção 1:2; as argamassas 1:2m6% se mostraram mais propensas à corrosão, quando possuem menor cobrimento; a intensidade de corrosão nas argamassas com s.a. é menor do que aquelas que não contêm adição.

Cabe destacar que:

- O uso da sílica ativa é benéfico para a resistência mecânica e na diminuição da permeabilidade. A argamassa é de simples manuseio, não requer equipamentos especiais, e se mostra de baixo custo quando comparado a outros materiais de reparo;
- A argamassa com s.a. provoca maior módulo de deformação e aumenta a tendência de fissuração das argamassas com os teores de agregados empregados;
- O aumento do período de cura das argamassas melhora o desempenho das mesmas nos ensaios para determinação do módulo de deformação, absorção e retração.

5.7 Considerações finais

Neste instante, cabe fazer uma síntese sobre certas características das argamassas com sílica ativa, citadas anteriormente, para poder-se definir e/ou justificar materiais, composições e propriedades que esta pesquisa adotará.

- Os traços usados estão com relação cimento: areia entre 1:2 e 1:3 – em massa;
- A sílica ativa pode entrar na composição da argamassa em substituição ou adição à massa de cimento;
- O problema de retração e aparecimento de fissuras em argamassas de sílica ativa podem influenciar muito seu desempenho quando forem utilizadas como material de reparo;
- A relação água/cimento está variando aproximadamente de 0,3 a 0,7;
- A união da sílica ativa com o superplastificante na argamassa melhora a impermeabilidade do material, devido ao refinamento dos poros;
- A areia deve ser de uma granulometria de média à fina, visando à compatibilidade da resistência à compressão da argamassa com o substrato e à melhoria do acabamento, dentre outros;
- As consistências das argamassas no estado fresco, medidas na mesa de consistência, variaram de aproximadamente 180 mm a 280 mm;
- A argamassa com s.a. obteve boa compatibilidade térmica com o substrato, quando do uso em reparos de barragens.

CAPÍTULO 6

PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Introdução

O programa experimental teve por objetivo quantificar propriedades que permitissem a comparação entre as argamassas com sílica ativa e as argamassas industrializadas, bem como comparar esses valores com dados existentes na bibliografia. (vide Figura 6.1)

O levantamento das propriedades das argamassas se baseou em ensaios físicos, mecânicos e de durabilidade, normalizados ou adaptados de normas.

O estudo experimental foi desenvolvido no LEMAC – Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção, ligado ao Departamento de Estruturas e Edificações do Centro Tecnológico – UFES. Sendo, também, necessária a colaboração do Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas, em Aparecida de Goiânia – GO.

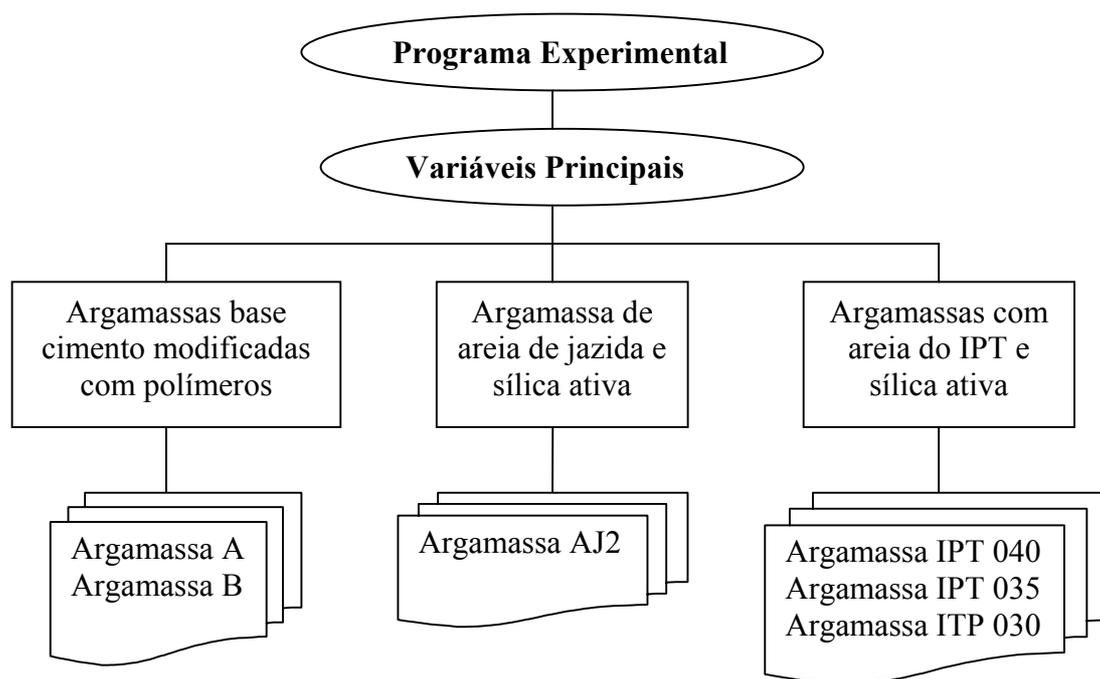


Figura 6.1 – Argamassas em estudo.

6.2 Escolha das argamassas e materiais constituintes

A escolha das argamassas com sílica ativa foi baseada em traços usuais relatados em trabalhos científicos; já as argamassas industrializadas foram selecionadas visando à sua utilização.

Nos traços de argamassas com sílica ativa foi verificado que a relação cimento/areia variava aproximadamente de 1:2 a 1:3 (traços em massa); escolheu-se então, inicialmente, o traço 1:3 (em massa). Esta proporção gerava um menor consumo de cimento, influenciando positivamente na retração e no custo do material.

As argamassas industrializadas foram escolhidas devido à sua utilização, em catálogos de fabricantes, visando a reparos superficiais – espessura em torno de 2,5 cm. Foram selecionadas 3 argamassas: A, B e C.

Contudo a argamassa C, após testes, foi desqualificada por possuir fibras em sua composição. Isto faria com que essa argamassa tivesse um comportamento bastante diferente das demais, podendo assim surgir dificuldades na hora de comparar todas as argamassas entre si.

O cimento usado foi um CP II E – 32 RS, apesar de outros trabalhos usarem o cimento de alta resistência inicial (KULAKOWSKI, 1994; SCHULER, 1998). O uso do CP II E pode ser explicado devido à facilidade de encontrá-lo no comércio; ser mais barato que o cimento ARI; por possuir menor quantidade de escória de alto forno que o CP III 32 – RS, menos que 34%, o que poderia influenciar no tempo de pega e demais implicações citadas no Capítulo 4.

A quantidade de sílica ativa poderia entrar em adição ou substituição ao cimento, preferiu-se a adição, visando aumentar a quantidade de material aglomerante e melhorar a pega inicial do cimento, devido ao efeito pozolânico da sílica ativa.

A sílica ativa teve sua proporção fixada na argamassa em 10% (percentual sobre a massa de cimento), valor este usual nos concretos de alto desempenho e que obteve bons resultados em estudos com argamassas de recuperação comentadas no Capítulo 5.

Com relação à areia, definiu-se estabelecer uma granulometria fixa. Portanto, comprou-se no comércio local uma areia fina de jazida, que seria peneirada em frações, posteriormente sendo misturadas em uma proporção pré-estabelecida (fixa para todas as argamassas).

Entretanto, devido à dificuldade em peneirar uma grande quantidade de areia em tempo hábil, isso obrigou este autor a procurar formas de conseguir essa areia já dividida em frações. Inicialmente, tentou-se comprar essa areia de empresas que a peneiravam para uso em argamassa colante. Verificou-se que devido ao processo de secagem das areias peneiradas industrialmente, as mesmas ficavam escuras, provavelmente resultante da queima de óleo diesel usado na geração de energia térmica nos fornos de secagem. Portanto, as mesmas foram abandonadas.

Definiu-se, então, usar a areia de jazida ao natural e adquirir areia normalizada do IPT para confeccionar outras 3 argamassas com granulometria fixa. Essa escolha forçou a passagem do traço de 1:3 (em massa) para 1:2,5 (em massa), para manter a consistência nas argamassas que usaram a areia do IPT.

Na questão valor a adotar para a consistência das argamassas, baseou-se no artigo de HASSAN *et al* (2000), os quais, estudando cinco materiais para reparo, descritos no Capítulo 3, obtiveram consistências (*flow-table*) variando de 210 mm a 110 mm. Porém, desses cinco materiais, quatro tiveram consistências variando de 210 mm a 190 mm. Como as argamassas deste estudo estavam com características mais próximas a essas quatro argamassas, a mesma faixa de consistência (210 mm a 190 mm) foi adotada.

Basicamente, pode-se agrupar o programa experimental desta pesquisa conforme a Figura 6.2. Verifica-se a importância da consistência, pois, quando fixada, obrigou este autor a executar vários proporcionamentos com cada argamassa – principalmente as com s.a. – para deixar as consistências das argamassas dentro da faixa adotada.

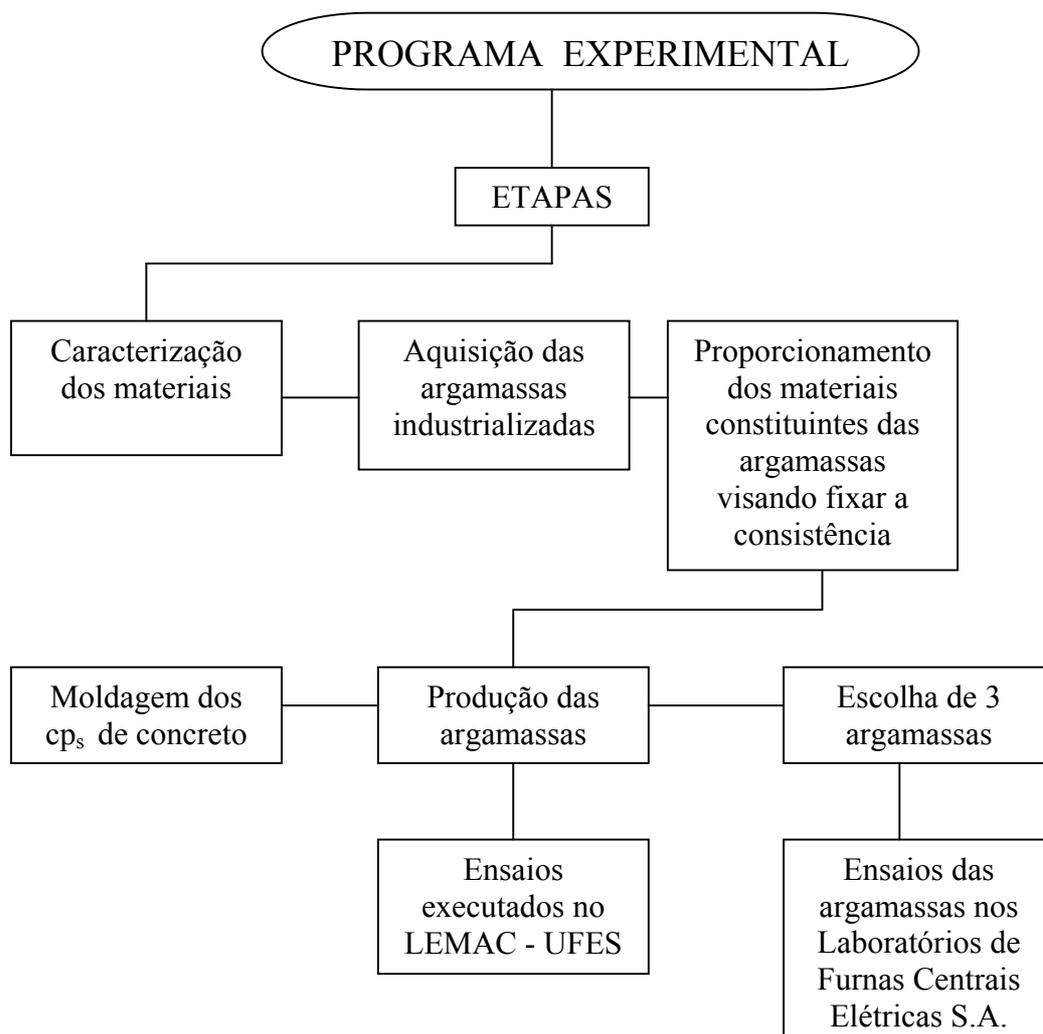


Figura 6.2 – Programa laboratorial.

6.3 Caracterização dos materiais constituintes

6.3.1 Cimento

O cimento utilizado na produção das argamassas com sílica ativa foi do tipo Portland, composto com adição de escória de alto forno, CP II E – 32 RS. O cimento foi produzido pela fábrica da NASSAU, localizada na cidade de Cachoeiro de Itapemirim, tendo sido fornecido em sacos de 50kg, de um mesmo lote.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam-se, respectivamente, os resultados físicos e químicos do cimento utilizado na produção das argamassas com sílica ativa.

Tabela 6.1 – Ensaios físicos no cimento.

Ensaios Realizados	Normas Utilizadas nos Ensaios	Resultados	Limites NBR 11578 (1991)	
Massa Específica	NBR 6474 (1984)	3000 kg/m ³	-	
Área Específica	NBR 7224 (1996)	432 m ² /kg	≥ 260 m ² /kg	
Finura	NBR 11579 (1991)	0,4 %	≤ 12,0 %	
Água da Pasta de Consistência Normal	NBR 11580 (1991)	29,2 %	-	
Tempo de Início de Pega	NBR 11581 (1991)	2 h e 25 min	≥ 1 h	
Tempo de Fim de Pega	NBR 11581 (1991)	4 h e 30 min	≤ 10 h	
Expansibilidade de Le Chatelier	NBR 11582 (1991)	0 mm	≤ 5 mm	
Resistência à Compressão	3 dias	NBR 7215 (1991)	19,76 MPa	≥ 10 MPa
	7 dias	NBR 7215 (1991)	27,50 MPa	≥ 20 MPa
Compressão	28 dias	NBR 7215 (1991)	36,11 MPa	≥ 32 MPa

Tabela 6.2 – Ensaios químicos no cimento

Propriedades Determinadas (Cimento CP II E – 32 RS)		Registro ⁽¹⁾ 1.2266.2001	Limite (NBR 11578 (1991))	
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	4,85	≤ 6,50 %	
	Resíduo insolúvel	1,46	≤ 2,50 %	
	Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,10	≤ 4,00 %	
	Óxido de magnésio (MgO)	6,25	≤ 6,50 %	
	Dióxido de silício (SiO ₂)	22,25	-	
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,64	-	
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	6,14	-	
	Óxido de cálcio (CaO)	54,16	-	
	Óxido de cálcio livre (CaO)	2,16	-	
	Alcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,30	-
		Óxido de potássio (K ₂ O)	0,36	-
	Equiv. Alcalino	0,54	-	
	Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	3,57	-	

Nota: (1) Relatório do laboratório de concreto do departamento de apoio e controle técnico de Furnas Centrais Elétricas.

6.3.2 Areia

As areias utilizadas foram: areia fina de jazida, comprada no comércio local, e proveniente da localidade de Barra do Jucu – Vila Velha; e areia normalizada do IPT, nas graduações de 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm.

A distribuição granulométrica da areia de jazida se encontra na Tabela 6.3, sendo sua caracterização apresentada na Tabela 6.4. A amostra para esses ensaios foi coletada

segundo a NBR 7216 (1987) e reduzida para ensaio conforme NBR 9941 (1987). Ao final, essa areia teve a fração 2,4 mm retirada antes da sua utilização.

Tabela 6.3 – Análise granulométrica da areia de jazida.

Peneira - Abertura (mm)	% Média Retida	% Média Acumulada
2,4	1	1
1,2	11	12
0,6	23	35
0,3	4	39
0,15	25	64
0,075	35	99
fundo	1	100

Tabela 6.4 – Caracterização da areia de jazida.

Ensaio Realizado	Normas Utilizadas nos Ensaio	Resultados
Classificação da areia	NBR 7211 (1983)	Muito fina
Dimensão Máxima Característica	NBR 7217 (1987)	2,4 mm
Módulo de Finura	NBR 7217 (1987)	1,51
Materiais Pulverulentos	NBR 7219 (1987)	1,5 %
Impurezas Orgânicas	NBR 7220 (1987)	Superior
Massa Unitária	NBR 7251 (1982)	1,5 kg/dm ³
Massa Específica	NBR 9776 (1987)	2,63 g/cm ³
Ensaio de Qualidade na Areia, NBR 7221 (1987) – Registro 1.3251.2001 ⁽¹⁾		
Idade de ruptura (dias)	7	28
Resistência relativa entre agregado original / agregado lavado	99,0 %	97,6 %

Nota: (1) Relatório do laboratório de concreto do departamento de apoio e controle técnico de Furnas Centrais Elétricas.

Nas areias do IPT, usou-se uma granulometria fixa nas argamassas, tendo a seguinte proporção: 10% de 1,2 mm, 20% de 0,6 mm, 30% de 0,3 mm e 40% de 0,15 mm. Esta mistura teve como objetivo não deixar a areia com granulometria uniforme e manter o módulo de finura em torno de dois.

A escolha de uma areia fina com grãos abaixo de 2,4 se deu devido a:

- A porcentagem retida na # 2,4 mm ser ~1,0% na areia de jazida; esses grãos poderiam interferir nos resultados dos ensaios de aderência, causando discrepância entre valores dos c_p ;
- Ser verificado, através de peneiramento, que o material granular utilizado nas argamassas industrializadas é menor que 2,4 mm;

- Se buscar um melhor acabamento superficial da argamassa aplicada.

KAY (1992), discutindo a composição e as propriedades de argamassa de recuperação, relata que o tamanho máximo do agregado não deve exceder o mínimo dentre os valores de: 1/3 da espessura da camada de aplicação, 1/3 do cobrimento pedido pela armadura, 1/4 do espaçamento das barras ou 1/4 da distância entre a face interna da barra e o substrato.

Tendo a situação de 1,0 cm de cobrimento para a armadura, em um local a ser reparado, deve-se usar um agregado de tamanho máximo = 2,5 mm, o que reforça a idéia de uma areia com granulometria \leq a 1,2 mm.

Outra consideração para a escolha de uma areia fina, nos traços das argamassas, foi baseada no trabalho de GRIGOLI *et al*, 2001, que obtiveram melhores resultados com relação à penetração de cloretos em concretos com agregado miúdo de granulometria fina, do que o mesmo concreto com areia de granulometria grossa.

6.3.3 Sílica ativa

A sílica ativa é de fabricação nacional, do tipo não densificada, fornecida em sacos de 15 kg, e na Tabela 6.5 está a análise química da mesma.

Tabela 6.5 – Análise química da sílica ativa

Propriedades Determinadas		Registro ⁽¹⁾	Limite
Sílica Ativa		1.2267.2001	(NBR 13956 (1997))
Componentes Químicos (%)	Perda ao fogo	5,19	\leq 6,00 %
	Resíduo insolúvel	-	-
	Trióxido de enxofre (SO ₃)	1,00	-
	Óxido de magnésio (MgO)	1,65	-
	Dióxido de silício (SiO ₂)	85,76	\geq 85,0
	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,30	-
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	0,34	-
	Óxido de cálcio (CaO)	1,16	-
	Óxido de cálcio livre (CaO)	-	-
	Alcalis Totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,24
	Óxido de potássio (K ₂ O)	2,12	-
	Equiv. alcalino em Na ₂ O	1,64	\leq 1,5 %
Teor de Umidade (%)		1,40	\leq 3,0 %

Nota: (1) Relatório do laboratório de concreto do departamento de apoio e controle técnico de Furnas Centrais Elétricas.

6.3.4 Aditivos

Para manter a consistência nos diversos traços com relação a/aglo diferentes, fez-se necessário o uso de um aditivo superplastificante. Este foi usado na forma em que foi adquirido – líquido, sem descontar a água de diluição dos sólidos na relação a/aglo.

O princípio ativo do superplastificante é o naftaleno, possuindo densidade em torno de $1,2 \text{ g/cm}^3$ e $\text{pH} \sim 9,8$ (dados do fabricante). Caso se queira fazer a consideração da água do aditivo na relação a/aglo, o teor de sólidos no superplastificante poderá ser estimado em 40%.

Devido a problemas causados pela retração nas argamassa de recuperação, adotou-se a utilização de um aditivo compensador de retração, na forma de pó, e proporcionado na mistura em relação à quantidade de aglomerante.

Devido a esse tipo de aditivo redutor de retração, fixou-se o tipo do aditivo superplastificante, pois, segundo o fabricante, não havia incompatibilidade no uso de ambos ao mesmo tempo. Com isto evitou-se o estudo de compatibilidade aditivo-aditivo.

6.3.5 Água

Para a produção dos traços de argamassa e do traço de concreto, no laboratório da UFES, foi utilizada a água da rede de abastecimento público de Vitória – ES.

6.4 Argamassas e concreto utilizados

Estudou-se uma argamassa feita com areia fina de jazida encontrada em loja de material de construção; três argamassas utilizando areia do IPT, variando só a relação a/aglo e duas argamassas base cimento modificadas com polímeros.

O proporcionamento dos materiais levou em consideração a consistência, fixada em $200 \pm 10 \text{ mm}$, e, no caso das industrializadas, o recomendado pelo fabricante, desde que a trabalhabilidade fosse considerada satisfatória para aplicação manual.

6.4.1 Argamassas industrializadas

Argamassa A

Argamassa base cimento modificada com polímero, destinada a reparos superficiais, para espessuras entre 5 mm a 25 mm. Embalagem (conjunto): componente A (líquido) e B (pó). Foi acrescentado + 5% de água em relação à massa de líquido, para aumentar um pouco a fluidez da mesma.

Argamassa B

Argamassa base cimento modificada com polímero, destinada a reparos estruturais em camadas de até 2,5 cm de espessura. Embalagem, (conjunto): componente A (pó) e B (líquido). O acréscimo de água foi de 25% em relação a massa de líquido; este caso em particular deveu-se, principalmente, à argamassa não apresentar uma trabalhabilidade considerada satisfatória para aplicação.

Devido à impossibilidade de se utilizar todo um conjunto de argamassa industrializada de uma só vez, foi determinada a relação líquido/pó para cada argamassa. Assim sendo, usavam-se 4,0 kg de pó e sua proporcional quantidade de líquido – tudo em massa, mais a quantidade de água em relação à massa de líquido.

Ambas as argamassas foram peneiradas para verificação do tamanho máximo dos grãos e para obter um referencial da granulometria das areias utilizadas, visto que o “pó” contém cimento, no mínimo, além da areia. (vide Tabela 6.6)

Tabela 6.6 – Granulometria das argamassas industrializadas.

Peneira - Abertura (mm)	Argamassa A		Argamassa B	
	% Média Retida	% Média Acumulada	% Média Retida	% Média Acumulada
2,4	-	-	-	-
1,2	-	-	1	1
0,6	-	-	9	10
0,3	16	16	17	27
0,15	34	50	31	58
0,075	12	62	10	68
fundo	38	100	32	100

6.4.2 Argamassas com sílica ativa

As denominações e as proporções para as argamassas com sílica ativa produzidas estão mencionadas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Denominação e proporção das argamassas com s.a.

Denominação das Argamassas	Relação a/aglo (³)	Relação cimento:areia	Teor de Sílica Ativa ¹	Aditivo Redutor de Retração ²	Aditivo SP ²
AJ2	0,40 (0,412)	1:3	10%	4%	2%
IPT 040	0,40 (0,400)	1:2,5	10%	2%	-
IPT 035	0,35 (0,354)	1:2,5	10%	2%	0,7%
IPT 030	0,30 (0,324)	1:2,5	10%	2%	4%

Notas: (1) Em relação à massa de cimento;
 (2) Em relação à massa de aglomerante;
 (3) Relação: (água + água do aditivo) / aglomerante.

Na produção das argamassas, sempre foi usada a dosagem em massa dos componentes.

No Quadro 6.2 apresenta-se o consumo de material em cada traço produzido.

Quadro 6.2 – Consumo de material em cada traço

Argamassa	Cimento (kg)	Areia (kg)	Sílica Ativa (g)	Aditivo Redutor de Retração (g)	Aditivo SP (g)	Água (g)
AJ2	1,0	3,0	100	44	22	440
IPT 040	1,0	2,5	100	22	0	440
IPT 035	1,0	2,5	100	22	7,7	385
IPT 030	1,0	2,5	100	22	44	330

Na figura 6.3 encontram-se as curvas granulométricas das areias e argamassas industrializadas utilizadas nesta pesquisa.

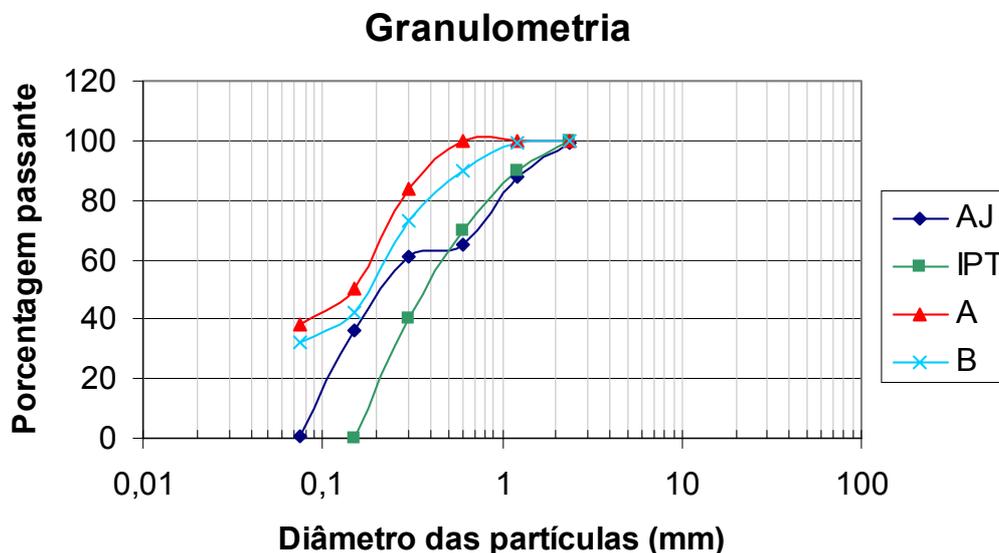


Figura 6.3 – Curvas granulométricas das areias e argamassas industrializadas.

6.4.3 Concreto Base

O concreto utilizado foi elaborado com o traço 1:3,226:1,387:2,08:0,63 (cimento: areia grossa: brita 1: brita 2, relação a/c - em massa). Os materiais eram dosados em massa e a água em volume. Produziu-se assim um concreto com abatimento ~ 65 mm e de resistência média aos 28 dias de ~ 23 MPa.

Produziu-se uma mistura do concreto para cada argamassa 28 dias antes do ensaio com a mesma. Isso visava a não congestionar as dependências do laboratório e não ter de fabricar mais de um tipo de argamassa por dia.

Para cada tipo de argamassa usavam-se: 10 cp_s cilíndricos de 10 cm x 20 cm, 3 prismas de 15 cm x 15 cm x 50 cm (normais) e 2 prismas de 15 cm x 15 cm x 50 cm com rebaixo, este conseguido através da colagem de uma placa de isopor de 10 cm x 30 cm x 1,5 cm na face do fundo da forma, antes da concretagem.

6.5 Procedimento de ensaio

6.5.1 Mistura

Para a produção das argamassas, utilizou-se um misturador acoplado a uma máquina de furar e um balde de latão para ordenha de 7 litros – Fotografia 6.1. Os materiais foram pesados em balança eletrônica com precisão de 0,01 g, massa < que 1,0 kg, e 0,1g para materiais > de 1,0 kg. O ambiente (sala) onde se realizava a mistura tinha temperatura e umidade controladas: 23 ± 2 °C e UR ~ 65%, respectivamente.

Cabe lembrar que a opção pelo uso dessa configuração, para a mistura do material, se deveu como tentativa de aproximar essas condições às da prática de pequenos reparos. Foram testadas 4 configurações de misturador, cujos desempenhos não foram satisfatórios, até a escolha da opção em questão.



Fotografia 6.1 – Equipamento utilizado na mistura e local de armazenamento das argamassas.

As argamassas industrializadas foram misturadas da seguinte maneira: colocação de todo o pó no balde (mistura de 40 s), colocação da metade do líquido (mistura de 40 s),

adição do resto do líquido + a água adicionada; 5% ou 25% em relação à massa de líquido, (mistura de mais 1,5 minutos, aproximadamente).

Nas argamassa com sílica ativa, inicialmente pesava-se o cimento, a s.a. e o aditivo redutor de retração, colocando-os num mesmo local (sacola 2) e homogeneizando-os. Na hora da mistura, o aditivo superplastificante era adicionado à água de amassamento.

A mistura, então, procedia-se da seguinte maneira: colocação de toda a areia + sacola 2 no balde (mistura de 40 s), colocação da metade da água com superplastificante (mistura de 40 s), adição do resto da água com superplastificante (mistura de mais 1,5 minutos, aproximadamente). Ao término da mistura, o material era colocado em um tacho, de onde era retirado conforme a utilização.

O concreto foi misturado em betoneira de eixo inclinado, com a seguinte ordem de colocação dos materiais: 2/3 da água, brita 1, brita 2 (mistura), cimento (mistura), areia + 1/3 de água (mistura final de 3 minutos). Após a mistura determinava-se o abatimento.

6.5.2 Compactação

As compactações dos corpos-de-prova cilíndricos foram de forma manual, já os prismáticos foram com um vibrador de imersão. Os cp_s 5 cm x 10 cm de argamassa receberam três camadas de 30 golpes e os 10 cm x 20 cm de concreto receberam duas camadas de 20 golpes cada.

No caso do prisma de concreto, foram 2 camadas, sendo a agulha do vibrador (\downarrow 25 mm) inserida em 3 pontos (equidistantes) em cada camada. As superfícies foram rasadas com espátula, no caso das argamassas, e com colher de pedreiro, no caso dos concretos.

6.5.3 Condições de cura

A condição de cura foi única para todas as argamassas a saber, os cp_s eram moldados, levados para câmara úmida (temperatura de 23 °C a 27 °C e UR = 95%) por 24 horas e, após esse tempo, eram desformados e ficavam em ambiente de laboratório até a data de ensaio.

No concreto, os corpos-de-prova permaneciam nos moldes, tapados com chapas metálicas, durante 24 h para os cp_s cilíndricos e 48 h para os cp_s prismáticos. Após esses períodos, eles eram desformados e levados para a câmara úmida, onde permaneciam por 28 dias, até a data de mistura das argamassas.

Nas condições de laboratório, a temperatura variou em torno de 27°C e a UR em torno de 76% (estimada). No sentido de melhorar as informações sobre temperatura e umidade, estão relacionadas na Tabela 6.7 as médias de temperatura e umidade relativa do ar do período de janeiro a novembro do ano de 2001, provenientes da RAMQAr (Rede Automática de Monitoramento do Ar) estação 2 – Carapina, Serra - ES. Dados esses que abrangem o período da maioria dos ensaios executados.

Tabela 6.7 – Médias de temperatura e umidade relativa do ar
(RAMAr – SEAMA, 2001)

Meses	Temperatura Média (°C) ¹	Umidade Relativa do Ar (%) ¹
Janeiro	26,2	84,3
Fevereiro	27,1	78,5
Março	26,3	69,8
Abril	25,5	68,1
Maio	23,3	70,4
Junho	22,1	80,1
Julho	21,7	77,9
Agosto	21,6	80,1
Setembro	21,8	78,3
Outubro	22,6	80,9
Novembro	24,1	83,3

Nota: (1) Média realizada com os dias de medição disponíveis de cada mês.

6.6 Ensaios executados

6.6.1 Determinação da consistência, ar incorporado e da retenção de consistência

Após a mistura da argamassa, era realizado o ensaio para obtenção do índice de consistência, conforme NBR 13276 (1995), com a utilização da mesa para esse fim (Fotografia 6.2). Como esse índice foi fixado em 200 ± 10 mm, caso a argamassa ficasse fora dessa faixa, a mesma era descartada.

A consistência era verificada no início de cada bateria de produção (dia de moldagem dos corpos-de-prova), ou quando o operador do aparato de mistura notasse que a argamassa estava muito diferente da primeira.

O ar incorporado foi medido com auxílio de um aparelho para esse fim, que determina o ar incorporado na argamassa através do método pressométrico (NBR NM 47 (1998)) (Fotografia 6.3).



Fotografia 6.2 – Mesa para obtenção do índice de consistência



Fotografia 6.3 – Aparelho para obtenção do volume de ar incorporado na argamassa.

O aparelho é dividido em tampa (onde se situa o manômetro) e em recipiente base, o qual possui volume de um litro. A argamassa era compactada em 2 camadas com 20 golpes cada (soquete de plástico), sendo que ao final de cada camada o recipiente recebia “batidas” laterais até o fechamento das cavidades provocadas pelo soquete. Após a última camada, o recipiente era rasado com uma régua de acrílico.

Com relação à retenção de consistência, as medidas de sua variação foram realizadas durante 1 h, com intervalos de 10 minutos a partir da primeira medida, sendo esta realizada conforme a NBR 12376 (1995). A primeira medida era feita de 5 a 8 minutos após a colocação da primeira parte de líquido na argamassa em mistura, sendo considerada a medida zero.

6.6.2 Massa específica no estado fresco

A obtenção da massa específica no estado fresco foi baseada na NBR 13278 (1995), diferenciando-se basicamente no molde que foi utilizado. A norma recomenda um molde de PVC de capacidade ~ 400 ml, porém foram utilizados 4 moldes de cp cilíndrico de 5 cm x 10 cm com volumes conhecidos.

Antes do enchimento dos moldes, era feita, novamente, a verificação do volume de cada molde. Fazia-se a compactação da argamassa conforme a NBR 13278 (1995), que basicamente era realizada em 3 camadas, com 20 “golpes” de espátula cada.

6.6.3 Resistência à compressão

Para a determinação da resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias, moldou-se uma série de 4 cp_s cilíndricos de 5 cm x 10 cm para cada idade, observando a NBR 7215 (1996). A compactação se deu em três camadas de 20 golpes cada, com soquete padronizado.

Os corpos-de-prova foram rompidos em uma prensa universal, marca *Amsler*, com capacidade de 50 toneladas, em escala de força compatível com o material. A carga de compressão era mantida até o total colapso do cp, sendo o tipo de ruptura anotado – conforme os esboços da NBR 5739 (1994), Fotografia 6.4.

Como se produziam mais corpos-de-prova que o necessário (reservas), começou-se a romper mais um cp de argamassa para cada idade, totalizando assim 5 cp_s.

6.6.4 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio dos cp_s procedeu-se conforme a NBR 7222 (1994), sendo rompidos em uma máquina universal, marca *Amsler*, com capacidade de 50 toneladas, em escala de força compatível com o material.

A quantidade, idade (3, 7 e 28 dias) e compactação foram iguais aos cp_s usados na resistência à compressão axial.



Fotografia 6.4 - Registro dos cp_s 5 cm x 10 cm antes e depois de serem rompidos à compressão axial.

6.6.5 Módulo de deformação

Inicialmente tentou-se fazer esse ensaio baseado na proposta de GODOY & BARROS (1999) – Proposta de Procedimento de Ensaio para Avaliação do Módulo de Deformação das Argamassas.

A quantidade de cp_s foi estipulada em nove, três eram rompidos à compressão axial para previsão da carga de ruptura média, usada no cálculo dos estágios de carregamento e os outros seis usados na obtenção do módulo de deformação.

Diferenciou-se daqueles autores no tipo do cp; usaram-se cilindros de 5 cm x 10 cm em vez de cubos de 10 cm de lado e, na forma de cálculo, usaram-se as fórmulas estabelecidas pela NBR 8522 (1984). Os cp_s cilíndricos tinham o topo e a base torneados para que os mesmos ficassem paralelos.

Porém, os resultados encontrados para módulo de deformação das argamassas A, B e AJ2 não refletiam valores de módulos de materiais para recuperação, ficando mais próximos de argamassas de revestimento.

Portanto, os resultados foram abandonados, sendo a possível causa dessa anomalia a forma de medida da deformação¹, externa aos cps. Essa medida incorporou as deformações próximas das regiões da base e do topo do cp, as quais são desprezadas nos aparatos de medição em ensaios de concreto – só é considerado o terço médio do cp.

Sendo assim, resolveu-se optar pela leitura de deformação no terço médio do cp. Isso foi conseguido com a incorporação de duas bases de medidas, em geratrizes opostas do cp. Essas bases foram constituídas de duas placas metálicas de ~ 1,0 cm x 0,7 cm x 0,096 cm, fixadas com cola de pega rápida, com distância de centro a centro de 50 mm. (Fotografia 6.5).

Adotou-se: o Plano de Carga II da NBR 8522 (1984), o ponto de carregamento inferior (σ_{inf}) foi fixado em 100 kgf, a expressão usada para o cálculo do valor do módulo foi a da tangente inicial, entre os pontos 0,3 e 0,6 (ou 0,5) da tensão estimada de ruptura, e o comprimento deformável de 40 mm, para o cálculo da deformação.

Todos os cps foram capeados com enxofre, visando ao paralelismo dos planos da base e do topo.

O ensaio começava com a ruptura de 3 cps, à compressão axial, para prever a tensão de ruptura (f_c). Calculavam-se então os pontos 0,1; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; e 0,7 de f_c , que são locais de medição das deformações.

Os demais cps tinham suas deformações ajustadas, entre os pontos de 100 kg e 0,1 f_c . Após as deformações estarem ajustadas, o ensaio continuava como na norma. Faziam-se leituras até 0,7 de f_c e o carregamento prosseguia até a ruptura do corpo-de-prova.

Nas leituras de deformação, foi utilizado um extensômetro mecânico, com precisão de 0,001 mm por divisão, acoplado em um aparelho que se encaixava nas bases de medida (Fotografia 6.6). Inicialmente era lida a deformação da base de medida do “lado” direito do cp e depois a do “lado” esquerdo. Este foi convencionado como sendo a base de medida mais próxima do operador da prensa.

¹ Os relógios comparadores eram posicionados paralelos ao cp, um de cada lado, igualmente espaçados, tendo seu ponto de medição numa linha que passava pela mediatriz do plano do topo (ou base) do cp.



Fotografia 6.5 – Detalhe da base de medida em um lado de um cp 5 cm x 10 cm.



Fotografia 6.6 – Exemplifica a ação de encaixe e posterior medida da deformação.

6.6.6 Absorção de água por imersão e por capilaridade

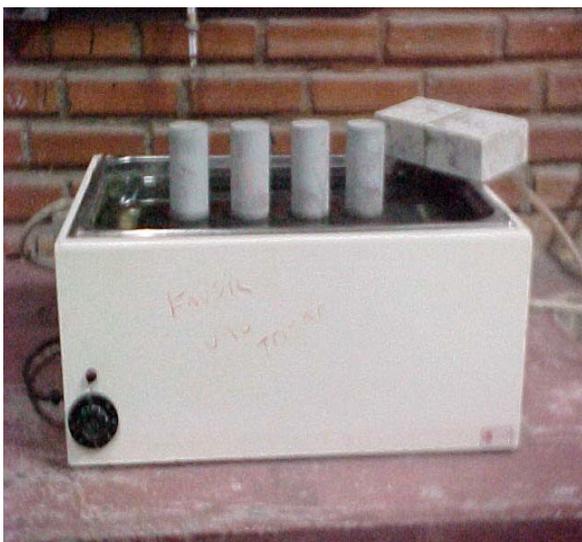
O ensaio de absorção por imersão foi realizado de acordo com a NBR 9778 (1984) – Argamassas e Concretos Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Imersão – Índice de Vazios e Massa Específica. O ensaio de absorção por capilaridade baseou-se na NBR 9779 (1995) – Argamassa e Concretos Endurecidos – Determinação da Absorção de Água por Capilaridade.

Ambos os ensaios usavam, no mínimo, 3 corpos-de-prova, sendo o normal de 4 cp_s. Como esses ensaios usam os corpos-de-prova secos em estufa, normalmente eram feitos em conjunto, sendo a idade escolhida de 28 dias para todas as argamassas.

No ensaio de absorção por imersão, obtinha-se também o índice de vazios e a massa específica no estado endurecido. Sendo todos os resultados expressos em relação a 72 h de imersão.

Com relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, quando da colocação dos cp_s em imersão parcial, os mesmos ficaram em temperatura ambiente (dentro das dependências do laboratório), sem vento ou chuva (Fotografia 6.7).

O monitoramento das massas foi realizado a 3, 6, 24, 48, e 72 h, conforme norma, sendo acrescentados mais pontos até 216 h, quando os mesmos foram rompidos à tração por compressão diametral para verificação da ascensão capilar (Fotografia 6.8).



Fotografia 6.7 – Aparato montado para execução do ensaio de absorção capilar.



Fotografia 6.8 – Corpos-de-prova rompidos à tração por compressão diametral, visando à verificação da altura capilar.

6.6.7 Retração livre

O ensaio de retração livre foi adaptado da NBR 8490 (1984). Moldaram-se seis cp_s prismáticos de dimensões 25 mm x 25 mm x 285 mm para cada argamassa em estudo. Os cp_s ficavam em cura nas primeiras 23 h, sendo deformados e medidos a 24 h – tempo medido em relação à colocação do líquido na mistura.

Executaram-se as medidas de retração nos tempos de 3, 7 e 28 dias após a leitura inicial, sendo realizadas com um extensômetro de precisão de 0,001 mm, acoplado a um aparelho de medida conforme sugerido pela norma (Fotografia 6.9). Os cp_s se encaixavam nesse aparelho com a ajuda de pinos metálicos inseridos em suas extremidades, quando da sua moldagem.

Foi necessário muito cuidado quando da desforma dos cp_s , caso houvesse a perda de mais de um cp , o ensaio era cancelado e moldavam-se novamente mais seis corpos-de-prova para a argamassa em questão.

Após a desforma, os cp_s permaneceram em ambiente de laboratório, dentro de uma sala com temperatura e umidade variando em torno de 25°C e 75%, respectivamente.



Fotografia 6.9 – Aparelho usado na determinação da retração livre.

6.6.8 Retração restringida

Este ensaio procurou verificar o aparecimento de fissuras através da restrição da variação volumétrica da argamassa. Isto foi conseguido através da aplicação das argamassas em rebaixos de $\sim 10 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 1,5 \text{ cm}$, produzidos em cp_s prismáticos de $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ de concreto.

Moldaram-se dois cp_s com rebaixo para cada argamassa, sendo, na data de ruptura, rompido mais um cp, sem rebaixo, para comparação das cargas. A verificação das fissuras era feita com uma lupa graduada, com verificações semanais (Fotografia 6.10).

O rebaixo no cp de concreto era conseguido com a fixação de uma placa de isopor, centralizada na face do fundo da forma, antes da concretagem. Essa placa possuía as dimensões de $10 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 1,5 \text{ cm}$, a qual causava um rebaixo no concreto de mesmas dimensões. Antes da aplicação da argamassa, a superfície do rebaixo era escovada com uma escova de aço tipo copo, acoplada a uma furadeira, até a retirada da nata de cimento e o aparecimento da superfície dos agregados.

Aos 28 dias de idade do concreto, a argamassa era aplicada nos cp_s prismáticos, sendo que o substrato ficava na situação saturado superfície seca. A aplicação se dava com uma espátula, em 3 camadas de 0,5 cm cada, sempre comprimindo a argamassa contra o substrato.



Fotografia 6.10 – Avaliação do aparecimento de fissuras



Fotografia 6.11 – Verificação do deslocamento da argamassa após a ruptura.

Realizava-se o rompimento dos prismas conforme a MB3483 (1991) – Concreto – Determinação da Resistência à Tração na Flexão em Corpos-de-prova Prismáticos, aos 21 dias de idade da argamassa. A face do prisma em que foi aplicada a argamassa ficava na parte mais exposta à tração, durante o rompimento do cp (para melhor visualização do ensaio veja Figura 4.1).

Durante e após o rompimento do prisma, verificava-se a condição de aderência da argamassa, avaliando-se se a mesma se soltava do substrato (concreto) (Fotografia 6.11).

6.6.9 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração foi baseado na NBR 13528 (1995) – Revestimento de paredes e tetos de argamassa inorgânica – Determinação da resistência de aderência à tração, com algumas modificações.

Escolheu-se a idade de 7 dias para verificação da aderência, pois ela mostra-se limite no início da utilização da estrutura reparada, sendo necessária uma boa resistência de aderência entre a argamassa e o substrato.

Para cada tipo de argamassa foram ensaiados nove cp_s, sendo anotada a carga de ruptura e onde a mesma ocorreu. A média da resistência de aderência foi feita com todos os valores obtidos no ensaio, independente do local de ruptura.

O substrato escolhido foi uma das faces laterais de 15 cm x 50 cm dos corpos-de-prova prismáticos de concreto. Essa superfície era preparada com auxílio de uma escova de aço tipo copo acoplada numa furadeira, sendo escovada até a retirada da nata de cimento e o aparecimento da superfície dos agregados.

A condição do substrato foi o saturado superfície seca. Foram usados três prismas de concreto para cada argamassa, sendo todos da mesma idade – 28 dias.

Visando à economia de argamassa, produziu-se uma forma de dimensões internas de ~ 10 cm x 10 cm x 1,5 cm, dotada de alças, com o objetivo de moldar “pastilhas” de argamassa. Sendo essas pastilhas os cp_s de argamassa para o ensaio de aderência à tração (Fotografia 6.12).

A economia foi conseguida, pois não se precisou cobrir toda a face do prisma de concreto e nem gastar com maquinário para o corte do revestimento e preparo dos cp_s.

Os cp_s (pastilhas) foram compactados em 3 camadas de 0,5 cm cada, com ajuda de uma espátula, a qual era usada para “apertar” a argamassa contra o substrato. Quando um cp ficava pronto, a forma era sacada e passava-se para a moldagem do próximo.

Antes da idade de 7 dias, a superfície do cp de argamassa era limpa, e procedia-se a colagem de uma placa de aço, essa fazia parte do sistema usado para tracionar a pastilha. O adesivo usado foi do tipo epóxi, com secagem de 24 h (Fotografia 6.13).

O equipamento para arrancamento das pastilhas consistia de um macaco hidráulico (manual), um manômetro, e um sistema que transferia a força de tração para a face do cp (pastilha), através da placa de aço. Sendo a tensão de tração calculada a partir da pressão lida no manômetro, multiplicada pela área do pistão da célula de carga; e dividindo-se esse valor pela área de contato da pastilha de argamassa com o substrato.

Após cada arrancamento, fazia-se a anotação da carga e do local de ruptura. As pastilhas de aço eram limpas e reutilizadas no próximo ensaio. (Fotografia 6.14)



Fotografia – 6.12



Fotografia – 6.13



Fotografia – 6.14

Fotografia 6.12 – Forma usada para moldar as “pastilhas” de argamassa.

Fotografia 6.13 – Os cp, de argamassa com as placas metálicas coladas na sua superfície.

Fotografia 6.14 – Corpos-de-prova durante o ensaio de resistência de aderência à tração.

6.6.10 Resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada

Este ensaio foi baseado nos estudos de CLÍMACO (1991), ABU-TAIR *et al* (1996) e GARCIA (1998), e nas normas: C 882 – 91 e C 1042 – 91 da ASTM, tendo como objetivo representar mais uma situação em que a argamassa pode ser exposta, quando aplicada.

O ensaio consistiu, basicamente, em unir, com argamassa, cp_s cilíndricos (10 cm x 20 cm) de concreto, que foram cortados em um ângulo de aproximadamente 60° com o plano da base, e rompê-los à compressão aos 7 dias de idade da argamassa.

Os cilindros eram reconstituídos passando argamassa, com auxílio de uma espátula, em ambas as metades (cunhas) e unindo-as dentro da forma do cp. Os mesmos recebiam 10 golpes com um soquete de madeira para comprimir a argamassa, melhorando assim a aderência. (Figura 6.4)

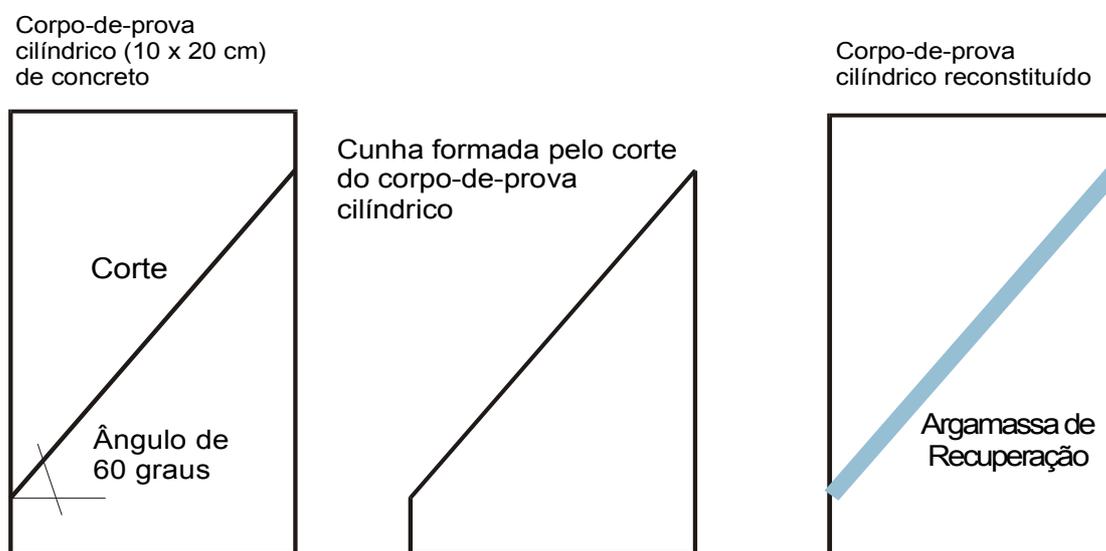


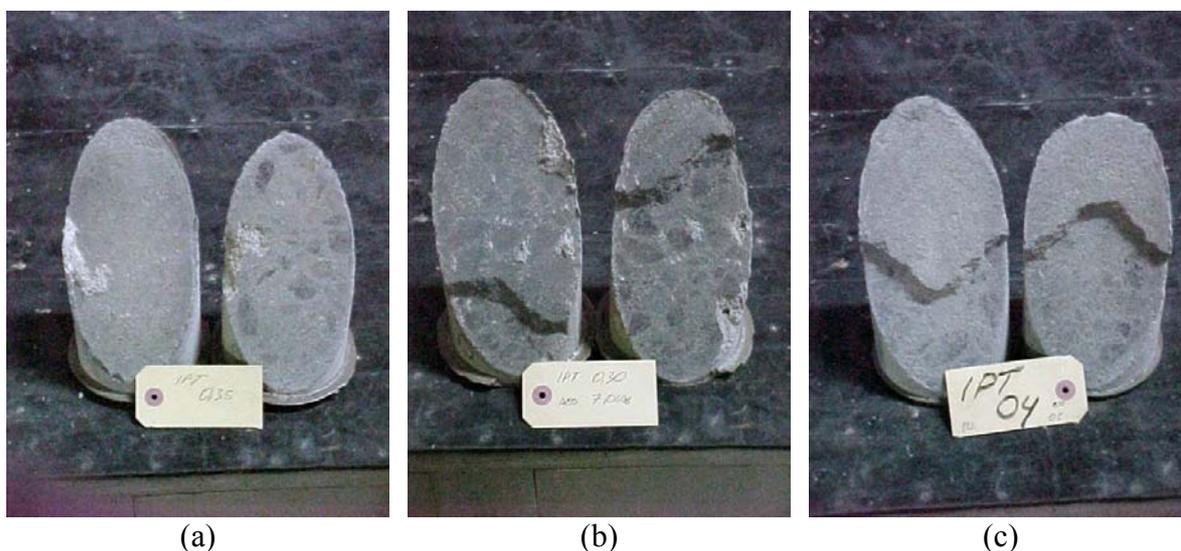
Figura 6.4 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência ao cisalhamento oblíquo.

A superfície do concreto recebia o mesmo tratamento citado nos ensaios de aderência à tração direta e retração restringida. O substrato, novamente, estava saturado superfície seca antes da aplicação da argamassa. A média da espessura da junta de argamassa ficava em torno de $7,0 \pm 2,0$ mm num mesmo cp. Isto foi devido, possivelmente, a um

deslocamento de uma das “cunhas” de concreto durante a remoldagem do cp cilíndrico (10 cm x 20 cm) dentro da forma de mesma medida interna.

Na data de ensaio, os cp_s reconstituídos eram rompidos em uma máquina para compressão, marca AMSLER. Era anotada a carga e como a ruptura ocorreu: em uma das interfaces argamassa x concreto, ou nas interfaces passando pela argamassa (Fotografia 6.15).

Para a obtenção da tensão de aderência, inicialmente calcularam-se as duas áreas resultantes do corte do cp cilíndrico. De posse da média de ambas as áreas, dividiu-se a carga de ruptura do corpo-de-prova à compressão por essa área média.



Fotografia 6.15 – Tipos de ruptura: em uma das interfaces (a), e nas interfaces passando pela argamassa (b) e (c).

Seguindo o programa experimental, foram enviadas três argamassas para os laboratórios de concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas, para levantamento de propriedades térmicas e ensaio de verificação de durabilidade. As argamassas escolhidas foram: A, B e AJ2, pois pôde-se verificar as propriedades dos materiais que mais estão sendo usados na prática, ou seja, argamassas base cimento modificadas com polímeros e argamassas de sílica ativa com areia encontrada no seu estado natural.

Cabe salientar que todo o material necessário para a produção dessas argamassas foi mandado de Vitória – ES para os Laboratórios de Furnas (Aparecida de Goiânia – GO), com os detalhes dos proporcionamentos e procedimentos a serem seguidos durante a mistura e cura das argamassas.

6.6.10 Coeficiente de dilatação térmica linear

Este ensaio foi baseado na NBR 12815 (1993): Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. Usaram-se cp_s cilíndricos de 15 cm x 30 cm, um para cada tipo de argamassa, com medidas nas idades de 7 e 28 dias,.

Foram utilizados, embutidos no centro dos cp_s, extensômetros de resistência elétrica tipo Carlson (números: M 6425; M-8496; M-8495), necessários para a medição das deformações. Para melhor entendimento do ensaio, ver PACELLI (1997).

6.6.11 Condutividade térmica na argamassa

Foi utilizada a NBR 12820 (1993): Concreto endurecido – Determinação da condutividade térmica. Corpos-de-prova cilíndricos de 20 cm x 40 cm foram utilizados, na idade de 28 dias, um para cada tipo de argamassa.

O ensaio foi repetido três vezes para cada cp, após 28 dias. Para melhor visualização da seqüência do ensaio e do maquinário utilizado, ver PACELLI (1997).

6.6.12 Ensaio de durabilidade

A metodologia deste ensaio teve por base o trabalho de SILVA E. *et al* (1999), os quais avaliaram os sistemas de reparo com relação à durabilidade dos mesmos, perante o fenômeno da corrosão das armaduras.

Para este trabalho, foram produzidos cp_s prismáticos de 15 cm x 15 cm x 20 cm, um para cada tipo de argamassa, sendo introduzida uma barra de aço CA-50 de Ø 12,5 mm (comprimento = 16 cm) durante a moldagem. Esta barra ficava paralela à face de ensaio (uma das faces de 15 cm x 20 cm), com cobrimento de 5 cm.

Em uma das faces de 15 cm x 15 cm, perpendicular à face de ensaio, foi deixada uma extremidade da barra de aço, com comprimento de ~3,0 cm para fora do prisma. Essa serviu para conexão do tensiômetro (vide Fotografia 6.16)

Aos 28 dias de idade da argamassa era feita uma “piscina” na face de ensaio, onde foi colocada uma solução de NaCl de concentração similar à água do mar (35 g/l), e mergulhado um eletrodo.

O circuito elétrico era fechado da seguinte forma: na extremidade da barra era conectado um fio, esse foi ligado a uma fonte elétrica de corrente contínua, a tensão foi mantida em torno de 60 volts; e o outro pólo da fonte foi conectado ao eletrodo, que estava mergulhado na solução.

A duração do ensaio foi de 24 h, sendo medida a intensidade de corrente elétrica que passava pelo corpo-de-prova a cada hora, menos no intervalo de 23:00 h a 7:00 h, devido a problemas de pessoal.

O ensaio seria interrompido da mesma maneira que SILVA E. *et al* (1999), quando aparecessem sinais de danos físicos como fissuras, ou manchas resultantes de produtos de corrosão provenientes da barra de aço. Prevendo assim, nesse estágio, o término da vida útil da argamassa.

Dessa forma, tentava-se verificar a argamassa que poderia alcançar a maior “vida útil” e verificar as correntes que passavam pelas argamassas. Cabe lembrar que esse ensaio é meramente comparativo.



Fotografia 6.16 – Detalhes do ensaio de durabilidade das argamassas

6.7 Análise Estatística

A análise estatística foi elaborada visando, principalmente, comparar se a diferença de médias entre os resultados dos ensaios das argamassas é significativa. A esses resultados foram acrescentados a significância do efeito da repetição dos ensaios nas diversas idades.

Os seguintes ensaios tiveram sua análise estatística realizada: resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral (idades de 3, 7 e 28 dias); absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios (28 dias); resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada e à tração (7 dias); retração livre (3, 7 e 28 dias); e absorção de água por capilaridade (72 h) (ver ANEXO A).

Utilizou-se então a análise de variância (ANOVA) para uma comparação geral, e o teste de Duncan para uma comparação em subgrupos, em função dos valores obtidos nos ensaios.

Foi utilizado o programa SPSS versão 8.0 para realização dos cálculos, e adotou-se um nível de significância de 5%.

CAPÍTULO 7

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos em laboratório, durante o programa experimental. O mesmo terá auxílio de gráficos e tabelas, visando ao melhor entendimento dos resultados.

Para os ensaios que tiveram suas análises estatísticas realizadas, as mesmas são comentadas após a apresentação dos resultados.

7.2 Ensaios no estado fresco

7.2.1 Consistência, ar incorporado e retenção de consistência

A consistência foi fixada em 200 ± 10 mm, porém, para efeito de verificações da uniformidade de uma mesma argamassa produzida em dias diferentes, a consistência era medida, no mínimo, na primeira mistura. Os valores de consistência, conforme NBR 13276 (1995), admitidos como base, estão na Tabela 7.1.

Encontra-se, também, na Tabela 7.1 a porcentagem de ar incorporado medido nas argamassas após a mistura (NBR NM 47 (1998)).

Tabela 7.1 – Índice de consistência base e ar incorporado nas argamassas

Argamassas	Índice de Consistência (mm)	Ar Incorporado (%)
A	198	19,5
B	190	12,5
AJ2	205	8,3
IPT 040	201	7,2
IPT 035	191	10,5
IPT 030	191	10,5

Todas as argamassas apresentaram resultados de ar incorporado no estado fresco maiores que as argamassas de KULAKOWSKI (1994), as quais tiveram como máximo 4,16%. Tal fato pode ser explicado nas argamassas com s.a., devido à incorporação do aditivo redutor de retração na mistura.

A retenção de consistência das argamassas avaliada durante uma hora, com intervalos de 10 minutos, está na Figura 7.1.

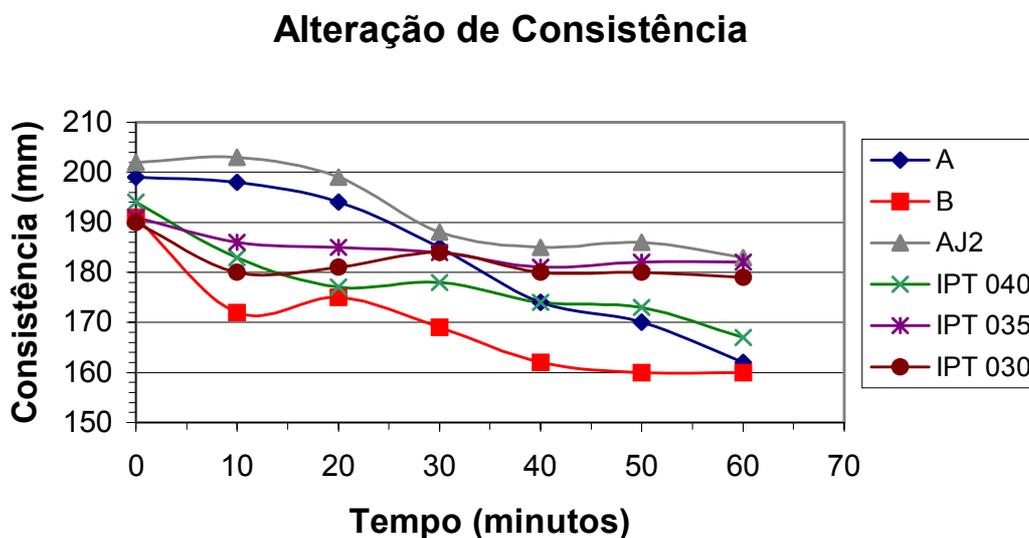


Figura 7.1 – Resultado do ensaio de retenção de consistência nas argamassas.

A argamassa “A” foi a que apresentou a maior queda na consistência (18,6%), ficando a argamassa IPT 035 com a menor (4,71%). Com relação à argamassa “A”, esse fato pode ser explicado, levando-se em conta que essa argamassa possui tempo de utilização menor que uma hora. A maior queda na consistência entre as argamassas com s.a. foi da argamassa IPT 040 (13,9%).

FIGUEIREDO (1998) obteve a menor queda na consistência entre as argamassas com sílica ativa de 14,2% (traço 1:2,5 – em massa, com 10% de s.a. e relação a/aglo = 0,36). Entretanto sua consistência inicial foi maior do que a estabelecida neste trabalho, sendo de 240 ± 10 mm.

7.2.2 Massa específica

Os resultados da massa específica no estado fresco, conforme NBR 13278 (1995), estão na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Massa específica no estado fresco

Argamassas	Valores obtidos (g/cm ³)				Média (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)	CV* (%)
A	1,96	2,02	2,02	2,07	2,02	0,041	2,03
B	2,02	2,02	2,06	2,05	2,04	0,018	0,91
AJ2	2,09	2,08	2,07	2,10	2,09	0,013	0,62
IPT 040	2,22	2,21	2,21	2,21	2,21	0,005	0,23
IPT 035	2,16	2,17	2,15	2,18	2,16	0,015	0,69
IPT 030	2,12	2,19	2,13	2,14	2,13	0,007	0,31

Nota: CV = Coeficiente de variação.

KULAKOWSKI (1994) obteve resultados de massa específica no estado fresco variando de 2,2382 g/cm³ (traço 1:2:0,35 com 5% de s.a.) até 2,1277 g/cm³ (traço 1:3:0,55 com 15% de sílica ativa). Comparando com os resultados obtidos neste trabalho, verifica-se que as argamassas com granulometria mais grossa (IPT 030, 035 e 040) ficaram nessa faixa, porém as com granulometria mais fina (demais argamassas) ficaram abaixo dessa faixa.

Analisando os resultados das argamassas com s.a., verifica-se que a IPT 040 foi a que teve maior massa específica, provavelmente resultado da granulometria da areia e do não uso de superplastificante nessa argamassa – menor quantidade de ar incorporado. A AJ2 ficou com a menor massa, resultado da granulometria da areia (mais fina) e da maior relação a/aglo.

7.3 Ensaios no estado endurecido

7.3.1 Resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão axial das argamassas, para as idades de 3, 7, e 28 dias, estão na Tabela 7.3, como também: a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos mesmos.

Tabela 7.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial (NBR 7215 (1996))

Traços	Resistência à Compressão Axial (MPa)					
	3 dias		7 dias		28 dias	
A	24,28	Média: 24,4 s: 0,35 CV: 1,43%	27,69	Média: 31,3 s: 2,73 CV: 8,71%	33,20	Média: 33,6 s: 0,73 CV: 2,18%
	23,99		34,26		34,22	
	24,82		31,35		34,28	
	24,47		32,02		32,81	
	-		-		-	
B	20,96	Média: 23,2 s: 2,30 CV: 9,93%	24,65	Média: 27,1 s: 3,53 CV: 13,0%	26,09	Média: 28,9 s: 1,97 CV: 6,81%
	26,14		31,18		30,02	
	21,83		23,68		30,46	
	23,82		28,87		28,85	
	-		-		-	
AJ2	21,39	Média: 20,5 s: 0,98 CV: 4,75%	30,22	Média: 29,8 s: 1,89 CV: 6,33%	34,46	Média: 36,1 s: 2,54 CV: 7,03%
	19,34		28,87		33,59	
	20,15		27,93		39,11	
	21,29		32,28		37,22	
	-		-		-	
IPT 040	27,58	Média: 28,0 s: 0,32 CV: 1,15%	38,85	Média: 37,7 s: 2,71 CV: 7,20%	46,72	Média: 43,7 s: 3,40 CV: 7,78%
	28,12		39,95		44,58	
	27,96		33,77		40,15	
	28,35		38,17		40,10	
	-		-		46,98	
IPT 035	22,33	Média: 22,9 s: 0,43 CV: 1,90%	32,98	Média: 34,4 s: 1,00 CV: 2,91%	43,42	Média: 43,3 s: 2,57 CV: 5,93%
	22,94		34,26		44,20	
	23,43		34,11		39,37	
	22,56		35,25		43,22	
	23,08		35,48		46,48	
IPT 030	20,67	Média: 21,0 s: 0,97 CV: 4,91%	35,86	Média: 34,3 s: 0,95 CV: 2,78%	36,31	Média: 40,3 s: 3,13 CV: 7,76%
	19,68		33,63		38,74	
	20,87		33,54		39,47	
	21,99		34,38		42,81	
	21,96		33,89		44,00	

Notas: s = desvio padrão;
CV = coeficiente de variação.

Utilizando-se a análise de variância, os resultados estatísticos indicam existir diferença significativa entre as médias por tipo de argamassa nas idades de 3, 7 e 28 dias. Não houve diferença estatística significante entre as repetições.

KULAKOWSKI (1994) obteve resistências à compressão axial a 28 dias que ficaram na faixa de 72,78 a 38,74 MPa para as argamassas com 10% de adição de s.a. e relação a/aglo = 0,35 e 0,55, respectivamente. SCHULER (1998) relatou valores de 75,5 MPa

(traço 1:1,7:0,35) e 42,2 MPa (traço 1:3:0,55) nas argamassas com adição de 10% de sílica ativa. Já FIGUEIREDO (1998) teve resultados para as argamassas com 10% de adição de s.a. de 54,0 e 55,5 MPa (traços 1:2:0,4 e 1:2,5:0,4, respectivamente).

As argamassas desta pesquisa obtiveram resistências à compressão axial a 28 dias mais próximas das argamassas de sílica ativa com maiores relações a/aglo ($\approx 0,55$) e a/c, dos trabalhos de KULAKOWSKI (1994) e SCHULER (1998). Podendo, nas argamassas com s.a., ser resultado da quantidade de aditivo redutor de retração utilizado em cada traço, que aumentou a quantidade de ar incorporado, reduzindo assim a resistência das mesmas, e do tipo de cimento utilizado (CP II E – 32 RS).

Entretanto, os resultados da resistência à compressão axial nas argamassas em estudo atendem as recomendações propostas por POSTON *et al* (2001): resistência mínima de 17,2 MPa a 3 dias e de 27,6 MPa a 28 dias. Bem como, atendem também as recomendações de SILVA JUNIOR (2001), quanto a valores mínimos (vide Capítulo 3).

As argamassas com s.a. e areia do IPT, IPT 035 e 040 apresentam pouca diferença na resistência à compressão, possível resultado da melhor hidratação da s.a. na argamassa IPT 040 devido à maior quantidade de água, concordando com sua menor quantidade de ar incorporado.

7.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral das argamassas, para as idades de 3, 7 e 28 dias, estão na Tabela 7.4, como também: a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos mesmos.

Tabela 7.4 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222 (1994))

Traços	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)					
	3 dias		7 dias		28 dias	
A	3,77	Média: 3,55 s: 0,30 CV: 8,49%	3,31	Média: 4,24 s: 0,65 CV: 15,4%	6,58	Média: 6,40 s: 0,18 CV: 2,82%
	3,44		4,27		6,36	
	3,18		4,64		6,17	
	3,83		4,75		6,49	
	-		-		-	
B	3,06	Média: 3,40 s: 0,45 CV: 13,2%	2,99	Média: 3,53 s: 0,37 CV: 10,4%	4,73	Média: 4,56 s: 0,11 CV: 2,44%
	3,51		3,71		4,51	
	3,05		3,77		4,48	
	4,00		3,66		4,54	
	-		-		-	
AJ2	2,29	Média: 2,68 s: 0,28 CV: 10,5%	3,90	Média: 3,73 s: 0,17 CV: 4,60%	3,97	Média: 4,08 s: 0,38 CV: 9,20%
	2,75		3,51		3,82	
	2,95		3,70		3,90	
	2,73		3,83		4,64	
	-		-		-	
IPT 040	3,04	Média: 3,28 s: 0,21 CV: 6,36%	3,77	Média: 4,19 s: 0,54 CV: 12,8%	3,67	Média: 4,23 s: 0,45 CV: 10,7%
	3,54		4,60		4,27	
	3,23		3,70		3,94	
	3,31		4,72		4,41	
	-		-		4,85	
IPT 035	3,28	Média: 3,23 s: 0,15 CV: 4,56%	3,57	Média: 3,72 s: 0,54 CV: 14,4%	5,95	Média: 4,91 s: 0,81 CV: 16,4%
	3,09		4,42		4,41	
	3,10		4,13		3,93	
	3,26		3,34		4,83	
	3,45		3,15		5,44	
IPT 030	3,28	Média: 2,95 s: 0,43 CV: 14,5%	3,74	Média: 4,03 s: 0,36 CV: 9,03%	4,84	Média: 5,10 s: 0,50 CV: 9,78%
	2,87		3,62		4,80	
	2,97		4,13		5,05	
	3,35		4,54		5,98	
	2,27		4,13		4,84	

Notas: s = desvio padrão;
CV = coeficiente de variação.

Na análise de variância, foi verificada diferença significativa entre as médias por tipo de argamassas para as idades de 3 e 28 dias, não havendo diferença estatística significativa entre as repetições.

A argamassa com maior resistência à tração por compressão diametral a 28 dias foi a “A” (6,40 MPa), possivelmente resultado da ação do polímero. E a argamassa com menor resistência foi a argamassa AJ2 (4,08 MPa). Segundo NEVILLE (1997), o ar incorporado influencia mais a resistência à compressão do que a resistência à tração, em particular, nos casos de misturas ricas e resistentes.

Comparando com resultados de outros autores, FIGUEIREDO (1998) obteve resistências à tração por compressão diametral de 5,7 e 4,6 MPa nas argamassas com 10% de s.a. (traços 1:2:0,4 e 1:2,5:0,4, respectivamente) a 28 dias. Já SCHULER (1998) teve resultados de 5,06 MPa (traço 1:1,7:0,35) e 2,96 MPa (traço 1:3:0,55), para argamassas com mesma adição de sílica ativa, também a 28 dias.

Nas recomendações de POSTON *et al* (2001), o valor da tensão de tração não deve ser inferior a 10% da tensão de compressão, em curas úmidas. Com apenas 24 horas de cura úmida, só a argamassa IPT 0,40 ficou abaixo desse valor recomendado, porém a diferença foi de 3,20% a 28 dias.

Já EMMONS *et al* (2000) recomendam um mínimo de resistência à tração na compressão diametral a 28 dias de 2,75 MPa, valor que foi atendido por todas as argamassas em estudo.

7.3.3 Módulo de deformação

Os resultados encontrados para o ensaio de módulo de deformação (NBR 8522 (1984) – Plano de Carga II) estão na tabela 7.5 e na Figura 7.2. Foram usados seis cp_s cilíndricos 5 cm x 10 cm para cada argamassa (só a ITP 040 usou cinco).

Tabela 7.5 – Valores de módulo de deformação para os corpos-de-prova

Argamassas	Módulo de Deformação – 28 dia (GPa)						Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)
	cp 4	cp 5	cp 6	cp 7	cp 8	cp 9			
A	21,67	31,64	25,71	25,10	25,78	28,89	26,5	3,42	12,94
B	15,12	16,61	16,61	15,83	18,75	14,56	16,2	1,47	9,04
AJ2	19,22	19,70	18,86	20,83	22,82	21,59	20,5	1,53	7,45
IPT 040	26,26	18,26	16,66	22,94	19,32	-	20,7	3,87	18,73
IPT 035	50,96	30,93	34,11	30,89	31,81	47,28	37,7	9,03	23,97
IPT 030	24,51	21,45	25,17	25,51	28,21	25,51	25,1	2,18	8,68

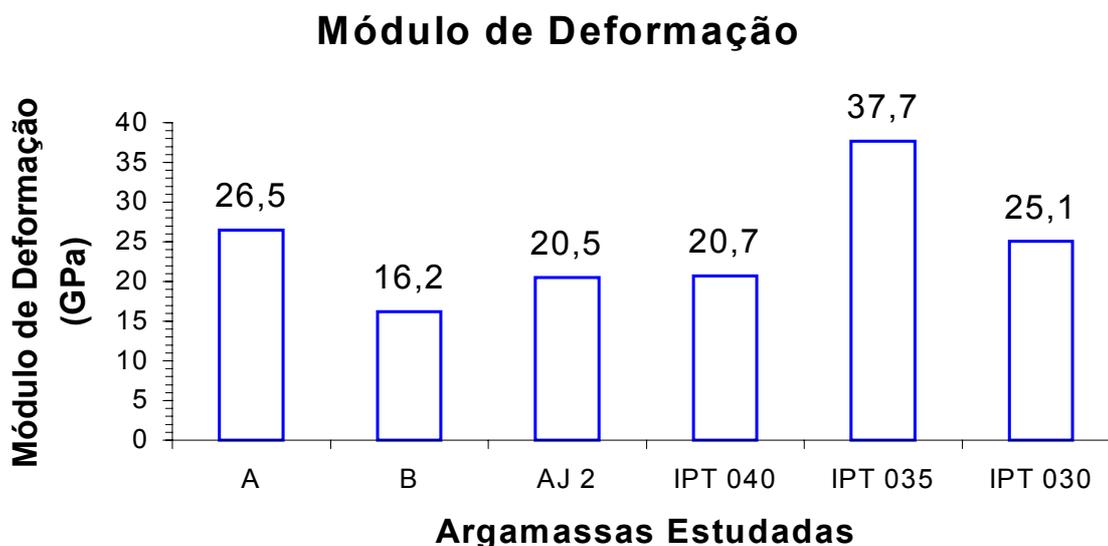


Figura 7.2 – Resultados do módulo de deformação.

Na dissertação de SCHULER (1998), os valores de módulo de deformação variaram de 29,34 a 32,07 GPa para as argamassas com s.a. e relação a/c = 0,35 e de 24,75 a 28,62 GPa para as argamassas com relação a/c = 0,55, a 62 dias de idade. Sendo que com o aumento da quantidade de sílica ativa, o módulo de deformação diminuía.

Nas argamassas de sílica ativa deste estudo, as com mesma relação a/aglo tiveram praticamente o mesmo valor, não sendo verificado um aumento no módulo de deformação com a diminuição da relação a/aglo. Não foi possível analisar com relação à variação da adição de s.a., pois essa é constante.

FIGUEIREDO (1998) obteve um resultado máximo de 25,6 GPa (traço 1:2:0,4 com 10% de s.a.) de módulo de elasticidade, a 28 dias, entre suas argamassas, seguido de perto pela argamassa 1:2,5:0,4 com o mesmo teor de sílica ativa. Essa autora relatou uma tendência de aumento do módulo de elasticidade quando do uso e do aumento da quantidade de s.a. Tendo verificado também que quanto maior o tempo de cura, maior o módulo de deformação.

Em comparação com o trabalho de FIGUEIREDO (1998), só a argamassa IPT 035 é que excedeu bastante o valor de 25,6 GPa.

Baseando-se no critério preliminar de desempenho para as argamassas de reparo sugerido por EMMONS *et al* (2000), verifica-se que praticamente só a argamassa IPT 035 excedeu o valor máximo de 25 GPa estabelecido por esses autores.

Já com relação ao nível mínimo de 5 GPa proposto por SILVA JUNIOR (2001), todas as argamassas deste estudo o atenderam.

7.3.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 9779 (1995)) foi prolongado para 216 h, e os corpos-de-prova, além de pesados, eram rompidos à compressão diametral para verificação da ascensão capilar.

Na Figura 7.3 encontram-se os valores de absorção de água por capilaridade (em g/cm²), durante o intervalo estabelecido, sendo as alturas capilares apresentadas na Tabela 7.6. A Tabela 7.7 é mais específica, sendo encontrados os valores para absorção em 72 h.

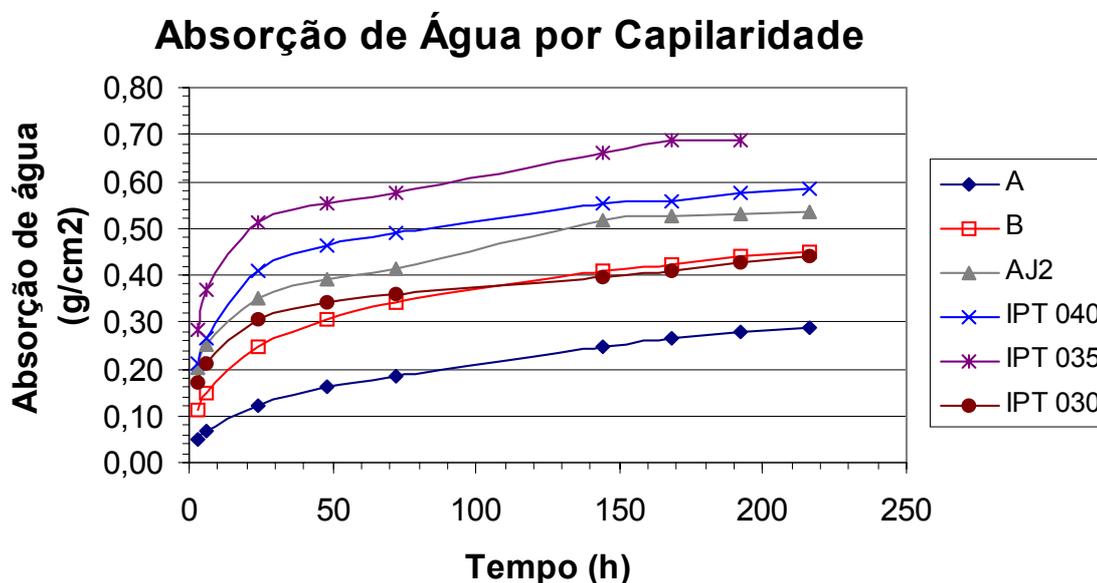


Figura 7.3 - Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Tabela 7.6 – Altura capilar medida nos cp_s após o período de ensaio

Argamassas	Altura capilar – 216 h (mm)				Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	CV ¹ (%)
	cp 29	cp 30	cp 31	cp 32			
A	4,0	4,0	4,0	2,0	3,5	1,00	28,6
B	11,5	12,5	9,5	11,7	11,2	1,14	10,2
AJ2	10,0	16,6	11,6	18,3	14,1	3,96	28,0
IPT 040	26,7	26,3	27,5	26,8	26,8	0,50	1,86
IPT 035²	29,4	25,5	24,0	31,2	27,5	3,34	12,1
IPT 030	11,2	10,2	8,1	12,4	10,5	1,82	17,4

Notas: (1) CV = Coeficiente de variação;

(2) Altura capilar a 192 h.

Tabela 7.7 – Absorção de água por capilaridade em 72 h

Argamassas	Absorção capilar – 72 h (g/cm ²)				Média (g/cm ²)	Desvio Padrão (g/cm ²)	CV ¹ (%)
	cp 29	cp 30	cp 31	cp 32			
A	0,17	0,17	0,21	0,19	0,19	0,020	10,73
B	0,31	0,36	0,30	0,40	0,34	0,045	13,05
AJ2	0,37	0,44	0,39	0,46	0,41	0,043	10,35
IPT 040	0,47	0,45	0,53	0,51	0,49	0,039	7,98
IPT 035	0,57	0,53	0,55	0,65	0,57	0,054	9,33
IPT 030	0,37	0,36	0,34	0,38	0,36	0,018	5,06

Nota: (1) CV = Coeficiente de variação.

A análise de variância, para a altura capilar no tempo de 72 h, indica existir diferença significativa entre as médias para todos os tipos de argamassa.

Analisando o trabalho de FIGUEIREDO (1998), as argamassas com um dia de cura úmida e com maior consumo de s.a. apresentaram menor absorção capilar, atingindo em média 0,60 g/cm² em 72 h.

Nas argamassas deste trabalho, nenhuma atingiu 0,60 g/cm² nesse intervalo de tempo, sendo a IPT 035 a que obteve maior absorção capilar. Uma explicação para esse fato pode ser a diminuição dos poros capilares pela ação da sílica ativa, do superplastificante e da menor relação a/aglo, fazendo a água alcançar maior altura capilar.

A argamassa polimérica “A” obteve a menor absorção e ascensão capilar, que condiz com o fato de ter sido a argamassa com a maior quantidade de ar incorporado, pois as bolhas de ar “obstruem” os canais capilares e impedem a absorção e, por conseguinte, a subida da água.

7.3.5 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios

Os resultados de absorção de água por imersão, massa específica, índice de vazios, medidos aos 28 dias, encontram-se na tabela 7.8, sendo os mesmos obtidos de acordo com a NBR 9778 (1987).

Tabela 7.8 – Resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Propriedade	Argamassa	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AJ2</i>	<i>IPT 040</i>	<i>IPT 035</i>	<i>IPT 030</i>
Absorção de Água (%)	Média:	2,76	7,94	8,65	7,30	8,38	7,38
	s:	0,05	0,14	0,09	0,12	0,11	0,06
	CV (%)	1,86	1,81	1,08	1,57	1,33	0,87
Massa Específica (g/cm³)	Média:	1,94	1,86	1,97	2,04	2,03	2,03
	s:	0,001	0,007	0,006	0,009	0,004	0,008
	CV (%)	0,06	0,35	0,30	0,43	0,18	0,37
Índice de Vazios (%)	Média:	5,34	14,77	17,07	14,88	17,00	15,00
	s:	0,10	0,22	0,16	0,21	0,20	0,14
	CV (%)	1,81	1,49	0,96	1,38	1,17	0,96
Número de corpos-de-prova:		3	3	4	4	4	4

Notas: s = desvio padrão;

CV = coeficiente de variação.

A análise de variância, novamente, indicou diferença significativa entre as médias para cada tipo de argamassa, em cada tipo de ensaio, e não houve diferença estatística significativa entre as repetições.

Dentre todas as argamassas, a “A” apresentou menor absorção por imersão e índice de vazios, fruto do uso do polímero. A também polimérica “B” não logrou o mesmo êxito, possivelmente devido à água adicionada para aumentar sua consistência inicial.

A argamassa AJ2 teve a maior absorção entre as argamassas estudadas, isso pode ser resultado do uso de um traço menos rico em cimento (1:3), com uma relação a/aglo alta (0,4) e uma areia muito fina.

A maior quantidade de água utilizada na argamassa IPT 040 pode ter melhorado a hidratação da sílica ativa, fazendo com que sua microestrutura ficasse mais densa, o que condiz com a massa específica e com o índice de vazios obtidos por essa argamassa.

Já nos resultados obtidos por FIGUEIREDO (1998) para um dia de cura, as argamassas com 10% de s.a. (e todas as demais, menos a que continha fibras) ficaram com absorção por imersão entre 8% e 10%, indicando assim, que as argamassas com s.a. desta pesquisa não possuem absorção por imersão incoerentes com as demais.

7.3.6 Retração livre

Na Figura 7.4 estão os valores obtidos para retração livre nas argamassas (NBR 8490 (1984)), nas idades de 3, 7 e 28 dias. Na Tabela 7.9, os valores de retração para 28 dias estão em destaque.

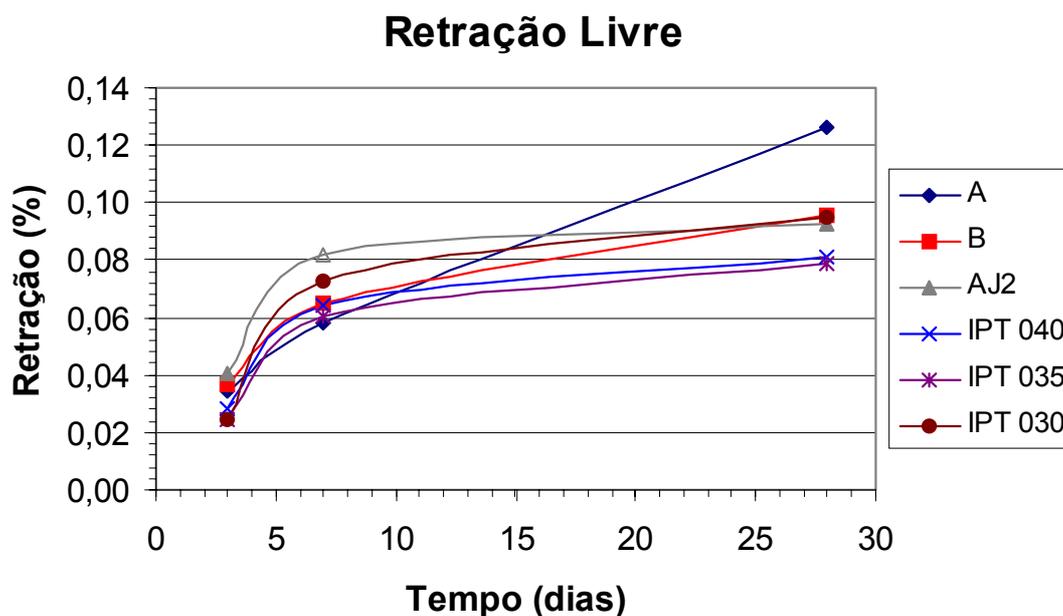


Figura 7.4 – Resultados dos ensaios de retração livre nas argamassas.

Tabela 7.9 – Valores de retração livre para 28 dias

Argamassas	Retração Livre – 28 dias (%)						Média (%)	Desvio Padrão (%)	CV (%)
	cp 1	cp 2	cp 3	cp 4	cp 5	cp 6			
A	0,127	0,126	0,124	0,129	0,128	0,124	0,126	0,0022	1,756
B	0,094	0,096	0,097	0,095	0,096	-	0,096	0,0014	1,430
AJ2	0,094	0,093	0,092	0,087	0,101	0,088	0,092	0,0051	5,469
IPT 040	0,082	0,075	0,074	0,087	0,086	0,083	0,081	0,0057	7,036
IPT 035	0,081	0,076	0,079	0,076	0,080	0,082	0,079	0,0026	3,279
IPT 030¹	0,092	0,094	0,094	0,097	0,096	0,098	0,095	0,0020	2,126

Nota: (1) Desforma dos cp_s em 47 h, as demais argamassas foram desformadas em 23 h.

A análise estatística indica existir diferença entre as médias das argamassas em todas as idades de comparação.

No ensaio de retração livre verificou-se que, a 28 dias, a maior retração livre foi da argamassa “A”, o que não era esperado devido aos bons resultados obtidos com a mesma até o momento.

Com relação à argamassa IPT 035, menor valor de retração livre, uma forma de justificar o fato seria o “esqueleto” formado pela areia do IPT com granulometria mais grossa e a utilização de uma relação a/aglo baixa.

FIGUEIREDO (1998) obteve para argamassas com 10% de sílica ativa, com apenas um dia de cura, as maiores retrações durante 45 dias, atingindo um máximo de 0,1144% (traço 1:2,5:0,4 – em massa) e 0,1080% (traço 1:2,0:0,4 - em massa). Essa autora notou que para esse tipo de cura, de um dia, aos 7 dias de idade a retração já era da ordem de 60% a 90% do seu valor a 28 dias.

Comparando os valores de FIGUEIREDO (1998) com os obtidos nesta pesquisa, pode-se supor que esses são um pouco maiores, pois 20 dias antes (a 28 dias) possuíam ~85% dos valores a 45 dias do trabalho de FIGUEIREDO (1998). Porém, cabe uma análise mais específica para os dados de 28 dias de ambas as pesquisas, o que não foi possível.

Porém EMMONS *et al* (2000) propõem um máximo para retração livre, a 28 dias, de 0,04%, tendo como base o ensaio da ASTM C 157 (1994 – modificado), o qual no artigo em questão não ficou bem claro. Entretanto POSTON *et al* (2001), em artigo que estudava o desempenho de materiais de reparo, em que Emmons foi um dos autores,

ressaltam detalhes desse ensaio modificado. Esse inclui um cp maior (76 mm x 76 mm x 286 mm) e um ambiente com temperatura de 23°C e UR = 50%, sendo que, em certas argamassas, foi adicionado agregado graúdo.

Mantendo os corpos-de-prova em 25 mm x 25 mm x 285 mm, todas as argamassas deste estudo passaram do limite de 0,04% sugerido por EMMONS *et al* (2000).

SOUZA & APPLETON (2001) levantaram valores de retração livre, a 28 dias, com cura em ambiente de laboratório, para uma argamassa de base cimentícia e outra modificada por polímero, os valores obtidos foram: $0,938 \times 10^{-3}$ (0,0938%) e $0,927 \times 10^{-3}$ (0,0927%), respectivamente. Valores esses mais consistentes com os resultados desta pesquisa.

7.3.7 Retração restringida

Este ensaio foi realizado por observação visual, sendo os resultados obtidos apresentados no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Resultados obtidos no ensaio de retração restringida

Argamassas	Aparecimento de Fissuras	Desprendimento da Argamassa Durante o Ensaio de Flexão	Desprendimento da Argamassa Após o Ensaio de Flexão
A	não	não	não
B	não	não	não
AJ2	não	não	não
IPT 040	não	não	não
IPT 035	(1)	não	não
IPT 030	não	não	não

Nota: (1) - Aparecimento de fissuras superficiais concêntricas devido à expansão, as quais não continuavam ao longo da profundidade da argamassa.

Verifica-se que apesar de a retração livre ter sido “alta”, baseado na sugestão de EMMONS *et al* (2000), as argamassas em questão aplicadas em rebaxos nos cp_s de concreto não apresentaram fissuras que comprometessem seu desempenho. E, também, não apresentaram perda de aderência durante o ensaio de rompimento do prisma à flexão (MB 3483 (1991)), onde estavam localizadas na parte do prisma que sofria maior esforço à tração.

7.3.8 Resistência de aderência à tração

Os valores do ensaio de resistência de aderência à tração estão relacionados na tabela 7.10, sendo que, na Figura 7.5, são exibidos os possíveis tipos de ruptura.

Tabela 7.10 – Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração
(NBR 13528 (1995))

Resistência de Aderência à Tração (MPa)										
Traços	Cp _s	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	Tensão de ruptura	0,480	0,235	1,297	1,642	1,426	0,672	0,880	0,610	0,469
	Tipo	c	c	c	d	d	c	c	c	c
	7 dias	Média: 0,857			s: 0,488			CV: 57,02%		
B	Tensão de ruptura	1,244	0,933	0,744	1,414	1,495	0,780	0,280	0,309	0,371
	Tipo	e	a	a	e	d	c	c	c	d
	8 dias	Média: 0,841			s: 0,469			CV: 55,75%		
AJ2	Tensão de ruptura	0,421	0,516	0,506	0,548	0,492	0,695	0,634	0,720	0,764
	Tipo	c	c	c	a	a	c	a	a	a
	8 dias	Média: 0,589			s: 0,119			CV: 20,16%		
IPT 040	Tensão de ruptura	0,545	0,563	0,517	0,479	0,511	0,613	0,482	0,492	0,559
	Tipo	d	d	d	c	a	e	e	c	d
	7 dias	Média: 0,529			s: 0,044			CV: 8,40%		
IPT 035	Tensão de ruptura	0,334	0,547	0,527	0,347	0,755	0,688	0,515	0,321	0,384
	Tipo	a	a	a	a	a	b	d	a	a
	8 dias	Média: 0,491			s: 0,158			CV: 32,12%		
IPT 030	Tensão de ruptura	0,147	0,217	0,183	0,149	0,094	0,125	0,205	0,151	0,092
	Tipo	c	c	c	c	c	c	c	c	c
	7 dias	Média: 0,151			s: 0,044			CV: 29,24%		

Notas:

s = desvio padrão;

CV = coeficiente de variação;

Tipos de ruptura:

a = interface cola x argamassa;

b = dentro da argamassa x interface argamassa substrato;

c = interface argamassa x substrato ⇒ com mínimos fragmentos do substrato;

d = interface argamassa x substrato ⇒ com < de 50% da área com fragmentos do substrato;

e = interface argamassa x substrato ⇒ com > de 50% da área com fragmentos do substrato.

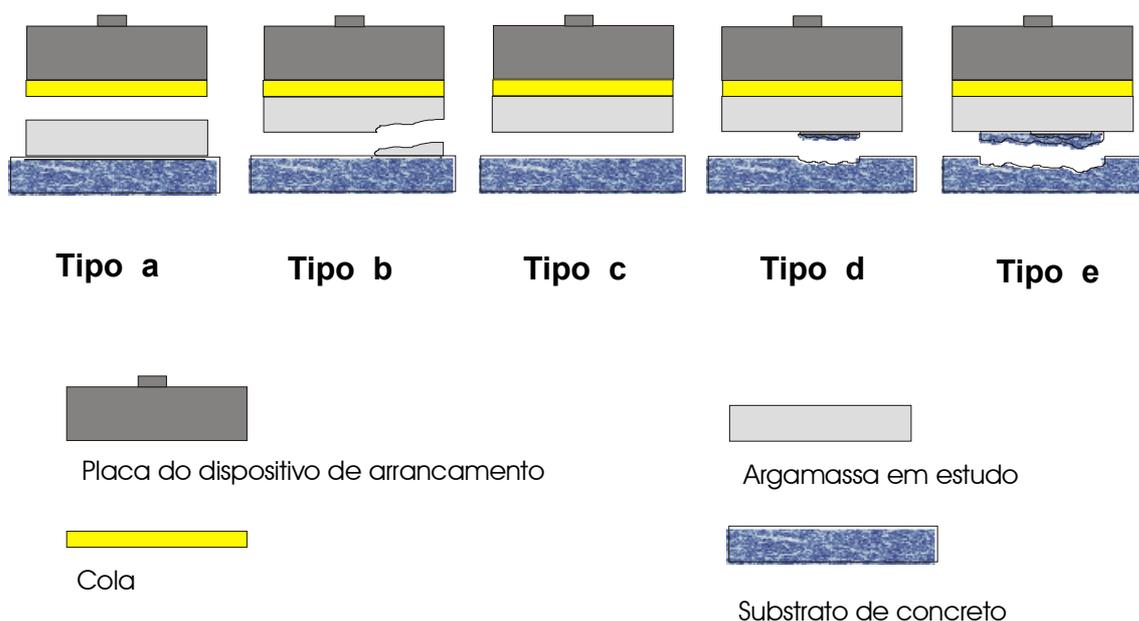


Figura 7.5 – Tipos de rupturas no ensaio de arrancamento.

Os resultados estatísticos encontrados indicam existir diferença entre as médias por tipo de argamassa para todas as comparações. Não houve casos em que a diferença estatística foi significativa entre as repetições.

O valor médio da resistência de aderência à tração foi calculado usando todos os valores obtidos, independente do tipo de ruptura; isso explica, de certa forma, os altos valores de alguns coeficientes de variação. Só seria desprezado o resultado em que o cp rompesse na interface cola/pastilha, o que não ocorreu. Um valor considerado aceitável para o CV seria de 34% (CARASEK, 1997), todavia preferiu-se manter todos os valores obtidos.

Neste ensaio, as duas argamassas base cimento modificadas com polímeros obtiveram melhores resultados que as argamassas com s.a.. Entretanto, analisando os resultados de SCHULER (1998) para a aderência à tração, a 7 dias, de uma argamassa traço 1:3,04:0,59 (em massa) com 10% de adição de s.a., cuja resistência foi de 0,3304 MPa, verifica-se que, com exceção da IPT 030, as demais argamassas com sílica ativa tiveram bons resultados.

DECTER & KEELEY (1997) recomendam o valor mínimo de $0,8 \text{ N/mm}^2$, valor esse recomendado pela CONCRETE SOCIETY, a 28 dias (idade obtida através de análise do artigo). Portanto, a sete dias, as argamassas base cimento modificadas com polímeros já atingiram esse resultado, e as argamassas AJ2, IPT 040 e IPT 035 já possuem aproximadamente 63% da resistência mínima a 28 dias.

Já SOUZA & APPLETON (2001) obtiveram resistências de aderência à tração de 1,22 e 0,81 MPa, a 28 dias, para suas argamassas (uma à base cimentícia e outra à base polimérica). Indicando um bom desempenho das argamassas base cimento modificadas com polímeros desta pesquisa.

Uma possível explanação para explicar o fato de a argamassa IPT 030 ter tido a menor resistência de aderência, está na menor quantidade de água usada nesse traço. Isso dificulta a sucção de água pelo substrato, sendo que nessa água são levados elementos do cimento em hidratação que, posteriormente, serão responsáveis pela “ancoragem” da argamassa.

7.3.9 Resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada

Na tabela 7.11 estão os resultados da resistência de aderência das argamassas ao cisalhamento da junta inclinada, aos 7 dias de idade da argamassa.

Tabela 7.11 – Resultados do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada

Resistência de Aderência ao Cisalhamento da Junta Inclinada (MPa)									
Traços	Cp,	1	2	3	4	5	6	7	8
A	Tensão de ruptura	6,24	8,83	9,03	9,52	9,81	8,64	9,44	8,48
	Tipo	1	1	1	1	1	1	1	1
	<i>Média</i>	8,68		s: 1,27			CV: 14,63%		
B	Tensão de ruptura	8,64	6,87	7,48	7,94	9,26	6,18	-	-
	Tipo	1	1	2	1	1	1	-	-
	<i>Média</i>	8,04		s: 1,13			CV: 14,08%		

Tabela 7.11 – (continuação) Resultados do ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada

AJ2	Tensão de ruptura	9,53	9,02	10,11	8,38	11,05	8,76	8,31	9,07
	Tipo	1	1	2	1	2	1	1	1
	<i>Média</i>	9,62		s: 0,98		CV: 10,18%			
IPT 040	Tensão de ruptura	10,29	11,53	10,42	11,58	12,32	11,49	12,28	8,57
	Tipo	1	2	1	2	2	1	2	2
	<i>Média</i>	11,23		s: 0,77		CV: 6,88%			
IPT 035	Tensão de ruptura	10,18	12,46	11,24	12,01	10,42	10,90	10,70	11,50
	Tipo	1	2	2	1	1	2	1	2
	<i>Média</i>	11,26		s: 0,89		CV: 7,94%			
IPT 030	Tensão de ruptura	12,10	11,66	11,14	12,71	10,79	11,36	11,68	12,07
	Tipo								
	<i>Média</i>	11,68		s: 0,69		CV: 5,93%			

Notas:

s = desvio padrão;

CV = coeficiente de variação;

Tipos de ruptura:

1 = rompeu só em uma das interfaces argamassa x substrato;

2 = ruptura começou em uma das interfaces, passou pela argamassa e terminou na outra interface: argamassa x substrato;

Neste ensaio, os resultados de aderência das argamassas com sílica ativa foram melhores que das argamassas base cimento modificadas com polímeros. Como as argamassas que utilizaram areia do IPT são as que possuem os maiores resultados, a granulometria mais grossa da areia pode ser uma explicação para esse resultado.

Sendo que, além da granulometria mais grossa, a textura e a forma dos grãos da areia do IPT também ajudariam a aumentar o atrito entre a argamassa e o concreto, pois são grãos menos arredondados que as demais areias e com superfície áspera.

Uma comparação com outros trabalhos (CLIMACO, 1991; GARCIA, 1997 e SCHULER, 1998) fica dificultada devido, dentre outros motivos, à forma de cálculo e de análises das tensões de aderência e dos tipos de corpos-de-prova.

Entretanto, verificando-se a ASTM C 881 (1991) são encontrados valores para a resistência de aderência de resinas epóxi a serem utilizadas como pontes de aderência, sob condições de ensaio semelhante, que variam de 6,9 a 10,3 MPa para 14 dias de idade. Analisando os resultados deste ensaio, observa-se que todas as argamassas atendem ou superam essa faixa.

7.3.10 Coeficiente de dilatação térmica linear

Os resultados do ensaio do coeficiente de dilatação térmica (NBR 12815 (1993)) para as argamassas A, B e AJ2 estão na Tabela 7.12.

Tabela 7.12 – Resultados do ensaio de coeficiente de dilatação térmica linear

Argamassa	Idade	Coef. de dilatação térmica linear ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Desvio padrão	Dispersão (< 10%)
A	7 dias	15,26	1,47	10%
	28 dias	15,69	1,07	7%
B	7 dias	12,74	1,03	8%
	28 dias	13,38	0,63	5%
AJ2	7 dias	11,78	0,53	5%
	28 dias	12,69	0,55	4%

Os resultados indicam uma menor dilatação térmica linear para argamassas feitas com sílica ativa, em relação às argamassas com base polimérica. A 28 dias o coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa polimérica¹ “A” é ~ 24% maior que a sem polímeros, o que condiz com os resultados de POSTON *et al* (2001).

Comparando os coeficientes de dilatação térmica linear com os dados citados por MEHTA & MONTEIRO (1994), verifica-se que a argamassa AJ2 é a que fica mais próxima da faixa de valores propostos para concretos com diferentes tipos de agregados, faixa que vai de 6 a 12 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Isso pode indicar futuros problemas de compatibilidade dimensional entre a argamassa “A” e os substratos de concreto, tendo em vista dilatações diferentes.

¹ Não foi considerada a argamassa “B” nesse cálculo devido ao acréscimo de 25% de água em relação a sua massa de líquido, o que pode ter influenciado nessa propriedade.

As três argamassas analisadas nessa propriedade ficaram com os coeficientes de dilatação térmica maiores que o máximo proposto por EMMONS *et al* (2000), que é de $11,7 \times 10^{-6}/\text{°C}$. Porém, atenderam o critério proposto por SILVA JUNIOR (2001) de coeficiente de expansão térmica, mínimo de $7 \times 10^{-6}/\text{°C}$.

7.3.11 Condutividade térmica na argamassa

Na tabela 7.13 encontram-se os resultados do ensaio de condutividade térmica (NBR 12820 (1993)) nas argamassas A, B e AJ2.

Tabela 7.13 – Resultados do ensaio de condutividade térmica

Argamassas			
Ensaio	A	B	AJ2
1	2,1526	1,9321	2,2831
2	1,9560	2,1008	2,3034
3	1,9881	2,0333	2,1766
Média (W/(m . °C))	2,0322	2,0221	2,2544
Desvio padrão	0,1055	0,0849	0,0681
CV (%)	5,19	4,20	3,02

Nota: CV = coeficiente de variação.

Analisando os resultados, verifica-se que os menores valores para a condutividade térmica foram obtidos pelas argamassas base cimento modificadas com polímeros, que por sua vez são as que apresentaram maior quantidade de ar incorporado em relação à AJ2. Isso está de acordo com o que acontece no concreto, onde quanto maior a quantidade de ar incorporado, menor a condutividade térmica (PACELLI, 1997).

Baseado em dados de alguns concretos, utilizando o granito como agregado graúdo do livro de PACELLI (1997), obteve-se a condutividade térmica média aproximada de $\sim 2,82$ (w/(m . K)) para esses concretos. Isso pode indicar uma menor condutividade dessas argamassas perante os possíveis concretos a serem reparados.

Entretanto, como a condutividade térmica do concreto é função de vários fatores, dentre eles: massa específica dos agregados, água unitária, teor de ar incorporado, composição mineralógica e dimensão máxima característica do agregado (PACELLI, 1997); fica difícil definir se os valores de condutividade dessas argamassas estão ou não compatíveis com os concretos de substrato.

7.3.12 Ensaio de durabilidade

Encontram-se na tabela 7.14 os resultados da intensidade de corrente (mA) que passava pelos corpos-de-prova durante o ensaio de qualidade, na idade de 28 dias.

Tabela 7.14 – Intensidade de corrente que passava pelos cp_s

Tempo (h)	Leitura (h)	Argamassas		
		A (corrente em mA)	B (corrente em mA)	AJ2 (corrente em mA)
00	10:00	35	170	33
01	11:00	36	165	32
02	12:00	38	160	31
03	13:00	25	154	30
04	14:00	25	151	29
05	15:00	21	147	29
06	16:00	21	142	29
07	17:00	20	135	28
08	18:00	20	125	28
09	19:00	26	120	27
10	20:00	20	117	27
11	21:00	21	112	26
12	22:00	17	108	25
22	8:00	43 ⁽¹⁾	76	23
23	9:00	44	74	22
24	10:00	44	68	22

Nota: (1) Houve ruptura do eletrodo e, após o mesmo ser substituído, fez-se a leitura da intensidade de corrente.

Nenhuma das argamassas obteve trincas devido à corrosão da armadura e, em relação ao aparecimento de manchas de corrosão, não houve condições adequadas para essa verificação. Isso foi devido, principalmente, em função do caso, ao consumo do eletrodo durante o ensaio ou ao aparecimento de incrustações na superfície do mesmo. Não se sabendo assim, se as manchas foram resultantes da corrosão da armadura ou de reações entre os eletrodos e componentes químicos das argamassas.

Fazendo uma analogia com o trabalho de SILVA E. *et al* (1999), pode-se inferir que nenhuma das argamassas apresentou problemas de durabilidade, pois todas foram até o final do período de ensaio (24 h) sem apresentar trincas de corrosão. Porém, o revestimento usado nos cp_s deste trabalho foi de 5 cm, 2 cm a mais que os usados por aqueles autores. O que pode prejudicar uma melhor avaliação do experimento, pois a

armadura ficou muito mais bem protegida, resistindo melhor às condições degenerativas do ensaio para o tempo de 24 h.

Com relação às correntes apresentadas pelas argamassas durante o ensaio, um menor valor dessas pode revelar um melhor produto, pois dificultaria a passagem de correntes elétricas pela matriz do material (SILVA E. *et al*, 1999). Assim sendo, as argamassas A e AJ2 obtiveram melhor rendimento, sendo os resultados obtidos pela argamassa B uma possível consequência da adição de água à mistura.

7.4 Comparação entre dados obtidos nesta pesquisa com os dos fabricantes

A comparação de resultados comuns entre os dados do fabricante e os dados obtidos nesta pesquisa estão na Tabela 7.15 para a argamassa “A”, e na tabela 7.16 para a argamassa “B”. Cabe lembrar que esta pesquisa não visa a fins de controle de qualidade dos produtos industrializados, nem meio de propaganda comercial dos mesmos.

Tabela 7.15 – Análise entre os dados do fabricante e os resultados obtidos nesta pesquisa – argamassa A

Testes (Argamassa A)	Resultado do fabricante	Resultado desta pesquisa
Resistência à compressão	(NBR 5739)	(NBR 7215 (1996)) ⁽¹⁾
3 dias	16 MPa	24,4 MPa
7 dias	21 MPa	31,3 MPa
28 dias	28 MPa	33,6 MPa
Resistência à tração na flexão	(NBR 12142)	(NBR 7222 (1994)) ⁽²⁾
3 dias	-	3,55 MPa
7 dias	-	4,24 MPa
28 dias	13 MPa	6,40 MPa
Coefficiente de expansão térmica	7 a 12 x 10 ⁻⁶ /°C	(NBR 12815 (1993)) ⁽³⁾ 15,69 x 10 ⁻⁶ /°C (28 dias)
Massa específica no estado fresco	2,083 g/cm ³ ⁽⁴⁾	(NBR 13278 (1995)) ⁽⁵⁾ 2,02 g/cm ³

Notas:

- (1) NBR 7215 (1996): Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão;
- (2) NBR 7222 (1994): Resistência à tração na compressão diametral;
- (3) NBR 12815 (1993): Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear;
- (4) Varia em função da consistência adotada;
- (5) NBR 13278 (1995): Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e o teor de ar incorporado. A consistência da argamassa foi de 198 mm.

Tabela 7.16 – Análise entre os dados do fabricante e os resultados obtidos nesta pesquisa – argamassa B

Testes (Argamassa B)	Resultado do fabricante	Resultado desta pesquisa
Resistência à compressão		(NBR 7215 (1996)) ⁽¹⁾
3 dias	-	23,2 MPa
7 dias	-	27,1 MPa
28 dias	25 a 30 MPa	28,9 MPa

Nota: (1) NBR 7215 (1996): Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

CAPÍTULO 8
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 Síntese

Nos capítulos iniciais desta pesquisa, pôde-se explorar questões relativas aos tipos de patologias mais encontradas, dando ênfase à corrosão de armadura, pois devido às patologias surgiram os materiais de recuperação.

Nesse ponto, buscou-se apresentar os materiais de recuperação estrutural, com destaque para as suas propriedades, tipos de controle (ensaios) necessários para qualificar o material, locais para a sua utilização, dentre outros. Para as argamassas de recuperação, algumas propriedades de maior importância foram enfatizadas.

Posteriormente, pôde-se abordar especificamente as argamassas com a utilização de sílica ativa, sendo relatados resultados de outros trabalhos científicos ligados ao tema.

A seguir, apresentou-se a metodologia dos ensaios realizados e os materiais constituintes das argamassas desta pesquisa.

No penúltimo capítulo estão os resultados dos ensaios realizados e seus respectivos resultados, os quais são comparados com resultados de outros trabalhos científicos e faixas de valores recomendadas por outros autores. Isso visou verificar possíveis discrepâncias nos resultados encontrados nesta pesquisa e ajudar na comparação entre as argamassas.

8.2 Conclusões específicas

8.2.1 Ensaios no estado fresco

- Os teores de ar incorporados obtidos nas argamassas foram altos. Sendo nas argamassas produzidas no laboratório um provável resultado do aditivo redutor de retração;
- A consistência adotada, considerada adequada para aplicação manual, levou ao uso de adição de água nas argamassas base cimento modificadas com polímeros, principalmente na argamassa “B”, sem a qual essa não favoreceria facilidade na sua aplicação manual;

- A queda na consistência foi menor para as argamassas com s.a. e areia de granulometria mais grossa do IPT. A argamassa “A” teve a maior queda, provável resultado da adição da água ou do tempo de ensaio. De um modo geral, só duas argamassas após 45 min ainda continuaram perdendo a consistência, sendo uma de s.a com areia de granulometria fina e outra modificada com polímero;
- As massas específicas no estado fresco tiveram influência do ar incorporado e da granulometria, as com granulometria mais grossa e menor quantidade de ar incorporado obtiveram as maiores massas específicas.

8.2.2 Ensaio no estado endurecido

- A resistência à compressão axial das argamassas com sílica ativa foram influenciadas pelo uso de diferentes relações água/aglomerante e pelo uso do aditivo redutor de retração; que devido à incorporação de ar, tende a baixar a resistência à compressão. Como esperado, as resistências das argamassas com s.a. ficaram maiores que as argamassas base cimento modificadas com polímeros;
- Na resistência à tração por compressão diametral, a argamassa polimérica “A” obteve melhor resultado que as demais, fruto do uso de polímeros. Resultado esse, que poderia ser seguido pela argamassa polimérica “B”, caso não tivesse sido adicionado água;
- Na obtenção dos módulos de deformação das argamassas, não houve a correlação entre a diminuição da relação a/aglo e o aumento do módulo. Partindo do princípio de as argamassas de recuperação terem propriedades compatíveis com as do substrato de concreto, as argamassas base cimento modificadas com polímeros e as com s.a. de maior relação a/aglo são as mais compatíveis;
- Na absorção de água por capilaridade, o efeito do polímero foi marcante, sendo a argamassa “A” a que obteve menor absorção. Nas argamassas com sílica ativa, o que veio diminuir essa absorção foi a combinação de uma menor relação a/aglo, com uso de uma maior quantidade de superplastificante;
- Já na absorção de água por imersão, o polímero logrou o mesmo êxito do ensaio de absorção por capilaridade, tendo a argamassa “A” obtido os menores valores de absorção e índice de vazios. No caso das argamassas com s.a., as que tiveram melhor desempenho (IPT 040 e IPT 030), utilizaram uma maior relação a/aglo ou

uma maior quantidade de superplastificante. A granulometria também influenciou, pois a areia mais grossa, montada com a areia do IPT, mostrou-se mais adequada;

- Apesar do uso de um redutor de retração e do ensaio ter sido realizado em ambiente de laboratório e não em câmara seca, a retração livre das argamassas ficou bem acima do valor de 0,04% proposto por EMMONS *et al* (2000) – Capítulo 3. Porém, esses mesmos resultados ficaram compatíveis com outros trabalhos científicos;
- Todas as argamassas deste estudo tiveram bom desempenho no ensaio de retração restringida, pois nenhuma apresentou trincas por retração até a idade de 21 dias. E também não se desprenderam quando os prismas em que estavam aplicadas foram submetidos à flexão;
- Na aderência à tração, as argamassas base cimento modificadas com polímeros apresentaram vantagem em relação às argamassas com s.a., sendo as argamassas com sílica ativa, com maior relação a/aglo, as que tiveram melhor resultado;
- Na aderência ao cisalhamento da junta inclinada, o resultado se inverteu, sendo as argamassas com s.a. as que alcançaram melhores resultados. Entre essas, as com granulometria mais grossa se sobressaíram;
- As argamassas com uso de polímeros, principalmente a “A”, apresentaram coeficientes de dilatação térmica linear maiores que a argamassa com sílica ativa, AJ2. Resultado esse que condiz com os de POSTON *et al* (2001);
- As argamassas com maior quantidade de ar incorporado possuem menores valores de condutividade térmica, analogia semelhante ao do concreto. Porém, a falta de um valor limite para essa propriedade dificulta a verificação da qualidade das mesmas;
- Quanto ao ensaio de durabilidade, dentre o que se pôde verificar, as argamassas “A” e AJ2 foram as que apresentaram os melhores resultados.

8.3 Conclusões Gerais

- As argamassas base cimento modificadas com polímeros se sobressaíram nas propriedades de absorção de água por imersão e por capilaridade, aderência à tração, índice de vazios e na resistência à tração por compressão diametral;
- Já as argamassas com sílica ativa tiveram destaque na retenção de consistência, resistência à compressão axial, retração livre, resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada e coeficiente de dilatação térmica linear;

- As argamassas com sílica ativa estudadas, de uma forma geral, possuem desempenho satisfatório, e apesar de não poderem, em certas propriedades, igualar-se às argamassas base cimento modificadas com polímeros, podem desempenhar papel importante em determinados sistemas de reparo.

8.4 Sugestões para futuros trabalhos

Considerando o aumento do mercado para recuperação de estruturas, é necessário maior quantidade de dados disponíveis sobre as argamassas de recuperação existentes no mercado, bem como estabelecer quais os requisitos mínimos a serem estudados nas argamassas que poderão surgir futuramente.

Neste contexto, pode-se vislumbrar outras pesquisas/estudos utilizando argamassas de recuperação, tais como:

- Elaboração de normalização específica para ensaios e controle de qualidade das argamassas para recuperação estrutural;
- Análise de outros tipos de faixas granulométricas e de areias. Utilização de areias com granulometrias “montadas”, e não simplesmente de outra granulometria encontrada na natureza;
- Verificação da viabilidade econômica da produção em maior escala das argamassas com sílica ativa, utilizando uma areia de granulometria definida obtida na região;
- Análise de todas as argamassas deste estudo com relação a ensaios de durabilidade, tais como: carbonatação e corrosão de armadura;
- Aplicação destas argamassas em campo para verificação do seu comportamento em um sistema de reparo;
- Maiores estudos sobre os procedimentos do ensaio de retração livre para as argamassas de recuperação.

ANEXO A
ANÁLISE ESTATÍSTICA

1 Introdução

A análise estatística foi elaborada visando, principalmente, dar embasamento às comparações entre os resultados das argamassas deste estudo, em determinados ensaios.

Utilizou-se então a análise de variância (ANOVA) para uma comparação geral, e o teste de Duncan para uma comparação em subgrupos em função dos valores obtidos nos ensaios.

Neste anexo, estão os resultados numéricos provenientes do programa estatístico SPSS versão 8.0. Adotou-se o nível de significância de 5%.

2 Resistência à compressão axial e à tração na compressão diametral

Foi realizado ANOVA (análise de variância) para comparar as médias de resistência à compressão e à tração nas idades 3, 7 e 28 dias, segundo o tipo de argamassa e o número de repetições (Tabela A1).

Tabela A1 – tabela ANOVA para resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral das argamassas e repetições estudadas

Modelo	Efeito Argamassa		Efeito Repetição	
	F	P valor	F	P valor
Resist. à compressão – 3 dias	23,112	0,000 ³	0,625	0,652
Resist. à compressão – 7 dias	14,357	0,000 ³	2,354	0,098
Resist. à compressão – 28 dias	20,787	0,000 ³	1,976	0,144
Resist. à tração – 3 dias	4,167	0,013 ¹	1,381	0,285
Resist. à tração – 7 dias	1,850	0,160	1,872	0,165
Resist. à tração – 28 dias	14,610	0,000 ³	1,875	0,161

Notas:

(1) $P < 0,05$; (2) $P < 0,01$; (3) $P < 0,001$;

Quanto menor o valor de P, menor a possibilidade de os resultados (das argamassa ou repetições) serem iguais.

Os resultados encontrados indicam existir diferenças entre as médias por tipo de argamassa para todas as comparações, menos para a resistência à tração na compressão diametral para a idade de 7 dias. Em nenhum dos casos, houve diferença estatística significativa entre as repetições.

Na tabela A2 estão os resultados do teste não paramétrico de Duncan, que determina a diferença entre os tipos de argamassas.

Tabela A2 – Teste de Duncan para resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral das argamassas estudadas

Modelo	Subgrupo 1	Subgrupo 2	Subgrupo 3	Subgrupo 4
Resist. Compressão – 3 dias	AJ2 IPT 030	IPT 030 B A	IPT 040	-
Resist. Compressão – 3 dias	B AJ2	AJ2 A	IPT 035 IPT 030	IPT 040
Resist. Compressão – 3 dias	B	AJ2 A	IPT 040 IPT 035 IPT 030	-
Resist. Tração – 3 dias	AJ2 IPT 030	IPT 030 IPT 035 IPT 040 B	IPT 040 IPT 035 A B	-
Resist. Tração – 28 dias	AJ2 IPT 040 B	B IPT 035 IPT 030	A	-

3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios

Na tabela A3 está a análise de variância e na Tabela A4 o teste de Duncan. Esses ensaios foram realizados na idade de 28 dias das argamassas.

Tabela A3 – Tabela ANOVA para a absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios das argamassas e repetições estudadas

Modelo	Efeito Argamassa		Efeito Repetição	
	F	P valor	F	P valor
Absorção de água	1245,062	0,000 ¹	0,276	0,841
Massa específica	358,181	0,000 ¹	1,222	0,341
Índice de vazios	1518,567	0,000 ¹	0,65	0,978

Nota: (1) P<0.001.

Tabela A4 – Teste de Duncan para a absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios das argamassas estudadas

Modelo	Subgrupo 1	Subgrupo 2	Subgrupo 3	Subgrupo 4	Subgrupo 5
Absorção de água por imersão	A	IPT 040 IPT 030	B	IPT 035	AJ2
Massa específica	B	A	AJ2	IPT 040 IPT 035 IPT 030	-
Índice de vazios	A	B IPT 040 IPT 030	AJ2 IPT 035	-	-

Os resultados encontrados indicam existir diferenças entre as médias por tipo de argamassa para todas as comparações. E em nenhum dos casos houve diferença estatística significativa entre as repetições.

4 Resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada e à tração

Na tabela A5 está a análise de variância e na Tabela A6 o teste de Duncan. Esses ensaios foram realizados na idade de 7 dias das argamassas.

Tabela A5 – Tabela ANOVA para resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada e à tração

Modelo	Efeito Argamassa		Efeito Repetição	
	F	P valor	F	P valor
Resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada	18,667	0,000 ¹	1,023	0,434
Resistência de aderência à tração direta	7,679	0,000 ¹	1,310	0,267

Nota: (1) P<0.001.

Tabela A6 – Teste de Duncan para resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada e à tração

Modelo	Subgrupo 1	Subgrupo 2	Subgrupo 3
Resistência de aderência ao cisalhamento da junta inclinada	A B	A AJ2	IPT 040 IPT 035 IPT 030
Resistência de aderência à tração direta	IPT 030	AJ2 IPT 040 IPT 035	AJ2 A B

Os resultados encontrados indicam existir diferenças entre as médias por tipo de argamassa para todas as comparações. E, em nenhum dos casos, houve diferença estatística significativa entre as repetições.

5 Retração Livre

Na tabela A7 está a análise de variância e na Tabela A8 o teste de Duncan. Esse ensaio foi realizado para as idades de 3, 7 e 28 dias das argamassas.

Tabela A7 – Tabela ANOVA para o ensaio de retração livre

Modelo	Efeito Argamassa		Efeito Repetição	
	F	P valor	F	P valor
Retração livre – 3 dias	28,052	0,000 ¹	3,263	0,022 ²
Retração livre – 7 dias	41,101	0,000 ¹	1,781	0,155
Retração livre – 28 dias	148,737	0,000 ¹	1,411	0,256

Notas: (1) Valor de $P < 0,001$;

(2) Valor de $P < 0,05$.

Tabela A8 – Teste de Duncan para o ensaio de retração livre

Modelo	Subgrupo 1	Subgrupo 2	Subgrupo 3	Subgrupo 4
Retração livre – 3 dias	IPT 035 IPT 030	IPT 040 IPT 035	A B	AJ2
Retração livre – 7 dias	A IPT 035	A	AJ2	IPT 040 IPT 030
Retração livre – 28 dias	A	B IPT 040 IPT 030	AJ2 IPT 035	-

A análise estatística da retração livre das argamassas indica haver diferenças entre as médias por tipo de argamassa para todas as comparações. Houve, porém, efeito da repetição para a idade de 3 dias, indicando variabilidade fora do padrão do experimento. Isso pode ser resultado da desforma de 47 h da argamassa IPT 030, sendo que as demais foram desformadas em 23 h.

Na Figura A1 encontra-se o gráfico (*box-plot*) que esclarece a variabilidade dos dados na repetição, idade de 3 dias.

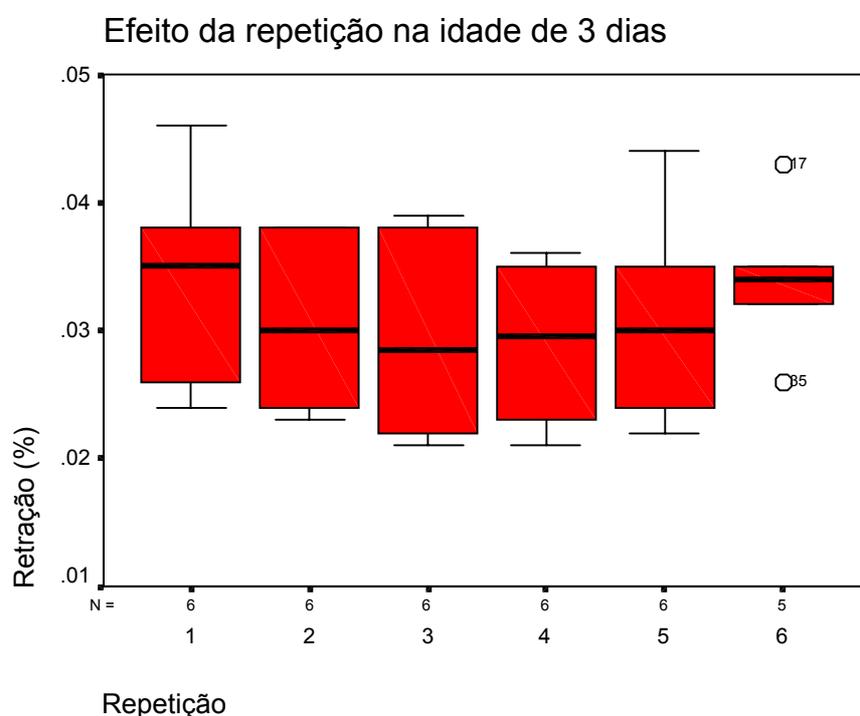


Figura A1 – Mostra a variação dos resultados das repetições, na idade de 3 dias, para o ensaio de retração livre.

Analisando o gráfico da figura A1, verifica-se uma pequena variabilidade entre as medianas¹ (traços pretos horizontais que separam as caixas vermelhas em duas). Os círculos fora das caixas são pontos discrepantes, sendo esses os possíveis responsáveis pela diferença detectada.

¹ Mediana: é o valor situado de tal forma no conjunto, que o separa em dois subconjuntos de mesmo número de elementos (CRESPO, 1996).

6 Absorção de água por capilaridade

Na tabela A9 está a análise de variância e na Tabela A10 o teste de Duncan. Esse ensaio foi realizado no tempo de 72 h.

Tabela A9 – Tabela ANOVA para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Modelo	Efeito Argamassa		Efeito Repetição	
	F	P valor	F	P valor
Capilaridade – 72h	72,030	0,000 ¹	3,712	0,035 ²

Notas: (1) Valor de $P < 0,001$;
(2) Valor de $P < 0,05$.

Tabela A10 – Teste de Duncan para o ensaio de absorção de água por capilaridade

Modelo	Subgrupo 1	Subgrupo 2	Subgrupo 3	Subgrupo 4	Subgrupo 5
Capilaridade – 72 h	A	B IPT 030	AJ2	IPT 040	IPT 035

A análise estatística da absorção de água por capilaridade das argamassas revela haver diferenças entre as médias por tipo de argamassa para todas as comparações. Porém, houve efeito da repetição, indicando variabilidade fora do padrão do experimento. Isso pode ser resultado da temperatura do ambiente mais alta (ou baixa) que o normal no dia do ensaio de alguma argamassa.

Na Figura A2, encontra-se o gráfico (*box plot*) que esclarece a variabilidade dos dados na repetição, no tempo de 72 h, para o ensaio de retração.

Analisando o gráfico da figura A2, verifica-se uma pequena variabilidade entre as medianas; podendo, novamente, os pontos discrepantes² serem os causadores da diferença detectada.

² Pontos discrepantes são valores entre $Q3 + 1,5(Q3-Q1)$ e $Q3 + 3,0(Q3-Q1)$ ou entre $Q1 - 1,5(Q3-Q1)$ e $Q1 - 3,0(Q3-Q1)$, onde $Q1$ e $Q3$ são o primeiro e o terceiro quartil, respectivamente. O primeiro quartil é o valor situado de tal forma na série, que 25% dos termos são menores que ele, e terceiro quartil é o valor situado de tal modo na série, que 75% dos termos são menores que ele (CRESPO, 1996).

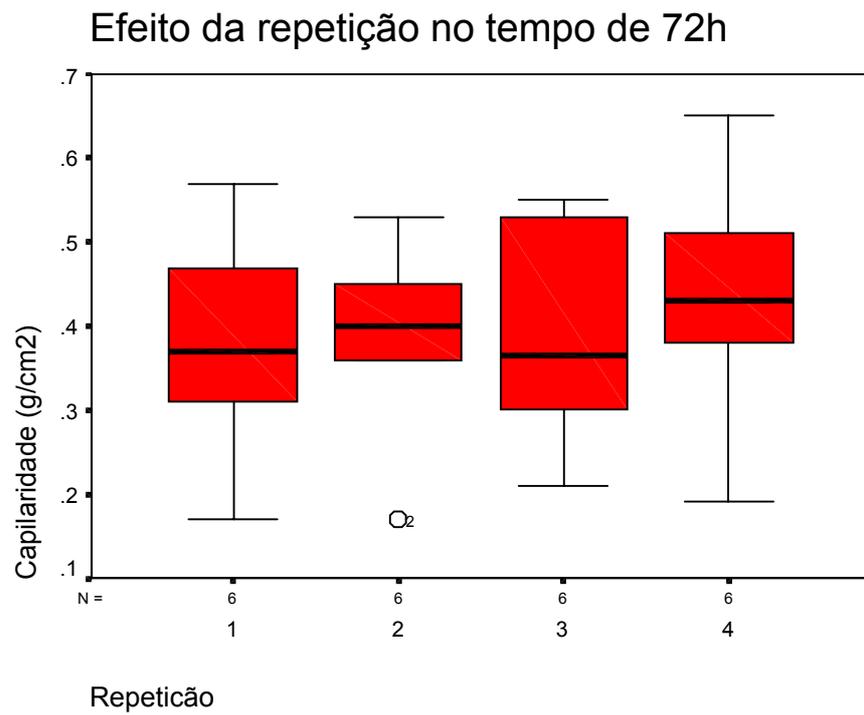


Figura A2 – Mostra a variação dos resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade no tempo de 72 h.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

As referências bibliográficas serão apresentadas nesta dissertação da seguinte maneira: inicialmente serão citadas as referências que efetivamente fazem parte do corpo de embasamento teórico da dissertação e, posteriormente, aquelas relativas às normas técnicas e métodos utilizados para o desenvolvimento dos trabalhos experimentais.

Referências bibliográficas

ABU-TAIR, A. I., RIGDEN, S. R., BURLEY, E. *Testing the Bond Between repair Materials and concrete Substrate*. **ACI Material Journal**, v. 93, n. 6, p. 553-558, nov/dez, 1996.

ABU-TAIR, A. I., LAVERY, D., NADJAY, A., RIGDEN, S. R., AHMED, T. M. A. *A New Method for Evaluating the Surface Roughness of Concrete Cut for Repair or Strengthening*. **Construction and Building Materials – Elsevier Science**, v. 10, n. 1, 2000. p. 57-67.

AGOSTINI, L. R. S. de, NUNES, N. L. Métodos de Cura para Concretos de Alta Resistência. **Revista IBRACON**, n. 14, agosto/setembro, 1996. p. 23-30.

AGUADO, Antônio, AGULLÓ, Luiz, CÁNOVAS, Manuel F., SALLA, J. Maria. *Diagnóstico de Daños Y Reparación de Obras Hidráulicas de Hormigón*. Madrid – Espanha: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Portos, 1996. ISBN: 84-380-0109-2

ALHOZAIMY, A., SOROUSHIAN, P., MIRZA, F. *Effects of Curing Conditions and Age on Chloride Permeability of Flay Ash Mortar*. **ACI Materials Journal**, v. 93, n. 1, Janeiro/fevereiro, 1996. p. 87-95.

ALMEIDA, I. R. Superplastificantes, Microsílica e Durabilidade dos Concretos. **Revista Téchné**, set/out - 1996. p. 30-33.

AMARAL, C. K. do, TEZUCA, Y. **O comportamento de Argamassas com e sem Microsílica Imersas em Ácidos Orgânicos**. São Paulo: EPUSP, 1992. (BT/PCC/83)

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armadura**. Traduzido e adaptado por Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini, 1992. ISBN: 85-7266-011-9

ANDRADE, J. J. de O. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco**. (Dissertação). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997. 148 p.

ANDREZ, P. R. A Influência da Natureza do Aglomerante e suas Adições na Carbonatação de Argamassas e Concretos. **In: Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, IX, 1989, São Paulo. Anais ...** São Paulo, 1989. p. 19-42.

BARONIO, G., MANTEGAZZA, G., CARMINATI, G. *Mechanical Properties and Durability of Superplasticized Silica Fume Mortars*. In: RILEM. Admixtures for Concrete – Improvement of Properties. Editora Chapman and Hall: Barcelona, 1993. ISBN 0-412-37410-2.

BASHEER, L., KROPP, J. CLELAND, D. J. *Assesment of the Durability of Concrete From its Permeation Properties: A Review*. **Concrete and Building Materials – Elsevier Science**, v. 15, 2001. p. 93-103.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. v. 1, 5 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1987. ISBN: 85-216-0560-9.

BAUER, E. Análise Comparativa do Comportamento de Concretos Adicionados com Escória Frente à Corrosão de Armaduras. In: 4º Congresso Brasileiro de Cimento, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1996. p. 37-56.

BENNISON, P. *Workability and mixing of materials for the repair of defective concrete*. In: RILEM – *Special Concretes: Workability and Mixing*. Great Britain, 1994. p.239-248.

BEZZERA, J. A. Alexandrino. **Estruturas de Concreto Armado: Patologia e Recuperação**. Fortaleza, 1998. 243 p.

BICKLEY, J. A. *Strategies for the maintenance of repaired structures: a Canadian perspective*. **Construction and Building Materials – Elsevier Science**, v. 10, n. 1, 1996. p. 89-94.

BISSONNETTE, B., PIERRE, P., PIGEON, M. *Influence of Key Parameters on Drying Shrinkage of Cementitious Materials*. **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, v. 29, 1999. p. 1655-1662.

CABRAL, A. E. B., DAL MOLIN, D. C. C., BAUER, E. **Avaliação de aspectos mecânicos de argamassas de reparo utilizadas em estruturas de concreto armado**. In: ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2000, Salvador. **Anais...** Salvador – BA, 2000 (CD – ROM).

CAMPBELL, A. D., ROPER, H. **Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair**. New York – EUA: Longman Scientific & Technical, 1991. 369 p. ISBN 0-582-05067-7.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do Concreto**. Boletim Técnico – 09/87, EPUSP – Departamento de Engenharia de Construção Civil. 1987. 15p.

CARASEK, H. Fatores que exercem influência na resistência de aderência de argamassas. In: II Simpósio brasileiro de tecnologia das Argamassas, 1997, Salvador. **Anais ...** Salvador, 17 e 18 de abril, 1997. p. 133-146.

CARNEIRO, E. F., ANDRADE, J. R. A., ALMEIDA Jr., W. Avaliação do Desempenho dos Reparos Executados na Soleira do Vertedouro da UHE Porto Primavera. **In:** 38° REIBRAC - IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 1996, Ribeirão Preto – SP. **Anais...** Ribeirão Preto, 1996. p. 393-398.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: Pini, 1997. 237 p. ISBN: 85-7266-080-1.

CHEN, S. W., PERBIX, W., GROSSKURTH, K. P. *The interface and Adhesive Strength Between Reactive Resin and Concrete.* **In:** RILEM. Interfaces in Cementitious Composites. Grã-Betanha, 1993. 315 p. ISBN 0-419-18090-7.

CLÍMACO, J. C. T. de S. Uma Análise Crítica dos Métodos de Avaliação de Aderência e do Uso de Agentes Adesivos no Reparo de Estruturas de Concreto. **In:** XXV – Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, 1991, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1991. p. 337-348.

CLÍMACO, J. C. T. de S. Controle da Aderência do Concreto Projetado ao Original em Reparos Estruturais. **In:** 36° Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1994.

COLLEPARDI, M. **A durabilidade em Questão.** Tradução de André Andrade. Revista Técnica, n. 38, jan/fev.1999.

CONCRETE REPAIR ASSOCIATION. *European standards for repair and protection of concrete.* 2001. **Concrete Repair Association** [on line], dia 13 de agosto de 2001. Disponível: www.concreterepair.org.uk [capturado dia 13/08/2001].

CRESPO, A. A. **Estatística fácil.** São Paulo: Editora Saraiva, 1996.

CZARNECKI, L., VAYSBURD, A. M., MAILVAGANAM, N. P., EMMONS, P. H., MCDONALD, J. E. *Repair and rehabilitation of structures – Some random thogh,* janeiro de 2000. Disponível: http://www.icjonline.com/techpapers/2001/january/paper9/jan01_9.htm [capturado em 11/08/01].

DECTER, M. H., KEELEY, C. *Durable concrete repair – Importance of compatibility and low shrinkage.* **Construction and Building Materials**, v. 11, p. 267-273, julho. 1997.

DECTER, M. H., KEELEY, C. *Durable Concrete Repair – Importance of Compatibility and Low Shrinkage.* **Elsevier Science**, 1999.

DÓREA, Sandra C. L., SILVA, Laércio F. Estudo sobre índices de patologias das construções – Paralelo entre a situação mundial e a brasileira. **In:** *V Congresso Iberoamericano de Patologias de Las Construcciones / VII Congreso de Control de Calidad*, 1999, Montevideo. **Anais ...** Montevideo, 1999. p. 609-616.

EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M. *System concept in design and construction of durable concrete repairs*. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, 1996. p. 69-75.

EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M., McDONALD, J. E., POSTON, R. W., KESNER, K. E. *Selecting durable repair materials: performance criteria*. **Concrete International**. Março, 2000. p. 38-45.

FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. Patologia e terapia do concreto armado. Coordenação técnica de L. A. Falcão Bauer e tradução de Maria C. Marcondes, Carlos W. Fernandes dos Santos e Beatriz Cannabrava. São Paulo: PINI, 1988. 522 p.

FIGUEIREDO, A. D. **Metodologia de Avaliação do desempenho de Grautes de Base Mineral**. In: IX Simpósio Nacional de Tecnologia das Construções, 1989, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP, 1989. p. 47-65.

FIGUEIREDO, C. R. **Contribuição ao Estudo da Capacidade de Proteção de Argamassas com Silica Ativa para Reparos Estruturais**. 1998. 155 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil da UNB.

FORTES, L. R., ANDRADE, J. C. **Corrosão da Armadura do Concreto Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação**. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br>> Acesso em: 04/2000.

GALEMBECK, F. Adesão de Superfícies. **Ciência Hoje**, v. 4, n. 19, julho/agosto 1985. p. 26-31.

GALLEGOS, H. *Adhesión Entre El Mortero y Las Unidades de Albañilería*. In: I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1995. p. 117-113.

GARCIA, S. R. do A. **Avaliação da Resistência de aderência de materiais para reparos de estruturas de Concreto**. 1998. 159 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Distrito Federal.

GARCIA, S. R. A., CLIMACO, J. C. T. S. Eficiência da aderência de materiais de reparo para estruturas de concreto. In: 43º IBRACON – Congresso Brasileiro do Concreto, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu – PR, 2001. (CD-ROM)

GASTALDINI, A. L. G., ROSSES, M. F., SACIOTO, A. P., BILHALVA, A. M. I. Influência das Adições Mineraias na Porosidade de Pastas de Cimento Portland. In: 4º Congresso Brasileiro de Cimento, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1996. p. 119-136.

GASTALDINI, A. L. G., ISAIA, G. C. Comportamento de Argamassas com Adições Mineraias Submetidas a Ataques de Sulfato de Sódio. In: VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 98, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis - SC: UFSC, 1998a. p. 45-53.

GASTALDINI, A. L. G., ISAIA, G. C. Porosidade de Pastas Compostas de Misturas Binárias e Ternárias de Adições Minerais. **In:** VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 98, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis - SC: UFSC, 1998b. p. 35-43.

GODOY, E. H. P. de, BARROS, M. M. S. B. de. Proposta de Procedimento de Ensaio para Avaliação do Módulo de Deformação de Argamassas. **In:** 3º Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 1999, Vitória. **Anais ...** Vitória – ES, 1999. v. 1, p. 159-167.

GOULART NETO, A. A., GONÇALVES, J. P., NASCIMENTO, J. F. F. do, TRABOULSI, M. A., GÓZ, R. S. Reparos com Argamassa de Cimento e Microssílica. **In:** 37º REIBRAC - IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1995. p. 585-598.

GRIGOLI, A. S., HELENE, P. do L., DJANIKIAN, J. G. Durabilidade dos Concretos Quanto à Penetração de Íons Cloretos, Executados com Agregado Miúdo Muito Fino. **In:** 43º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais ...** Foz do Iguaçu – PR, 2001. (CD-ROM)

HASSAN, K. E., ROBERY, P. C., AL-ALAWI, L. *Effect of Hot-Dry Curing Environment on the Intrinsic Properties of Repair Materials.* **Cement & Concrete Composites – Elsevier Science**, v. 22, 2000. p. 435-458.

HELENE, P. R. do L. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto.** 2.ed. São Paulo: Pini, 1992. 213p.

HELENE, P. R. do L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado** (Livre Docência). São Paulo, 1993. 231 p.

HELENE, P. R. do L. Vida útil das estruturas de concreto. **In:** Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, IV – COMPAT 97, 1997, Porto Alegre. **Anais ...** Porto Alegre, 1997. v. 1, p. 1-30.

HISADA, M., NAGATAKI, S., OTSUKI, N. *Evaluation of Mineral Admixtures on the Viewpoint of Chloride Ion Migration Through Mortar.* **Cement and Concrete Composites – Elsevier Science**, 1999. p. 443-448.

IGARASHI, S., KUBO, H. R., KAWAMURA, M. *Long-Term Volume Changes and Microcracks Formation in High Strength Mortars.* **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, v. 30, 2000. p. 943-951.

KANNA, V., OLSON, P. A., JENNINGS, H. M. *Effect of Shrinkage and Mixture Content on the Physical Characteristics of Blended Cement Mortars.* **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, v. 28, n. 10, 1998. p. 1467-1477.

KAY, T. *Assesment and Renovation of Concrete Structures.* Inglaterra: Logman Scientific & Technical, 1992.

KHATIB, J. M., MANGAT, P. S. *Influence of Superplasticizer and Curing on Porosity and Pore Structure of Cement Paste*. **Cement & Concrete Composites – Elsevier Science**, v. 22, 1999. p. 431-437

KROPP, J. *Chlorides in Concrete*. In: KROPP, J. HILSDORF, H. K. (org). *Performance Criteria for Concrete Durability*. RILEM – Report 12, 1995. ISBN 0-419-19880-6

KULAKOWSKI, M. P. **Argamassas com Adição de Microsilica para Reparos Estruturais: Estudo da Penetração de Cloretos**. 1994. 131 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da UFRGS.

LAMB, R. W. *International Developments in Materials and Methods for the Repair of Concrete*. In: IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, 1989, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1989. p. 125-172.

LEVY, S., HELENE, P. R. L. Restauração e recuperação de estruturas de concreto armado de escolas estaduais no Estado de São Paulo. **Revista Técnica**, n. 47, jul/ago. 2000. p. 53-58.

MANGAT, P. S., LIMBACHIYA, M. C. *Repair Material Properties Which Influence of Concrete Structures*. **Construction and Building Materials – Elsevier Science**, v. 9, n. 2, 1995. p. 81-90.

MANGAT, P. S., LIMBACHIYA, M. C. *Repair Material Properties for Effective Structural Application*. **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, v. 27, n. 4, 1997. p. 601-617.

MANGAT, P. S., LIMBACHIYA, M. C. *Effect of Initial Curing on Chloride Diffusion in Concrete Repair Materials*. **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, v. 29, 1999. p. 1475-1485.

MANGAT, P. S., O'FLAHERTY, F. J. *Influence of Elastic Modulus on Stress redistribution and Cracking in Repair Patches*. **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, v. 30, 2000. p. 125-136.

MEDEIROS, M. H. F., SELMO, S. M. S. Desempenho de Argamassas para Recuperação de Estruturas de Concreto com Corrosão das Armaduras. In: 43º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu – PR, 18 a 23 de agosto de 2001 (CD-ROM).

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. ISBN 85-7266-040-2.

MIRZA, J., DURAND, B. *Evaluation, Selection and Installation of Surface Repair Mortars at a Dam Site*. **Construction and Building Materials – Elsevier Science**, 1994. v. 8, n. 1, p. 17-25.

MONTEIRO, E., PIMENTEL, H., BENICIO, A., HELENE, P. R. L. Estudo da Influência do Tipo de Cimento em Relação à Frente de Penetração de Íons Cloretos. **In:** CONPAT 99, 1999, Montevideo, **Anais...** Montevideo, 1999. p. 297-304.

MORENO Jr, R., SELMO, S. M. S. Reparos Localizados Superficiais em Estruturas de Concreto – Análise da Aderência Segundo Métodos de Ensaio Distintos. **In:** 43º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu – PR, 2001. (CD-ROM)

MORGAN, D. R. *Compatibility of concrete repair materials and systems.* **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, 1996. p. 57-67.

NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto.** 2º edição. São Paulo: Pini, 1997. 828 p. ISBN: 85-7266-068-2.

OLIVEIRA, P. S. F. **Preparo de Substrato e Metodologia de Reparos.** **In:** IX Simpósio Nacional de Tecnologia das Construções, 1989, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP, 1989. p. 69-82.

OLIVEIRA, P. S. F., GUIMARÃES, F. A. P., MAGRINI FILHO, C. R. **Desenvolvimento de Materiais e Métodos para Recuperação e Proteção de Estruturas de Concreto Armado, com Danos Causados por Corrosão de Armadura.** **In:** 34º IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 1992. p. 447-466.

PACELLI, W. de A. (editor), **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** São Paulo: Pini, 1997. ISBN 85-7266-069-0.

PEREIRA NETO, P. M., DJANIKIAN, J. G. **Algumas Propriedades do Concreto de Alta Resistência com Microssilica.** São Paulo: EPUSP, 1995. (BT/PCC/143)

POSTON, R. W., KESNER, K., McDONALD, J. E., VAYSBURD, A. M., EMMONS, P. H. *Concrete repair material performance – Laboratory study.* **ACI Material Journal.** Março/abril, 2001. p. 137-147.

RAO, G. A. *Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Expansion and Drying Shrinkage.* **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, 1998. v. 28, n. 10, p. 1505-1500.

RAMAr-SEAMA. **Relatório da rede automática de monitoramento da qualidade do ar.** Dados da estação 2 – situada em Carapina, Serra – ES, fornecidos pela SEAMA – Secretaria Especial para Assuntos do Meio Ambiente. 2001.

RAO, G. A. *Influência of Silica Fume on Long-Term Strength of Mortars Containing Different Aggregate Fractions.* **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, 2001a. p. 7-12.

RAO, G. A. *Development of Strength With Age of Mortars Containing Silica Fume.* **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, 2001b. p. 1141-1146.

RAO, G. A. *Long-Term Drying Shrinkage of Mortar – Influence of Silica Fume and Size of Fine Aggregate*. **Cement and Concrete Composites – Elsevier Science**, v. 31, 2001c. p. 171-175.

REGATTIERI, C. E. X., SILVA, M. G., HELENE, P. R. L., AGOPYAN, V., ABREU, J. V. Influência do Tipo de Cimento na Resistência, na Absorção Capilar e na Difusão de Cloretos dos Concretos Plásticos. **In: 4º Congresso Brasileiro de Cimento**, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1996. p. 37-56.

REPETTE, W. L., LIMA, M. G., MATOS, O. C. **Recomendações para Reparo de Estruturas de Concreto com Armadura Corroída**. **In: 4º Seminário de Corrosão na Construção Civil**, Rio de Janeiro, 1990. **Anais...** Rio de Janeiro, Associação Brasileira da Corrosão – ABRACO, 1990. p. 158-73.

ROBERY, P., SHAW, J. *Materials for the Repair and Protection of Concrete Construction and Building Materials – Elsevier Science*, v. 11, n. 5-6, 1997. p. 275-281

ROCHA, C. de C. Durabilidade – Palavra bonita, mas muito pouco Compreendida. **Revista Recuperar**, março/abril 1997. p. 28-34.

RODRIGUES, J. C. Corrosão tem fim. Use Proteção Catódica. **Recuperar**, p. 5-8, nov./dez. 1994.

SCHULER, A. **Caracterização de Argamassas com Adição de Sílica Ativa como Material para Reparos e Reforços de Estruturas de Concreto Armado**, 1998. 142 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação da UFRGS.

SERRA, E. T. Corrosão do Aço, um risco para as Estruturas. **Revista Ibracon**. n. 3, p. 57-61, jan./fev./mar. 1992.

SILVA, E., MORAIS, D., GUIMARÃES, M. C., ANDRADE, R., ANDRADE, J. Avaliação dos sistemas de reparo para correção de problemas patológicos em estruturas de concreto armado. **In: 41º REIBRAC – IBRACON: Congresso Brasileiro do Concreto**, 1999, Salvador. **Anais...** Salvador – BA, 1999. (CD-ROM)

SILVA JUNIOR, J. Z. R. **Argamassas para reparo de estruturas de concreto**. São Paulo, 2001. 145 p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SOUZA, R. H. F., APPLETON, J. A influência das propriedades físicas e mecânicas dos sistemas de reparo no comportamento estrutural de vigas de concreto armado reparadas. **In: 43º IBRACON, Congresso Brasileiro do Concreto**, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais ...** Foz do Iguaçu, 18 a 23 de agosto, 2001. (CD-ROM)

STORE, M. Considerando o Meio Ambiente. **Revista Ibracon**. n. 1, p. 39 a 41, jul./ago. 1991.

SVENKERUD, P. J., FIDJESTOL, P., ARTIGUES, J. C. *Microsilica Based Admixtures for Concrete*. In: RILEM. Admixtures for Concrete – Improvement of Properties. Editora Chapman and Hall: Barcelona, 1990. ISBN 0-412-37410-2.

TARALLO Jr., J., ANDRADE, J. R. A., CARNEIRO, E. F., OLIVEIRA, P. J. R., SALLES, F. M. Reparos em Concreto, Utilizando Argamassa com Microssilica. In: 36° REIBRAC - IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1994. p. 184-198.

TENESI, J. **A influência das Fibras de Polipropileno no Controle da Fissuração por Retração**. 1999. 132 p. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil.

TORII, K., KAWAMURA, M. *Effects of Fly Ash and Silica Fume on the Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack*. **Cement and Concrete Research – Elsevier Science**, 1994. v. 24, n. 2, p. 361-370.

USACE. *Planning and Design of concrete repair – Chapter 4, 30 jun 1995*. Disponível: <http://www.usace.army.mil> [capturado em 09/11/01].

VAYSBURD, A. M., EMMONS, P. H. *Visible and invisible problems of concrete repair*, janeiro de 2001. Disponível: http://www.icjonline.com/techpapers/2001/january/paper10/jan01_10.htm [capturado em 11/08/01].

WHITEWAY, P. *Building a better bridge*. American Metal Market, 11 de abril de 2000. **Findarticles.com** [on line], dia 10 de agosto de 2001. Disponível: http://www.findarticles.com/cf_0/m3MKT/69_108/61643345/print.jhtml [capturado em 10/08/2001].

Referências bibliográficas das normas técnicas e métodos

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 881 – 91**; Standard specification for Epoxy-Resin-Base systems for concrete. Philadelphia, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 882 – 91**; *Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete by Slant Shear*. Philadelphia, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1042– 91**; *Standard Test Method for Bond Strength of Latex Systems Used With Concrete by Slant Shear*. Philadelphia, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3483**. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Projeto de revisão. Rio de Janeiro, agosto de 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6474**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7216**. Amostragem de agregado. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**. Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**. Agregado – Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7220**. Agregado – Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7221**. Agregado – Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**. Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7224**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da área específica. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**. Agregado no Estado Solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8490**. Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**. Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão – deformação. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776**. Agregado – Determinação da massa específica de agregado miúdo por meio do frasco de Chapmam. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**. Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9941**. Redução da amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**. Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**. Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11580**. Cimento Portland - Determinação da água da pasta de consistência normal. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11581**. Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**. Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12815**. Concreto endurecido - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12820**. Concreto endurecido - Determinação da condutividade térmica. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**. Revestimento de paredes e tetos em argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956**. Sílica ativa para uso em cimento, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificações. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 47**. Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 1998.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)