MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS

**ESTRUTURAS DE CONCRETO COM CORROSÃO DE
ARMADURAS POR CARBONATAÇÃO: COMPARAÇÃO
DE ARGAMASSAS DE REPARO QUANTO À
PROTEÇÃO DO AÇO**

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

São Paulo
2002

MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS

**ESTRUTURAS DE CONCRETO COM CORROSÃO DE
ARMADURAS POR CARBONATAÇÃO: COMPARAÇÃO
DE ARGAMASSAS DE REPARO QUANTO A
PROTEÇÃO DO AÇO**

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

Área de concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:
Professora Dr^a Silvia Maria de Souza Selmo

São Paulo
2002

FICHA CATALOGRÁFICA

Medeiros, Marcelo Henrique Farias de
Estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação: comparação de argamassas de reparo quanto à proteção do aço / Marcelo Henrique Farias de Medeiros. – São Paulo, 2002.
193p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1. Recuperação de estruturas 2. Argamassa de reparo 3. Estruturas reparadas [Durabilidade] I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t

Dedico este trabalho às três mulheres da minha vida, Olívia Regina Farias de Medeiros (mãe falecida em 05/01/1988), Helena Farias de Medeiros (avó materna falecida em 01/04/2000), Helena Farias de Medeiros e Silva (irmã), pela contribuição de extrema importância de cada uma delas nesta minha realização pessoal.

"Não se contente em trilhar um caminho estabelecido. Ao contrário, vá para onde não há caminho algum e deixe seu rastro."

Muriel Strode

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família pela confiança e incentivo a este rumo que dei a minha vida profissional. Citando pessoas como Tia Regina, Tia Vanda, Andrezina, Vanda, Marilena, Helena, Fernando, Marlene, Felipe, Érika, Willknner, Célia e os demais membros da família Medeiros que me incentivaram e de certa forma contribuíram para a realização deste feito tão importante para a minha pessoa.

À Eride Moura e toda a sua família por ter recebido um desconhecido em sua casa e o ter tratado tão bem, dedicando toda a atenção, amizade e companheirismo. Sem estas pessoas não sei se seria viável a conclusão deste curso e, por isso, dedico minha total gratidão a elas.

Não poderia deixar de agradecer a pessoas como Joel da Silva, Seu Jura e família e Gilda Guimarães, pessoas estas a quem só tenho a dedicar total gratidão pelo fato de terem sido tão decisivas na minha escolha profissional e na condução da minha vida pessoal.

À Professora Silvia Selmo deixo o meu fiel agradecimento pela amizade e grande atenção dispensada à mim e principalmente a este trabalho. Deixo registrada a importância fundamental da orientadora para o bom andamento do estudo, fruto de longas e complexas reuniões e discussões sobre esse tema tão fascinante, que é a recuperação de estruturas de concreto armado.

À Eliana Monteiro e ao Professor Béda Barkokébas por terem plantado a primeira sementinha da sede pela pesquisa e conhecimento ao me engajarem nos três projetos de iniciação científica que participei, ainda pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco.

À Heloísa Pimentel que me encorajou a participar do exame de seleção para o curso de mestrado na USP e sem este apoio não estaria aqui, pois se tratava de um momento em que eu pensava em desistir dessa idéia e ela me fez ver que não se desiste de um sonho sem primeiro tentar realizá-lo.

Aos meus amigos Aluizio Caldas e Maria Cristiana que, por terem ingressado na Pós-graduação da POLI-USP um ano antes de mim, foram de importância fundamental no sentido de dar força e mostrar o caminho a ser seguido para chegar onde eles estavam.

Aos membros da banca examinadora do exame de qualificação (Dr. Leonel Tula, Prof. Dr. Paulo Helene e Profª Drª Silvia Selmo) pela imensa contribuição para o aperfeiçoamento do texto e encaminhamento da pesquisa.

Aos colegas da Sala Olimpo que contribuíram com este trabalho, mesmo que indiretamente e neste momento gostaria de citar pessoas como Ivie Della Pietra, Priscila Carrijo, Andréia Nince, Maria Fernanda Campos e Maurício Garcia, que se mostraram tão companheiros e, por isso, foram de importância fundamental para o sucesso deste trabalho.

Ainda me referindo à Sala Olimpo, dedico especial gratidão aos amigos Charles Siervi, Eliana Monteiro e Paulo Barbosa, que se mostraram excelentes companheiros, oferecendo apoio nas horas mais difíceis. Sobre o último aqui citado, é importante agradecer a ajuda na revisão inicial do texto.

Agradeço ao amigo Manoel Grullon pela atenção dedicada a revisão do abstract deste trabalho, além do companheirismo e amizade dedicado por este dominicano meio brasileiro.

Agradeço ao amigo Angelo Just pela amizade e dedicação, além da paciência de assistir e opinar sobre os slides referente a apresentação deste trabalho.

Aos amigos da República nordestina, Antônio Acácio e Evandro Bastos, pelo companheirismo e respeito às individualidades de cada um.

A Artemária Coelho pela ajuda na impressão dos exemplares desta dissertação, sem contar com a amizade a mim dedicada, que tenho orgulho de ter conquistado.

A todos os colegas da Pós-Graduação, cujos nomes prefiro não citar para não correr o risco de deixar alguém de fora.

Aos colegas Leonardo Miranda, Rafael Moreno Jr. e Gerusa Aguiar, também orientados pela Professora Silvia Selmo, que souberam dividir o tempo de dedicação da nossa orientadora. Ao primeiro aqui citado, faço um agradecimento especial pela ajuda no empréstimo de um estagiário para a conclusão dos trabalhos, que foi de importância fundamental nesta reta final.

Aos funcionários do laboratório Dorval Aguiar, Reginaldo Mariano, João Soares, Mário Takeashi, Renata Monte e Adilson dos Santos, pela ajuda nas horas que necessitei.

Aos estagiários Rafael Gomes, Claudio Kosoba, Carlos Reyes e Elaine Rodrigues, Vinícius Lopes e Patrícia Galeni, pela dedicação e grande contribuição tanto na execução dos ensaios laboratoriais como na organização e armazenamento dos dados. Especialmente a esta última que me acompanhou na reta final do estudo.

À FAPESP pelo incentivo fornecido através da concessão da bolsa.

Às empresas Sika, Fosroc, Otto Baumgart, Master Builders Technologies e Waker Polymer Systems pelo fornecimento dos produtos necessários para o andamento do trabalho.

RESUMO

Reparos localizados são um dos sistemas de recuperação mais usados em estruturas de concreto com corrosão de armaduras, por carbonatação, e podem ser bastante diversificados em função do preparo do substrato, tipo de argamassa, forma de aplicação e proteção final. Mas, não se tem normas que regulamentem esses serviços e nem especificação de argamassas de reparo, ainda que o mercado ofereça uma extensa gama de produtos. Neste trabalho foi feita uma análise abrangente de propriedades de treze argamassas de reparo, em dois grupos distintos quanto à fabricação: seis (6) argamassas formuladas em laboratório, com dois (2) tipos de cimento e dois (2) tipos de polímero, para o traço 1:3 e um mesmo tipo de agregado miúdo; e outras sete (7) argamassas industrializadas do mercado de São Paulo, tomando-se como referência um concreto de substrato com f_{ck} 25 MPa (a/c 0,60). As propriedades estudadas para as argamassas foram: a) de caracterização básica (curva granulométrica, densidade de massa específica e aparente, teor de álcalis solúveis, manutenção de consistência); b) de relação com a compatibilidade de deformações com o concreto (resistência à flexão, à compressão, módulo de elasticidade, resistência de aderência ao cisalhamento direto e retração por secagem); c) de relação com a estabilidade eletroquímica do aço (resistência à carbonatação, absorção de água por capilaridade e por imersão, índice de vazios, resistência à mobilidade de corrente avaliada por espectroscopia de impedância eletroquímica e por resistividade superficial pelo método Wenner). Os resultados indicaram uma grande diferença de propriedades entre as argamassas industrializadas nacionais disponíveis para a mesma finalidade, reparos localizados em estruturas de concreto armado. Isto é bem ilustrado pelo fato de algumas das propriedades terem variado tão amplamente como segue: resistência à compressão com 28 dias (22 - 108 MPa), resistência à tração na flexão com 28 dias (8 - 24 MPa), módulo de elasticidade com 28 dias (15 - 50 GPa), absorção por imersão (2,5 - 24 %), absorção de água por capilaridade (1,5 - 13 kg/m²). Quanto às argamassas formuladas em laboratório, o uso dos polímeros indicou melhora em todas as propriedades estudadas, exceto a retração por secagem, sendo o acrilato mais eficiente do que o EVA. O cimento de alta resistência inicial (CPV ARI PLUS RS) produziu argamassas com melhores propriedades do que as argamassas com cimento composto com fíler calcário (CP II-F 32). O trabalho propõe, ao final, faixas de classificação para as diversas propriedades estudadas, com base principalmente nos resultados apresentados pelas argamassas industrializadas e os limites propostos poderão servir como base futura para a evolução de uma especificação brasileira e de métodos de ensaio para argamassas de reparo.

ABSTRACT

Patch Repairs are one of the most well-spread recuperation systems used in concrete structures with steel corrosion, due to carbonation of concrete, and can be well diversified according to the substrate prepare, mortar type, application type and final protection. Nevertheless, we still do not have any normative prescribing neither these services nor any specification for these products, even having an extensive line of products. For this research was done an ample analysis of the properties for thirteen repair mortars, in two different groups according to the type of fabrication: six (6) laboratory-formulated repair mortars, with two (2) types of cement and two (2) types of polymers, for the mix proportion 1:3 and a same type of fine aggregate; and seven (7) industrialized repair mortars from the São Paulo market, having as reference a concrete substrate with a f_{ck} 25 MPa (w/c 0,60). The properties studied for the mortars were: a) basic characterization (granulometry, bulk and apparent mass density, alkali content, consistency retention); b) related to the compatibility of deformations with concrete (flexural strength, compressive strength, elasticity modulus, shear bond and drying shrinkage); c) related to electrochemical stability of the steel reinforcement (carbonation resistance, water absorption by capillarity and by immersion, air content, resistance to the flow of electrical current measured by electrochemical impedance spectroscopy and by surface resistivity measured by the Wenner method). The results indicated significant differences in the properties among national industrialized mortars available for the same final use, patch repairs in concrete structures. This can be well explained with the fact that some properties varied as follows: compressive strength at 28 days (22 – 108 MPa), flexural tensile strength at 28 days (8 – 24 MPa), elasticity modulus at 28 days (15 – 50 GPa), water absorption by immersion (2,5 – 24 %), and water absorption by capillarity (1,5 – 13 Kg/m²). Referring to the laboratory-formulated mortars, the use of polymers indicated improvements in every property but in drying shrinkage, being acrylate more efficient than EVA. The High Early Strength Cement (CPV ARI PLUS RS) produced mortars with better properties than those of the mortars made with cement with limestone filler addition (CP II-F 32). This work proposes, at the end, ranks of classification for each of the properties of the mortars studied, basing principally in the results presented by the industrialized mortars. The limits proposed can eventually be used as a future support for the evolution of a Brazilian specification and for the evolution of test methods for repair mortars.

ESTRUTURAS DE CONCRETO COM CORROSÃO DE ARMADURAS POR CARBONATAÇÃO: COMPARAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARO QUANTO À PROTEÇÃO DO AÇO

SUMÁRIO

Resumo	
Abstract	
Sumário	
Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativas do estudo	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Conteúdo da dissertação	3
2 DETERIORAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO POR CARBONATAÇÃO	5
2.1 Influência da carbonatação	5
2.1.1 Corrosão das armaduras de aço pela carbonatação	5
2.1.2 Efeitos da carbonatação nas propriedades do concreto	8
2.1.3 Principais fatores determinantes da carbonatação	8
2.1.4 Estudos de carbonatação por métodos acelerados	10
2.2 Normalização sobre reparação de estruturas de concreto na Europa	15
2.3 Reparos localizados – conceito e tecnologia de execução	17
2.4 Composição e propriedades das argamassas de reparo	21
2.4.1 Composição das argamassas de reparo	21
2.4.2 Adições poliméricas em argamassas de reparo	23
2.4.3 Propriedades gerais de desempenho das argamassas de reparo	26
2.5 Requisitos de compatibilidade entre argamassa de reparo e a estrutura de concreto	29
2.5.1 Compatibilidade de deformações	31
2.5.2 Estabilidade eletroquímica do aço	38
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
3.1 Objetivos	47
3.2 Variáveis estudadas	47
3.2.1 Variáveis fixadas	47
3.2.2 Variáveis medidas	48
3.3 materiais empregados – descrição e caracterização	49
3.3.1 Argamassas passíveis de preparo em obra (APO)	49
3.3.2 Argamassas industrializadas (AI)	50
3.3.3 Substrato de concreto	51
3.3.4 Aço	51
3.4 Propriedades de caracterização básica das argamassas	51
3.4.1 Curva granulométrica no estado anidro	51
3.4.2 Densidade de massa específica e aparente no estado anidro	52
3.4.3 Teor de álcalis solúveis na fração anidra de finos	52
3.4.4 Manutenção de consistência e densidade de massa aparente no estado fresco	52
3.5 Propriedades relacionadas à compatibilidade de deformações	53
3.5.1 Confecção dos corpos-de-prova empregados	53
3.5.2 Resistência à tração na flexão	55
3.5.3 Resistência à compressão	56
3.5.4 Módulo de elasticidade	57

3.5.5	Resistência de aderência por cisalhamento direto	58
3.5.6	Resistência de aderência por tração direta	59
3.5.7	Retração por secagem	60
3.6	Propriedades relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço	60
3.6.1	Confecção dos corpos-de-prova para ensaios relativos ao ingresso de água e CO ₂	61
3.6.2	Absorção de água por capilaridade	63
3.6.3	Absorção de água por imersão	63
3.6.4	Resistência à carbonatação acelerada	63
3.6.5	Confecção dos corpos-de-prova para ensaios eletroquímicos relativos à mobilidade de corrente pelas argamassas	65
3.6.6	Proteção do aço em “reparo homogêneo”, por espectroscopia de impedância eletroquímica	68
3.6.7	Resistividade elétrica superficial pelo método Wenner	72
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
4.1	Argamassas passíveis de preparo em obra (APO)	75
4.1.1	Propriedades de caracterização básica das argamassas do tipo APO	75
4.1.2	Propriedades relacionadas à compatibilidade de deformações	78
4.1.3	Propriedades relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço	84
4.2	Argamassas industrializadas (AI)	94
4.2.1	Propriedades de caracterização básica das argamassas do tipo AI	94
4.2.2	Propriedades relacionadas à compatibilidade de deformações	100
4.2.3	Propriedades relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço	106
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	113
5.1	Propriedades de caracterização básica das argamassas industrializadas e tipo APO	113
5.1.1	Curvas granulométricas	113
5.1.2	Retenção de consistência por 1 hora	114
5.1.3	Rendimento	116
5.2	Propriedades relacionadas à compatibilidade de deformações	117
5.2.1	Resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade	117
5.2.2	Retração por secagem	121
5.2.3	Resistência de aderência por cisalhamento direto	123
5.3	Propriedades relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço	127
5.3.1	Absorção de água por capilaridade	127
5.3.2	Resistência à carbonatação	129
5.3.3	Espectroscopia de impedância eletroquímica	132
5.3.4	Resistividade elétrica superficial	132
5.3.5	Avaliação conjunta das propriedades	133
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
6.1	Contribuição para a normalização de argamassas de reparo	135
6.2	Efeitos dos polímeros e cimentos nas argamassas tipo APO	137
6.3	Sugestões para estudos futuros	139
6.4	Divulgações do trabalho ao meio técnico	140
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
ANEXOS		
Anexo A	- PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DAS BARRAS	147
Anexo B	- TABELAS DAS PROPRIEDADES DOS PRODUTOS E SISTEMAS DE REPARO DA ENV 1504-9/97	151
Anexo C	- CÓPIA DOS CATÁLOGOS DOS PRODUTOS EMPREGADOS	155
Anexo D	- CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS	172
Anexo E	- GRÁFICOS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA CONFORME ITENS 3.6.5 E 3.6.6	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Pourbaix com o sistema Fe – H ₂ O a 25 °C, delimitando os domínios prováveis de corrosão, passivação e imunidade (Pourbaix citado por Helene 1993).	5
Figura 2 – Esquema do avanço da frente de carbonatação (Medeiros; Helene, 2001).	6
Figura 3 – Esquema mais detalhado sobre a frente de carbonatação (Campbell-Allen; Roper, 1991).	7
Figura 4 - Relação entre carbonatação natural e resistência à compressão com cura submersa até 28 dias, realizada para traços de concreto com diferentes relações a/c (0,55 e 0,70) e diversos tipos de cimento (Dunster, 2000).	9
Figura 5 – Dados sobre relação da carbonatação com o tempo de exposição, em condições reais de exposição e por ensaios acelerados (Dunster, 2000).	11
Figura 6 – Dados de carbonatação acelerada (28 dias de exposição) para corpos-de-prova expostos a diferentes concentrações de dióxido de carbono (1, 4 e 10%), em ambiente com umidade relativa de 65% (Dunster, 2000).	13
Figura 7 – Organograma das normas européias da Série EN 1504, “Products and systems for protection and repair of concrete structures”, (Catarino; Gonçalves; Ribeiro, 2000).	16
Figura 8 – Esquema genérico de um sistema completo de reparo localizado, adaptado de Castro, Pazini e Helene (1998).	18
Figura 9 - Modelo teórico de um sistema de reparo (Emmons; Vaysburd, 1996).	18
Figura 10 – Ilustração sobre como delimitar as áreas para execução de reparos localizados.	19
Figura 11 – Detalhe da geometria da cavidade do reparo após sua escarificação.	20
Figura 12 – Classificação das adições de base polimérica, segundo Ohama (1998).	24
Figura 13 – Ilustração dos esforços atuantes em um reparo localizado em virtude da retração da argamassa de reparo.	30
Figura 14 – Requisitos principais a serem considerados para se obter a compatibilidade de deformações entre sistemas de reparo localizados e as estruturas de concreto (Medeiros; Selmo, 2001).	32
Figura 15 – Ilustração do problema do uso de materiais com módulos de elasticidade muito distintos em reparos de estruturas de concreto, segundo Aguiar (1999). Mas existem controvérsias, como indicam experimentos de campo de Mangat; O’Flaherty (2000).	36
Figura 16 – Trechos das armaduras passíveis de corrosão após a execução de reparos localizados em estruturas de concreto armado (adaptado de Vaysburd; Emmons, 2000).	40
Figura 17 – Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm, com vão livre de 100 mm.	56
Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão em metades dos corpos-de-prova de flexão e com dimensões aproximadas a 40 mm x 40 mm x 80 mm, conforme EN 196-1/90 e prEN 12190/98.	57
Figura 19 - Ciclos de carregamento a que os corpos-de-prova foram submetidos no ensaio de módulo de elasticidade, definido por analogia a NBR 7190/96.	58
Figura 20 – Ensaio de módulo de elasticidade secante à compressão em corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 80 mm, feito por 2 ciclos de carregamento, conforme a Figura 19.	58
Figura 21 – Ilustração do ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto.	59
Figura 22 – Ilustração do ensaio de resistência de aderência por tração direta (fora de escala).	59
Figura 23 – Aparelho de medida de retração livre corpos-de-prova de 25 mm x 25 mm x 285 mm e sua condição de armazenamento.	60
Figura 24 – Câmara de carbonatação empregada no estudo.	64
Figura 25 - Modelo do corpo-de-prova constituído de argamassa de reparo ou do concreto do substrato para medida da frente de carbonatação, ao longo do tempo.	64
Figura 31 – Modelo do corpo-de-prova de argamassa de reparo e do concreto de substrato, usado nos ensaios de impedância, com trecho de exposição do aço igual a 3 cm e cobertura de 1,5 cm.	65
Figura 26 – Detalhe da moldagem de três corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm.	66
Figura 28 – Esquema das barras de 15 cm utilizadas nos corpos-de-prova de impedância. Área escurecida protegida por epóxi com alcatrão e área de ensaio no trecho claro, equivalente 5,6 cm ² .	67
Figura 29 – (a) Fase entre tensão (E) e corrente (I) alternadas; (b) Vetores de tensão e corrente em fase e fora de fase; (c) Diagrama de Nyquist com o vetor Z plotado para o ponto de frequência onde o ângulo de fase é máximo para o circuito de Randles (Silverman, 1986 apud Selmo, 1997).	69
Figura 30 – Componentes básicos de circuitos elétricos que podem modelar processos corrosivos, pela técnica de impedância e em caso de interpretação física consistente (Silverman, 1986 apud Selmo, 1997).	70

Figura 32 – Esquema da técnica de resistividade (adaptação da figura de GOWERS & MILLARD, 1999; DARBY, 1999).	73
Figura 33 - Curva granulométrica média teórica das argamassas do tipo APO, conforme a Tabela 20.	75
Figura 34 – Resultados de manutenção de consistência por método NBR 7215/96 das argamassas do tipo APO (mistura segundo a EN 196-1/90).	77
Figura 35 – Resultados de densidade de massa no estado fresco das argamassas do tipo APO, segundo a NBR 13278/95.	77
Figura 36 - Resultados de ar no estado fresco das argamassas do tipo APO, segundo a NBR 13278/95.	78
Figura 37 – Resultados médios de retração por secagem e variação de massa das argamassas de reparo do tipo APO, ensaio análogo à ASTM C157/89 e à NBR 8490/84.	79
Figura 38 – Resultados médios de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas tipo APO, análogo à EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).	81
Figura 39 – Resultados médios de resistência à compressão nos corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas tipo APO, ensaio análogo à EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).	81
Figura 40 – Resultados médios de resistência de aderência por cisalhamento direto para as argamassas do tipo APO, com método descrito no item 3.5.5.	82
Figura 41 – Ilustração das formas de ruptura encontradas no ensaio de determinação da resistência de aderência por cisalhamento direto. (a) Ruptura na interface entre o concreto e argamassa; (b) Ruptura no concreto de substrato.	83
Figura 42 – Percentual de ocorrência de corpos-de-prova com ruptura no concreto do substrato no ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto para cada argamassa do tipo APO.	84
Figura 43 – Resultados médios de absorção de água por capilaridade em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, ensaio realizado em analogia à DIN 52617/87.	85
Figura 44 – Resultados médios de coeficiente de absorção capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, após 24 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.	85
Figura 45 – Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.	86
Figura 46 – Resultados médios de absorção de água por imersão em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.	87
Figura 47 – Índice de vazios médio determinado em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.	88
Figura 48 – Evolução da profundidade média de carbonatação em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para o concreto de substrato e as argamassas do tipo APO, medidas realizadas segundo a RILEM TC-CPC 18, (a) usando a fenolftaleína como indicador, (b) usando a timolftaleína como indicador.	89
Figura 49 – Ilustração da configuração das curvas obtidas nos ensaios de impedância eletroquímica (a) Barra imersa em corpo-de-prova após saída da cura úmida a 3 dias de idade; (b) Ampliação da parte inicial da curva de (a), na região de alta frequência; (c) Mesma barra de (a) após ser armazenada por 4 dias em câmara seca a 50 % de U.R. e 25 °C.	91
Figura 50- Valor médio de impedância total, $ Z $, na frequência de 0,01 Hz, do aço protegido por cada uma das argamassas tipo APO, em cobrimento de 15 mm e nas idades de 3, 28 e 63 dias, conforme a metodologia descrita nos itens 3.6.5 e 3.6.6. Concreto nas linhas tracejadas (seco = linha superior e saturado = linha inferior).	92
Figura 51 – Resultados de resistividade elétrica superficial, medidas realizadas em corpos-de-prova saturados de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO.	94
Figura 52 – Resultados de densidade de massa específica no estado anidro, em analogia à NBR NM 23/98.	95
Figura 53 – Resultados de densidade de massa aparente no estado anidro, em analogia à NBR 14086/98.	95
Figura 54 – Curva granulométrica das argamassas industrializadas, analogia à NBR 7217/87 e BS EN 1015-1/99.	96
Figura 55 – Resultados de manutenção de consistência por método ABNT das argamassas preparadas com a água recomendada pelo fabricante (mistura segundo EN 196-1/90).	98

Figura 56 – Resultados médios de densidade de massa no estado fresco das argamassas do tipo AI, segundo à NBR 13278/95.	99
Figura 57 – Resultados médios de ar das argamassas do tipo AI no estado fresco, segundo à NBR 13278/95.	99
Figura 58 – Resultados médios de retração e variação de massa das argamassas de reparo tipo AI, ensaio em analogia à ASTM C157/89 e a NBR 8490/84.	100
Figura 59 – Resultados médios de resistência à flexão nos corpos-de-prova 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas do tipo AI, segundo a EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).	102
Figura 60 – Resultados médios de resistência à compressão nos corpos-de-prova 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado segundo EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).	102
Figura 61 – Resultados médios de módulo de elasticidade na compressão medido nos corpos-de-prova 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas do tipo AI (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).	103
Figura 62 – Resultados médios de resistência de aderência por cisalhamento direto para as argamassas do tipo AI.	104
Figura 63 - Percentual de corpos-de-prova com ocorrência de ruptura no concreto do substrato no ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto para cada argamassa do tipo AI.	105
Figura 64 – Ilustração da ocorrência de fissuras de retração após a aplicação de uma camada de 20 mm da argamassa AI-6 em substrato de concreto de 300 mm x 300 mm.	106
Figura 65 – Resultados médios de absorção capilar em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado em analogia à DIN 52617/87.	106
Figura 66 – Resultados médios de coeficiente de absorção capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, após 24 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.	107
Figura 67 - Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.	107
Figura 68 – Resultados médios de absorção de água por imersão em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.	108
Figura 69 – Índice de vazios determinado em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.	108
Figura 70 – Evolução da profundidade média de carbonatação em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para o concreto de substrato e as argamassas do tipo AI, medidas realizadas segundo o documento RILEM TC-CPC 18 .	109
Figura 71- Valor médio de impedância total, $ Z $, na frequência de 0,01 Hz, do aço protegido por cada uma das argamassas industrializadas, em cobrimento de 15 mm e nas idades de 3, 28 e 63 dias, conforme a metodologia descrita nos itens 3.6.5 e 3.6.6. Concreto nas linhas tracejadas (seco = linha superior e saturado = linha inferior).	111
Figura 72 – Resultados médios de resistividade elétrica superficial medida em corpos-de-prova saturados de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI.	112
Figura 74 – Comparação das curvas granulométricas de todas as argamassas do estudo.	114
Figura 75 – Retenção de consistência das argamassas empregadas no estudo, ensaio conforme NBR 10906/90.	115
Figura 73 – Relação entre o rendimento e o teor de ar para cada argamassa do estudo.	117
Figura 76 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de resistência à compressão, ensaio em analogia à EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).	117
Figura 77 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de resistência à tração na flexão (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).	118
Figura 78 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão para as argamassas do tipo AI.	119
Figura 79 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão para as argamassas do tipo AI, excluindo os produtos AI-5 e AI-7.	119
Figura 80 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão para as argamassas do tipo APO.	120
Figura 81 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de módulo de elasticidade para as argamassas do tipo AI.	120

Figura 82 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade das argamassas do tipo AI.	121
Figura 83 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de retração por secagem para a idade de 7 dias.	121
Figura 84 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de retração por secagem para a idade de 28 dias.	122
Figura 85 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de retração por secagem para a idade de 91 dias.	123
Figura 86 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de resistência de aderência por cisalhamento direto após 3 dias de cura úmida seguido de 25 dias em câmara seca a 23 ± 3 °C e 50 ± 5 % de umidade relativa ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$).	124
Figura 87 - Visão geral do local de ocorrência das rupturas nos corpos-de-prova empregados no ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto.	125
Figura 88 - Relação entre os resultados de resistência de aderência por cisalhamento direto e o percentual de ocorrência da ruptura no concreto do substrato ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$).	125
Figura 89 - Relação entre a resistência de aderência por cisalhamento direto e a resistência à compressão das argamassas do tipo APO.	126
Figura 90 - Relação entre a resistência de aderência por cisalhamento direto e a resistência à compressão das argamassas do tipo AI.	126
Figura 91 - Relação entre a resistência de aderência por cisalhamento direto e a resistência à compressão das argamassas do tipo AI, eliminando o ponto referente à argamassa AI-1.	127
Figura 92 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de coeficiente de absorção por imersão após 24 horas de ensaio.	128
Figura 93 - Relação entre o coeficiente de absorção capilar a 24 horas e a altura de ascensão a 72 horas, para os produtos tipos AI e APO.	128
Figura 94 - Relação entre a absorção capilar a 72 horas e o coeficiente de absorção a 24 horas, segundo a DIN 52617/87.	129
Figura 95 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de profundidade de carbonatação a 28 dias com uso de fenolftaleína.	130
Figura 96 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de profundidade de carbonatação a 106 dias com uso de fenolftaleína.	130
Figura 97 - Relação entre o índice de vazios e a profundidade de carbonatação após 28 dias de exposição em câmara com 65% de umidade relativa, 25 °C de temperatura e 5% de concentração de CO ₂ .	131
Figura 98 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação após 28 dias de exposição em câmara (65% U.R., 25 °C e 5% de CO ₂).	131
Figura 99 - Relação entre os resultados de resistividade elétrica superficial e os de ascensão capilar de água para os produtos tipos AI e APO.	133
Figura 100 - Ilustração do procedimento empregado na limpeza das barras: A) Imersão em solução de ácido clorídrico e água 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina, B) Imersão em solução de ácido clorídrico e água 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina, C) Lavagem em água corrente, D) Imersão em água deionizada.	149
Figura 101 - Variação da perda de massa com os ciclos de limpeza realizados nas barras de ensaio.	150
Figura 102 - Curvas granulométricas dos agregados usados no concreto de substrato e nas argamassas tipo APO.	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeitos da carbonatação (adaptado de Claisse; El-Sayad; Ibrahim, 1999).	8
Tabela 2 – Resumo das condições de ensaios acelerados de carbonatação, reunidos da literatura.	14
Tabela 3 – Propriedades de argamassas de reparo resumidas de catálogos de fabricantes do mercado brasileiro, conforme Anexo C.	22
Tabela 4 – Requisitos de qualidade para cimentos modificados em argamassa padrão segundo a JIS A 6203 (Ohama, 1998).	25
Tabela 5 – Propriedades de argamassas, para reparos localizados em estruturas de concreto com corrosão de armaduras, e sugestões para a sua aplicação no controle tecnológico de fabricantes (Medeiros; Selmo, 2001).	28
Tabela 6 – Propriedades dos sistemas de reparo, avaliadas em substratos padronizados ou de serviço, para qualificação de fabricantes (Medeiros; Selmo, 2001).	28
Tabela 7 – Procedimentos para ensaio de retração por secagem (adaptado de Decter; Keeley, 1997).	33
Tabela 8 – Limites recomendados para retração de argamassas de reparo (adaptado de Decter; Keeley, 1997).	33
Tabela 9 – Relação entre a área superficial e o volume dos corpos-de-prova adotados nos documentos especificados na Tabela 7.	34
Tabela 10 – Levantamento de corpos-de-prova utilizados por outros pesquisadores para verificação da capacidade de proteção de concretos e argamassas à armadura de aço carbono. C=cobrimento da barra; D=diâmetro da barra.	43
Tabela 11 – Levantamento de corpos-de-prova utilizados por pesquisadores para o estudo de formação de macro-célula de corrosão. C=cobrimento da barra; D=diâmetro da barra.	46
Tabela 12 – Identificação das argamassas tipo APO estudadas.	49
Tabela 13 – Identificação das argamassas industrializadas empregadas no estudo e a sua respectiva relação água/material anidro.	50
Tabela 14 – Corpos-de-prova para a determinação das propriedades relacionadas a compatibilidade de deformações.	53
Tabela 15 – Número de corpos-de-prova para a determinação das propriedades relacionadas a compatibilidade de deformações.	55
Tabela 16 – Corpos-de-prova para a determinação das propriedades relacionadas ao efeito barreira física.	61
Tabela 17 – Número de corpos-de-prova do estudo de propriedades relacionadas ao efeito barreira física contra a corrosão do aço.	62
Tabela 18 – Número de corpos-de-prova moldados para verificação da proteção do ponto de vista eletroquímico.	67
Tabela 19 – Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão – CEB 192 (Helene, 1993).	74
Tabela 20 – Composição granulométrica teórica das argamassas do tipo APO.	76
Tabela 21 – Resultado teórico do teor de álcalis solúveis em água das argamassas do tipo APO, ensaio de acordo com a ASTM C144/94.	76
Tabela 22 – Composição granulométrica das argamassas industrializadas, analogia a NBR 7217/87 e BS EN 1015-1/1999.	96
Tabela 23 – Resultado da determinação do teor de álcalis solúveis em água das argamassas industrializadas, ensaio realizado de acordo com a ASTM C144/94.	97
Tabela 24 – Rendimentos das argamassas que fizeram parte do estudo.	116
Tabela 25 – Comparação do teor de finos de todas as argamassas do estudo.	114
Tabela 26 – Sugestão de limites quanto à retração por secagem.	123
Tabela 27 – Sugestão de limites quanto a absorção capilar.	128
Tabela 28 – Sugestão de limites quanto ao coeficiente de carbonatação aos 28 dias de exposição a 5% de CO ₂ , 25 °C de temperatura e 65% de umidade relativa.	129
Tabela 29 – Classificação final das argamassas segundo os limites sugeridos neste trabalho e reunidos na Tabela 30.	134
Tabela 30 – Limites sugeridos para controle e especificação de argamassas de reparo superficial para estruturas de concreto.	137
Tabela 31 – Caracterização dos agregados usados no concreto de substrato e nas argamassas tipo APO.	174
Tabela 32 – Resultados de caracterização físico-mecânica do cimento CPV-ARI PLUS RS.	175

Tabela 33 – Resultados de caracterização química do cimento CPV-ARI PLUS RS. _____	175
Tabela 34 - Resultados de caracterização físico-mecânica do cimento CII F 32. _____	176
Tabela 35 - Resultados de caracterização química do cimento CII-F 32. _____	176
Tabela 36 - Resultado da determinação do teor de álcalis solúveis em água dos cimentos, ensaio realizado de acordo com a ASTM C144/94. _____	177
Tabela 37 – Propriedades do EVA fornecidas pelo fabricante. _____	177
Tabela 38 – Propriedades do acrilato fornecidas pelo fabricante. _____	178
Tabela 39 – Resultados de resistência à compressão, ensaio realizado conforme a NBR 5739/94. _____	179
Tabela 40 – Resultados de resistência à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade do concreto de substrato, em corpos-de-prova reduzidos, em analogia à EN 196/90. _____	179

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO

Através de levantamentos de falhas de desempenho em edificações no Rio Grande do Sul, Dal Molin (1988) encontrou a incidência de corrosão das armaduras em edificações como sendo da ordem de 30% do total das anomalias. Carmona; Marega (1988), realizaram um extenso levantamento em todo o Brasil e obtiveram a incidência de 27% para tal problema. Em estudos mais recentes, Nince (1996) pesquisando o mesmo tema, encontrou a incidência de 30% para o problema de corrosão das armaduras em edifícios de Brasília. Andrade (1996) encontrou resultados muito mais alarmantes no estado de Pernambuco concluindo que a corrosão de armaduras é o causador de aproximadamente 62% das manifestações patológicas registradas nas edificações daquele estado. Como há quase 20 anos vem sendo alertado por Helene (1986) e como demonstrado pelas pesquisas mencionadas, a corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado é e continuará sendo um desafio para a Construção Civil, nas próximas décadas.

Sabe-se que as manifestações patológicas em estruturas de concreto armado causadas por corrosão das armaduras têm origem, principalmente, em deficiências de Projeto, Execução e Manutenção dos edifícios; e que a sua degradação prematura não pode ser atribuída à agressividade do meio ou às condições de serviço, pois estas devem ser levadas em consideração na fase de Projeto, o que em geral não ocorre. Independente de tudo isto, o fato é que muitas estruturas mal projetadas ou mal executadas estão com problemas de corrosão de armaduras e necessitam de uma intervenção eficiente, de modo a estabilizar o mecanismo de degradação e reduzir o custo de intervenções de manutenção.

Para o caso de estruturas localizadas em regiões não litorâneas, o mecanismo de degradação que causa maiores problemas às armaduras das estruturas de concreto é a carbonatação, quando acompanhado de

condições propícias ao desenvolvimento da corrosão eletroquímica do aço, quais sejam, diferença de potencial eletroquímico, oxigênio e umidade. A velocidade de ocorrência deste mecanismo pode talvez ser maior nos grandes centros urbanos, como em São Paulo, pelo fato de a poluição ser mais acentuada.

Segundo Clímaco; Nepomuceno (1995), apesar de ser crescente o reconhecimento da importância da manutenção das estruturas, são ainda insuficientes as disposições normativas específicas para programas de manutenção, mesmo nos países desenvolvidos.

Por exemplo, na Europa, as normas para proteção e reparo de estruturas de concreto, da série pr EN 1504, ainda estão sendo elaboradas.

No Brasil, muito ainda se tem a evoluir, pois não existem normas que regulem os materiais e serviços de reparo. Já se encontram algumas contribuições publicadas discutindo os procedimentos e técnicas para a recuperação de estruturas com corrosão das armaduras, tais como Helene (1992) e Helene; Levy (1998). Contudo, a normalização de materiais de reparo ainda é incipiente, embora tenha havido um aumento na oferta de materiais no mercado, em particular das argamassas de reparo industrializadas.

Desta forma, torna-se imprescindível investir no domínio tecnológico a respeito dos materiais e serviços inerentes à manutenção das estruturas de concreto, de maneira a se garantir a sua durabilidade e principalmente, o devido retorno financeiro do investimento da manutenção.

É neste contexto que se insere esta dissertação e que tem os objetivos a seguir analisados.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho foram:

- a) realizar um levantamento bibliográfico sobre deterioração de estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação e recuperação por reparos localizados;

- b) estudar propriedades de argamassas de reparo industrializadas e passíveis de preparo em obra, visando classificações e critérios para uma futura evolução normativa desses materiais.

Para tanto, estudaram-se seis argamassas passíveis de preparo em obra e definidas a partir de Moreno (2002), com base em requisitos de aderência, e outras sete fornecidas por fabricantes de representação expressiva no mercado nacional. Nas argamassas dosadas em laboratório, variaram-se dois tipos de polímero e dois tipos de cimento.

Os ensaios para estudo da eficiência dessas argamassas foram muito abrangentes, envolvendo desde a caracterização dos materiais anidros até propriedades físicas e mecânicas, em estágio de normalização na Europa. Incluiu-se na investigação das argamassas, as seguintes propriedades, ainda pouco exploradas para análise da tendência à formação de células de corrosão em armaduras reparadas e para estimativa de útil residual das estruturas reparadas:

- a) Resistência à carbonatação por ensaio acelerado;
- b) Progressão do aumento de impedância de barras de aço CA 50, com cobrimento de 15 mm de argamassa, sendo a análise feita por espectroscopia de impedância eletroquímica, desde as primeiras idades até 63 dias de secagem em câmara seca.

1.3 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho se encontra dividido da seguinte forma:

- Capítulo 1, de introdução, onde estão apresentadas as justificativas do estudo e seus objetivos;
- Capítulo 2, sobre deterioração e recuperação de estruturas de concreto por carbonatação, no qual foi feita uma síntese do que se encontrou de importante na literatura especializada relacionado ao tema do trabalho, tanto em publicações nacionais como internacionais;

- Capítulo 3, de apresentação do programa experimental, com a identificação e caracterização dos materiais que fizeram parte do trabalho e uma exposição da metodologia empregada no estudo de laboratório;
- Capítulo 4, de análise dos resultados, onde procede-se à apresentação e análise dos resultados, de forma simultânea;
- Capítulo 5, de discussão dos resultados, de uma forma mais abrangente, ilustrando-se a variação e relação coerente entre várias propriedades estudadas até se chegar à sugestão de classificações e limites para uma futura evolução normativa;
- Capítulo 6, de considerações finais, no qual se encontram as conclusões da pesquisa realizada, assim como sugestões para estudos futuros relacionados ao tema e para divulgação dos resultados obtidos;
- Capítulo 7, de referências bibliográficas, que consiste no último capítulo do trabalho e serve para identificar cada trabalho citado no decorrer do texto dos capítulos anteriores.

Ao final, constam como anexos:

- Procedimento de limpeza das barras, Anexo A;
- Tabelas das propriedades dos produtos e sistemas de reparo da ENV 1504-9/97, Anexo B;
- Cópia dos catálogos dos fabricantes das argamassas industrializadas, Anexo C.
- Dados de caracterização dos materiais empregados, Anexo D.
- Gráficos obtidos nos ensaios de impedância eletroquímica para barras de aço em meio homogêneo, só de argamassa ou concreto, Anexo E.

2 DETERIORAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO POR CARBONATAÇÃO

2.1 INFLUÊNCIA DA CARBONATAÇÃO

2.1.1 Corrosão das armaduras de aço pela carbonatação

No meio altamente alcalino promovido pelas pastas de cimento Portland, forma-se uma proteção eletroquímica de caráter passivo sobre o aço. A alcalinidade do concreto é resultante das reações de hidratação dos silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) que liberam certa quantidade de $Ca(OH)_2$, podendo atingir cerca de 100 kg/m^3 em concretos com consumo de cimento de 400 kg/m^3 (Helene, 1993). Como o hidróxido de cálcio tem pH da ordem de 12,6 (à temperatura ambiente), o diagrama de Pourbaix, na Figura 1, ilustra como nessa faixa se forma a passivação do aço.

Figura 1 – Diagrama de Pourbaix com o sistema Fe – H₂O a 25 °C, delimitando os domínios prováveis de corrosão, passivação e imunidade (Pourbaix citado por Helene 1993).

A carbonatação é um dos mecanismos capazes de causar a destruição desta proteção natural das armaduras no concreto. Ela consiste em reações químicas que ocorrem entre os compostos hidratados da pasta de cimento Portland (compostos alcalinos) e o dióxido de carbono que ingressa na pasta a partir do ar atmosférico (CO_2). O resultado dessas reações é a formação de compostos de caráter mais neutro, o que provoca a redução do pH da pasta das argamassas e concretos de cimento Portland.

Resumindo, as armaduras de aço das estruturas de concreto armado ficam inicialmente passivas devido à elevada alcalinidade da pasta de cimento Portland, que tem um pH acima de 12. Nestas condições, as armaduras se mantêm protegidas e não se desenvolve a corrosão do aço. Entretanto, esta situação de equilíbrio pode ser alterada, quando o pH do concreto é reduzido, como consequência da carbonatação que avança progressivamente até a superfície do aço.

O CO_2 penetra pela porosidade da pasta de forma lenta, gradual e relativamente uniforme. A linha que separa as duas zonas de pH distintos é denominada frente de carbonatação e se encontra representada na Figura 2. Quando a frente de carbonatação chega até as armaduras, rompe-se a película protetora de óxidos formada na superfície do aço, o que se denomina despassivação.

Figura 2 – Esquema do avanço da frente de carbonatação (Medeiros; Helene, 2001).

Vale destacar que o pH do concreto não muda de forma brusca e nítida como sugere a Figura 2, pois esta é apenas uma representação didática da frente de carbonatação. Na realidade, existe uma primeira faixa de profundidade que fica com pH por volta de 8,3 (totalmente carbonatada), seguido por uma região de pH crescente com o distanciamento da superfície (carbonatação em progresso) e por último a região de concreto não carbonatado, como pode ser bem compreendido a partir da Figura 3.

Pelo esquema ilustrado na Figura 2, pode-se inferir que a espessura e a compacidade da camada de cobertura das armaduras são fatores determinantes do tempo no qual o fenômeno de despassivação irá ocorrer e, portanto, são decisivos para se garantir a durabilidade das estruturas, pois a sua ocorrência de forma simultânea com a presença de água, oxigênio e diferença de potencial irá desencadear o processo de corrosão das armaduras das estruturas de concreto.

Figura 3 – Esquema mais detalhado sobre a frente de carbonatação (Campbell-Allen; Roper, 1991).

2.1.2 Efeitos da carbonatação nas propriedades do concreto

O desenvolvimento da carbonatação no concreto não é necessariamente prejudicial, já que este material nem sempre é utilizado em conjunto com o aço. Segundo Sims (1994) a carbonatação tende a aumentar a resistência do concreto, contudo, isto não costuma ser significativo porque normalmente trata-se de uma zona superficial e isto representa apenas uma pequena proporção dos elementos estruturais de concreto. Além disso, o concreto carbonatado é, de forma geral, mais resistente ao ingresso de fluidos do que o mesmo concreto não carbonatado. Claisse; El-Sayad; Ibrahim (1999) elaboraram a Tabela 1, onde se pode ter uma visão geral dos efeitos da carbonatação.

Tabela 1 – Efeitos da carbonatação (adaptado de Claisse; El-Sayad; Ibrahim, 1999).

EFEITO	CONSEQUÊNCIA PARA A DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS	CONSEQUÊNCIA PARA PROPRIEDADES ASSOCIADAS À DURABILIDADE
Redução da alcalinidade	Corrosão de armaduras	Redução do pH, detectada com solução de fenolftaleína ou timolftaleína
Decréscimo nos coeficientes dos mecanismos de transporte	Diminui a taxa de carbonatação, o transporte de cloretos e sulfatos.	Ensaio na superfície do concreto, como absorção superficial, irão resultar em indicações distorcidas de melhoria da durabilidade
Acréscimo na resistividade elétrica	Provavelmente não vai ocorrer redução significativa da corrosão	Medidas de resistividade serão superestimadas, mascarando a real resistividade do concreto
Retração	Pode causar fissuras	Fissuras podem ter interferência em todas as propriedades acima indicadas

2.1.3 Principais fatores determinantes da carbonatação

A relação água/cimento, cura e tipo de cimento são os principais fatores ligados ao concreto que limitam a velocidade de carbonatação, pois estes são responsáveis pela determinação da porosidade resultante no concreto de cobrimento das armaduras.

Em geral, a redução da relação água/cimento diminui extremamente a taxa de carbonatação, já que a penetração da água e de agentes agressivos no concreto depende da quantidade e dimensões de poros capilares, ou seja, da sua porosidade, que é principalmente resultante daquela variável.

Além disso, a relação água/cimento também controla a resistência à compressão que por este motivo apresenta boa relação com a carbonatação. Isto é bem ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Relação entre carbonatação natural e resistência à compressão com cura submersa até 28 dias, realizada para traços de concreto com diferentes relações a/c (0,55 e 0,70) e diversos tipos de cimento (Dunster, 2000).

O tipo de cimento influencia o avanço da frente de carbonatação, uma vez que a reserva alcalina é função da sua composição química e das adições a ele incorporadas, tais como: escória de alto forno, pozolana, entre outras. Pesquisadores como Campbell-Allen; Roper (1991), Parrot (1996) e Isaia et al. (2000) encontraram que o emprego de adições pozolânicas resulta em maiores taxas de carbonatação. Uma explicação para esse fato é que a sílica dessas adições reage com o Ca(OH)_2 , diminuindo assim, a reserva alcalina do concreto. Nunes (1998) também encontrou resultados similares quando comparou os resultados de carbonatação em quatro cimentos nacionais, observando que o cimento CP V apresenta maior capacidade de proteção quanto à carbonatação quando comparado com os

cimentos CP II-F, CP III e CP IV. Aquela autora atribui estes resultados ao fato de o cimento CP V apresentar menor quantidade de adições, se comparado aos demais cimentos citados.

A umidade relativa do ambiente também influencia de forma significativa a carbonatação devido à sua interdependência com a umidade interna do concreto. Segundo Rosell; Vázquez (2000), o coeficiente de difusão de CO_2 no ar é 10.000 vezes maior do que na água, por isso, se os poros do concreto estão saturados, a penetração deste gás será muito pequena e a carbonatação pode ser considerada desprezível. Porém, em concretos muito secos quase não há carbonatação, uma vez que as suas reações ocorrem com o Ca(OH)_2 solubilizado na água. Desse modo, existe um consenso entre os pesquisadores da área que a carbonatação ocorre com maior intensidade na umidade relativa em torno de 65 % (Helene, 1986; Andrade, 1992; Cascudo, 1997; Rincón et al., 1998; Dunster, 2000).

2.1.4 Estudos de carbonatação por métodos acelerados

A carbonatação do concreto é relativamente lenta em condições naturais. Conseqüentemente, para se ter resultados em curto espaço de tempo, tem-se dispensado atenção especial a métodos de ensaio de carbonatação acelerada usando elevadas concentrações de CO_2 . Com estes métodos, torna-se possível atingir profundidades de carbonatação equivalentes a muitos anos, em poucas semanas. Não existe método normalizado atualmente, contudo, na Europa já existe uma preocupação com relação ao desenvolvimento de normas neste sentido, um exemplo disso é o documento prEN 13295¹ (2000).

A dificuldade atual é que as condições de cura e do ensaio, de uma forma geral, não têm sido aplicadas de forma uniforme pelo meio científico e isto leva à impossibilidade de comparação entre resultados de estudos desenvolvidos em várias partes do mundo.

¹ Comité Européen de Normalization (CEN). **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test method Determination of resistance to carbonation. PrEN 13295.** Brussels, CEN, 2000.

Segundo Dunster (2000), para que um ensaio de carbonatação acelerada seja efetivo, é preciso que ele produza resultados de resistência à carbonatação em um curto espaço de tempo e possibilite uma correlação com a carbonatação natural. Este último aspecto ainda apresenta-se pouco estudado, contudo, a Figura 5 apresenta resultados interessantes sobre este tema, onde pode-se verificar a boa relação da carbonatação natural com resultados de carbonatação acelerada.

Cabe salientar pela Figura 5, como a cura imersa causa alterações na microestrutura do concreto e altera a real performance que os concretos usuais podem ter em serviço, quando o seu prazo de cura dificilmente ultrapassa 3 dias (Regime B). Também desse trabalho verifica-se que o prazo de 28 dias de carbonatação acelerada pela metodologia de Dunster (2000) foi o que mais se aproximou dos 4 anos de exposição natural.

Figura 5 – Dados sobre relação da carbonatação com o tempo de exposição, em condições reais de exposição e por ensaios acelerados (Dunster, 2000).

O controle da umidade geralmente é obtido usando bandejas com soluções salinas dentro da câmara de carbonatação, contudo, sistemas mais sofisticados que injetam umidade de maneira controlada também são utilizados.

Da mesma forma, alguns sistemas de injeção de CO_2 são relativamente simples, injetando-se o CO_2 através de dispositivos manuais, e outros são mais complexos, com o CO_2 sendo injetado automaticamente quando a concentração deste gás cai, atingindo um nível preestabelecido.

Um outro aspecto de grande importância é o período de pré-condicionamento, que consiste em deixar os corpos-de-prova em condições ambiente para que ele atinja um equilíbrio com a umidade e temperatura do ar. Segundo Dunster (2000), a ausência de um período de pré-condicionamento deverá impedir temporariamente a carbonatação como resultado do bloqueio dos poros pela água. Estes autores também sugerem 14 dias para o período de pré-condicionamento, pelo fato de terem realizado ensaios comparativos com períodos de 14 e 28 dias, sem variação significativa dos resultados. Como o fator tempo é fundamental, em serviços de especificação e controle de materiais, 14 dias para acondicionamento prévio à carbonatação pode ser considerado um prazo mais apropriado.

Na Tabela 2 encontra-se um resumo das condições aplicadas nos ensaios acelerados de carbonatação publicados pelo meio técnico, tanto no âmbito internacional como nacional.

Sobre o efeito da concentração de CO_2 , Dunster (2000) estudou uma variedade de concretos submetidos aos teores de 1%, 4% e 10% de CO_2 e verificou que existiu aumento significativo na frente de carbonatação com o incremento de 1% para 4% no teor de CO_2 , contudo, quando passou-se de 4% para 10% o aumento não foi tão significativo com exceção dos casos onde foram usados grandes quantidades de cinza volante e escória de alto forno (40% e 60% em relação a massa de cimento, respectivamente), Figura 6.

Figura 6 – Dados de carbonatação acelerada (28 dias de exposição) para corpos-de-prova expostos a diferentes concentrações de dióxido de carbono (1, 4 e 10%), em ambiente com umidade relativa de 65% (Dunster, 2000).

Loo et al. *apud* Dunster (2000), mostraram que variando a concentração de CO_2 entre 7 e 18% a taxa de carbonatação não foi afetada de forma significativa, para concretos com resistência à compressão acima de 40 MPa aos 28 dias. Contudo, isto não foi observado para os concretos com resistências inferiores a este patamar.

Tabela 2 – Resumo das condições de ensaios acelerados de carbonatação, reunidos da literatura.

REFERÊNCIA	CO ₂ (%)	UR (%)	DURAÇÃO DO ENSAIO	CURA E PRÉ-CONDICIONAMENTO	NOTAS
Papadakis; Fardis; Vayenas (artigo), 1992	50	65	25 dias	Ausência de detalhes sobre a cura e pré-condicionamento	Temperatura de 30 °C
Thomas; Matthews (artigo), 2000	10	65	Mais de 56 dias	Cura: úmida por 1, 3 ou 7 dias. Pré-condicionamento: a 5 ou 20 °C e 40 a 90% de UR até 28 dias	---
Claisse; El-Sayad; Ibrahim (artigo), 1999	5	Não declarado	140 dias	Cura: 28 dias ao ar ou 28 dias submersa. Pré-condicionamento: inexistente	---
Dunster (artigo), 2000	4	65	28 dias	Cura: submersa por 28 dias Pré-condicionamento: não declarado	Controle ativo de CO ₂
Al-Kadhimi et al. (artigo), 1996	---	---	14 dias	Pré-condicionamento: 7 dias em ambiente de laboratório com 22 a 24 °C e UR de 38 a 42%	14 dias submetido a 15 bar de pressão de CO ₂ . O objetivo deste ensaio foi produzir corpos-de-prova carbonatados com rapidez para ensaios de realcalinização.
Roy; Poh; Northwood (artigo), 1999	6	52, 64, 75, 84 e 92	16 semanas	Pré-condicionamento: inexistente	Não forneceu detalhes sobre o tipo de controle de injeção de CO ₂
Nunes (Dissertação), 1998	15 %	65 %	12 semanas	Cura: úmida por 7 dias + Pré-condicionamento: 21 dias a 70% de UR	Temperatura de 24 ± 2 °C
Venquiaruto; Isaia; Gastaldini (artigo), 2001	5 ± 0,2 %	75 ± 2 %	12 semanas	Cura: úmida por 7 dias	Temperatura de 22 ± 2 °C
Martins; Monticelli; Camarini (artigo), 2001	100	60 e 75 %	42 dias	Cura: 7 dias submersa e cura térmica Pré-condicionamento: até idade de 28 dias	---
Isaia; Vagheti; Gastaldini (artigo), 2001	10 %	---	16 semanas	Cura: 7 dias em câmara úmida Condicionamento até idade de 28 dias	---
Nordtest Method ² (método de ensaio), 1989	3	55-65	Vários meses	Cura: úmida por 14 dias. Pré-Condicionamento: a 20 °C a 50% de UR até o ensaio	O ensaio compara o desempenho de produtos de reparo com um concreto de controle
Procedimento ABCP (método de ensaio), 2000	5±1	65±5	56 dias	Ausência de detalhes sobre a cura e pré-condicionamento	Temperatura: 23±2 °C
PrEN 13295 (método de ensaio), 2000	1	60±10	56 dias	Cura: úmida por 48 horas ou 28 dias. Pré-condicionamento: sala climatizada até constância de massa	O ensaio compara o desempenho de produtos de reparo com um concreto de controle

² NORDTEST METHOD. Concrete, repairing materials and protective coating: carbonation resistance. **NT Building 357**. Finland, Nordtest, 1989.

2.2 NORMALIZAÇÃO SOBRE REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO NA EUROPA

Na Europa, as normas para proteção e reparação de estruturas de concreto ainda estão sendo elaboradas e são as da Série EN 1504. Desde a década de 80, o sub-comitê 8 do TC 104, grupo da CEN (Comité Européen de Normalisation), está elaborando esse conjunto de normas e encontra-se dividido em 8 grupos de trabalho, distribuídos pelos diferentes temas (Catarino; Gonçalves; Ribeiro, 2000).

O conjunto de normas da Série EN 1504 reúne as informações essenciais sobre os produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de concreto.

A Figura 7 mostra o organograma do futuro conjunto de normas européias EN 1504, intitulado “Products and systems for protection and repair of concrete structures”. Este conjunto de normas inclui 10 partes, que têm em conta 6 usos pretendidos para os produtos (Partes 2 a 7) e aspectos comuns a esses usos considerados em conjunto (Partes 1 e 8 a 10).

A Parte 9 deste conjunto de normas, relativa aos princípios gerais para o uso dos produtos e sistemas de reparação, pode considerar-se o núcleo fundamental da Série EN 1504. Nessa parte, são abordadas as etapas principais dos serviços de recuperação, que são:

- Avaliação das condições da estrutura;
- Identificação das causas da deterioração;
- Decisão sobre os objetivos da proteção e da reparação;
- Seleção dos princípios adequados para a proteção e reparação;
- Seleção dos métodos;
- Definição das propriedades dos produtos e sistemas;
- Especificação dos requisitos de manutenção após os trabalhos de proteção e reparo.

Figura 7 – Organograma das normas europeias da Série EN 1504, “Products and systems for protection and repair of concrete structures”, (Catarino; Gonçalves; Ribeiro, 2000).

Como se observa na Figura 7, apenas a Parte 9 tem estatuto de norma provisória, com sigla oficial ENV 1504-9, e as restantes se encontram em fase de projeto. Saliente-se que na Parte 10, são estabelecidas as regras para a preparação do substrato e aplicação dos produtos e sistemas, bem como para o controle de qualidade da execução.

Com um rápido exame dos projetos de normas da Série EN 1504, observa-se que elas reportam para um conjunto vasto de métodos de ensaio, num total de cerca de 90, para caracterizar as propriedades exigidas aos produtos e sistemas de reparo em função do uso pretendido, a maioria dos quais também estão em fase de projeto. No Anexo B, consta relação de 72 propriedades, mais direcionadas ao reparo de estruturas de concreto armado com corrosão de armaduras.

No Brasil, já se têm algumas contribuições publicadas discutindo os procedimentos e as técnicas para a recuperação de estruturas com corrosão das armaduras, tais como Helene (1992) e Helene; Levy (1998).

Mas, a normalização de materiais de reparo ainda é incipiente no Brasil, embora tenha havido um aumento na oferta de materiais no mercado, em particular das argamassas de reparo industrializadas. Iniciativas para a normalização nessa área iniciaram em 1993, pelo Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB – 18), da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, mas ao que parece não se chegou na época a textos base que tenham evoluído para projetos de normas.

Assim, o programa experimental realizado no âmbito desta dissertação, apresentado do Capítulo 3 até o Capítulo 5, é mais uma das contribuições acadêmicas para a consolidação da tecnologia nacional e de futuros textos normativos, no campo das argamassas de reparo superficial de estruturas de concreto.

2.3 REPAROS LOCALIZADOS – CONCEITO E TECNOLOGIA DE EXECUÇÃO

No Brasil, a tecnologia de reparo localizado de estruturas de concreto armado foi inicialmente difundida por Helene (1992). A técnica de reparo localizado consiste em expor os trechos corroídos das barras e proceder ao seu tratamento com posterior reconstituição da seção do concreto.

Segundo Castro; Pazini; Helene (1998), um sistema completo de reparo localizado pode incluir as seguintes etapas: remoção do concreto danificado, a limpeza das armaduras, uma imprimação do aço, a aplicação de uma ponte de aderência, a reconstituição da seção da estrutura por meio da aplicação de uma argamassa ou graute de reparo e por último a aplicação de uma pintura superficial de proteção do concreto, para evitar a entrada de agentes agressivos. Ainda segundo aqueles autores, este tipo de reparo mais completo pode usar como mecanismo de proteção o efeito barreira, a repassivação, a proteção catódica e a inibição da corrosão.

Vale destacar que o tratamento das barras corroídas, além da limpeza superficial, pode envolver a imprimação por pinturas protetoras de base mineral ou orgânica. Muitos são os tipos de pinturas utilizadas com o objetivo de proteger a armadura, seja por barreira, inibição ou passivação. De acordo com Figueiredo (1994), em virtude de serem os materiais mais

próximos à armadura, entre todos os que fazem parte de um sistema de reparo localizado, os revestimentos levam consigo a maior carga de responsabilidade na proteção da armadura.

A Figura 8 ilustra os quatro componentes que podem estar presentes em um reparo localizado.

Figura 8 – Esquema genérico de um sistema completo de reparo localizado, adaptado de Castro, Pazini e Helene (1998).

Emmons; Vaysburd (1996) sugerem que um reparo localizado superficial de concreto deve ser interpretado como um sistema formado por três meios distintos e que governam a sua durabilidade: material de reparo, substrato de concreto e interface entre estes dois materiais (Figura 9).

Figura 9 - Modelo teórico de um sistema de reparo (Emmons; Vaysburd, 1996).

A primeira atividade num processo de reparo estrutural é a delimitação das áreas deterioradas, ou seja, os pontos que irão sofrer a intervenção. Nesta fase é preciso adotar geometria bem definida, evitando a geometria mais complexa, isto é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Ilustração sobre como delimitar as áreas para execução de reparos localizados.

Com as áreas delimitadas, procede-se à eliminação do concreto contaminado ou deteriorado. Este deve ser retirado até encontrar-se concreto são. Saliente-se que todos os métodos disponíveis de escarificação do concreto podem acarretar uma certa micro-fissuração superficial do mesmo e deixar partículas soltas, as quais devem ser retiradas para não comprometerem a aderência do material de reparo.

Além disso, é necessário eliminar 1 a 2 cm de concreto por trás das armaduras corroídas, com o objetivo de permitir um bom acesso para a correta limpeza dos produtos de corrosão. Esse espaço assegura também o correto preenchimento dos vazios ao redor das barras pelo material de reparo (Helene, 1992; Andrade et al., 1997).

Além disso, é importante que a área escarificada não termine no nível zero. A partir da Figura 11, torna-se mais fácil a compreensão desta recomendação, que melhora a aderência da argamassa por resultar em maior área de contato e por proporcionar uma ancoragem lateral. Deixar os cantos arredondados também é um detalhe importante por proporcionar maior facilidade de preenchimento com a argamassa de reparo.

Figura 11 – Detalhe da geometria da cavidade do reparo após sua escarificação.

Em seguida, deve-se eliminar todo o produto de corrosão aderido à superfície das armaduras e deixar a superfície do concreto áspera, para isto geralmente se utiliza a escarificação com ponteira elétrica ou manual, o hidrojateamento ou o jateamento com areia, sendo estes empregados para grandes extensões de áreas a serem reparadas.

Na sequência de um reparo, as próximas etapas podem ser a aplicação de uma tinta anti-corrosiva na armadura e de uma ponte de aderência na superfície do concreto que vai receber o reparo. Estes procedimentos nem sempre são adotados, porque ainda têm os seus resultados questionados, por exemplo em Figueiredo (1994) e, além disso, existem razões técnico-econômicas que em determinados casos inviabilizam o emprego de um sistema de reparo completo.

Ao final, aplica-se a argamassa, graute ou concreto de reparo, recompondo a geometria original da peça estrutural que esteja sendo reparada.

Quando se tratar de concreto aparente, após a cura inicial da argamassa, normalmente, será necessária uma etapa de acabamento e que é relativa ao estucamento da superfície reparada e do restante do concreto, com uma pasta de cimento e fíler, podendo conter aditivos e adições, para se ajustar a textura e tonalidade superficial do concreto. Uma etapa de

lixamento deve ser necessária após o estucamento e, por fim, a aplicação de um sistema de pintura de proteção.

2.4 COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REPARO

A reconstituição da seção do concreto, em geral, é feita utilizando concretos, argamassas ou grautes especiais para reparo, que podem ser a base de cimento, cimento modificado com polímeros ou poliméricos.

2.4.1 Composição das argamassas de reparo

Segundo Cusson; Mailvaganam (1996), as argamassas de reparo de estruturas de concreto podem ser divididas em três tipos genéricos, que são:

1. Argamassas cimentícias: a base de cimento Portland (CP), a base de cimento aluminoso, misturas de cimento Portland e aluminoso ou com agentes expansivos;
2. Argamassas cimentícias modificadas por polímeros: estireno-butadieno (SBR), poliacetato de vinila-etileno (EVA), ester poliacrílico (PAE), entre outros;
3. Argamassas a base de resinas: epóxi, poliéster e poliuretana.

De uma forma geral, as argamassas de reparo dosadas em obra ou industrializadas são dos grupos 1 e 2 e basicamente constituídas por: cimento Portland, agregado miúdo, aditivos plastificantes, retardadores ou aceleradores de pega, impermeabilizantes, adições minerais (fíler calcário, sílica ativa, entre outras) e polímeros, tais como estireno-butadieno (SBR), acrilato, poliacetato de vinila-etileno (EVA) e acetato de polivinil (PVA) ou outros mais nobres.

Diante desta variedade de possíveis materiais, tem-se um mercado cada vez mais diversificado de argamassas industrializadas, fornecidas ensacadas por diversos fabricantes.

Muitos produtos, entretanto, apresentam dosagens e componentes desconhecidos e não há especificações normalizadas para o seu controle de qualidade, de modo que projetistas, engenheiros e empresas de recuperação apenas dispõem de catálogos técnicos e comerciais, como os

dos produtos estudados neste trabalho e que constam no Anexo C. Para balizar especificações, nem sempre é viável comparar o desempenho dos produtos, só pelas informações dos catálogos, pois para começar não há linguagem nem critérios técnicos unificados entre os fabricantes. Além disso, em geral, as propriedades mais focadas pelos fabricantes, como as resumidas na Tabela 3 a partir do Anexo C, podem não responder por questões associadas à durabilidade e eficiência dos sistemas de reparo, quanto à capacidade de proteção às armaduras reparadas. No caso dos sete produtos listados, apenas um fornece informações com relação à permeabilidade da argamassa, uma propriedade importante para o efeito de barreira física de proteção ao aço.

Tabela 3 - Propriedades de argamassas de reparo resumidas de catálogos de fabricantes do mercado brasileiro, conforme Anexo C.

FABRICANTE	ARGAMASSA*	PROPRIEDADES INFORMADAS PELO FABRICANTE
A	Produto 1	Nenhuma
	Produto 2	Nenhuma
B	Produto 3	Resistência à compressão (30 MPa aos 28 dias)
	Produto 4	Módulo de elasticidade – (25 e 30 GPa para 7 e 28 dias, respectivamente) Expansão – (0,10 % aproximadamente) Aderência ao concreto – (1,5 a 2,0 MPa para 28 dias) Aderência ao aço – (barra lisa: 4 MPa; barra estriada: 30 MPa)
C	Produto 5	Resistência à compressão - (12; 30; 38; 50 MPa para 1, 3, 7 e 28 dias, respectivamente) Resistência à flexo-compressão - (2,5; 5,3; 7,5; 12,0 MPa para 1, 3, 7 e 28 dias, respectivamente)
D	Produto 6	Resistência à compressão (NBR 5739) – (16 e 28 MPa para 3 e 28 dias, respectivamente) Resistência à tração por flexão (NBR 12142 ³) – (13 MPa para 28 dias) Penetração de água sob pressão (NBR 10787 ⁴) – (0 mm para 28 dias) Difusão de íons (método Taywood) – (11×10^{-6} cm ² /s)
	Produto 7	Resistência à compressão (NBR 5739) – (14 e 25 MPa para 3 e 28 dias, respectivamente)

* Estas argamassas foram usadas no programa experimental, Capítulo 3.

³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. NBR 12142.** Rio de Janeiro, 1991.

⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão. NBR 10787.** Rio de Janeiro, 1994.

Acredita-se que as argamassas de reparo industrializadas estejam cada vez mais sendo utilizadas pelo meio técnico, por sua praticidade e pela transferência da responsabilidade do proporcionamento do material para as fábricas e seus laboratórios, eliminando a necessidade de fiscalização contínua de profissionais responsáveis pela dosagem das argamassas em obra.

Por outro lado, o aumento da oferta de produtos pelo mercado, faz crescer a demanda por critérios técnicos para a sua especificação, já que hoje pouco se informa sobre as propriedades referentes à compatibilidade do material de reparo com os substratos de concreto.

A seguir são abordados os polímeros como adições, já que este tipo de material é freqüentemente usado nas argamassas de reparo e por terem sido empregados nos experimentos conduzidos no Capítulo 3, deste trabalho.

2.4.2 Adições poliméricas em argamassas de reparo

Segundo Ohama (1998), a primeira patente com conceito de modificação de concretos e argamassas por polímero foi publicada em 1924. Desde então, muitas pesquisas neste sentido têm sido desenvolvidas em vários países. Conseqüentemente, muitos polímeros para argamassas e concretos têm sido desenvolvidos e são correntemente usados em várias aplicações na indústria da construção civil, incluindo a produção de argamassas de reparo.

Ainda segundo Ohama (1998), uma adição de base polimérica é definida como aquela que apresenta um composto polimérico, como principal ingrediente, para modificar ou melhorar propriedades de concretos e argamassas, como resistência, deformabilidade, aderência, resistência ao ingresso de água e a sua durabilidade.

Em geral estes produtos são classificados em 4 tipos principais: látex (ou dispersão), polímero redispersível em pó, polímero solúvel em água e polímero líquido, como pode ser observado na Figura 12 e está discutido nos itens a), b), c) e d) que seguem.

a) Látex ou dispersão

Latexes consistem em polímeros formados por partículas muito pequenas (diâmetro de 0,05 – 5 μm) dispersas em água. Em geral são polímeros elastoméricos e termoplásticos que formam filmes contínuos quando secos. Os mais usados estão destacados na Figura 12.

Figura 12 – Classificação das adições de base polimérica, segundo Ohama (1998).

A formação de microfissuras sob tensão de secagem, nas argamassas e concretos modificados com estes polímeros, é alterada pelo filme formado, que deve dificultar a propagação de fissuras e conseqüentemente desenvolver uma maior aderência entre a fase hidratada e os agregados. Contudo, seu efeito é dependente da relação polímero/cimento (P/C), definida como a relação entre o total de sólidos no látex e o conteúdo de cimento no concreto ou argamassa modificada com látex. Seu aumento até certo limite leva a uma maior capacidade de deformação, resistência à

tração e resistência química, além de diminuir a permeabilidade à água, ao ar e a absorção capilar.

Os latexes mais usados são o estireno-butadieno (SBR), éster poliacrílico (PAE) e o acetato etileno-vinil (EVA).

b) Polímero em pó redispersível

Trata-se de um polímero em pó, que quando é colocado em água e agitado dá origem aos latexes com tamanho de partículas de 1 – 10 μm . A Tabela 4 mostra os requisitos de desempenho da JIS A 6203 (Polymer dispersions and redispersible polymer powders for cement modifiers) para este tipo de polímero e para os latexes.

Tabela 4 – Requisitos de adições poliméricas para cimentos modificados, em argamassa padrão segundo a JIS A 6203 (Ohama, 1998).

MATERIAL	TIPO DE ENSAIO	REQUISITOS
Argamassa modificada com polímero	Resistência à flexão	$\geq 5 \text{ MPa}$
	Resistência à compressão	$\geq 15 \text{ MPa}$
	Aderência	$\geq 1 \text{ MPa}$
	Absorção de água	$\leq 15 \%$
	Retração	$< 0,15\%$

Geralmente, os polímeros em pó redispersível são misturados a seco com cimento e agregado, e depois é feita a mistura com a água.

A modificação de argamassas e concretos por este tipo de polímero é a mesma dos latexes. A Figura 12 também mostra os principais polímeros deste tipo usados na construção civil.

c) Polímeros solúveis em água

Este tipo de polímero pode ser adicionado nos concretos ou argamassas na forma de pó em solução com água e são adicionados durante a mistura. Quando usados na forma de pó é aconselhável misturar com o cimento e agregados previamente e só então adicionar a água. Os acrilatos, como o acrilato de magnésio e o acrilato de cálcio, são os principais polímeros desta categoria usados nas argamassas e concretos. Em geral, este tipo de polímero conduz a um pequeno aumento na resistência do sistema modificado.

d) Polímeros líquidos

Polímeros líquidos, como a resina epóxi e a resina poliéster insaturada, são adicionados com catalisador nas argamassas e concretos durante a mistura. São os menos usados, se comparados aos outros tipos de polímeros anteriormente citados.

Estes tipos de polímero podem levar a um aumento significativo da resistência à tração, da resistência química, além de diminuir a permeabilidade a água e a absorção das argamassas e concretos.

2.4.3 Propriedades gerais de desempenho das argamassas de reparo

Em princípio, as argamassas de reparos localizados podem ter que atender a um amplo espectro de requisitos e propriedades, em função das particularidades de cada obra. Considerando-se as etapas gerais de um projeto de recuperação listadas no item 2.2, pode-se detalhar os seguintes principais fatores determinantes das propriedades das argamassas de reparo, conforme Geho (1989) e Selmo et al. (2000):

- As características do concreto a ser reparado;
- A espessura dos reparos, após a limpeza das regiões danificadas;
- A responsabilidade estrutural das argamassas, se irão apenas conferir acabamento geométrico ou ainda desempenhar função estrutural significativa;
- A densidade, diâmetro e cobrimento das armaduras que irão ser repassivadas, nas diversas peças que compõem a estrutura;
- As condições de temperatura e umidade para execução dos serviços de recuperação;
- Tempo disponível para a execução dos reparos, que é função da importância ou finalidade da estrutura e do planejamento da obra;
- As condições de exposição ao intemperismo e demais solicitações de serviço, das diversas partes que compõem a estrutura a ser recuperada.

Alguns trabalhos da literatura discutem as propriedades das argamassas de reparo, tal como Geho (1989) e Wood (1990). Mais

recentemente e como explorado no item 2.2, a norma provisória ENV 1504-9/97 relaciona cerca de 90 propriedades que podem ser especificadas para argamassas, sistemas de proteção ou reparo de estruturas de concreto, em função do princípio do processo utilizado, e diferencia aquelas sempre exigíveis das que são específicas ou especiais, para certos tipos de obra. Nas Tabelas do Anexo B, estão listadas 72 das propriedades mais diretamente relacionadas à recuperação de obras com corrosão de armaduras. Como visto, muitas são as propriedades que podem ser ponderadas na especificação ou compra de argamassas de reparo, e a norma provisória ENV 1504-9/97 fornece algumas orientações práticas sobre quais propriedades são mais importantes para os diversos tipos de recuperação, conforme o mecanismo e as origens do processo de deterioração.

Pela análise das Tabelas do Anexo B, pode-se destacar as seguintes propriedades, no caso das argamassas de reparos localizados: 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 elasticidade, retração por secagem, deformações cíclicas por umidade e temperatura, capilaridade e permeabilidade a água, resistência à carbonatação e difusão de íons cloreto, resistividade elétrica, resistência de aderência, entre outras.

Na Tabela 5 e Tabela 6, a seguir, são relacionadas as propriedades que Medeiros; Selmo (2001) consideram factíveis de controle para as argamassas e sistemas de reparo, para estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação. Com isso, pretende-se destacar para o leitor o que há de mais importante nas Tabelas anexas da norma provisória ENV 1504-9/97, já que este lista um número muito grande de propriedades, e isto pode gerar dúvidas sobre o que realmente é relevante ou não, se precisar ser extrapolado para um processo de controle tecnológico de fabricação ou para efeito normativo. Nas últimas colunas da Tabela 5 e Tabela 6, sugere-se o tipo de controle em que podem ser cabíveis a avaliação das propriedades relacionadas.

Tabela 5 – Propriedades de argamassas, para reparos localizados em estruturas de concreto com corrosão de armaduras, e sugestões para a sua aplicação no controle tecnológico de fabricantes (Medeiros; Selmo, 2001).

ARGAMASSA	PROPRIEDADE	CONTROLE TECNOLÓGICO		
		(1)*	(2)*	(3)*
Estado anidro ou granular	Densidade de massa aparente	X		
	Resíduo insolúvel	X		
	Granulometria		X	
	Teor de álcalis		X	
	Cloretos solúveis		X	
Estado fresco	Densidade de massa aparente	X		
	Manutenção da trabalhabilidade		X	
Estado endurecido	Resistência à compressão	X		
	Resistência à tração na flexão		X	
	Retração por secagem		X	
	Sucção capilar de água		X	
	Módulo de elasticidade		X	
	Variações dimensionais cíclicas			X
	Resistência à carbonatação			X
	Resistividade elétrica			X
(1)* Controle normal de fabricante, com maior frequência; (2)* Controle especial de fabricante, com menor frequência; (3)* Controle adicional em obras de arte ou em condições mais críticas de exposição, como p. ex., concreto aparente.				

Tabela 6 – Propriedades dos sistemas de reparo, avaliadas em substratos padronizados ou de serviço, para qualificação de fabricantes (Medeiros; Selmo, 2001).

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 cargas)		(A), (B)
		Compatibilidade eletroquímica com armadura (ausência de macro-células 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, temperatura ou carga		(A), (B)
(1)* Controle normal de fabricante, com maior frequência;				
(2)* Controle especial de fabricante, com menor frequência;				
(3)* Controle adicional em obras de arte ou em condições mais críticas de exposição, como p. ex., concreto aparente.				
(A) Substrato + Argamassa		(B) Substrato + Argamassa + Proteção final		

Pela listagem da Tabela 5 e Tabela 6, não é difícil prever que as exigências de fabricação ou as especificações normativas de argamassas industrializadas devam ficar restritas às suas propriedades intrínsecas (Tabela 5), até que se evolua para ensaios de desempenho de sistemas de reparo, com substratos padrão (Tabela 6). Aos engenheiros cabem selecionar, especificar e controlar propriedades de desempenho críticas, para as condições particulares de cada obra, considerando a sua experiência anterior com o produto e outras variáveis como o sistema de proteção superficial, sempre tendo em vista que muitas das propriedades apontadas são interdependentes, isto é, inter-relacionadas.

A diferença de propriedades físicas e mecânicas básicas das argamassas de reparo industrializadas, por exemplo apontadas em Selmo et al. (2000), indica a necessidade dos fabricantes brasileiros passarem a informar propriedades normalizadas para qualificar os seus produtos, não sendo mais admissível a informação apenas qualitativa de suas propriedades. Uma simples e conseqüente classificação dessas argamassas, com base em suas características de trabalhabilidade e propriedades mecânicas intrínsecas, irá permitir às empresas de recuperação especificarem, compararem e controlarem produtos do mercado, de forma muito mais facilitada e tecnicamente melhor balizada.

2.5 REQUISITOS DE COMPATIBILIDADE ENTRE ARGAMASSA DE REPARO E A ESTRUTURA DE CONCRETO

Segundo Emmons; Vaysburd (1996), a compatibilidade em um sistema de reparo pode ser definida como o balanço entre as propriedades físicas, químicas e eletroquímicas entre os materiais de reparo e o substrato existente, responsável pela garantia de que a estrutura reparada vai resistir às tensões induzidas por cargas, mudanças de volume, e a influências químicas e eletroquímicas do material de reparo e do ambiente, sem abalo e deterioração em determinado ambiente e dentro de um certo período de tempo.

De acordo com Vaysburd; Emmons (2000), os problemas de compatibilidade têm ocorrido pelo fato da indústria da construção não estar dando atenção adequada para os dois tópicos relacionados à corrosão prematura em estruturas de concreto reparadas, a saber: fissuras (devidas à retração por secagem e a outros fatores), incompatibilidade eletroquímica (devido à mudanças na interface do aço causadas pelo reparo).

Vaysburd; Emmons (2000) defendem que para se atingir boa resistência ao surgimento de fissuras na interface, o material precisa ter baixos valores de retração e módulo de elasticidade e altos valores de resistência à tração.

É importante ressaltar que a questão do módulo de elasticidade ainda é muito controversa como está discutido no item 2.5.1.

É claro que a retração e a resistência à tração das argamassas de reparo não são os únicos fatores a serem considerados para o sucesso de uma intervenção por reparos localizados, mas sem dúvida são propriedades críticas de desempenho.

A Figura 13, elaborada por este autor, ilustra muito bem a importância dessas propriedades, quando é realizada uma intervenção por reparos localizados.

Quanto à compatibilidade eletroquímica, ainda muito pouco se tem esclarecido sobre métodos e critérios para a sua avaliação como será discutido no item 2.5.2.

Figura 13 – Ilustração dos esforços atuantes em um reparo localizado em virtude da retração da argamassa de reparo.

2.5.1 Compatibilidade de deformações

A técnica de reparos localizados de estruturas de concreto armado coloca materiais distintos em contato e necessita de análise do sistema quanto às possíveis conseqüências, pelas diferenças na mudança do volume dos materiais envolvidos, quando submetidos às variações de umidade, temperatura e cargas normais de serviço.

Quando se trata de reparos a base de argamassas de cimento Portland, pode-se entender, de forma errada, que essa questão não é muito importante, por serem essas argamassas da mesma natureza do concreto. Contudo, segundo Emmons (1993), as mudanças de volume das argamassas precisam ser controladas em reparos de concreto, para evitar ou minimizar a ocorrência de fissuras na interface com o concreto.

A Figura 14 destaca em preto os principais requisitos que devem ser levados em consideração na escolha de opções de argamassa de reparo, com relação à obtenção da compatibilidade de deformações, tendo-se por objetivo evidenciar e sintetizar a complexidade dos requisitos envolvidos e a seguir discutidos nos itens **a)** e **b)**.

Pela análise das propriedades intrínsecas à compatibilidade de deformações, na Figura 14, tem-se que a aderência dos sistemas de reparo é a propriedade que vai garantir a capacidade da peça reabilitada de trabalhar de forma monolítica com a estrutura, sendo interpretada sempre através da extensão e da resistência de aderência, havendo pesquisa recente sobre o tema, de Moreno (2002).

Figura 14 – Requisitos principais a serem considerados para se obter a compatibilidade de deformações entre sistemas de reparo localizados e as estruturas de concreto (Medeiros; Selmo, 2001).

a) Variações volumétricas iniciais por secagem

A retração por secagem nas primeiras idades de um reparo é totalmente indesejável, pois este é um caso em que apenas a argamassa está retraindo, o que provoca tensões na interface provavelmente maiores do que por efeito térmico, quando os dois materiais, argamassa e concreto, modificam seu volume no mesmo sentido, ainda que com intensidades e em momentos diferenciados. Dessa forma, quanto menor a retração por secagem da argamassa de reparo, menor o risco de ocorrência de fissuras na interface com o concreto.

A Tabela 7 resume uma indicação de procedimentos para este tipo de ensaio, e a Tabela 8 apresenta os limites recomendados para a retração em argamassas de reparo.

O ensaio de retração aqui discutido é para medida da retração livre, cujo princípio se baseia na medida da mudança de comprimento de corpos-de-prova prismáticos expostos a condições padronizadas. Deve-se notar pela Tabela 7 que as dimensões dos corpos-de-prova variam consideravelmente em todo o mundo. As condições ambientais para a realização do ensaio situam-se entre 20 °C e 27 °C, com umidade relativa entre 45% e 65%.

Tabela 7 – Procedimentos para ensaio de retração por secagem (adaptado de Decter; Keeley, 1997).

ESPECIFICAÇÃO OU NORMA	CONDIÇÕES DA SECAGEM	DIMENSÕES DOS CORPOS-DE-PROVA (mm)
Proposta de norma européia	Temperatura: 20 °C UR: 65 %	40 x 40 x 160
HKHA (Hong Kong Housing Authority) ⁵	Temperatura: 27 °C UR: 55 %	25 x 25 x 285
AS 1012 Pt. 13 ⁶ – 1970 - Austrália	Temperatura: 23 °C UR: 50 %	75 x 75 x 285
ASTM C157 ⁷ – 1989 – Estados Unidos	Temperatura: 23 °C UR: 50 %	25 x 25 x 285
DIN 52450 ⁸ – 1985 – Alemanha	Várias: 20 °C; 65 % de UR 23 °C; 50 % de UR 20 °C; 45 % de UR 20 °C; >95 % de UR 20 °C; úmido	40 x 40 x 160
BS 1881 Part 5 ⁹ – 1970 – Reino Unido	Não informado pelos autores	75 x 75 x 150
NBR 8490/1984 ¹⁰ - Brasil	Temperatura: 23 °C UR: 50 %	25 x 25 x 285

Tabela 8 – Limites recomendados para retração de argamassas de reparo (adaptado de Decter; Keeley, 1997).

PROCEDIMENTO A SER EMPREGADO	AUTOR DA RECOMENDAÇÃO	LIMITE RECOMENDADO
Proposta de norma européia	pr EN 1504-4 - 2000	≤ 0,1 %.
HKHA (Hong Kong Housing Authority)	HKHA (Hong Kong Housing Authority)	0,03 % a 7 dias.
Adaptado da ASTM C157 – 1989 – Estados Unidos	EMMONS (1993) Observação: usou corpos-de-prova de 76 mm x 76 mm x 286 mm ao invés do recomendado na ASTM C 157/1989	0,05 % a 28 dias.
Adaptado da ASTM C157 – 1989 – Estados Unidos	POSTON et al. (2001) Observação: usou corpos-de-prova de 76 mm x 76 mm x 286 mm ao invés do recomendado na ASTM C 157/1989	0,04 % a 28 dias; Retração a 18 meses < 2 vezes o valor da retração a 28 dias.

⁵ Hong Kong Housing Authority. **Practice notes for concrete Repair**. 1991.

⁶ AS 1012 Part 13 – **Method for the determination of drying shrinkage of concrete**. Australia, 1970.

⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for length change of hardened hydraulic – cement mortar and concrete. ASTM C157**. Philadelphia, 1989.

⁸ Deutsches Institut für Normung (DIN) **Determination of shrinkage and swelling on small test pieces. Alemanha, DIN 52450**. 1985.

⁹ British Standards Institution (BSI). **Testing concrete – Methods of testing hardened concrete for other than strength. BS 1881 Part 5**. Reino Unido, 1970.

¹⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. NBR 8490**. Rio de Janeiro, 1984.

É relevante destacar pela Tabela 9 que os corpos-de-prova especificados para este tipo de ensaio no Brasil, em Hong Kong e nos Estados Unidos apresentam maior relação área superficial/volume, o que proporciona uma secagem mais rápida e, conseqüentemente, maiores valores de retração.

Além disso, a condição de armazenamento dos corpos-de-prova adotada no Brasil é uma das mais severas entre as listadas na Tabela 7.

Tabela 9 – Relação entre a área superficial e o volume dos corpos-de-prova adotados nos documentos especificados na Tabela 7.

LOCAL	RELAÇÃO ÁREA SUPERFICIAL/VOLUME
Proposta de norma européia Din 52450 – 1985 – Alemanha	1
NBR 8490/1984 - Brasil HKHA (Hong Kong Housing Authority) ASTM C157 – 1989 – Estados Unidos	1,6
BS 1881 Pt. 5 – 1970 – Reino Unido AS 1012 Pt. 13 – 1970 – Austrália	0,53
EMMONS (1993); POSTON et al. (2001)	0,53

Vale salientar que, a retração por secagem nas primeiras idades, deve ser tomada como uma propriedade crítica de desempenho de uma argamassa de reparo, já que o surgimento de fissuras de interface entre o concreto original e a argamassa de reparo facilitam o acesso de agentes agressivos às armaduras da estrutura, podendo desencadear um processo de corrosão localizada pelo desenvolvimento de macro-células, a serem discutidas no item 2.5.2.

b) aderência e capacidade de deformação

Como decorrência das variações volumétricas por secagem, ação de cargas ou condições ambientais e considerando-se a finalidade dos reparos localizados, torna-se indispensável a propriedade de aderência entre a argamassa e o substrato, como indicado na Figura 14.

Nas deformações cíclicas das estruturas em serviço, por variações de umidade e temperatura, principalmente em reparos de concreto aparente, a exigência de resistência de aderência é requisito crítico. Ensaio acelerados

comparativos de aderência à tração e ao cisalhamento podem ser úteis e já são normalizados na França. No Brasil, pode-se citar estudos iniciais com bons resultados realizados por Mitre (2001) e com uma síntese discutida em Mitre et al. (2001) frente à ação cíclica de umidade e temperatura.

A aderência é a responsável pela restrição às deformações e permite a transferência de tensões para a estrutura, pela interface com o concreto e as armaduras. Porém, a aderência é uma propriedade de interface do reparo e só será mantida às custas da adequada transferência de tensões ou de deformações do reparo localizado, para o concreto de base e para isto é fundamental a resistência mecânica e o módulo de elasticidade da argamassa de reparo.

Quanto ao módulo de elasticidade, verifica-se que é uma propriedade que ainda demanda muita pesquisa e discussão, pois não existe um consenso sobre o assunto quando se objetiva um bom desempenho para um determinado material de reparo, e isto pode ser verificado a partir dos próximos parágrafos.

A capacidade de deformação do reparo controla a sua variação dimensional, segundo Aguiar (1999), e é totalmente indesejável que um reparo deforme de forma diferenciada do elemento estrutural, quando submetido a determinadas condições de carregamento. Desse modo, para a autora citada, se torna importante a compatibilidade entre o módulo de elasticidade dos dois materiais, argamassa e concreto, que devem trabalhar da forma o mais homogênea possível¹¹.

A Figura 15 ilustra o caso de um elemento formado por dois materiais com módulo de elasticidade bastante distintos, para exemplificar o que pode ocorrer em um sistema de reparo localizado. Pesquisadores como Decter; Keely (1997) também defendem esta tese.

¹¹ Quando Aguiar (1999) fala de compatibilidade entre os módulos de elasticidade da argamassa de reparo e do concreto do substrato, significa que esses módulos devem ser o mais próximos possível.

Figura 15 – Ilustração do problema do uso de materiais com módulos de elasticidade muito distintos em reparos de estruturas de concreto, segundo Aguiar (1999). Mas existem controvérsias, como indicam experimentos de campo de Mangat; O’Flaherty (2000).

Por outro lado, autores como Mangat; O’Flaherty (2000) defendem justamente o contrário de Aguiar (1999), declarando que o ideal é que o material a ser empregado como reparo deva ser mais rígido do que o concreto de substrato (módulo de elasticidade maior do que o do substrato de concreto). A explicação é que o material mais rígido se comporta melhor com relação à retração restringida, facilitando a transferência de tensões para o substrato e para as armaduras, resultando, desse modo, em uma maior distribuição das tensões.

Em seus estudos, Mangat; O’Flaherty (2000) aplicaram várias argamassas de reparo industrializadas na recuperação das pontes Lawns Lane e Gunthorpe, na Inglaterra, e verificaram a menor ocorrência de fissuras nos reparos com argamassas com módulos de elasticidade maiores do que o do substrato.

Ainda segundo aqueles autores, no caso da ponte Lawns Lane, a argamassa de reparo escolhida pelo engenheiro residente da obra foi a de maior resistência à compressão e menor módulo de elasticidade, sendo esta a que proporcionou maiores problemas com o surgimento de fissuras. Vale destacar que a opção com menor resistência à compressão (menor até do

que a resistência à compressão do substrato) e módulo de elasticidade maior do que o do substrato, demonstrou-se satisfatória, o que pode indicar grandes chances de falha ao se especificar materiais de reparo com base apenas na resistência à compressão.

Outros, tal como Vaysburd; Emmons (2000), expõem que o módulo de elasticidade das argamassas de reparo deve ser baixo para que o material tenha uma boa capacidade de absorver deformações, evitando o surgimento de fissuras na interface entre o concreto antigo e a argamassa de reparo.

Poston et al. (2001) preferiram não arriscar recomendação de limite sobre essa propriedade a partir de seus dados, justificando não terem encontrado a relação que esperavam entre os resultados de módulo de elasticidade e os de retração restringida.

Com relação à resistência à tração, Poston et al. (2001) recomendam que ela seja no mínimo 10 % da resistência à compressão da argamassa de reparo para cura úmida. Estes mesmos autores também recomendam que a resistência à compressão deve ser maior ou igual a 17 MPa e 28 MPa a 3 e 28 dias, respectivamente.

Estas recomendações feitas por Poston et al. (2001) baseiam-se em um estudo laboratorial envolvendo 12 materiais de reparo incluindo desde concretos até argamassas destinadas ao reparo de estruturas de concreto armado. O critério para a determinação dos limites acima indicados não foram muito bem definidos, por isso deve-se encarar estes valores apenas como pontos de referência para este estudo, já que é rara a recomendação de limites para as propriedades de materiais de reparo.

Isto reflete a carência atual com relação a requisitos e critérios de desempenho bem definidos para materiais de reparo de estruturas de concreto armado e esta é uma questão não muito fácil de ser resolvida porque fica difícil dizer, por exemplo, quais as propriedades físicas e mecânicas que uma dada argamassa pode ter para que não apareçam fissuras de interface. Mesmo porque isto não depende única e exclusivamente de uma só propriedade e sim de um conjunto delas incluindo as condições e propriedades do substrato. O interessante seria o

desenvolvimento de pesquisas laboratoriais vinculadas à verificação do desempenho dos produtos em campo. Essa sim seria uma boa metodologia para se estabelecer limites ou critérios recomendados, mas não é de simples execução ou interpretação pelo número de variáveis envolvidas.

2.5.2 Estabilidade eletroquímica do aço

A partir da remoção e recuperação de trechos corroídos de armaduras nas estruturas de concreto, conforme item 2.3, e ainda que garantida a compatibilidade de deformações entre a argamassa de reparo e o substrato de concreto, existem ainda muitas discussões relacionadas à durabilidade da técnica de reparos localizados.

Principalmente, no caso de estruturas de concreto aparente, como são, em geral, muitas obras de arte e prédios de projetos arquitetônicos arrojados da administração pública, a durabilidade dos sistemas de reparo deveria, em princípio, ainda ser avaliada pela capacidade de proteção ao aço conferida pelos diferentes sistemas de reparo ofertados pelo mercado.

Porém, ainda maior é o atraso do meio técnico, no desenvolvimento de técnicas ou métodos de ensaio eficientes para efetivar tal análise, pela complexidade dos agentes atuantes e porque o mecanismo básico de deterioração pode iniciar por formação de macro-células de corrosão, como indicado em trabalhos de tese de Nepomuceno (1992), Figueiredo (1994) e Helene (1993).

a) Formação de macro-célula de corrosão

Quando se faz o reparo de uma estrutura de concreto com corrosão das armaduras por carbonatação, retira-se o concreto deteriorado de determinada região danificada e recompõe-se a peça com uma argamassa de reparo. Dessa forma, tem-se uma parte da armadura imersa em concreto carbonatado e às vezes contaminado por outros agentes agressivos, como cloretos, sulfatos, etc, e um outro segmento imerso em argamassa nova e alcalina.

Assim, o reparo de um trecho de concreto carbonatado expõe uma armadura a duas diferentes condições de alcalinidade e já é por si suficiente

para provocar o surgimento de uma pilha eletroquímica (denominada macro-célula de corrosão), de modo que a parte da armadura em contato com a argamassa de reparo funciona como cátodo e o segmento de aço adjacente, antes intacto e em contato com o concreto original não removido, passa agora a funcionar como ânodo (Helene; Monteiro, 1993; Andrade et al., 1997).

Vaysburd; Emmons (2000) denominam esta possível ocorrência como incompatibilidade eletroquímica¹², e este problema é relevante, principalmente, para estruturas de concreto aparente e ainda maior em obras recuperadas, mas que não tenham depois a garantia de ter a sua pintura de proteção periodicamente renovada.

A incompatibilidade eletroquímica é responsável por um par galvânico quando provocada pelo desbalanceamento de potencial eletroquímico entre dois metais que são colocados em contato. Este desbalanceamento no potencial geralmente resulta em uma corrosão acelerada do metal eletroquimicamente menos nobre. Este conceito, contudo, é um pouco diferente quando ele é aplicado a reparos de concreto armado, pois ele se refere à diferença de potencial ocorrendo em diferentes locais de uma mesma barra ou entre barras em contato e causada pela falta de similaridade do meio envolvente, ou seja, reparo e concreto original. A referida diferença de potencial eletroquímico é causada por uma variedade de fatores incluindo propriedades físicas (como, densidade, porosidade e permeabilidade) e composição química do material de reparo e do substrato de concreto (Ping Gu et al., 1997).

É importante ter em consideração que o risco de corrosão devido à formação de macro-células de corrosão em uma estrutura reparada sempre vai existir a menos que um dos componentes imprescindíveis à corrosão não esteja presente (oxigênio, água, diferença de potencial e despassivação da armadura).

¹² O termo incompatibilidade eletroquímica é também mencionado como inversão de polaridade ou ainda como aparecimento de ânodos incipientes.

Segundo Andrade (1992), ainda que não apareçam fissuras ou sinais visíveis de corrosão pode ocorrer que alguns trechos não reparados estejam corroendo-se internamente, em locais aparentemente são. Assim, regiões restauradas por reparos localizados podem começar a atuar como cátodo frente àquelas regiões adjacentes não restauradas e que passarão a deteriorar-se mais rapidamente. Quando isto ocorre, é devido ao fato de que o reparo tem diferentes teores de umidade, oxigênio ou íons dissociados, se comparado ao restante da estrutura original, acarretando no surgimento de diferenças de potencial e na formação de pilhas de corrosão.

Existem quatro locais possíveis de ocorrência da corrosão de armaduras, por formação de macro-células de corrosão, que estão representados na Figura 16.

Figura 16 – Trechos das armaduras passíveis de corrosão após a execução de reparos localizados em estruturas de concreto armado (adaptado de Vaysburd; Emmons, 2000).

(I) Macro-célula tipo 1: Este caso (Figura 16 – a), em que a corrosão se desenvolve nas adjacências do trecho de barra reparada, ocorre quando o reparo foi feito de modo que todo o concreto antigo ao redor da barra foi eliminado e substituído pela argamassa de reparo, que aliás, é a técnica recomendada. Neste caso, considerando que as armaduras da estrutura já estejam despassivadas, a corrosão pode ocorrer pelo fato da barra embebida no material de reparo passar a funcionar como cátodo. A diferença de potencial eletroquímico neste caso deve-se principalmente a diferenças de contaminação, de acesso do oxigênio e da umidade entre os dois materiais, já que a argamassa de reparo geralmente apresenta isenção

de contaminação e maior compacidade do cobrimento, se comparado ao concreto original da estrutura reparada;

(II) Macro-célula tipo 2: O segundo caso (b) na Figura 16 é similar ao primeiro, mas pior e se deve ao surgimento de fissuras de retração da argamassa, na interface reparo-concreto original, muitas vezes ocasionadas pela retração por secagem e diferenças de movimentação higrotérmica entre o reparo e a estrutura. Estas fissuras permitem a rápida entrada dos agentes agressivos e da água ocasionando a despassivação pontual, que é mais nociva, por poder gerar uma corrosão localizada na barra;

(III) Macro-célula tipo 3: O terceiro caso (c), na Figura 16, ocorre pela técnica deficiente de eliminação apenas da parte externa do concreto original, de modo que a armadura fica com uma face catódica (aço imerso na argamassa de reparo) e outra anódica (aço imerso em concreto original) paralelas e com grande extensão de contato entre si. Este caso se manifesta pelo destacamento da argamassa de reparo. Vaysburd; Emmons (2000) ressaltam que este caso gera uma forte célula de corrosão, de modo que a deterioração do reparo pode se desenvolver em menos de um ano. Este é um caso de falha de metodologia de reparo ou da mão-de-obra empregada;

(IV) Macro-célula tipo 4: O quarto caso (d), na Figura 16, se refere ao fato de que, em uma estrutura de concreto armado, todas as armaduras principais estão interligadas por estribos. Desse modo, se um reparo localizado é executado em apenas algumas das armaduras principais, ter-se-á barras embebidas em meios distintos e interligadas entre si, o que pode proporcionar o surgimento de macro-células de corrosão.

b) Métodos discutidos na literatura

O estudo de produtos de base cimento, sejam argamassas ou concretos, com vistas à sua capacidade de proteção ao aço é algo já bastante difundido no Brasil, mas ainda não se chegou a uma padronização quanto aos procedimentos e dimensões dos corpos-de-prova a serem empregados. A Tabela 10 ilustra muito bem esta disparidade de metodologias.

Quando se pensa em estudar a corrosão de armaduras em estruturas reparadas, tudo fica mais complexo, já que em um caso como este a armadura está imersa em dois meios distintos, concreto antigo e argamassa nova, havendo ainda que se considerar a geometria e o posicionamento de um terceiro material, no caso o aço carbono.

Poucos estudos foram desenvolvidos sobre esse assunto, e a Tabela 11 apresenta um levantamento dos trabalhos publicados compilados por este autor.

Um grande avanço poderá ocorrer quando se chegar à adoção de corpos-de-prova e métodos padronizados para ensaios acelerados de corrosão, causada por ataque de cloretos e por carbonatação. Isto facilitará a comparação entre resultados no Brasil, contribuindo para a melhor qualidade das pesquisas nacionais e a conclusões práticas e direcionadas ao reparo ou prevenção da corrosão de armaduras, em estruturas de concreto armado. Mas, para isso realmente acontecer, é necessária uma convergência dos pesquisadores da área, no sentido de uniformizar os métodos de ensaio no desenvolvimento dos seus estudos.

Tabela 10 - Levantamento de corpos-de-prova utilizados por outros pesquisadores para verificação da capacidade de proteção de concretos e argamassas à armadura de aço carbono. C=cobrimento da barra; D=diâmetro da barra.

Pesquisador	Dimensões	Dados	Aceleração da corrosão
Cascudo (1991)		<p>C1 = 0,5 cm C2 = 2,5 cm D = 12,5 mm</p> <p>Leituras: * Potencial de corrosão (E_{corr})</p>	<p>* Imersão parcial em solução de NaCl (3,5 a 10%) por 3 dias e secagem ao ar por 4 dias.</p>
Tula (2001)		<p>C = 1,0 cm D = 8 mm</p> <p>Leituras: * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Resistividade elétrica-método Wenner * Intensidade de corrosão * Perda de massa</p>	<p>* Imersão parcial contínua em solução agressiva com 5% de NaCl. * Imersão parcial em solução de NaCl (5,0 a 10%) por 3 dias e secagem em estufa a 50 °C por 4 dias. * Câmara de carbonatação com umidade relativa de 59% e ambiente com 5% de CO₂. Os corpos de prova ficavam na câmara por 7 dias e 14 dias fora dela.</p>
Nepomuceno (1992)		<p>C = 0,7 cm D = 6,0 mm</p> <p>Leituras: * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Intensidade de corrosão (I_{corr}) * Queda Ohmica (R_{ohm})</p>	<p>* Câmara de névoa salina com temperatura de 35 a 40 °C e solução de NaCl variando de 3 a 7 %. * Câmara de carbonatação com umidade relativa de 50 a 70 % e ambiente com 100 % de CO₂.</p>

Pesquisador	Dimensões	Dados	Aceleração da corrosão
Bauer (1995)	<p>cotas em mm</p>	<p>C1 = 1,25 cm C2 = 2,5 cm D = 12,5 mm</p> <p>Leituras:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Intensidade de corrosão (I_{corr}) 	<ul style="list-style-type: none"> * Secagem em estufa (50 °C) por 14 dias e imersão parcial em solução de NaCl (3%) por 7 dias. * Câmara de carbonatação com umidade relativa de 65 a 70 % e ambiente com 50 % de CO₂.
Monteiro (1996)	<p>CORTE VERTICAL</p> <p>CORTE HORIZONTAL</p>	<p>C = 1,00 cm D = 5,0 mm</p> <p>Leituras:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Intensidade de corrosão (I_{corr}) Resistência ôhmica (ohm) * Variação de massa (%) 	<ul style="list-style-type: none"> * Secagem em estufa (50 °C) por 5 dias e imersão parcial em solução de NaCl (5%) por 2 dias. * Câmara de carbonatação. Medidas das variáveis inicialmente a cada 30 minutos e posteriormente leituras diárias.
Lima (2000)	<p>seção transversal</p> <p>cotas em mm</p> <p>vista frontal</p> <p>fundo falso</p>	<p>C = 2,0 cm D = 12,5 mm</p> <p>Leituras:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Intensidade de corrosão (I_{corr}) Resistência elétrica superficial 	<ul style="list-style-type: none"> * Secagem em estufa a 50 °C por 4 dias e imersão parcial em solução de NaCl (3,5%) por 3 dias.

Pesquisador	Dimensões	Dados	Aceleração da corrosão
Monteiro (2002)	<p>a = 9,8 ; 11,8 e 12,2 cm b = 3,6 ; 5,6 ; 9,6 cm</p>	<p>C1 = 1,0 cm C2 = 2,0 cm C3 = 4,0 cm D = 6,0 mm</p> <p>Leituras: * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Intensidade de corrosão (I_{corr})</p>	* Câmara de carbonatação com umidade relativa de 70 % e ambiente com 100 % de CO ₂ .
Francinete (1999)	<p>A) Seção Transversal Eletrodo de trabalho = 8 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento Contra-eletrodo = 10 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento</p> <p>B) Vista Frontal</p> <p>Celula em mm</p>	<p>C = 4,6 cm D = 8,0 mm</p> <p>Leituras: * Intensidade de corrente catódica (I_{cat}) * Intensidade de corrosão (I_{corr})</p>	* Exposição à umidade
Dal Molin (1999)	<p>Contra - eletrodo Grafite Eletrodo de trabalho Área de exposição 7,92 cm² Fita de PVC</p> <p>Dimensões em mm</p>	<p>C = 2,1 cm D = 6,3 mm</p> <p>Leituras: * Potencial de corrosão (E_{corr})</p>	* Imersão parcial em solução de NaCl (3,5%) por 2 dias e secagem ao ar por 5 dias.

Tabela 11 - Levantamento de corpos-de-prova utilizados por pesquisadores para o estudo de formação de macro-célula de corrosão. C=cobrimento da barra; D=diâmetro da barra.

Pesquisador	Dimensões	Dados	Aceleração da corrosão
Cleland, Yeoh e Long (1997)	<p>(a) Plan</p> <p>(b) Side elevation</p> <p>cotas em mm</p>	<p>C1 = 2,0 cm C2 = 4,0 cm D = 10,0 mm</p> <p>Leituras:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Potencial de corrosão (E_{corr}) 	<ul style="list-style-type: none"> * Imersão parcial em solução de NaCl (5%) por 7 dias e secagem ao ar por 7 dias.
Nepomuceno (1992)	<p>(a)</p> <p>(b)</p> <p>cotas em mm</p>	<p>C1 = 1,5 cm C2 = 3,0 cm D = 6 mm</p> <p>Leituras:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Intensidade de corrosão * Intensidade de corrente galvânica (I_g) 	<ul style="list-style-type: none"> * Foram colocadas poças de uma solução com 5% de NaCl. * Foram efetuadas ligações entre as armaduras dos corpos de prova para provocar o surgimento de macro-células de corrosão.
Castanheiras (1997)	<p>(a)</p> <p>(b)</p> <p>VISTA FRONTAL</p> <p>VISTA LATERAL</p> <p>VISTA FRONTAL</p> <p>VISTA LATERAL</p> <p>cotas em mm</p>	<p>C = 0,7 cm D = 6,0 mm</p> <p>Leituras:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Intensidade de corrente galvânica (I_g) * Queda Ôhmica (R_{ohm}) 	<ul style="list-style-type: none"> * O concreto era contaminado com uma solução de 3% de cloreto de sódio. * Foram efetuadas ligações entre as armaduras dos corpos de prova para provocar o surgimento de macro-células de corrosão.
Lima (2000)	<p>(a)</p> <p>(b)</p> <p>VISTA FRONTAL</p> <p>VISTA LATERAL</p> <p>cotas em mm</p>	<p>C = 2,0 cm D = 12,5 mm</p> <p>Leituras:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Potencial de corrosão (E_{corr}) * Intensidade de corrosão (I_{corr}) * Resistência elétrica superficial 	<ul style="list-style-type: none"> * O concreto era contaminado com uma solução de 3,5% de cloreto de sódio. * Secagem ao ar por 4 dias e imersão parcial em solução de NaCl (3,5%) por 3 dias.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do programa experimental foi investigar propriedades de argamassas de reparo de cimento Portland, que possam responder pela sua capacidade de proteção ao aço em estruturas de concreto, com vistas à sugestão de classificações e critérios para uma evolução normativa da tecnologia de reparos localizados.

Para isso, programou-se obter uma ampla caracterização das propriedades de argamassas de reparo industrializadas do mercado de São Paulo, e obter informações sobre argamassas passíveis de preparo em obra, com variação de dois tipos de cimento e dois tipos de polímero.

3.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS

3.2.1 Variáveis fixadas

Foram as variáveis independentes, objetos da investigação, com o intuito de observar a sua influência nas variáveis dependentes medidas.

Pelos objetivos indicados no item 3.1, as variáveis independentes e fixadas neste estudo estão apresentadas a seguir:

- a) **Argamassas industrializadas (AI)** – sete (7) produtos com dosagem dos materiais pré-estabelecida por cada fabricante, incluindo a proporção líquido/material seco;
- b) **Argamassas passíveis de preparo em obra (APO)** – seis (6) argamassas, com definição empírica dos materiais e de seu proporcionamento, a partir dos estudos de dosagem para otimização da aderência, de Moreno (2002). Essas argamassas foram produzidas com nível de consistência pré-fixada, um único traço, agregado miúdo e superplastificante, com variação dos seguintes materiais:
 - Dois (2) tipos de cimento;
 - Dois (2) tipos de polímero.

c) **Concreto de referência** – de f_{ck} 25 MPa e relação a/c 0,60.

3.2.2 Variáveis medidas

Foram as variáveis dependentes das variáveis fixadas, medidas em corpos-de-prova de argamassa e do concreto de referência, podendo ser agrupadas da forma como apresentada a seguir:

a) ***Propriedades de caracterização básica das argamassas:***

- Densidade de massa específica no estado anidro;
- Densidade de massa aparente no estado anidro;
- Distribuição granulométrica no estado anidro;
- Consistência inicial e manutenção de consistência;
- Densidade de massa aparente, teor de ar e rendimento no estado fresco;

b) ***Propriedades relacionadas à compatibilidade de deformações:***

- Resistência à compressão;
- Resistência à tração na flexão;
- Módulo de elasticidade;
- Resistência de aderência ao cisalhamento;
- Resistência de aderência à tração direta;
- Retração por secagem.

c) ***Propriedades relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço:***

- Absorção de água por imersão;
- Absorção de água por capilaridade;
- Resistência à carbonatação acelerada;
- Resistividade elétrica superficial;
- Proteção do aço em “reparos homogêneos”, só constituídos por argamassa ou concreto, empregando-se a espectroscopia de impedância eletroquímica.

3.3 MATERIAIS EMPREGADOS – DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

3.3.1 Argamassas passíveis de preparo em obra (APO)

Foram utilizadas seis argamassas passíveis de serem preparadas em obra, com dosagem cimento:agregado pré-estudadas e definidas no projeto de Moreno (2002), por critério de aderência a substratos de concreto. No presente estudo, além do cimento selecionado no trabalho já referido, da marca Bonfim, tipo CP II-F 32, foi também incluído o uso do cimento CPV ARI-PLUS RS, sendo três argamassas de cada cimento citado, Tabela 12.

A justificativa para a escolha desses cimentos foi por possuírem reservas alcalinas bem distintas, sendo o cimento CP II-F ainda pouco estudado quanto ao desempenho em sistemas de reparo. Já o CPV ARI-PLUS RS é sempre preferido em situações de reparo, com necessidade de rápida liberação de áreas para uso. Destaque-se que a marca do cimento CP II-F foi selecionada pelo ponto de vista da otimização da aderência entre cinco marcas disponíveis no mercado de São Paulo, resultado este obtido por Moreno (2002).

Os resultados de caracterização dos cimentos, pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, estão resumidos no Anexo D.

As argamassas do tipo APO foram confeccionadas no intuito de se obter índices de consistência de 200 mm $\pm$ 10 mm, sendo estas argamassas típicas de aplicação manual. A Tabela 12 resume as argamassas do tipo APO que fizeram parte do estudo.

Tabela 12 – Identificação das argamassas tipo APO estudadas.

CIMENTO	TRAÇO EM MASSA	SP DOSAGEM	RELAÇÃO a/c (kg/kg)	POLÍMERO (tipo e dosagem)	IDENTIFICAÇÃO
CP II-F	1:3	2,4 %	0,40	Referência (0 %)	APO – 1
			0,43	EVA (10 %)	APO – 2
			0,40	Acrilato (10 %)	APO – 3
CP V-ARI PLUS RS	1:3	2,4 %	0,40	Referência (0 %)	APO – 4
			0,43	EVA (10 %)	APO – 5
			0,40	Acrilato (10 %)	APO – 6

APO = argamassa passível de ser preparada em obra.

SP = superplastificante

O agregado miúdo para a confecção destas argamassas foi uma areia natural oriunda do Porto Perdigão, em São José dos Campos – SP, que abastece o mercado de São Paulo há muitos anos. Esta areia também foi utilizada por Moreno (2002) e a sua caracterização consta no Anexo D.

Os polímeros empregados neste estudo foram um acrilato (especificação: VINNAPAS LL 512) e um EVA (especificação: VINNAPAS LL 5044) fornecidos em pó pela Waker e têm suas características apresentadas no Anexo D. O polímero EVA foi também previamente estudado por Moreno, do ponto de vista da aderência e aqui usou-se teor indicado por aquele trabalho.

Quanto ao aditivo superplastificante, este foi de marca selecionada por Moreno (2002) entre três fabricantes do mercado e o seu teor também foi balizado por estudos conduzidos por aquele autor, com a orientadora deste trabalho.

3.3.2 Argamassas industrializadas (AI)

Conforme catálogos no Anexo C, foram empregadas sete argamassas industrializadas, cujos nomes comerciais são: Renderoc S2 e Renderoc S25 da FOSROC, Emaco 167-com fibras e Emaco 168 da MBT, Revestimento OBE 240 e Revestimento OBE 250 da Otto Baumgart, Sika Top 122 da Sika.

Neste trabalho, estes produtos foram identificados com os códigos AI-1 até AI-7, sem relação alguma com a ordem acima mencionada ou com a que está indicada no Anexo C. Estas designações podem ser verificadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Identificação das argamassas industrializadas empregadas no estudo e a sua respectiva relação água/material anidro.

ARGAMASSA	RELAÇÃO LÍQUIDO/MATERIAL ANIDRO
AI-1	0,167 (componente A/componente B)
AI-2	0,125 (componente A/componente B)
AI-3	0,14 (água/material seco)
AI-4	0,13 (componente A/componente B)
AI-5	0,14 (água/material seco)
AI-6	0,16 (água/material seco)
AI-7	0,149 (componente A/componente B)

A argamassa AI-6 foi a única que não teve a faixa de relação água/material seco fixada em catálogo e, desse modo, o critério usado para a sua definição foi o de adicionar água suficiente para obter um produto de consistência semelhante à do produto bicomponente do mesmo fabricante.

3.3.3 Substrato de concreto

O concreto utilizado como substrato para aplicação das argamassas de reparo, foi definido por Moreno (2002), que fez estudo de dosagem com os mesmos materiais aqui empregados. Trata-se de um concreto de traço 1 : 2,24 : 3,12 com relação água/cimento 0,60. O teor de argamassa deste concreto é de 51% e a consistência medida pelo abatimento do tronco de cone igual a 100 ± 10 mm. As propriedades mecânicas deste concreto estão apresentadas no Anexo D.

O cimento empregado foi do tipo CII-F 32, da mesma marca usada nas argamassas de reparo APO-1 até APO-3.

A areia empregada foi da mesma procedência usada nas argamassas tipo APO, enquanto a brita foi de dimensão máxima característica de 19 mm, com as características indicadas no Anexo D.

3.3.4 Aço

As barras de aço empregadas para o estudo da eficiência de proteção das argamassas quanto à corrosão foram de aço CA-50 e de diâmetro 6,3 mm, da marca Gerdau.

3.4 PROPRIEDADES DE CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DAS ARGAMASSAS

3.4.1 Curva granulométrica no estado anidro

Para as argamassas industrializadas procedeu-se de forma similar à NBR 7217/87¹³ e BS EN 1015-1/99¹⁴, já que esta última apesar de não ser específica para argamassas de reparo é direcionada a argamassas industrializadas. Foi feito o peneiramento a seco das argamassas

¹³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação da composição granulométrica dos agregados - Método de ensaio. NBR 7217**. Rio de Janeiro, 1987.

¹⁴ British Standards Institution (BSI). **Methods of test for mortar for masonry – Part 1: Determination of particle size distribution. BS EN 1015-1**. Reino Unido, 1999.

industrializadas em um peneirador mecânico durante 30 minutos. O uso deste equipamento permitiu a total separação das frações graduadas, sem a necessidade de lavagem para a separação dos finos que poderiam aderir aos grãos de maior dimensão.

3.4.2 Densidade de massa específica e aparente no estado anidro

A densidade de massa específica foi determinada conforme a NBR NM 23/98¹⁵ e a densidade de massa aparente conforme a NBR 14086/98¹⁶, por ser um procedimento direcionado a argamassas industrializadas.

3.4.3 Teor de álcalis solúveis na fração anidra de finos

A determinação do teor de álcalis solúveis em água das argamassas foi conduzida na fração passante na peneira de abertura de malha 0,075 mm e de acordo com a ASTM C-144/94¹⁷. Teve por finalidade avaliar o efeito dos álcalis na carbonatação acelerada das argamassas, como já citado por Nepomuceno (1992).

3.4.4 Manutenção de consistência e densidade de massa aparente no estado fresco

A consistência das argamassas no estado fresco foi determinada de acordo com o procedimento da NBR 7215/96¹⁸. Os tempos de medida foram 15, 30, 45, 60 e 90 minutos, medidos a partir do momento da mistura da parte líquida com a parte sólida. O intuito foi verificar a perda de consistência das argamassas ao longo do tempo, ou seja, avaliar por essa propriedade o importante requisito de manutenção de trabalhabilidade.

A densidade de massa aparente no estado fresco foi determinada de acordo com a NBR 13278/95¹⁹, e permite o cálculo de rendimento das

¹⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento Portland – Determinação de massa específica. NBR NM 23**. Rio de Janeiro, 1998.

¹⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica – Ensaio de caracterização no estado anidro. NBR 14086**. Rio de Janeiro, 1998.

¹⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for chemical analysis of hydraulic cement. ASTM C-144/94**. Philadelphia, 1994.

¹⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. NBR 7215**. Rio de Janeiro, 1996.

¹⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. NBR 13278**. Rio de Janeiro, 1995.

argamassas e a comparação de volume produzido por unidade de massa, e por conseguinte uma melhor comparação do seu custo, do que o simples confronto do preço unitário por quilograma.

3.5 PROPRIEDADES RELACIONADAS À COMPATIBILIDADE DE DEFORMAÇÕES

3.5.1 Confeção dos corpos-de-prova empregados

As propriedades estudadas nesta parte do trabalho estão dispostas na Tabela 14 juntamente com a indicação dos corpos-de-prova e normas tomadas como referência.

Tabela 14 – Corpos-de-prova para a determinação das propriedades relacionadas a compatibilidade de deformações.

PROPRIEDADE	DIMENSÕES DOS CORPOS-DE-PROVA	DOCUMENTO ADOTADO COMO BASE PARA PROCEDIMENTOS
Resistência à compressão	40 mm x 40 mm x 160 mm	EN 196/90 ²⁰ e pr EN 12190/98 ²¹
Resistência à tração na flexão	40 mm x 40 mm x 160 mm	EN 196/90 e pr EN 12190/98
Módulo de elasticidade	40 mm x 40 mm x 160 mm	NBR 7190/96 ²²
Retração por secagem	25 mm x 25 mm x 285 mm	ASTM C 490/97 ²³
Resistência de aderência por cisalhamento	40 mm x 40 mm x 160 mm	GEHO (1989)
Resistência de aderência à tração direta (1)	20 mm x 300 mm x 300 mm	AFNOR 18-853/86 ²⁴

Observação: (1) problemas operacionais não são apresentados neste trabalho.

a) Moldagem e cura dos corpos-de-prova empregados

A confecção das argamassas foi realizada de acordo com o procedimento descrito na EN 196/90²⁵.

²⁰ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196.** 1990.

²¹ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of compressive strength of repair mortar. pr EN 12190.** 1998.

²² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190/96.** Rio de Janeiro, 1996.

²³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. ASTM C 490/97.** Philadelphia, 1997.

²⁴ ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits destinés aux applications superficielles sur béton durci. – Essai d'adhérence par traction après thermiques sur éprouvette sciée. AFNOR P 18-853.** 1986.

²⁵ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1.** 1990.

No caso da moldagem dos corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm, a compactação foi realizada em duas camadas de 17 golpes com o emprego do soquete padrão especificado na NBR 7215/96²⁶. Por outro lado, para a moldagem dos corpos-de-prova de 25 mm x 25 mm x 285 mm para o ensaio de retração livre, a compactação foi realizada em duas camadas aplicando 10 golpes da haste prismática de borracha de 15 mm x 25 mm x 12 mm especificado na NBR 8490/84²⁷.

No que se refere à cura, foi realizada uma averiguação inicial com relação ao seu efeito nas propriedades de resistência à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade. Para tanto, foram estudadas três condições de cura:

- 28 dias de cura úmida;
- 1 dia em câmara úmida e 27 dias em câmara seca a 23 ± 3 °C e 50 ± 5 % de umidade relativa;
- 28 dias em câmara seca a 23 ± 3 °C e 50 ± 5 % de umidade relativa.

Nos ensaios de retração por secagem adotou-se a cura **b)**.

No caso do ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto, a cura tipo **b)** foi ampliada em câmara úmida para 3 dias, seguidos de 25 dias em câmara seca, já no caso do ensaio de aderência por tração direta optou-se por uma cura úmida por 7 dias seguido de 21 dias em câmara seca. A cura inicial foi ampliada para estes ensaios, pela ocorrência de inúmeros deslocamentos de argamassas nos corpos-de-prova de aderência, antes mesmo da execução dos ensaios, no caso do uso da cura tipo **b)** acima.

²⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. NBR 7215**. Rio de Janeiro. 1996.

²⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. NBR 8490**. Rio de Janeiro, 1984.

b) Quantidade de corpos-de-prova empregados

Na Tabela 15 consta uma visão global do tipo e quantidade de corpos-de-prova empregados na determinação das propriedades físicas e mecânicas das argamassas de reparo e concreto do substrato.

Tabela 15 - Número de corpos-de-prova para a determinação das propriedades relacionadas a compatibilidade de deformações.

SÉRIES	ARGAMASSA	ENSAIOS			
		Número De Corpos- De- Prova			
		Retração por secagem linear ⁽¹⁾	Resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade ⁽²⁾	Resistência de aderência	
				Cisalhamento ⁽³⁾	Tração direta ⁽⁴⁾
AI-1	Industrializada 1	4	12	4	2
AI-2	Industrializada 2	4	12	4	2
AI-3	Industrializada 3	4	12	4	2
AI-4	Industrializada 4	4	12	4	2
AI-5	Industrializada 5	4	12	4	2
AI-6	Industrializada 6	4	12	4	2
AI-7	Industrializada 7	4	12	4	2
APO-1	Dosada 1	4	12	4	2
APO-2	Dosada 2	4	12	4	2
APO-3	Dosada 3	4	12	4	2
APO-4	Dosada 4	4	12	4	2
APO-5	Dosada 5	4	12	4	2
APO-6	Dosada 6	4	12	4	2
Concreto de referência	---	4	12	4	2
TOTAL		56	168	56	28

(1) Os corpos-de-prova de retração tiveram as dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm.

(2) Os corpos-de-prova para resistência à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade tiveram dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm.

(3) Os corpos-de-prova para resistência de aderência por cisalhamento tiveram dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, sendo metade de concreto e metade de argamassa.

(4) Os corpos-de-prova para resistência de aderência por tração direta tiveram dimensões 100 mm x 300 mm x 300 mm (substrato) com camada de 20 mm de argamassa aplicada sobre a superfície de 300 mm x 300 mm.

Observação: Também foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de ϕ 100 mm x 200 mm do concreto utilizados no substrato para realização dos ensaios de resistência à compressão, à tração na compressão diametral e módulo de elasticidade.

3.5.2 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração por flexão foi medida com quatro corpos-de-prova de dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada argamassa, aos 28 dias de idade, ensaiados de acordo com a norma EN 196/90²⁸, com velocidade de carregamento de 50 N/s, em uma prensa da marca Emic modelo DL 10000. A Figura 17 ilustra o ensaio sendo realizado.

Figura 17 – Ensaio de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm, com vão livre de 100 mm.

Após o período de cura, conforme item 3.5.1-a), todos os corpos-de-prova foram colocados em estufa a 70 °C até constância de massa, para garantir as mesmas condições de secagem, no momento do ensaio. Sem este procedimento, os corpos-de-prova estariam com teores de umidade interna diferentes no momento do ensaio, e os resultados estariam influenciados, não só pela hidratação resultante dos diferentes procedimentos de cura, como também pelo teor de umidade proveniente de cada tipo de cura.

3.5.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi medida com quatro corpos-de-prova de dimensões próximas a 40 mm x 40 mm x 80 mm para cada argamassa, aos 28 dias de idade, utilizando-se uma das metades de cada corpo-de-prova ensaiado à flexão, segundo ilustração da Figura 18 e sendo a velocidade de carregamento igual a 2400 N/s, em uma prensa Emic modelo DL 10000.

²⁸ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1.** 1990.

Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão em metades dos corpos-de-prova de flexão e com dimensões aproximadas a 40 mm x 40 mm x 80 mm, conforme EN 196-1/90²⁹ e prEN 12190/98³⁰.

3.5.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade secante à compressão das argamassas foi medido também aos 28 dias de idade utilizando-se as 4 metades restantes dos corpos-de-prova originais do ensaio de tração na flexão.

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade à compressão foi realizado em analogia à NBR 7190/96³¹ efetuando-se inicialmente dois ciclos de carga e descarga a 10% e 50% do limite de resistência à compressão estimado para cada argamassa³², ver Figura 19. O módulo secante foi calculado para as deformações medidas nesses dois limites através de dois extensômetros elétricos acoplados em duas laterais opostas de cada corpo-de-prova. A velocidade de carga foi de 2400 N/s, tal como a empregada no ensaio de compressão, sendo também usada a prensa Emic modelo DL 10000. Após atingir 50% da carga de ruptura pela terceira vez, os dois extensômetros foram retirados e o corpo-de-prova levado à ruptura. A Figura 20 ilustra este tipo de ensaio sendo realizado.

²⁹ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1.** 1990.

³⁰ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of compressive strength of repair mortar. prEN 12190/98.** March, 1998.

³¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190/96.** Rio de Janeiro, 1996.

³² O fato de não existir norma específica para ensaio de módulo de elasticidade para argamassas levou à necessidade de adotar um procedimento padronizado. Como o procedimento da NBR 7190/96 já havia sido empregado para argamassa nos trabalhos de Miranda (2000) e Moreno (2002) com bons resultados, este também foi aqui empregado.

Figura 19 - Ciclos de carregamento a que os corpos-de-prova foram submetidos no ensaio de módulo de elasticidade, definido por analogia a NBR 7190/96³³.

Figura 20 – Ensaio de módulo de elasticidade secante à compressão em corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 80 mm, feito por 2 ciclos de carregamento, conforme a Figura 19.

3.5.5 Resistência de aderência por cisalhamento direto

A resistência de aderência por cisalhamento direto consistiu na aplicação da argamassa estudada em um substrato de 40 mm x 40 mm x 40 mm, feito do concreto indicado no item 3.3.3 e cuja superfície de aplicação foi previamente jateada com areia. A aplicação da argamassa de reparo foi de forma contígua e compacta a esse substrato e com dimensões equivalentes, produzindo-se corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm, feitos metade de concreto e a outra metade de argamassa. O rompimento foi realizado como ilustra a Figura 21, que também apresenta uma foto do

³³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190/96**. Rio de Janeiro, 1996.

ensaio sendo realizado. A velocidade de carregamento foi 50 N/s como a empregada no ensaio de flexão.

Figura 21 – Ilustração do ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto.

3.5.6 Resistência de aderência por tração direta

Esta parte do estudo consistiu em aplicar uma camada de 20 mm de espessura sobre uma base de concreto prismática de 300 mm x 300 mm x 100 mm, que foi previamente jateada com areia e umedecida superficialmente por imersão em lâmina de água, por cerca de 1 minuto.

Após a cura de 3 dias e condicionamento destes corpos-de-prova por 90 dias em câmara seca a 23 ± 3 °C e 50 ± 5 % de umidade relativa, foi feita uma tentativa de corte das argamassas para realização do ensaio como ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Ilustração do ensaio de resistência de aderência por tração direta (fora de escala).

3.5.7 Retração por secagem

Este ensaio foi realizado de forma análoga à ASTM C490/97³⁴ e NBR 8490/84³⁵. Os corpos-de-prova empregados tiveram dimensões de 25 mm x 25 mm x 285 mm e foram desmoldados 24 horas após sua moldagem, mantidos em câmara úmida até este prazo. Foram confeccionados 4 corpos-de-prova para cada argamassa estudada.

Logo depois da desforma foram realizadas as primeiras leituras de retração e a pesagem, que se prosseguiram por 90 dias. Os corpos-de-prova ficaram armazenados em uma câmara seca com umidade relativa de 50 ± 5 % e temperatura de 23 ± 3 °C. A Figura 23 ilustra o aparelho para leitura da retração e as condições de armazenamento dos corpos-de-prova.

Figura 23 – Aparelho de medida de retração livre corpos-de-prova de 25 mm x 25 mm x 285 mm e sua condição de armazenamento.

3.6 PROPRIEDADES RELACIONADAS À ESTABILIDADE ELETROQUÍMICA DO AÇO

As propriedades escolhidas para avaliar o requisito de estabilidade eletroquímica do aço, conjunto com o efeito de barreira física, não tiveram a intenção de esgotar o assunto e foram agrupadas em:

³⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. ASTM C 490/97**. Philadelphia, 1997.

³⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. NBR 8490**. Rio de Janeiro, 1984.

- propriedades que avaliam diretamente o efeito barreira, pela resistência à penetração de agentes agressivos, como a absorção de água por capilaridade e por imersão, resistência à carbonatação acelerada, conforme itens 3.6.1 até 3.6.4;
- propriedades que avaliam diretamente a resistência à mobilidade de corrente pelas argamassas, como a espectroscopia de impedância eletroquímica e a resistividade elétrica superficial, conforme itens 3.6.5 até 3.6.7.

3.6.1 Confeção dos corpos-de-prova para ensaios relativos ao ingresso de água e CO₂

As propriedades estudadas estão dispostas na Tabela 16 juntamente com a indicação dos corpos-de-prova e normas adotadas.

Tabela 16 – Corpos-de-prova para a determinação das propriedades relacionadas ao efeito barreira física.

PROPRIEDADE INTRÍNSECA DE DESEMPENHO	DIMENSÕES DOS CORPOS-DE-PROVA	NORMA ADOTADA
Absorção de água por capilaridade	60 mm x 60 mm x 120 mm	NBR 9779/87 ³⁶
Absorção de água por imersão	60 mm x 60 mm x 120 mm	NBR 9798/78 ³⁷
Resistência à carbonatação acelerada	60 mm x 60 mm x 120 mm	---

a) Moldagem e cura dos corpos-de-prova empregados

O procedimento descrito na EN 196/90 foi o empregado para a confecção das argamassas deste estudo.

Para os ensaios desta parte do estudo, foram empregados corpos-de-prova de dimensões 60 mm x 60 mm x 120 mm feitos totalmente de argamassa de reparo ou do concreto empregado no substrato. o adensamento foi feito com 40 golpes de uma haste de aço com diâmetro de 6,3 mm. O motivo do emprego desta haste foi padronizar a forma de

³⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. NBR 9779.** Rio de Janeiro, 1987.

³⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas e Concretos - ensaio de absorção de água por imersão. NBR 9798.** Rio de Janeiro, 1987.

adensamento com relação aos corpos-de-prova para o estudo quanto à proteção com relação à corrosão.

Os corpos-de-prova foram submetidos à cura em câmara úmida por 3 dias e seguida de 25 dias de secagem em câmara seca a 23 ± 3 °C e 50 ± 5 % de umidade relativa. Os corpos-de-prova de carbonatação foram na seqüência ensaiados conforme item 3.6.4. Os corpos-de-prova ensaiados à absorção de água por capilaridade e por imersão foram secos em estufa até constância de massa, antes de se proceder aos ensaios conforme itens 3.6.2 e 3.6.3.

b) Quantidade de corpos-de-prova empregados

Na Tabela 17 pode-se verificar a quantidade de corpos-de-prova que foram empregados no estudo de propriedades relacionadas à proteção contra a corrosão do aço.

Tabela 17 - Número de corpos-de-prova do estudo de propriedades relacionadas ao efeito barreira física contra a corrosão do aço.

SÉRIES	ARGAMASSA	ENSAIOS		
		Número de corpos- de- prova ^(*)		
		Absorção de água por imersão ⁽¹⁾	Absorção de água por capilaridade ⁽²⁾	Carbonatação acelerada ⁽³⁾
AI-1	Industrializada 1	3	3	4
AI-2	Industrializada 2	3	3	4
AI-3	Industrializada 3	3	3	4
AI-4	Industrializada 4	3	3	4
AI-5	Industrializada 5	3	3	4
AI-6	Industrializada 6	3	3	4
AI-7	Industrializada 7	3	3	4
APO-1	Dosada 1	3	3	4
APO-2	Dosada 2	3	3	4
APO-3	Dosada 3	3	3	4
APO-4	Dosada 4	3	3	4
APO-5	Dosada 5	3	3	4
APO-6	Dosada 6	3	3	4
Concreto de referência	---	3	3	4
TOTAL		42	42	56

(*) Os corpos-de-prova para absorção por imersão tiveram dimensões 60 mm x 60 mm x 120 mm.

3.6.2 Absorção de água por capilaridade

Foram empregados corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm, por se tratarem das dimensões adotadas nos ensaios eletroquímicos, e o procedimento foi baseado na DIN 52617/87³⁸. As laterais destes corpos-de-prova foram seladas com silicone e a superfície de 60 mm x 60 mm foi imersa em uma lâmina d'água, procedendo-se leituras de aumento de massa nos tempos de 1 min, 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 360 min, 1440 min (24 horas), 2880 min (48 horas), 4320 min (72 horas). A altura de ascensão capilar foi ainda medida após ruptura dos corpos-de-prova no final do ensaio (72 h). O coeficiente de ascensão capilar foi determinado no tempo de 24 horas pela fórmula abaixo, como recomendado pela DIN 52617/87:

$$C_{24} = \frac{Ab_{24}}{\sqrt{24}}$$

Onde:

C_{24} = coeficiente de absorção de água, em $\text{kg/m}^2 \times \text{h}^{-1/2}$;

Ab_{24} = absorção superficial de água em 24 horas, em kg/m^2 .

3.6.3 Absorção de água por imersão

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 9798/87³⁹ com o emprego de corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm.

3.6.4 Resistência à carbonatação acelerada

A carbonatação acelerada foi realizada em uma câmara de carbonatação, onde as condições foram mantidas da seguinte forma: umidade relativa em 65%, temperatura de 24 °C e 5% de teor de CO_2 .

A câmara de carbonatação empregada é da marca Thermotron e possui controle automático de temperatura (tolerância $\pm 1,1$ °C), umidade relativa (tolerância $\pm 2,5$ %) e teor de CO_2 (controlador de CO_2 modelo CEA

³⁸ DIN 52617 – Determinação do coeficiente de absorção de água de materiais de construção. DIN-52617/1987. Tradução de Consultor Técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland.

³⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Argamassas e Concretos - ensaio de absorção de água por imersão. NBR 9798. Rio de Janeiro, 1987.

266 com precisão de $\pm 3 \%$ sobre a escala empregada, que no caso foi de 5 %), como bem ilustrado na Figura 24.

A medida do avanço da frente de carbonatação para as argamassas e concreto (Figura 25) foi realizada com o uso de indicadores químicos (fenolftaleína e timolftaleína).

O procedimento de determinação da profundidade de carbonatação foi o constante no documento Rilem TC-CPC18/88⁴⁰ e o modelo do corpo-de-prova aqui empregado está representado na Figura 25.

Figura 24 – Câmara de carbonatação empregada no estudo.

Figura 25 - Modelo do corpo-de-prova constituído de argamassa de reparo ou do concreto do substrato para medida da frente de carbonatação, ao longo do tempo.

⁴⁰ RILEM - Measurement of hardened concrete carbonation depth. TC –CPC18. 1988.

3.6.5 Confeção dos corpos-de-prova para ensaios eletroquímicos relativos à mobilidade de corrente pelas argamassas

a) Moldagem e cura dos corpos-de-prova empregados

No ensaio de impedância conforme o item 3.6.6, foi usado o corpo-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm em sua configuração com as barras de aço, representado na Figura 26, sendo o cobrimento das argamassas de reparo igual a 1,5 cm.

A sua forma prismática e com dimensões reduzidas seguiu o empregado por alguns pesquisadores em ensaios de corrosão, como se pode ver no levantamento colocado na Tabela 10, semelhante à de Nepomuceno (1992), Bauer (1995) e Monteiro (1996), apenas em dimensões diferentes.

Como se pode constatar, trata-se de um corpo-de-prova em que o aço fica imerso em um meio homogêneo (argamassa de reparo ou concreto de substrato para comparação). Assim chamou-se a medida de impedância como relativa a proteção do aço em um “reparo homogêneo”, condição teórica e particular que merece prosseguimento da pesquisa para reparos heterogêneos (concreto - argamassa).

Figura 26 – Modelo do corpo-de-prova de argamassa de reparo e do concreto de substrato, usado nos ensaios de impedância, com trecho de exposição do aço igual a 3 cm e cobrimento de 1,5 cm.

No segundo tipo de ensaio foram usados corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm, sem armadura. A grandeza medida neste caso foi a resistividade elétrica superficial das argamassas, conforme item 3.6.7.

Para a confecção das argamassas foi utilizado o procedimento descrito na EN 196/90⁴¹.

Os corpos-de-prova prismáticos de 60 mm x 60 mm x 120 mm foram compactados em três camadas de 40 golpes com uma haste de aço com 6,3 mm de diâmetro. Adotou-se esta haste pelo fato de alguns destes corpos-de-prova serem armados com 4 barras de aço e por esse motivo necessitou-se de um soquete que pudesse passar entre estas barras para a compactação das primeiras camadas. A Figura 27 ilustra a moldagem deste tipo de corpo-de-prova.

Figura 27 – Detalhe da moldagem de três corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm.

Devido às dificuldades encontradas para a determinação da resistência de aderência das argamassas adotando a cura b), item 3.5.1-a), foi resolvido usar um outro período de cura mais favorável à hidratação das argamassas, no caso dos ensaios envolvendo o efeito barreira das argamassas. Essa cura foi de 3 dias em câmara úmida e 25 dias em câmara seca a 23 ± 3 °C e 50 ± 5 % de umidade relativa.

b) Preparo das barras de aço

As barras de aço foram cortadas com comprimento de 15 cm e foram submetidas ao procedimento de limpeza exposto na ASTM G1/90 (Anexo A) e em seguida tiveram um fio soldado na sua extremidade.

⁴¹ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1.** 1990.

O próximo passo foi proceder a sua pintura com uma tinta epoxídica a base de alcatrão de hulha, de modo a delimitar a área de exposição da barra no interior dos corpos-de-prova. A Figura 28 mostra como foi a disposição da pintura destas barras.

Figura 28 – Esquema das barras de 15 cm utilizadas nos corpos-de-prova de impedância. Área escurecida protegida por epóxi com alcatrão e área de ensaio no trecho claro, equivalente $5,6 \text{ cm}^2$.

c) Quantidade de corpos-de-prova empregados

A Tabela 18 mostra o número de corpos-de-prova que foram moldados para a avaliação da proteção quanto à corrosão.

Tabela 18 - Número de corpos-de-prova moldados para verificação da proteção do ponto de vista eletroquímico.

SÉRIES	ARGAMASSA	ENSAIOS	
		Número de corpos-de-prova	
		Barras isoladas	Resistividade
AI-1	Industrializada 1	1	2
AI-2	Industrializada 2	1	2
AI-3	Industrializada 3	1	2
AI-4	Industrializada 4	1	2
AI-5	Industrializada 5	1	2
AI-6	Industrializada 6	1	2
AI-7	Industrializada 7	1	2
APO-1	Dosada 1	1	2
APO-2	Dosada 2	1	2
APO-3	Dosada 3	1	2
APO-4	Dosada 4	1	2
APO-5	Dosada 5	1	2
APO-6	Dosada 6	1	2
Concreto de referência	---	1	2
TOTAL		14	28

Observação: Os corpos-de-prova dos ensaios visando grandezas eletroquímicas tiveram dimensões 60 mm x 60 mm x 120 mm.

3.6.6 Proteção do aço em “reparo homogêneo”, por espectroscopia de impedância eletroquímica

a) Princípios da técnica de impedância

A espectroscopia de impedância eletroquímica, internacionalmente designada por EIS (“Electrochemical Impedance Spectroscopy”) é uma técnica não-destrutiva com emprego em diversas áreas de pesquisa.

Para avaliação da corrosão, esta técnica se baseia na análise da resposta de um determinado metal frente à aplicação de uma diferença de potencial ou de corrente, em sinal alternado.

Para um sinal de tensão alternado (E), a sua relação com a resposta de corrente (I), em um dado circuito, é chamada de impedância (Z), pela fórmula:

$$Z = \frac{E}{I}$$

Pelos conceitos elétricos clássicos, sabe-se que a defasagem de tempo entre a aplicação de um sinal de tensão alternada e a corrente de resposta chama-se fase (Figura 29-(a)), sendo uma resposta característica de componentes capacitivos ou indutivos, pois para resistores ideais, não há ângulo de fase, ou seja, este é igual a zero. Pela Figura 29-(b), representa-se a fase em escala angular, onde θ é o ângulo de fase. A partir da representação vetorial, configura-se o vetor impedância, que é deduzido para o campo complexo, no chamado diagrama de Nyquist, com um eixo real (Z_{re}) e um outro imaginário (Z_{im}), como na Figura 29-(c) que representa um exemplo para um circuito equivalente simples do tipo Randles.

A variação da impedância com a frequência é representada pelo diagrama de Bode, sendo este juntamente com o diagrama de Nyquist os tipos de representações mais usados na interpretação da espectroscopia de impedância eletroquímica.

Figura 29 – (a) Fase entre tensão (E) e corrente (I) alternadas; (b) Vetores de tensão e corrente em fase e fora de fase; (c) Diagrama de Nyquist com o vetor Z plotado para o ponto de frequência onde o ângulo de fase é máximo para o circuito de Randles (Silverman, 1986 *apud* Selmo, 1997).

As equações que se estabelecem no plano complexo, com $j^2 = -1$, constam abaixo e na Figura 30, para os componentes básicos que podem ser modelados pela espectroscopia de impedância eletroquímica.

$$E = E_{real} + E_{imaginário} = E' + jE''$$

$$I = I_{real} + I_{imaginária} = I' + jI''$$

$$Z = Z_{re} + jZ_{im} = \frac{E' + jE''}{I' + jI''}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{Z_{im}}{Z_{re}}$$

$$Z = \sqrt{(Z_{re})^2 + (Z_{im})^2}$$

Resistor		$Z = R$	$E = RI$
Capacitor		$Z = -1/j\omega C$	$E = -j I/\omega C$
Indutor		$Z = j\omega L$	$E = -j L\omega I$

Figura 30 – Componentes básicos de circuitos elétricos que podem modelar processos corrosivos, pela técnica de impedância e em caso de interpretação física consistente (Silverman, 1986 *apud* Selmo, 1997).

Desse modo, a impedância pode medir a resistência física global de um determinado metal em um dado meio, a uma diferença de potencial ou de corrente imposta em sinal alternado, interpretada como respostas resistivas, capacitivas ou indutivas.

Em geral, a EIS também permite modelar um circuito elétrico que possua um comportamento similar ao processo eletroquímico que se deseja estudar, mas na maioria das vezes pode não representar o sistema corrosivo na sua real complexidade.

Quando o sistema é excitado por altas frequências, somente tem-se informações sobre a resistência do eletrólito (R_e), ou ao carregamento da dupla camada (também chamada de resistência à transferência de carga pelos eletroquímicos - R_t). À medida que a frequência diminui pode-se analisar as reações mais lentas e obter informações sobre as reações envolvidas no processo corrosivo, que geralmente ocorrem em várias etapas.

Em determinados processos corrosivos, é ainda possível obter-se informações sobre a resistência de polarização (R_p), que é a variável obtida na baixa frequência e internacionalmente difundida, por pesquisas do Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja da Espanha, para efetuar estimativas de densidade de corrente de corrosão do aço carbono em concretos de cimento Portland, admitindo-se um controle paralelo por perda de massa do metal, para eventual ajuste.

b) Metodologia utilizada

A espectroscopia de impedância eletroquímica usada neste trabalho se baseou na aplicação de um sinal de potencial alternado, com pequena amplitude em relação ao valor de E_{corr} (± 10 mV), com a variação do espectro de frequência na aplicação do sinal. Iniciou-se na alta frequência, a partir de 120 kHz e varreu-se o espectro até a baixa frequência, em valor de 0,01 mHz. Foi previsto o registro de 10 pontos de resposta, por década de frequência varrida.

O equipamento usado foi um potenciostato de alta impedância, modelo 283 da EG&G – Princeton Applied Research – PAR, em conjunto com um Lock-in Analyzer modelo 5210 EC, operados por software do fabricante.

A realização da impedância foi feita pela técnica de 2 eletrodos, isto é, fazendo-se a polarização do eletrodo de trabalho (com $5,6 \text{ cm}^2$ na Figura 26-a), por um contra-eletrodo em chapa de aço inox (com cerca de 72 cm^2) usado simultaneamente como eletrodo de referência, sendo a chapa posicionada e pressionada contra a face do corpo-de-prova que continha a barra em ensaio, por um esponja vegetal com 3 elásticos de borracha, posicionados ao longo da altura do corpo-de-prova.

Como a cura adotada para os corpos-de-prova foi de 3 dias em câmara úmida, a primeira leitura foi feita nessa idade e com as argamassas em condição de umidade muito próxima à de moldagem ou ainda um pouco maior, pelo tipo de cura.

Após essa cura inicial, os corpos-de-prova foram estocados na câmara seca com 50 ± 5 % de umidade relativa e 23 ± 3 °C de temperatura, ou seja, estavam cada vez mais secos após a primeira avaliação de impedância em condições saturadas.

As curvas de impedância eletroquímica foram monitoradas a 3, 7, 14, 21, 28 e 63 dias após a moldagem, e sempre que possível as quatro barras foram testadas. No âmbito deste trabalho, apenas serão apresentados os resultados de 3, 28 e 63 dias, já que nas idades entre 3 e 28 dias verificou-se a secagem das argamassas, sendo complexo comparar as argamassas

nesse período, pois os mecanismos de transporte podem interferir nas curvas de impedância, segundo apontado por Selmo (1997).

Assim, o objetivo principal da aplicação da EIS neste trabalho foi comparar as curvas de Bode, com relação à capacidade de proteção ao aço pelas argamassas em estudo, no estado endurecido e após secagem da água de amassamento excedente.

Nessas condições, previu-se avaliar a proteção ao aço por efeito barreira das argamassas, similar ao de uma tinta orgânica que protegesse o metal, pois deve-se esperar que as argamassas de alta resistência possam gerar um revestimento de natureza resistiva e tanto maior, quanto menor a sua porosidade intrínseca e maior a sua impedância total, $|Z|$, medida na baixa frequência e uma vez que esteja estabilizada como elemento resistivo, o que pode ser visualizado por um patamar no Diagrama de Bode, sendo o ângulo de fase próximo a zero, conforme ilustrações na Figura 29.

Mansfeld⁴² (1996) *apud* Selmo (1997) considera que a proteção de pintura ao aço apenas pode ser considerada de alta eficiência, quando a impedância total, $|Z|$ no diagrama de Bode for superior a $10 \text{ G}\Omega.\text{cm}^2$.

Já segundo Costa⁴³ (1991) *apud* Selmo (1997), o valor de $1 \text{ M}\Omega.\text{cm}^2$ (em corrente contínua) é considerado como limite de diferenciação entre revestimentos orgânicos de proteção média a baixa, mas que não impede a corrosão, na ocorrência de condições favoráveis ao processo.

3.6.7 Resistividade elétrica superficial pelo método Wenner

A resistividade elétrica superficial do concreto é uma das principais propriedades utilizadas na monitoração qualitativa da possibilidade de corrosão de armaduras em concreto armado, quando se tem controle do posicionamento das barras. Na armadura despassivada, ela é decisiva na velocidade de corrosão, pois controla o fluxo de íons que se difundem pelo concreto através da solução aquosa presente nos poros, sendo altamente

⁴² MANSFELD, F. Discussion: evaluation of corrosive degradation in coated steel using alternating current impedance spectroscopy. *Corrosion*, v. 12, n. 6, p. 417-418, 1996.

⁴³ COSTA, I. *The effect of minor addition elements on the corrosion behaviour of bare and coated steels*. Manchester, 1991, Tese (PhD) – Universidade de Manchester.

sensível ao teor de umidade e à temperatura do concreto, reduzindo-se com o aumento desses parâmetros (Helene, 1993).

Em estudos de Selmo (1997), foi comprovada a variação efetiva da resistividade elétrica superficial de pastas de gesso em função da umidade desse material, enquanto trabalhos como o de Medeiros (2001) evidenciou isto para o concreto.

Nesta dissertação, a medida de resistividade elétrica superficial foi conduzida em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm com o emprego do aparelho dos quatro eletrodos Wenner. A distância entre eletrodos foi de 30 mm e o ensaio foi realizado nos mesmos corpos-de-prova usados no ensaio de absorção por imersão, após 60 dias de imersão em água. Esta geometria não atende às instruções de uso do equipamento, mas aplicou-se na expectativa de não ter muita influência nas medidas, pela condição de saturação.

O equipamento imprime uma corrente entre os dois eletrodos externos e conseqüentemente uma voltagem é captada pelos eletrodos internos, como pode ser verificado na Figura 31. Os quatro eletrodos previamente umedecidos em água são colocados em contato direto com a superfície do concreto, que pode estar previamente úmida ou seca conforme padronização da forma de contato.

Figura 31 – Esquema da técnica de resistividade (adaptação da figura de GOWERS & MILLARD, 1999; DARBY, 1999).

A resistividade é obtida com a fórmula seguinte:

$$\rho = \frac{2\pi a V}{I}$$

Onde:

ρ é a resistividade (ohm x cm);

a é o espaçamento entre eletrodos (cm);

V é a voltagem (Volts);

I é a corrente (Ampère).

Os valores de resistividade elétrica superficial hoje considerados como de referência para risco de corrosão constam na Tabela 19.

Tabela 19 – Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão – CEB 192 (Helene, 1993).

RESISTIVIDADE DO CONCRETO	INDICAÇÃO DE PROBABILIDADE DE CORROSÃO
$\rho > 20 \text{ kohm x cm}$	Desprezível
10 a 20 kohm x cm	Baixa
5 a 10 kohm x cm	Alta
$\rho < 5 \text{ kohm x cm}$	Muito alta

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados será feita a partir do tipo de argamassa para facilitar a primeira análise das propriedades medidas, conforme agrupado e descrito no Capítulo 3.

Os dados de caracterização dos materiais empregados nas argamassas tipo APO e no concreto empregado como substrato encontram-se apresentados no Anexo D.

4.1 ARGAMASSAS PASSÍVEIS DE PREPARO EM OBRA (APO)

4.1.1 Propriedades de caracterização básica das argamassas do tipo APO

a) Propriedades calculadas para o estado anidro

A Figura 32 e a Tabela 20 apresentam os dados da granulometria teórica das argamassas do tipo APO, calculada a partir da composição granulométrica do agregado miúdo e considerando o cimento e o polímero como passantes na peneira de abertura de malha de 0,075 mm.

Figura 32 - Curva granulométrica média teórica das argamassas do tipo APO, conforme a Tabela 20.

Tabela 20 – Composição granulométrica teórica das argamassas do tipo APO.

Abertura de peneira (mm)	Massa retida acumulada (%)	
	APO-1 e APO-4	APO-2, APO-3, APO-5 E APO-6
2,4	2	2
1,20	13	13
0,60	40	39
0,30	65	63
0,15	72	71
0,075	75	73
Fundo	100	100
% fundo	25	27
Módulo de finura	1,92	1,87

A Tabela 21 apresenta o teor de álcalis solúveis em água calculado para as argamassas do tipo APO, sendo o ensaio realizado no material passante na peneira de abertura de malha igual a 0,075 mm.

Tabela 21 - Resultado teórico do teor de álcalis solúveis em água das argamassas do tipo APO, ensaio de acordo com a ASTM C144/94⁴⁴.

MATERIAL	Teor nos cimentos e nas argamassas (% em massa)		
	Na ₂ O	K ₂ O	Álcalis solúveis em água na argamassa (expresso em Na ₂ O)
Argamassa APO – 1	0,04	0,40	0,08
Argamassa APO – 2	0,04	0,40	0,08
Argamassa APO – 3	0,04	0,40	0,08
Argamassa APO – 4	0,01	0,57	0,10
Argamassa APO – 5	0,01	0,57	0,10
Argamassa APO – 6	0,01	0,57	0,10

b) Consistência, densidade de massa aparente e teor de ar no estado fresco

A Figura 33 apresenta os resultados de manutenção de consistência das argamassas, cujos índices foram determinados segundo procedimento descrito no Capítulo 3, item 3.4.4.

⁴⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for chemical analysis of hydraulic cement. ASTM C144/04**. Philadelphia, 1994.

Figura 33 – Resultados de manutenção de consistência por método NBR 7215/96 das argamassas do tipo APO (mistura segundo a EN 196-1/90).

De forma geral, as argamassas do tipo APO apresentaram uma perda de consistência rápida, contudo destaca-se que o uso do acrilato resultou em certa melhora da manutenção da consistência.

Os resultados de densidade de massa aparente no estado fresco das argamassas tipo APO estão representados na Figura 34. Pode-se verificar que os valores são muito próximos uns dos outros, ou seja, o emprego dos polímeros não alterou de forma considerável esta propriedade.

Figura 34 – Resultados de densidade de massa no estado fresco das argamassas do tipo APO, segundo a NBR 13278/95⁴⁵.

⁴⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. NBR 13278. Rio de Janeiro, 1995.

Com relação ao teor de ar, Figura 35, verifica-se uma tendência de redução do teor de ar com o emprego dos polímeros, destacando-se o EVA que mostrou redução mais acentuada do ar.

Figura 35 - Resultados de ar no estado fresco das argamassas do tipo APO, segundo a NBR 13278/95.

4.1.2 Propriedades relacionadas à compatibilidade de deformações

a) Retração por secagem

Na Figura 36 estão apresentados os resultados de retração livre e perda de massa dos corpos-de-prova de 25 mm x 25 mm x 285 mm confeccionados com argamassas do tipo APO. O procedimento de ensaio foi o descrito no Capítulo 3, item 3.5.7.

Quanto à perda de massa, todas as argamassas apresentaram comportamentos muito semelhantes, contudo, com relação à retração observou-se uma diferença considerável entre as argamassas.

Os resultados indicaram que o uso do polímero EVA (APO-2 e APO-5) resultou em maior retração se comparado às suas respectivas argamassas de referência (APO-1 e APO-4, respectivamente). Desse modo, pode-se dizer que o uso deste produto piorou a eficiência da argamassa no que diz respeito à sua retração. Contudo, é importante destacar que isso pode não se dever exclusivamente ao EVA, mas também ao fato de ter sido necessário adicionar cerca de 10 % a mais de água para se obter a mesma consistência, conforme a Tabela 12.

Figura 36 – Resultados médios de retração por secagem e variação de massa das argamassas de reparo do tipo APO, ensaio análogo à ASTM C157/89 e à NBR 8490/84.

No caso do uso do polímero do tipo acrilato, a tendência foi a mesma, porém com maior intensidade, ou seja, resultou em valores de retração ainda maiores do que no caso do emprego do EVA. Contudo, vale ressaltar que neste caso a relação água/cimento é a mesma das séries de referência, o que indica que o aumento da retração se deve única e exclusivamente à presença do acrilato.

Além disso, deve-se notar que as argamassas com cimento CPV ARI PLUS RS (APO-4, APO-5 e APO-6) apresentaram muito maior retração se comparadas com os resultados das argamassas confeccionadas com o cimento CP II-F (APO-1, APO-2 e APO-3). Isto pode ser atribuído à maior

finura do cimento CPV ARI PLUS RS e ao fato deste cimento apresentar maior teor de fase aglomerante, enquanto o CP II-F 32 apresenta uma fração inerte que é o filer calcário.

b) Resistência à tração na flexão, à compressão e módulo de elasticidade

Na Figura 37 e Figura 38 encontram-se os dados de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, respectivamente, realizados em corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm confeccionados de argamassa do tipo APO, conforme descrito no Capítulo 3, item 3.5.1.

Como já era de se esperar, quanto maior o período de cura úmida maior a resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas. A única exceção foi a argamassa APO-5 quanto a resistência à tração na flexão, na qual o procedimento de cura não demonstrou influência na resistência à flexão, contudo, o mesmo não pode ser dito para a resistência à compressão.

Analisando a Figura 37, nota-se que a melhora na resistência à tração na flexão é bastante nítida quando se emprega os polímeros, porém, a argamassa com EVA e cimento CPV ARI PLUS RS (APO-5) não mostrou esta tendência apenas no caso da cura úmida por 28 dias.

É importante destacar que quando se fez uso de ambos os polímeros, mesmo com condições de cura ausentes (28 dias em câmara seca), os resultados foram argamassas com resistências à tração na flexão superiores à do concreto utilizado como substrato ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$). Por outro lado, a cura de 28 dias em câmara seca, fez com que as argamassas de referência apresentassem resistências à tração inferiores às do concreto de referência.

A respeito da Figura 38, quanto à resistência à compressão, verifica-se que o aumento da resistência relativa ao emprego dos polímeros foi menos intensa principalmente no que se refere à cura úmida por 28 dias, havendo até caso de redução da resistência com o acréscimo de EVA na argamassa com o cimento CII-F 32 para as curas úmidas por 28 dias (APO-2). O acrilato resultou em aumento da resistência em todos os casos (APO-3 e

APO-6), porém este aumento é bem mais nítido à medida que a cura foi mais deficiente.

Figura 37 – Resultados médios de resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas tipo APO, análogo à EN 196-1/90⁴⁶ (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).

Figura 38 – Resultados médios de resistência à compressão nos corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas tipo APO, ensaio análogo à EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).

⁴⁶ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.** EN 196-1. 1990.

Deve-se destacar que, ao contrário do que ocorreu na resistência à tração na flexão, o emprego de uma cura deficiente resultou em argamassas com resistência à compressão inferior ou muito próxima à do concreto tomado como referência ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$), mesmo usando produtos especiais como os polímeros aqui empregados. A exceção foi a argamassa APO-6, formulada com cimento CPV ARI PLUS RS e o acrilato.

Segundo a recomendação de Poston et al. (2001), a resistência à tração de argamassas de reparo deve ser maior ou igual a 10% da resistência à compressão. Todas as argamassas do tipo APO, aqui empregadas, estão de acordo com esta recomendação.

c) Resistência de aderência por cisalhamento direto

Analisando a Figura 39, nota-se que, com exceção da argamassa APO-2, em todos os casos que o polímero foi incorporado, a resistência de aderência por cisalhamento direto foi maior do que a da sua respectiva série de referência (APO-1 e APO-4).

Figura 39 –Resultados médios de resistência de aderência por cisalhamento direto para as argamassas do tipo APO, com método descrito no item 3.5.5.

Ao realizar o ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto, constatou-se a ocorrência de dois tipos de ruptura, o primeiro sendo ocasionado na parte de concreto e o outro na interface entre o concreto e a argamassa de reparo, ambas destacadas na Figura 40.

Figura 40 – Ilustração das formas de ruptura encontradas no ensaio de determinação da resistência de aderência por cisalhamento direto. (a) Ruptura na interface entre o concreto e argamassa; (b) Ruptura no concreto de substrato.

A Figura 41 apresenta o percentual de corpos-de-prova com ocorrência da ruptura no concreto (Figura 40-(b)), que consiste em um caso ideal, onde a resistência de aderência por cisalhamento direto é alta o suficiente a ponto de a ruptura ocorrer no concreto do substrato.

Os resultados da Figura 41, assim como os da Figura 39, indicam que o acrilato resultou em argamassas com resistência de aderência ao cisalhamento excelentes. Por sua vez, o EVA apenas apresentou incremento de aderência no caso das argamassas com cimento CPV ARI PLUS RS, mas não se mostrou satisfatório no caso das argamassas formuladas com o cimento CP II F 32. Isto pode ter ocorrido por alguma falha nos corpos-de-prova ou mesmo na execução do ensaio. Contudo, não se descarta a hipótese de existência de algum tipo de interação desfavorável entre o EVA e o cimento CP II F 32, e isto resultar em uma queda da resistência de aderência se comparada com a série de referência (APO-1).

As argamassas de referência não se mostraram satisfatórias quanto à seção de ruptura (Figura 41), ainda que a resistência de aderência não tenha sido baixa (Figura 39).

Figura 41 – Percentual de ocorrência de corpos-de-prova com ruptura no concreto do substrato no ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto para cada argamassa do tipo APO.

d) Resistência de aderência por tração direta

Como descrito no Capítulo 3, item 3.5.6, foram feitas duas tentativas de análise desta propriedade. Por falha operacional no preparo dos substratos, os resultados não puderam ser aqui considerados, já que houve inúmeros destacamentos dos testemunhos no momento de execução dos furos, por uso da face inadequada.

Alerta-se, portanto, que o tratamento do substrato no que diz respeito à ausência de óleo desmoldante de fôrma, uma correta padronização da rugosidade superficial, se possível por jateamento de areia, e a forma de umedecimento são etapas muito importantes para a execução adequada de ensaios, para a caracterização da aderência de argamassas de reparo. Em Moreno (2002) estão discutidos estes aspectos da metodologia de ensaio.

4.1.3 Propriedades relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço

a) Absorção de água por capilaridade

A Figura 42, Figura 43 e Figura 44 apresentam os resultados de absorção de água por capilaridade realizados nas argamassas do tipo APO, empregando corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm, segundo descrito no Capítulo 3, itens 3.6.1 e 3.6.2.

Figura 42 – Resultados médios de absorção de água por capilaridade em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, ensaio realizado em analogia à DIN 52617/87.

Figura 43 – Resultados médios de coeficiente de absorção capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, após 24 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.

Figura 44 – Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.

Os resultados indicam que a adição dos polímeros reduziu significativamente a absorção de água das argamassas, se comparadas com as argamassas sem polímero (APO-1 e APO-4). Novamente, salienta-se que o acrilato (APO-3 e APO-6) demonstrou maior eficiência do que o EVA (APO-2 e APO-5) na redução da absorção capilar.

O tipo de cimento mostrou pouca influência na propriedade de ascensão capilar quando se analisam a Figura 42 e a Figura 43, já que os resultados encontrados para a argamassa APO-1 (cimento CP II-F 32) são bastante semelhantes aos encontrados para a argamassa APO-4 (cimento CP V-ARI PLUS RS). Além disso, este comportamento também pode ser constatado para os pares APO-2 e APO-5; APO-3 e APO-6, cuja diferença entre as argamassas de cada um destes pares é o tipo de cimento (APO-2 e APO-3 confeccionadas com o cimento CP II-F 32 e APO-5 e APO-6 com o cimento CP V ARI-PLUS RS).

Porém, na Figura 44, pelos resultados de altura de ascensão capilar é possível observar uma grande diferença das argamassas com relação ao tipo de cimento empregado e confirma-se o efeito positivo do EVA e do acrilato na redução da altura de ascensão capilar de água das argamassas.

É relevante destacar que todas as argamassas do estudo apresentaram ingresso de água por absorção muito inferiores ao concreto de referência ($f_{ck} = 25$ MPa e $a/c = 0,60$).

b) Absorção de água por imersão

Na Figura 45 e Figura 46 encontram-se os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios, respectivamente, cujo ensaio foi realizado em conformidade com o Capítulo 3, itens 3.6.1 e 3.6.3.

Com relação à absorção de água por imersão também se verifica uma melhora das argamassas, com a redução da absorção e do índice de vazios, pela introdução dos polímeros EVA e acrilato, observando-se novamente o melhor efeito do acrilato. Além disso, é fácil verificar que as argamassas de referência (APO-1 e APO-4) apresentaram absorção por imersão e índice de vazios superiores ao do concreto de referência ($f_{ck} = 25$ MPa e $a/c = 0,60$).

Figura 45 – Resultados médios de absorção de água por imersão em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.

Figura 46 – Índice de vazios médio determinado em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.

c) Resistência à carbonatação acelerada

A Figura 47 apresenta resultados de resistência à carbonatação acelerada de argamassas do tipo APO, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm, conforme procedimento descrito no Capítulo 3, itens 3.6.1 e 3.6.4.

Deve-se notar que as argamassas formuladas com o cimento CP V ARI PLUS RS (APO-4, APO-5 e APO-6) mostraram profundidades de carbonatação inferiores às formuladas com o cimento CP II-F 32 (APO-1, APO-2 e APO-3), comparando, é claro, os pares de argamassa (APO-1 com APO-4, APO-2 com APO-5 e APO-3 com APO-6). Isto se deve ao maior teor de hidróxido de cálcio que pode ser liberado na hidratação deste tipo de cimento, tendo isto já sido constatado também por Nepomuceno (1992) e Nunes (1998).

Com relação ao acréscimo dos polímeros estudados (EVA e acrilato), ambos demonstraram melhora quanto à resistência à carbonatação, possivelmente pela redução da porosidade causada pelo preenchimento dos poros, como indicado por Ohama (1998).

Os valores obtidos com o indicador químico fenolftaleína foram sensivelmente inferiores aos obtidos com o indicador timolftaleína, como já

conhecido pela bibliografia consultada e esperado neste trabalho. Além disso, a idade de 105 dias foi mais sensível para diferenciar as argamassas do tipo APO.

Figura 47 – Evolução da profundidade média de carbonatação em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para o concreto de substrato e as argamassas do tipo APO, medidas realizadas segundo a RILEM TC-CPC 18 ⁴⁷, (a) usando a fenolftaleína como indicador, (b) usando a timolftaleína como indicador.

d) Proteção do aço em “reparo homogêneo”, por espectroscopia de impedância eletroquímica

Os diagramas de Nyquist obtidos para a configuração de ensaio e metodologia explicadas no item 3.6.6, apresentaram forma bem mais complexa do que a representação do circuito de Randles (Figura 29), como se pode verificar no resultado de uma barra detalhado na Figura 48.

Ao sair da cura úmida inicial de 3 dias, os poros das argamassas apresentavam a quantidade de água máxima e a menor resistividade, como indicado na Figura 48-(a)-(b), estando representada pelo valor R_e . O aço encontrava-se em condição passiva, podendo a sua impedância total ser considerada quase infinita e nessas condições o valor de $|Z|$ não se estabilizou em patamar resistivo para nenhuma das argamassas até o valor da baixa frequência varrido (0,01 Hz), conforme pode-se visualizar no Anexo E. Apenas pelo Diagrama de Nyquist, seria possível tentar extrapolar um semicírculo para algumas das argamassas, equivalente a valor muito grande de resistência da interface do aço e indicativo do estado de passivação das barras.

A configuração de todas as curvas obtidas por impedância eletroquímica a 3 dias, com os corpos-de-prova em condição máxima de umidade, foi semelhante à apresentada na Figura 48-(a), o que pode ser avaliado no Anexo E.⁴⁸

Na secagem inicial das argamassas, na idade de 7 dias, a primeira resposta ao sinal da impedância foi dada, possivelmente, por um volume já bem menor de capilares com eletrólito disponível para a passagem de corrente, sendo isto observado a frequências mais baixas, como indicado na Figura 48-(c), para um valor de R_e bem maior.

Nas idades de 28 e 63 dias, o aumento da resistência das argamassas foi ainda muito maior, e o aço passou a ter uma resposta muito conturbada aos sinais de impedância no diagrama de Nyquist, possivelmente pelas reduzidas condições de umidade e ausência de uma camada de equilíbrio iônico perfeitamente estável na sua interface. Suspeitou-se depois, haver necessidade de aumento da área do contra-eletrodo, pelo aumento da resistência do meio.

⁴⁷ RILEM “**Measurement of hardened concrete carbonation depth**”. TC –CPC18. 1988.

⁴⁸ Neste trabalho só foram realizadas leituras para as barras em estado passivo, apesar de ter sido previsto submeter os corpos-de-prova carbonatados à ciclagem com molhamento e secagem, o que não foi possível pelo prazo muito prolongado dos ensaios de carbonatação acelerada e limitações de volume da câmara usada.

Assim, a interpretação e comparação entre as argamassas foi feita apenas pelo valor de impedância total, $|Z|$, sempre resistiva na frequência final de varredura (0,01 Hz), podendo esta variável ser melhor visualizada no Diagrama de Bode, no Anexo E. Também por isto não se julgou adequado efetuar cálculos por unidade de área polarizada e os valores de $|Z|$ estão informados apenas em ohm.

Figura 48 – Ilustração da configuração das curvas obtidas nos ensaios de impedância eletroquímica (a) Barra imersa em corpo-de-prova após saída da cura úmida a 3 dias de idade; (b) Ampliação da parte inicial da curva de (a), na região de alta frequência; (c) Mesma barra de (a) após ser armazenada por 4 dias em câmara seca a 50 % de U.R. e 25 °C.

Os resultados compilados para as argamassas tipo APO constam na Figura 49. Os valores de $|Z|$ a 3 dias são aproximadamente iguais para todas

as argamassas, em função de não serem valores resistivos, mas essencialmente capacitivos e associados à resposta de impedância, na frequência considerada (0,01 Hz).

Já na idade de 28 dias, observou-se um comportamento essencialmente resistivo para a resposta a 0,01 Hz, tendo a resistência das argamassas à passagem de corrente aumentado de forma muito significativa e coerente, em função da adição dos polímeros EVA e acrilato e para ambos os tipos de cimento.

Na idade de 63 dias, houve uma queda de impedância total de todas as argamassas APO. Isto talvez possa ser explicado pela suposição de que as curvas a 28 dias tenham sido afetadas pelo processo de secagem. De qualquer forma, seria conveniente confirmar os resultados obtidos a 63 dias.

A título de comparação, estão também indicados em tracejado, na Figura 49, os resultados de impedância do aço imerso em corpos-de-prova do concreto de referência carbonatado (f_{ck} 25 MPa; a/c 0,60), na condição seca (linha superior) e saturada (linha inferior), podendo-se verificar que todas as argamassas de reparo a 63 dias conferiram ao aço valores de impedância da mesma ordem de grandeza.

Figura 49- Valor médio de impedância total, $|Z|$, na frequência de 0,01 Hz, do aço protegido por cada uma das argamassas tipo APO, em cobertura de 15 mm e nas idades de 3, 28 e 63 dias, conforme a metodologia descrita nos itens 3.6.5 e 3.6.6. Concreto nas linhas tracejadas (seco = linha superior e saturado = linha inferior).

e) Resistividade elétrica superficial

Na Figura 50 estão apresentados os resultados de resistividade elétrica medida em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm após 2 meses de imersão em água.

É possível notar, pela Figura 50, que as argamassas APO-1, APO-2 e APO-4 se destacam pela sua menor resistividade elétrica, o que indica que estes produtos deverão apresentar um pior desempenho quando aplicados em condições de serviço. Esta consideração se deve ao fato de que a velocidade de corrosão do aço é altamente dependente da resistividade elétrica do concreto, como vem sendo a algum tempo exposto por pesquisadores como Gonzáles et al. (1996) e Andrade (1999). De acordo com Gowers; Millard (1999) a resistividade elétrica regula o fluxo de corrente iônica entre as áreas anódicas e catódicas da armadura. Desse modo, quanto maior a resistividade elétrica, menor o fluxo de corrente entre o ânodo e o cátodo, e por isso, menor a taxa de corrosão do aço nesse meio.

Todas as argamassas em condições saturadas apresentaram resistividade superficial indicativas de risco corrosão baixa a desprezível conforme o critério da Tabela 19.

A Figura 50 indica que as argamassas formuladas com o polímero acrilato apresentaram valores de resistividade mais altos do que as suas respectivas séries de referência (APO-1 e APO-4) indicando maior capacidade de proteção quanto a corrosão de armaduras. Este mesmo efeito, apesar de com menor intensidade, também foi encontrado para o caso do emprego do EVA em argamassas formuladas com o cimento CPV ARI PLUS RS, já no caso das argamassas formuladas com o cimento CII F 32 a resistividade se manteve na mesma ordem de grandeza da série de referência (APO-1).

Figura 50 – Resultados de resistividade elétrica superficial, medidas realizadas em corpos-de-prova saturados de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo APO.

4.2 ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS (AI)

4.2.1 Propriedades de caracterização básica das argamassas do tipo AI a) Propriedades no estado anidro

A Figura 51 e Figura 52 apresentam a densidade de massa específica e aparente, respectivamente, das argamassas industrializadas no estado anidro que fizeram parte do estudo. Pode-se verificar certa diferença nessas propriedades entre os produtos disponíveis no mercado nacional, pois a densidade de massa específica variou de 2650 a 2850 kg/m³ e a densidade de massa aparente de 1250 a 1450 kg/m³.

Quanto à composição granulométrica e o módulo de finura das argamassas, os resultados encontram-se na Tabela 22 e são ilustrados pela Figura 53.

Figura 51 – Resultados de densidade de massa específica no estado anidro, em analogia à NBR NM 23/98⁴⁹.

Figura 52 – Resultados de densidade de massa aparente no estado anidro, em analogia à NBR 14086/98⁵⁰.

⁴⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento Portland – Determinação de massa específica. NBR NM 23.** Rio de Janeiro, 1998.

⁵⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica – Ensaios de caracterização no estado anidro. NBR 14086.** Rio de Janeiro, 1998.

Figura 53 – Curva granulométrica das argamassas industrializadas, analogia à NBR 7217/87 e BS EN 1015-1/99.

Todas as argamassas industrializadas apresentaram distribuição granulométrica com elevado teor de finos. Se considerada a fração passante na peneira de abertura de malha de 0,075 mm, o teor de finos total situa-se entre 32 % e 52 %, Tabela 22. Esta fração, em sua maior parte, deve ser referente à fração cimentícia e adições das argamassas industrializadas. Acima dessa dimensão são claramente distinguíveis a fração de areia graduada e fibras, no caso das argamassas AI-5 e AI-7 (por apreciação visual).

Tabela 22 - Composição granulométrica das argamassas industrializadas, analogia a NBR 7217/87 e BS EN 1015-1/1999.

Abertura de peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada em massa (%)						
	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5	AI-6	AI-7
2,4	0,0	0,2	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0
1,20	0,0	5,4	0,1	0,0	11,1	0,0	7,0
0,60	0,0	10,7	0,2	0,1	27,6	0,0	32,2
0,30	0,3	29,9	2,0	16,6	38,4	0,4	43,8
0,15	14,1	60,7	23,7	41,8	47,8	10,5	54,3
0,075	55,9	68,2	62,3	62,1	52,0	47,5	59,8
fundo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
% fundo	44	32	38	38	48	52	40
Módulo de finura	0,14	1,07	0,26	0,59	1,27	0,11	1,37

Na Tabela 23 estão indicados os valores obtidos no ensaio de determinação do teor de álcalis solúveis em água realizado segundo a ASTM C-144/94. Este ensaio foi executado na fração passante na peneira de abertura 0,075 mm de cada argamassa estudada.

Tabela 23 – Resultado da determinação do teor de álcalis solúveis em água das argamassas industrializadas, ensaio realizado de acordo com a ASTM C144/94⁵¹.

MATERIAL	Teor nos cimentos e nas argamassas (% em massa)		
	Na ₂ O	K ₂ O	Álcalis solúveis em água na argamassa (expresso em Na ₂ O)
Argamassa AI – 1	0,07	0,34	0,13
Argamassa AI – 2	0,01	0,51	0,11
Argamassa AI – 3	0,10	0,46	0,15
Argamassa AI – 4	0,10	0,51	0,17
Argamassa AI – 5	0,06	0,55	0,20
Argamassa AI – 6	0,09	0,36	0,17
Argamassa AI – 7	0,03	0,54	0,15

b) Consistência, densidade de massa aparente e teor de ar no estado fresco

Na Figura 54, encontram-se os resultados da manutenção de consistência, em função do tempo de preparo das argamassas industrializadas. Vale ressaltar que o material AI-2, por ser uma argamassa muito seca, não teve seus dados plotados na Figura 54 pelo fato de as medidas terem sido inviáveis.

Além disso, é importante observar que as argamassas podem ser divididas em duas faixas de consistência e de formas de aplicação bem distintas. Os produtos AI-2, AI-3, AI-4, AI-5 e AI-7 são argamassas para serem aplicadas a mão, sendo a primeira de consistência muito seca e as quatro últimas com consistência medianamente plásticas, semelhante a uma massa de modelar.

Por outro lado, os produtos AI-1 e AI-6 são argamassas plásticas e podem ser aplicadas por jateamento ou colher de pedreiro, sendo que a aplicação por este meio não é recomendada, pela dificuldade de

⁵¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for chemical analysis of hydraulic cement. ASTM C144/04**. Philadelphia, 1994.

preenchimento total da cavidade do reparo, principalmente no que diz respeito ao preenchimento por trás das armaduras.

Figura 54 – Resultados de manutenção de consistência por método ABNT das argamassas preparadas com a água recomendada pelo fabricante (mistura segundo EN 196-1/90⁵²).

Analisando a Figura 54 destaca-se a argamassa AI-4 como a de pior capacidade de manutenção de consistência. Por outro lado, as argamassas AI-1, AI-5 e AI-6 se comportaram melhor com relação a esta propriedade. Este tema vai ser tratado e melhor ilustrado no item 5.1.

A Figura 55 mostra a densidade de massa no estado fresco das argamassas industrializadas que compõem o estudo. Verifica-se que os valores variam entre 1600 e 2250 kg/m³.

⁵² EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1. 1990.**

Figura 55 – Resultados médios de densidade de massa no estado fresco das argamassas do tipo AI, segundo à NBR 13278/95⁵³.

A Figura 56 mostra os resultados de teor de ar para as argamassas tipo AI, onde verifica-se grande variação dos resultados, desde 2% a 27%. O produto AI-4 e principalmente AI-1 mostraram altos teores de ar, o que indica um provável comprometimento do desempenho destas argamassas quando aplicadas em serviço.

Figura 56 – Resultados médios de ar das argamassas do tipo AI no estado fresco, segundo à NBR 13278/95.

⁵³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. NBR 13278. Rio de Janeiro, 1995.

4.2.2 Propriedades relacionadas à compatibilidade de deformações

a) Retração por secagem

O comportamento quanto à retração livre das argamassas foi bastante diferenciado, como pode ser observado na Figura 57. O ensaio foi conduzido em analogia à ASTM C157/89⁵⁴ e à NBR 8490/84⁵⁵ e maiores detalhes podem ser encontrados no Capítulo 3, itens 3.5.1 e 3.5.7.

Figura 57 – Resultados médios de retração e variação de massa das argamassas de reparo tipo AI, ensaio em analogia à ASTM C157/89 e a NBR 8490/84.

É interessante ressaltar a grande diferença de propriedades entre argamassas de reparo disponíveis no mercado atual, de modo que poderão proporcionar desempenhos muito diferenciados para uma dada aplicação.

⁵⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for length change of hardened hydraulic – cement mortar and concrete. ASTM C157/89.** Philadelphia, 1989.

⁵⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. NBR 8490.** Rio de Janeiro, 1984.

Contudo, estes são materiais com a mesma classificação: argamassas de reparo para estruturas de concreto, sem nenhuma diferenciação adicional fornecida pelos fabricantes.

Seguindo este raciocínio, pode-se dizer que entre as argamassas industrializadas, a AI-6 apresentou alto grau de retração comparado às demais, enquanto a AI-3 e AI-5 se destacaram como as de menor retração.

b) Resistência à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade

Na Figura 58, Figura 59 e Figura 60 encontram-se os dados de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade, respectivamente, obtidos em corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm de acordo com a EN 196-1/90⁵⁶.

Nestes ensaios foram estudados três tipos de cura para os corpos-de-prova, como já mencionado no item a).

É importante destacar a alta resistência à tração na flexão atingida pela argamassa AI-7 (Figura 58), o que pode levá-la a ter um desempenho diferenciado e melhor quando aplicada na prática. Porém, são inúmeros os fatores que afetam o desempenho de um reparo e um parâmetro como resistência à flexão não pode ser analisado isoladamente, desconsiderando a necessidade de uma visão global das propriedades do material de reparo e do substrato que vai receber a intervenção.

Com o auxílio da Figura 59 e Figura 60 pode-se notar que, entre as argamassas industrializadas que compreendem o estudo, existem argamassas de alta resistência à compressão (valores na faixa de 80 a 110 MPa) e conseqüentemente de alto módulo de elasticidade e argamassas de resistência à compressão menores (valores entre 16 e 50 MPa), com valores menores de módulo de elasticidade.

⁵⁶ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1.** 1990.

Figura 58 – Resultados médios de resistência à flexão nos corpos-de-prova 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas do tipo AI, segundo a EN 196-1/90⁵⁷ (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).

Figura 59 – Resultados médios de resistência à compressão nos corpos-de-prova 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado segundo EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).

⁵⁷ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.** EN 196-1. 1990.

Figura 60 – Resultados médios de módulo de elasticidade na compressão medido nos corpos-de-prova 40 mm x 40 mm x 160 mm para as argamassas do tipo AI (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).

Com relação à resistência à tração na flexão, todas as argamassas atenderam à recomendação de Poston et al. (2001) de que a resistência à tração deve ser maior ou igual a 10% da resistência à compressão.

Comparando os dados obtidos com os do concreto de referência ($f_{ck} = 25$ MPa e $a/c = 0,60$), verifica-se que apenas a argamassa AI-1 apresentou resistências à tração na flexão inferiores. Quanto à resistência à compressão, apenas os produtos AI-1 e AI-3 apresentaram resultados inferiores aos do concreto de referência.

Confrontando os resultados da Figura 60 com o exposto no item 2.5.1, o critério de Vaysburd; Emmons (2000) levaria à escolha dos produtos AI-1 e AI-3, porém, este tipo de escolha levaria a argamassas com resistência à compressão inferior à do concreto de referência ($f_{ck} = 25$ MPa e $a/c = 0,60$), o que não é apropriado.

Por sua vez, o critério de Aguiar (1999) resultaria na escolha dos produtos AI-2, AI-4 e AI-6, produtos com resistência à compressão superior à do concreto de referência.

Já o critério de Mangat; O'Flaherty (2000) levaria aos produtos AI-5 e AI-7, que são os produtos de maior módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração na flexão.

Como se pode verificar, a seleção da argamassa de reparo baseada no módulo de elasticidade é muito polêmica. Desse modo, para fazer uma escolha entre os produtos aqui estudados, seria necessário um estudo da relação do módulo de elasticidade com o desempenho de argamassas aplicadas em condições de serviço, o que não foi feito neste estudo por limitação do programa experimental.

c) Resistência de aderência por cisalhamento direto

Analisando os resultados da Figura 61, pode-se dizer que AI-1, AI-5, AI-6 e AI-7 são as argamassas de reparo disponíveis no mercado nacional que proporcionam maior resistência de aderência por cisalhamento direto com relação ao concreto aqui empregado como substrato ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$).

Figura 61 –Resultados médios de resistência de aderência por cisalhamento direto para as argamassas do tipo AI.

Para a análise da Figura 62, deve-se lembrar que neste ensaio foram constatados dois tipos de ruptura, um no substrato de concreto e outro na interface entre a argamassa e o concreto, como ilustrado no item 4.1.2 (c).

É importante destacar que, apesar de não ter apresentado ruptura no concreto, a argamassa AI-6 demonstrou resistência de aderência ao cisalhamento direto da mesma ordem de grandeza das outras três

argamassas que apresentaram quase 100 % de corpos-de-prova rompendo no concreto do substrato (AI-1, AI-5 e AI-7, sendo apenas estas consideradas de aderência satisfatória).

Figura 62 - Percentual de corpos-de-prova com ocorrência de ruptura no concreto do substrato no ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto para cada argamassa do tipo AI.

d) Resistência de aderência à tração direta

Nesta parte do trabalho, a apresentação dos resultados ficaram inviabilizados pelo mesmo motivo mencionado no item 4.1.2 d).

Apesar de os resultados não terem sido apresentados, pelo fato de os testemunhos terem destacados no momento do corte, é importante destacar a ocorrência de fissuras nos corpos-de-prova onde foram aplicadas a argamassa AI-6, como ilustrado na Figura 63. Salienta-se a elevada retração por secagem desta argamassa na Figura 57.

Figura 63 – Ilustração da ocorrência de fissuras de retração após a aplicação de uma camada de 20 mm da argamassa AI-6 em substrato de concreto de 300 mm x 300 mm.

4.2.3 Propriedades relacionadas à estabilidade eletroquímica do aço

a) Absorção de água por capilaridade

A Figura 64 representa os resultados de absorção capilar para as argamassas do tipo AI para o ensaio realizado em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm, como descrito no Capítulo 3, item 3.6.1 e 3.6.2. Por sua vez, a Figura 65 apresenta os coeficientes de absorção de água de cada argamassa deste tipo, e a Figura 66 apresenta os resultados de altura de ascensão capilar após o final do ensaio.

Figura 64 – Resultados médios de absorção capilar em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado em analogia à DIN 52617/87.

Deve-se destacar que o produto AI-6 foi o único que apresentou o coeficiente de absorção capilar e a altura de ascensão capilar maiores do que o concreto de referência.

É importante notar que os produtos AI-2, AI-4, AI-5 e AI-7 foram as argamassas que demonstraram menor penetração de água por ascensão capilar, destacando-se os produtos AI-4 e AI-7 como aqueles de menor coeficiente de sucção capilar entre todos.

Figura 65 – Resultados médios de coeficiente de absorção capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, após 24 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.

Figura 66 - Resultados médios de altura de ascensão capilar de água, em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, após 72 horas de contato com lâmina de 5 mm de água.

b) Absorção de água por imersão

Na Figura 67 e Figura 68 encontram-se os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios, cujo ensaio foi realizado conforme Capítulo 3, item 3.6.1 e 3.6.3.

Figura 67 – Resultados médios de absorção de água por imersão em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.

Figura 68 – Índice de vazios determinado em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI, ensaio realizado em analogia à NBR 9798/87.

Os resultados indicam que o produto AI-7 é o mais resistente ao ingresso de umidade e, analisando por este ponto de vista, este seria o melhor produto entre os estudados, seguido dos produtos AI-4, AI-2 e AI-5. Isto pelo fato de que o acesso de água é importante para o desenvolvimento do processo de corrosão eletroquímica e, desse modo, a restrição da

presença do eletrólito na região que deverá ter uma tendência a se comportar como cátodo deverá dificultar o desenvolvimento da corrosão.

Além disso, é importante salientar a facilidade ao ingresso de umidade apresentada pelos produtos AI-1, AI-3 e AI-6, que apresentaram índices de vazios maiores do que o próprio concreto de referência ($f_{ck} = 25$ MPa e $a/c = 0,60$).

c) Resistência à carbonatação acelerada

Na Figura 69 encontram-se os resultados da evolução da frente de carbonatação ao longo do tempo para as argamassas do tipo AI e do concreto de referência ($f_{ck} = 25$ MPa e $a/c = 0,60$), a partir do ensaio de carbonatação acelerada conforme descrito nos itens 3.6.1 e 3.6.4 do Capítulo 3.

Figura 69 – Evolução da profundidade média de carbonatação em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm para o concreto de substrato e as argamassas do tipo AI, medidas realizadas segundo o documento RILEM TC-CPC 18⁵⁸.

⁵⁸ RILEM “Measurement of hardened concrete carbonation depth”. TC –CPC18. 1988.

É possível destacar que, também quanto à carbonatação, os produtos AI-1, AI-3 e AI-6 apresentaram pior eficiência, destacando a argamassa AI-1 que se apresentou totalmente carbonatada na leitura de 28 dias de exposição nas condições da câmara. Este comportamento era esperado, dado o alto índice de vazios dessa argamassa, como já mostrado na Figura 68.

Destacam-se como argamassas de melhor resistência à carbonatação as de números AI-5, AI-2 e AI-7.

d) Proteção do aço em “reparo homogêneo”, por espectroscopia de impedância eletroquímica

O comportamento do aço, nas primeiras idades após a moldagem dos corpos-de-prova de impedância com as argamassas industrializadas, foi semelhante ao descrito para as argamassas tipo APO, no item 4.1.3 - d).

Também para as argamassas tipo AI, nas idades de 28 e 63 dias, o aumento da resistência à passagem de corrente foi significativo em relação a 3 dias, e o aço passou a ter resposta conturbada aos sinais de impedância, mas os diagramas de Nyquist para essas argamassas resultaram melhor configurados, como se pode ver no Anexo E.

A interpretação e comparação entre as argamassas também foi feita apenas pelo valor de impedância total, $|Z|$, sempre resistiva na frequência final de varredura (0,01 Hz), podendo-se melhor visualizar esta variável nos diagramas de Bode, no Anexo E. Não se julgou conveniente efetuar cálculos por unidade de área polarizada, e os valores de $|Z|$ estão informados apenas em ohm.

Os resultados compilados para as argamassas tipo AI constam na Figura 70. Os valores de $|Z|$ a 3 dias são aproximadamente iguais para a maioria das argamassas, em função de não serem valores resistivos, mas essencialmente capacitivos e associados à resposta de impedância, na frequência considerada (0,01 Hz). Destacam-se com maiores valores de $|Z|$ nessa idade as argamassas AI-4 e AI-6.

Já nas idades de 28 e 63 dias, observou-se um comportamento essencialmente resistivo para a resposta a 0,01 Hz, tendo a resistência das argamassas à passagem de corrente aumentado de forma muito significativa e coerente. Destacaram-se nessas idades, como oferecendo maior impedância ao aço, as argamassas AI-1, AI-6 e AI-7, sendo as duas últimas de resistência mecânica muito superior à AI-1.

A título de comparação, estão também indicados em tracejado, na Figura 70, os resultados de impedância do aço imerso em corpos-de-prova do concreto de referência carbonatado (f_{ck} 25 MPa; a/c 0,60), na condição seca (limite superior) e saturada (limite inferior), podendo-se verificar que apenas as argamassas de reparo AI-1, AI-6 e AI-7 conferiram maior impedância ao aço. Estes resultados precisariam ser confirmados para idades mais avançadas isentas do mecanismo de secagem ou de carbonatação atuantes no eletrólito.

Figura 70- Valor médio de impedância total, $|Z|$, na frequência de 0,01 Hz, do aço protegido por cada uma das argamassas industrializadas, em cobertura de 15 mm e nas idades de 3, 28 e 63 dias, conforme a metodologia descrita nos itens 3.6.5 e 3.6.6. Concreto nas linhas tracejadas (seco = linha superior e saturado = linha inferior).

e) Resistividade elétrica superficial

A Figura 71 apresenta os resultados de resistividade elétrica obtidos a partir de ensaios realizados em corpos-de-prova de 60 mm x 60 mm x 120 mm após 2 meses de imersão em água.

Todas as argamassas em condições saturadas apresentaram resistividade elétrica superficial indicativas de risco de corrosão baixo a desprezível conforme critério da Tabela 19.

Analisando a Figura 71 pode-se notar facilmente que os produtos AI-1, AI-2, AI-3 e AI-6 se destacam pela sua baixa resistividade elétrica, indicando que eles devem apresentar um pior desempenho do ponto de vista da mobilidade iônica. Por outro lado, os produtos AI-4, AI-5 e AI-7 apresentam valores de resistividade elétrica mais altos, o que deverá resultar em uma maior dificuldade do fluxo de corrente iônica entre o ânodo e o cátodo, resultando em uma maior eficiência como barreira quanto ao desenvolvimento da corrosão.

Figura 71 – Resultados médios de resistividade elétrica superficial medida em corpos-de-prova saturados de 60 mm x 60 mm x 120 mm para as argamassas do tipo AI.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esta parte final do trabalho consiste em uma discussão, com o objetivo de tratar a relação entre os resultados obtidos, além de sugerir formas de interpretação e limites para algumas das principais propriedades das argamassas de reparo estudadas.

É importante destacar a grande dificuldade de estabelecimento de limites que garantam a eficiência de uma argamassa de reparo quando aplicada em condições de serviço. Isto ocorre basicamente pelo fato de que no laboratório os ensaios são realizados em condições de ambiente controlado e isolando cada propriedade a ser estudada. Por outro lado, no campo existe uma sinergia entre as propriedades das argamassas.

O critério inicial para a sugestão de limites a serem apresentados se baseou na escolha de valores que compreendessem o maior número de argamassas disponíveis no mercado nacional.

Pode ser que esta não seja a melhor forma de indicar limites, mas consiste em uma contribuição inicial que pode ser usada como um ponto de partida para a normalização e classificação das argamassas de reparo, o que pode facilitar a especificação destes produtos para os serviços de intervenção por reparos localizados. Esta forma de indicação de limites foi também empregada por Poston et al. (2001).

5.1 PROPRIEDADES DE CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DAS ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS E TIPO APO

5.1.1 Curvas granulométricas

A Figura 72 mostra o confronto das curvas granulométricas de AI e APO. Deve-se notar que as argamassas tipo AI são produtos mais finos do que as APO empregadas neste estudo. Além disso, pela Tabela 24, verifica-se que os teores de finos (material passante na peneira de 0,075 mm) para as argamassas do tipo AI são bem maiores do que os das argamassas do tipo APO. Considerando que estes teores de finos se devam à presença de finos do agregado, às adições, mas principalmente ao cimento, pode-se

dizer que possivelmente as argamassas tipo AI têm consumos de cimento maiores do que as APO. Contudo, isto não pode ser afirmado com plena certeza, pelo fato de pouco se saber sobre a formulação das argamassas do tipo AI, já que se trata de produtos industrializados cujos detalhes de formulação não são revelados.

Figura 72 – Comparação das curvas granulométricas de todas as argamassas do estudo.

Tabela 24 – Comparação do teor de finos de todas as argamassas do estudo.

	ARGAMASSAS							
	AI-1	AI-2	AI-3	AI-4	AI-5	AI-6	AI-7	APO-1 APO-2 APO-3 APO-5 APO-6
Material passante na peneira de abertura de malha igual a 0,075 mm	44	32	38	38	48	52	40	25

5.1.2 Retenção de consistência por 1 hora

Para uma maior facilidade de comparação da propriedade de manutenção de consistência das argamassas do estudo interpretou-se a retenção de consistência a 1 hora para cada uma delas, pela fórmula a seguir, como se pode verificar na Figura 73:

$$R_c = 100 \times \frac{C_{1h}}{C_i}$$

Onde:

R_c = retenção de consistência a 1 hora de mistura, em porcentagem;

C_i = consistência inicial, em mm;

C_{1h} = consistência após 1 hora da mistura com a água, em mm.

A Figura 73 ilustra o fato de que os produtos AI-1, AI-5, AI-6 e AI-7 são, entre as argamassas do tipo AI, as de melhor retenção de consistência. Além disso, fica evidente que a argamassa AI-4 não apresentou boa retenção de consistência.

Com relação às argamassas do tipo APO, nota-se que o uso dos polímeros melhorou a capacidade de manutenção de consistência das argamassas de referência (APO-1 e APO-4), com exceção da APO-5, que se manteve no mesmo patamar da sua argamassa de referência (APO-4). Fazendo uma comparação das argamassas tipo AI com as do tipo APO, verifica-se que os níveis de manutenção de consistência das APO são bem inferiores aos das AI.

Figura 73 – Retenção de consistência das argamassas empregadas no estudo, ensaio conforme NBR 10906/90⁵⁹.

⁵⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento de alvenaria – ensaios. NBR 10906.** Rio de Janeiro. 1990.

5.1.3 Rendimento

A Tabela 25 apresenta o rendimento das argamassas estudadas. O rendimento foi calculado como segue:

$$R = \frac{(1 + H / 100)}{d}$$

Onde:

R = rendimento da argamassa anidra, expresso em volume de argamassa fresca por massa da mistura anidra, em L/kg;

H = percentagem de água em relação ao material anidro, em %;

d = densidade de massa da argamassa no estado fresco, em kg/L.

Tabela 25 – Rendimentos das argamassas que fizeram parte do estudo.

ARGAMASSA	LÍQUIDO EM RELAÇÃO A MASSA ANIDRA (%)	DENSIDADE DE MASSA NO ESTADO FRESCO (kg/L)	RENDIMENTO (L/kg)
AI-1	12,5	1,627	0,69
AI-2	14,0	2,109	0,54
AI-3	14,0	2,031	0,56
AI-4	13,0	1,932	0,58
AI-5	16,7	2,235	0,52
AI-6	16,0	2,108	0,55
AI-7	14,9	2,193	0,52
APO-1	10,0	2,114	0,52
APO-2	10,8	2,126	0,52
APO-3	10,0	2,05	0,54
APO-4	10,0	2,124	0,52
APO-5	10,8	2,161	0,51
APO-6	10,0	2,078	0,53

A Figura 74 apresenta a relação entre o rendimento e o ar aprisionado das argamassas estudadas e nota-se que as duas grandezas têm relação direta.

Figura 74 – Relação entre o rendimento e o teor de ar para cada argamassa do estudo.

5.2 PROPRIEDADES RELACIONADAS À COMPATIBILIDADE DE DEFORMAÇÕES

5.2.1 Resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade

Quanto a resistência à compressão, pela Figura 75, nota-se que todas as argamassas do tipo APO se enquadraram na faixa de 55-75 MPa. Já as argamassas do tipo AI se mostraram bem divididas entre as faixas da Figura 75, destacando-se as faixas de 55-75 MPa e 95-115 MPa, ambas com duas argamassas.

Figura 75 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de resistência à compressão, ensaio em analogia à EN 196-1/90 (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).

Analisando a Figura 76, novamente observam-se as argamassas do tipo APO com resultados mais homogêneos e concentrados nas faixas de 13-15 MPa e 15-17 MPa, o que não ocorre com as argamassas do tipo AI com resultados variando bastante entre as faixas definidas.

Assim, para a resistência à compressão recomenda-se o limite inferior de 55 MPa e que compreende 11 das 13 argamassas estudadas e 5 das 7 tipo AI. Argamassas com resistência à compressão entre 45 e 55 MPa foram enquadradas como aceitáveis. Quanto à escolha do limite sugerido para a resistência à tração na flexão aconselha-se que esta seja maior do que 11 MPa, já que a escolha do valor ≥ 15 MPa (faixa de maior concentração de argamassas) deixaria praticamente todas as AI como fora do requisito. Considerou-se aceitável valores entre 9 e 11 MPa, já que estes ainda são superiores aos do concreto de referência ($f_{ck} = 25$ MPa e $a/c = 0,60$).

Figura 76 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de resistência à tração na flexão (corpos-de-prova secos a 70 °C, até constância de massa).

Com os resultados de resistência à compressão e à tração na flexão para as argamassas do tipo AI, tentou-se relacionar estas duas propriedades obtendo-se a Figura 77, que não indicou uma boa relação. Como os produtos AI-6 e AI-7 são materiais que possuem fibras em sua composição e por estes dois materiais terem visivelmente causado uma dispersão na relação, foi feito um novo gráfico excluindo os resultados destes materiais obtendo-se assim uma relação mais aceitável (Figura 78).

Figura 77 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão para as argamassas do tipo AI.

Figura 78 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão para as argamassas do tipo AI, excluindo os produtos AI-5 e AI-7.

Quanto às argamassas do tipo APO a relação entre a resistência à compressão e à tração na flexão não se mostrou muito boa com $r^2=0,52$, como pode-se observar na Figura 79 e isto se deve possivelmente à introdução dos polímeros nas argamassas, gerando uma matriz de propriedades bem distintas das argamassas de referência, como ficou evidenciado nos ensaios analisados no item 4.1.2, Capítulo 4.

Figura 79 - Relação entre a resistência à compressão e a resistência à tração na flexão para as argamassas do tipo APO.

A partir da Figura 80 verifica-se que a maior parte (57% das argamassas industrializadas) encontra-se na faixa de 35-45 GPa de módulo de elasticidade, inclusive o concreto. Além disso, verificou-se uma relação muito boa entre os resultados de módulo de elasticidade e de resistência à compressão para as argamassas do tipo AI (Figura 81). O módulo de elasticidade das argamassas APO não pode ser determinado, por problemas no equipamento.

Figura 80 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de módulo de elasticidade para as argamassas do tipo AI.

Figura 81 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade das argamassas do tipo AI.

5.2.2 Retração por secagem

A Figura 82, Figura 83 e Figura 84 tratam do enquadramento das argamassas do estudo em faixas de retração livre pré-estabelecidas quanto à retração por secagem para 7, 28 e 91 dias.

Figura 82 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de retração por secagem para a idade de 7 dias.

Observando a Figura 82, verifica-se que os resultados não foram homogêneos para as argamassas do tipo APO, como havia sido verificado quanto à resistência à compressão. Com relação às argamassas tipo AI, nota-se que a grande maioria se enquadrou nas faixas de 0,04%-0,07% e 0,07%-0,10%.

Analisando a Figura 83, nota-se novamente a heterogeneidade da distribuição das argamassas do tipo APO entre as faixas estabelecidas. Referindo-se às argamassas do tipo AI, pode-se verificar que a maior parte dos produtos se enquadraram na faixa de 0,10%-0,13%.

Figura 83 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de retração por secagem para a idade de 28 dias.

Com a Figura 84 verifica-se que a maior parte das argamassas, seja do tipo AI ou do tipo APO, encontra-se na faixa de 0,10% - 0,13%.

Figura 84 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de retração por secagem para a idade de 91 dias.

Com base na frequência das argamassas indicadas na Figura 82, Figura 83 e Figura 84, fica como sugestão que argamassas de reparo atendam à recomendação indicada a seguir na Tabela 26.

Tabela 26 – Sugestão de limites quanto à retração por secagem.

IDADE DE AVALIAÇÃO	RETRAÇÃO		
	Baixa	Média	Alta
7 dias	< 0,07 %	0,07 % – 0,10 %	> 0,10 %
28 dias	< 0,07 %	0,07 % – 0,12 %	> 0,12 %
91 dias	< 0,09 %	0,09 % – 0,12 %	> 0,12 %

5.2.3 Resistência de aderência por cisalhamento direto

Agora tratando dos resultados de resistência de aderência por cisalhamento direto, a Figura 85 mostra a distribuição das argamassas diante das faixas de variação estabelecidas. A Figura 86 apresenta uma visão geral do percentual de corpos-de-prova que apresentaram ruptura no substrato de concreto, para cada tipo de argamassa e para todas em conjunto. A Figura 87 apresenta uma relação entre o percentual de ruptura no concreto do substrato e a resistência de aderência por cisalhamento direto, indicando que, para o concreto aqui empregado como substrato ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$), a partir de um valor de 1,8 MPa de resistência de

aderência ao cisalhamento, as rupturas começaram a ocorrer no concreto do substrato, em mais de 60 % dos corpos-de-prova de cada conjunto. Contudo, esse valor não pode ser tomado como um limite mínimo para a resistência de aderência, já que este valor vai variar com a resistência do concreto do substrato da estrutura a ser reparada.

Desse modo, nota-se que é muito difícil estabelecer um limite de resistência de aderência mínimo para a especificação de uma argamassa de reparo, pois esse valor depende do concreto que vai ser reparado.

Em contrapartida, o fato é que a resistência de aderência da argamassa de reparo ao substrato é uma das propriedades críticas de desempenho para a intervenção por reparos localizados, em uma estrutura de concreto armado, pois dela depende a capacidade da peça reparada trabalhar de forma monolítica. Dessa forma, recomenda-se como critério de especificação que a ruptura na aderência ocorra no concreto de substrato, em 100% dos corpos-de-prova. Se houver ruptura na interface com valores elevados ou próximos ao concreto de referência, a resistência de aderência pode ser considerada como média, mas não integralmente satisfatória.

Figura 85 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de resistência de aderência por cisalhamento direto após 3 dias de cura úmida seguido de 25 dias em câmara seca a $23 \pm 3^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa ($f_{ck}=25\text{ MPa}$ e $a/c=0,60$).

Figura 86 – Visão geral do local de ocorrência das rupturas nos corpos-de-prova empregados no ensaio de resistência de aderência por cisalhamento direto.

Figura 87 – Relação entre os resultados de resistência de aderência por cisalhamento direto e o percentual de ocorrência da ruptura no concreto do substrato ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$).

A Figura 88 mostra a relação encontrada entre os valores de resistência à compressão e resistência de aderência por cisalhamento direto para as argamassas do tipo APO. Pode-se notar uma tendência de relação direta entre estas duas variáveis.

Figura 88 - Relação entre a resistência de aderência por cisalhamento direto e a resistência à compressão das argamassas do tipo APO.

A Figura 89 também representa a relação encontrada entre os valores de resistência de aderência por cisalhamento direto e os de resistência à compressão obtidos para as argamassas do tipo AI. Note-se que não foi encontrada uma relação muito boa entre os valores, o que é indicado pelo valor de r^2 igual a 0,18. Contudo, isso foi devido ao resultado obtido para AI-1, que apesar de apresentar uma baixa resistência à compressão apresentou resultados de resistência de aderência por cisalhamento direto bem satisfatórios.

Figura 89 - Relação entre a resistência de aderência por cisalhamento direto e a resistência à compressão das argamassas do tipo AI.

A Figura 90 consiste no mesmo gráfico da Figura 89 com a exclusão do ponto referente a argamassa AI-1, onde verificou-se uma relação bastante razoável entre a resistência de aderência por cisalhamento direto e a resistência à compressão das argamassas do tipo AI.

Figura 90 - Relação entre a resistência de aderência por cisalhamento direto e a resistência à compressão das argamassas do tipo AI, eliminando o ponto referente à argamassa AI-1.

5.3 PROPRIEDADES RELACIONADAS À ESTABILIDADE ELETROQUÍMICA DO AÇO

5.3.1 Absorção de água por capilaridade

A Figura 91 se refere à distribuição das argamassas estudadas dentro de faixas de coeficiente de absorção capilar determinado para o tempo de 24 horas segundo recomendação da DIN 52617/87⁶⁰.

Na Tabela 27 constam os limites aqui indicados para esta propriedade.

⁶⁰ DIN 52617 – Determinação do coeficiente de absorção de água de materiais de construção. DIN-52617/1987. Tradução de Consultor Técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland.

Figura 91 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de coeficiente de absorção por imersão após 24 horas de ensaio.

Tabela 27 - Sugestão de limites quanto à absorção de água por capilaridade.

TEMPO DE CÁLCULO	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE ($\text{kg}/\text{m}^2 \times \text{h}^{-1/2}$)		
	Baixo	Médio	Alto
24 horas	< 0,5	0,5 – 1,0	> 1,0

A Figura 92 mostra a relação entre o coeficiente de absorção capilar a 24 horas e a altura de ascensão capilar a 72 horas de ensaio (método brasileiro), medidas nos mesmos corpos-de-prova. O valor de $r^2=0,81$ indica uma relação razoável.

Figura 92 - Relação entre o coeficiente de absorção capilar a 24 horas e a altura de ascensão a 72 horas, para os produtos tipos AI e APO.

A Figura 93 mostra uma relação muito boa entre os valores de ascensão capilar a 72 horas e o coeficiente de absorção de água determinado segundo a DIN 52617/87, evidenciando que o prazo de 24 horas é suficiente.

Figura 93 - Relação entre a absorção capilar a 72 horas e o coeficiente de absorção a 24 horas, segundo a DIN 52617/87.

5.3.2 Resistência à carbonatação

A Figura 94 e a Figura 95 apresentam a classificação das argamassas quanto à profundidade de carbonatação a 28 dias e a 106 dias de exposição em câmara à 65 % de umidade relativa, 25 °C de temperatura e 5 % de concentração de CO_2 , respectivamente. Verifica-se que muitas das argamassas de reparo tipo AI apresentaram profundidade de carbonatação menores ou iguais a 5 mm a 28 dias de ensaio. A Tabela 28 apresenta os limites recomendados para a especificação das argamassas de reparo:

Tabela 28 - Sugestão de limites quanto ao coeficiente de carbonatação aos 28 dias de exposição a 5% de CO_2 , 25 °C de temperatura e 65% de umidade relativa.

IDADE DE AVALIAÇÃO	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA ENSAIO ACELERADO (mm)		
	Baixa	Média	Alta
28 dias	< 5	5 - 10	>10
105 dias	< 5	5 - 15	>15

Figura 94 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de profundidade de carbonatação a 28 dias com uso de fenolftaleína.

Figura 95 - Enquadramento das argamassas do estudo em faixas de profundidade de carbonatação a 106 dias com uso de fenolftaleína.

A Figura 96 e Figura 97 mostram a relação entre a profundidade de carbonatação, o índice de vazios e a resistência à compressão aos 28 dias. Pode-se notar a relação direta entre o índice de vazios e a profundidade de carbonatação. A relação inversa entre a resistência à compressão e a

profundidade de carbonatação também foi encontrada por Dunster (2000), Figura 4.

Figura 96 - Relação entre o índice de vazios e a profundidade de carbonatação após 28 dias de exposição em câmara com 65% de umidade relativa, 25 °C de temperatura e 5% de concentração de CO₂.

Figura 97 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação após 28 dias de exposição em câmara (65% U.R., 25 °C e 5% de CO₂).

5.3.3 Espectroscopia de impedância eletroquímica

Pelos resultados de impedância, que não foram conclusivos, caberia recomendar:

- aprofundar uma investigação da configuração geométrica da célula, no que diz respeito ao uso de dois ou três eletrodos e à extensão do contra-eletrodo, para as demais faces do corpo-de-prova;
- acertada a geometria da célula e assegurado o final do processo de secagem das argamassas, prosseguir na monitoração em condições de ciclagem higratérmica, para uma melhor avaliação do nível de proteção que cada argamassa pode conferir ao aço.

Lembra-se que os fenômenos de macro-célula com o concreto reparado podem ser em princípio desprezados se o sistema de reparo por si impedir o acesso de umidade e oxigênio às armaduras, o que a argamassa de reparo e um bom sistema final de proteção por pintura podem por si conferir.

A técnica de impedância pode ser promissora na diferenciação de sistemas de proteção final do concreto, pela interpretação aqui discutida.

5.3.4 Resistividade elétrica superficial

A Figura 98 mostra a relação existente entre os resultados encontrados neste estudo para a resistividade elétrica superficial e para absorção capilar de água das argamassas do estudo. Como já era esperado, houve uma tendência à redução dos valores de resistividade superficial com o aumento da absorção capilar das argamassas estudadas. Desse modo, pode-se dizer que a resistividade elétrica superficial das argamassas em condição úmida pode ser indiretamente avaliada pela absorção de água por capilaridade.

Figura 98 - Relação entre os resultados de resistividade elétrica superficial e os de ascensão capilar de água para os produtos tipos AI e APO.

5.3.5 Avaliação conjunta das propriedades

A Tabela 29 mostra a classificação geral das argamassas estudadas com relação aos limites sugeridos neste trabalho. As argamassas que reuniram as melhores propriedades para o uso aqui considerado estão sombreadas e foram as de números AI-5, AI-7 e APO-3.

Recomenda-se o desenvolvimento de trabalhos futuros no sentido de testar a eficácia dos limites propostos neste capítulo, confrontando-os com o desempenho dos produtos em campo e para os diferentes tipos de estruturas de concreto afetadas por corrosão de armaduras por carbonatação.

Cabe salientar que nenhum dos critérios aqui discutidos pode inferir sobre a durabilidade ou a tendência à formação de macro-células de corrosão pelas argamassas testadas. Este trabalho será conduzido em seqüência como tese de livre docência da orientadora deste trabalho.

Tabela 29 – Classificação final das argamassas segundo os limites sugeridos neste trabalho e reunidos na Tabela 30, Capítulo 6.

Argamassa	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Retração por secagem	Aderência por cisalhamento direto	Coefficiente de absorção capilar	Profundidade de carbonatação
AI-1	☹	☹	☺	☺	☹	☹
AI-2	☺	☺	☺	☹	☺	☺
AI-3	☹	☺	☺	☹	☺	☺
AI-4	☺	☺	☺	☹	☺	☺
AI-5	☺	☺	☺	☺	☺	☺
AI-6	☺	☺	☹	☺	☹	☺
AI-7	☺	☺	☺	☺	☺	☺
APO-1	☹	☹	☺	☺	☺	☹
APO-2	☹	☺	☺	☹	☺	☺
APO-3	☺	☺	☺	☺	☺	☺
APO-4	☹	☹	☺	☺	☺	☺
APO-5	☹	☺	☹	☺	☺	☺
APO-6	☺	☺	☹	☺	☺	☺

☹ - insatisfatório

☺ - razoável

☺ - satisfatório

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONTRIBUIÇÃO PARA A NORMALIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARO

Tão importante quanto conhecer os materiais, é saber escolher a melhor opção para cada tipo de recuperação. No caso das estruturas de concreto com corrosão de armaduras por carbonatação, a argamassa de reparo mais apropriada deve ser aquela que apresente manutenção de trabalhabilidade nas condições de aplicação, baixa retração por secagem e deformação semelhante à do substrato, quando sujeita a variações de temperatura e umidade.

No mercado atual, têm-se diversas argamassas que são fornecidas com composição desconhecida e utilizadas na maioria dos serviços de recuperação de estruturas. Cada fabricante oferece cerca de duas opções de material, de modo que para certas características de um determinado substrato, uma marca pode não oferecer a solução mais adequada para um determinado problema, o que torna totalmente desaconselhável a preferência absoluta por um fabricante específico.

Entre as argamassas de reparo industrializadas aqui estudadas e indicadas para o mesmo fim (reparo de estruturas de concreto armado), encontram-se produtos de características muito diferenciadas. Sendo recomendável de forma ideal a sua caracterização juntamente com a do concreto da estrutura a ser reparada, para que o projetista possa fazer a especificação do produto mais adequado para cada caso de intervenção. Contudo, sabe-se que este é um caso difícil de ocorrer, já que um estudo deste tipo aumentaria bastante o custo da obra além de estender o seu prazo de execução, ou seja, existe a questão da viabilidade econômica que sempre deve ser levada em consideração.

Assim, há necessidade de mobilização da comunidade técnica nacional, com vistas ao desenvolvimento de normas específicas para materiais e serviços de reparo para estruturas de concreto, a exemplo do

que já ocorre na Europa com o desenvolvimento das normas europeias da série EN 1504.

Além do desenvolvimento de normas específicas para as argamassas de reparo, é importante passar a classificá-las por categorias em função de propriedades críticas como resistência mecânica, retração por secagem e coeficiente de absorção capilar. Isto iria pelo menos padronizar algumas características das argamassas do mercado, evitando que as empresas de recuperação sejam obrigadas a escolher entre materiais tão distintos (ver resultados deste trabalho), sem subsídios técnicos, já que trabalho comparativo do tipo aqui desenvolvido tem custo e prazo impraticáveis para a maioria das obras.

Espera-se que este trabalho efetivamente contribua para uma retomada de encaminhamento à ABNT de métodos de ensaio e sugestão de limites de propriedades críticas para argamassas de reparos superficiais para estruturas de concreto e que se encontram resumidos na Tabela 30. É importante destacar que estes não são limites absolutos, mas apenas pontos de partida para a discussão e o estabelecimento de classificações para argamassas de reparos superficiais.

Os critérios aqui indicados surgiram a partir da análise da distribuição das argamassas do estudo em faixas balizadas principalmente pelas argamassas tipo AI e a partir da experiência acumulada pelos pesquisadores envolvidos neste trabalho. Vale ressaltar que o intuito do estabelecimento destes limites não é de dizer que uma argamassa que atenda a estas recomendações vai ter um bom desempenho em serviço. A finalidade é estabelecer parâmetros para que uma empresa possa comparar produtos de diferentes fabricantes ou para saber que limites deve atender, se quiser fazer a dosagem de uma argamassa de reparo igual ou melhor do que os produtos do mercado.

Por fim, recomenda-se o prosseguimento desses estudos no sentido de testar estes limites, por ensaios interlaboratoriais e com o desempenho das argamassas, preferencialmente aplicadas em condições de serviço.

Tabela 30 – Limites sugeridos para controle e especificação de argamassas de reparo superficial para estruturas de concreto.

PROPRIEDADES		LIMITES		MÉTODO DE ENSAIO
Essenciais	Consistência inicial e retenção de consistência	Para aplicação manual: 200±10 mm e ≥ 95 %		- Procedimento empregado neste trabalho
	Resistência à compressão	Alta - ≥ 55 MPa Média – 45 - 55 MPa Baixa - < 45 MPa		- Procedimento empregado neste trabalho Referência: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1. 1990.
	Resistência à tração na flexão	Alta - > 11 MPa Média - 9 – 11 MPa Baixa – < 9 MPa		
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade (calculado a 24 horas de ensaio)	Baixa – < 0,5 kg/m ² x h ^{-1/2} Média – 0,5 – 1,0 kg/m ² x h ^{-1/2} Alta - > 1,0 kg/m ² x h ^{-1/2}		- Procedimento empregado neste trabalho Referência: DIN 52617 – Determinação do coeficiente de absorção de água de materiais de construção. DIN-52617/1987. Tradução de Consultor Técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland.
	Retração por secagem	7 dias	Baixa - < 0,07 % Média – 0,07 – 0,10 % Alta - > 0,10 %	- Procedimento empregado neste trabalho Referência: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. NBR 8490. Rio de Janeiro, 1984. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for length change of hardened hydraulic – cement mortar and concrete. ASTM C157/89. Philadelphia, 1989.
28 dias		Baixa - < 0,07 % Média – 0,07 – 0,12 % Alta - > 0,12 %		
91 dias		Baixa - < 0,09 % Média – 0,09 – 0,12 % Alta - > 0,12 %		
Opcionais	Aderência por cisalhamento direto	Ruptura deve ocorrer no concreto de substrato		- Procedimento empregado neste trabalho
	Profundidade de carbonatação	28 dias	Baixa – < 5 mm Média – 5 – 10 mm Alta - > 10 mm	- O procedimento empregado neste trabalho
		91 dias	Baixa – < 5 mm Média – 5 – 15 mm Alta - > 15 mm	

6.2 EFEITOS DOS POLÍMEROS E CIMENTOS NAS ARGAMASSAS TIPO APO

Foi significativo o efeito de ambos os polímeros na retenção de consistência em prazo de 1 hora a contar da mistura da água com o material seco das argamassas. Também, a adição de ambos os polímeros levou a uma melhora na resistência à tração na flexão das argamassas, merecendo destaque o acrilato, que se mostrou mais eficiente do que o EVA. É importante destacar que quando se fez uso de ambos os polímeros, mesmo com condições de cura muito deficientes (1 dia), resultaram argamassas

com resistências à tração na flexão bem superiores à do concreto utilizado como substrato ($f_{ck}=25$ MPa e $a/c=0,60$).

Quanto à resistência à compressão, existe uma tendência de aumento com o emprego dos polímeros, porém menos intensa do que a ocorrida para a resistência à tração na flexão. Vale destacar a ocorrência de um caso de redução da resistência à compressão (uso de EVA na argamassa com o cimento CPPII-F 32) para as curas úmidas por 28 dias (APO-2). O acrilato resultou em aumento da resistência em todos os casos (APO-3 e APO-6).

Tratando da resistência de aderência por cisalhamento direto, os resultados indicaram que o emprego do acrilato resultou em argamassas com resistência de aderência excelente, com todos os corpos-de-prova apresentando ruptura no substrato de concreto. Além disso, destaque-se que as argamassas de referência (APO-1 e APO-4) não mostraram resultados satisfatórios quanto à seção de ruptura por cisalhamento direto, mas os valores de resistência de aderência foram aceitáveis.

Os resultados obtidos no estudo de resistividade elétrica superficial indicaram que o emprego dos polímeros resultou em argamassas mais resistivas, o que é bastante coerente já que estes polímeros diminuem o ingresso de água nas argamassas. Resultados como estes só confirmam a melhora da capacidade de proteção ao aço das argamassas quando os polímeros são empregados. Vale salientar que as argamassas com acrilato resultaram mais resistivas.

De uma forma geral, nas argamassas passíveis de dosagem em obra, o emprego dos polímeros (EVA e acrilato) resultou na melhora das propriedades das argamassas estudadas, com exceção da retração por secagem que se tornou mais acentuada com o emprego destes produtos, independentemente do cimento empregado na formulação da argamassa. Este aumento da retração foi maior no caso das argamassas com cimento CPV ARI PLUS e com o uso do acrilato em sua formulação. Desse modo, seriam recomendáveis estudos variando o teor deste polímero, chegando a um teor ótimo que resulte em melhoria das outras propriedades, sem comprometimento do desempenho quanto à retração por secagem. Pelos

resultados de Moreno (2002), sabe-se que isto não se conseguiu para o EVA e nem mesmo a aderência foi melhorada, para três teores estudados naquele trabalho.

Os resultados indicaram que tanto a adição dos polímeros, como a mudança do cimento CII F 32 para o CPV ARI PLUS RS influenciaram bastante as propriedades relacionadas ao efeito barreira e estabilidade eletroquímica do aço, ou seja, absorção de água por capilaridade, por imersão e resistência à carbonatação, resistividade elétrica superficial e impedância do aço em “reparos homogêneos”. Saliente-se que o acrilato (APO-3 e APO-6) demonstrou maior eficiência do que o EVA (APO-2 e APO-5) na redução da absorção de água por imersão e por capilaridade.

O emprego do cimento CP V ARI PLUS RS mostrou uma maior capacidade de proteção à carbonatação e absorção de água, quando comparado com as argamassas de cimento CP II-F 32, mas o efeito maior sobre estas propriedades foi introduzido pelo uso dos polímeros. Isto se deve à redução da porosidade causada pelo preenchimento dos poros, como indica Ohama (1998).

Desse modo, com o emprego dos polímeros foram obtidas melhoras significantes em todas as propriedades relacionadas ao efeito barreira contra a corrosão de armaduras, principalmente para o acrilato com o cimento CPV ARI PLUS RS.

6.3 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para resultar no prosseguimento do avanço recuperação de estruturas de concreto armado, aconselha-se o estudo dos seguintes temas que visam esclarecer aspectos da durabilidade dos sistemas de reparo:

- Estudo usando diversos teores do polímero acrilato em argamassas de reparo, no intuito de determinar um teor ótimo para o seu uso e verificar a sua eficiência na melhoria da aderência para condições higrotérmicas críticas;

- Continuidade dos estudos aqui iniciados e direcionados a tendência à formação de células de corrosão, no aço imerso em concreto carbonatado e na argamassa de reparo;
- Avaliação dos critérios aqui propostos com relação ao desempenho das argamassas de reparo aplicadas em diversas condições de campo;
- Evolução para estudos de desempenho que incluam a avaliação de sistemas de reparo completos, incluindo as pinturas de proteção superficial para concretos aparentes.

6.4 DIVULGAÇÕES DO TRABALHO AO MEIO TÉCNICO

O trabalho experimental desenvolvido nesta dissertação poderá contribuir para um melhor conhecimento e uniformização de critérios para a seleção de argamassas de reparos localizados de estruturas de concreto, com corrosão por carbonatação.

Além disso, este trabalho traz informações importantes sobre a influência dos polímeros EVA e acrilato nas propriedades das argamassas, que podem ter reflexos decisivos no seu desempenho.

Uma forma de divulgação das informações aqui constantes é a publicação de artigos em revistas técnicas e participação em eventos técnicos, nacionais e internacionais. Vale ressaltar que isto já vem sendo feito desde o início do curso de Mestrado, pois com relação a esta pesquisa, já foram divulgados em congressos e seminários 3 artigos, sendo um deles em Congresso Internacional do ACI.

Contudo, será dado prosseguimento a esta forma de divulgação, para os resultados finais e mais importantes do trabalho que são os métodos de ensaio e limites sugeridos para futuros textos normativos da ABNT.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, S. D. **Deterioration and repair of the Midland Links viaducts**. Leeds, 1999. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Leeds.
- AL-KADHIMI, T. K. H.; BANFILL, P. F. G.; MILLARD, S. G.; BUNGEY, J. H. An accelerated carbonation procedure for studies on concrete. **Advances in cement research**, vol. 8, nº 30, p. 47-59, abril, 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for length change of hardened hydraulic – cement mortar and concrete. ASTM C157**. Philadelphia, 1989.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. ASTM C 490/97**. Philadelphia, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. ASTM G1-90**. In: Annual book of ASTM Standards. Philadelphia, 1990.
- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.
- ANDRADE, J.J.O. **Estudo das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado no Estado de Pernambuco**. Porto Alegre, 1996. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRÍA, J.; RÍO, O. Técnicas de reparacion de estruturas dañadas por corrosion de armaduras. In: 4º Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 4., Porto Alegre, 1997. **Anais**. Porto Alegre, UFRGS, 1997. v. 1, p. 47-54.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto - ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos; NBR 5739/94**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. NBR 7215**. Rio de Janeiro. 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação da composição granulométrica dos agregados - Método de ensaio. NBR 7217**. Rio de Janeiro. 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregado para concreto - especificação. NBR 7211**. Rio de Janeiro. 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação das Impurezas orgânicas das areias para concreto - Método de ensaio. NBR 7219**. Rio de Janeiro. 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregado em estado solto – determinação da massa unitária: método de ensaio. NBR 7251**. Rio de Janeiro. 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. NBR 8490**. Rio de Janeiro, 1984.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação da massa unitária dos agregados - Método de ensaio. NBR 9776.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas e Concretos - ensaio de absorção de água por imersão. NBR 9798.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo: método de ensaio. NBR 9937.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto endurecido - Determinação da penetração de água sob pressão. NBR 10787.** Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. NBR 12142.** Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. NBR 13278.** Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Procedimento Operacional - Carbonatação acelerada em argamassa e concreto. PO-GT-1028, ABCP, Revisão 03, 2000.**
- ASSOCIACION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits destinés aux applications superficielles sur béton durci. - Essai d'adhérence par traction après thermiques sur éprouvette sciée. AFNOR P 18-853.** 1986.
- BAUER, E. Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **Determination of changes in length on drying and wetting (Initial drying shrinkage, drying shrinkage and wetting expansion). BS 1881 Part 5.** Reino unido, 1970.
- CABRAL, A. E. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; BAUER, E. Avaliação de sistemas de reparo para estruturas de concreto armado atacadas por cloretos utilizando a resistência de polarização. In: 5º Congresso Brasileiro de Cimento, São Paulo, 1999. **Anais.** São Paulo, 1999. CD-ROM.
- CAMPBELL-ALLEN, D.; ROPER, H. **Concrete structures: materials, maintenance and repair.** New York, Concrete Design & Construction Series, 1991.
- CARMONA, A. & MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil, estudo estatístico. In. Colloquia 88 - Jornada en Español y Portugues sobre Estructuras Y Materiales, Madrid, 1988. **Anais.** Madrid, 1988. v. VI, p. 101-123.
- CASCUDO, O. Contribuição ao estudo e emprego de técnicas eletroquímicas no controle da corrosão de armaduras em concreto armado. São Paulo, 1991. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto.** São Paulo: Pini, 1997.

- CASTANHEIRA, A. P. A. **Estudo de um sistema de reparo mais eficaz para uma estrutura de concreto armado contaminada por cloretos**. Brasília, 1997. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.
- CATARINO, J.; GONÇALVES, A.; RIBEIRO, S. Reparação de estruturas de betão na normalização europeia. In: Encontro nacional sobre conservação e reabilitação de estruturas, Lisboa, 2000. **Anais**. Lisboa, 2000. p. 105-113.
- CLAISSE, P. A.; EL-SAYAD, H.; IBRAHIM, G. S. Permeability and pore volume of carbonated concrete. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 3, p. 378-381, 1999.
- CLELAND, D. J.; YEOH, K. M.; LONG A. E. Corrosion of reinforcement in concrete repair. **Construction and building materials**, v. 11, n.4, p. 233-238, UK, 1997.
- CLÍMACO, J. C. T. S.; NEPOMUCENO, A. A. Parâmetros para uma metodologia de manutenção de estruturas de concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 36., Porto Alegre, 1995. **Anais**. Porto Alegre, PUCRS, 1995.
- CUSSON, D., MAILVAGANAM, N. Durability of repair materials. **Concrete international**. Authorized reprint, Mar. 1996.
- DAL MOLIN, D.C.C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1988. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DAL MOLIN, D. C. C.; BAUER, E.; CABRAL, A. E. B. Avaliação de sistemas de reparo para estruturas de concreto armado atacadas por cloretos utilizando a resistência de polarização. In: Congresso Brasileiro de Cimento, 5., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, 1999. CD-ROM.
- DECTER, M. H.; KEELEY, C. Durable concrete repair – importance of compatibility and low shrinkage. **Construction and building Materials**, v. 11, n. 5-6, p. 267-273, 1997.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) **Determination of shrinkage and swelling on small test pieces**. Alemanha, DIN 52450. 1985.
- DUNSTER, A. M. Accelerated carbonation testing of concrete. **BRE – Information papers of the building research establishment**, edição: 20, 2000.
- EMMONS, P. H. **Concrete repair and maintenance illustrated: problem analysis, repair strategies, techniques**. Kingston: R. S. Means Company, 1993. p. 29
- EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1, p. 69-75, 1996.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Products and systems for protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. pr EN 1504 – Partes 2 a 9**. 1997.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION(CEN). **Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test method Determination of resistance to carbonation. prEN 13295**. Brussels, CEN, 2000.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196**. 1990.
- FIGUEIREDO, E.J.P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas- contribuição ao estudo de reparo de estruturas de**

- concreto armado.** São Paulo, 1994. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- FRANCINETE JÚNIOR, P. **Estudo da difusão de oxigênio no concreto através de técnica eletroquímica.** São Paulo, 1999. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Grupo Español Del Hormigon (GEHO) Morteros de Reparación. Comisión I G. T. I-4, Dez. 1989. p. 43
- GONZÁLEZ, J. A.; FELIÚ, S.; RODRÍGUEZ, P.; RAMÍREZ, E.; ALONSO, C.; ANDRADE, C. Some questions on the corrosion of steel in concrete – part 1: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**, v. 29, p. 97-104, março 1996.
- GOWERS, K. R. & MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique. **ACI Materials Journal**, n. 96-M66, p. 536-541, Setembro/outubro, 1999.
- HELENE, P. **Corrosão de armaduras no concreto.** São Paulo: Pini, 1986.
- HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto.** 2.ed. São Paulo: Projeto de divulgação tecnológica – FOSROC/PINI, 1992.
- HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P.; MONTEIRO, P. Reparos localizados podem ser considerados soluções eficientes para correção de problemas de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado? In: Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, Barquisimeto, 1993. **Anais.** Barquisimeto, 1993. v. 2, p. 80-89.
- HELENE, P.; LEVY, S. M. **Metodologia, especificações técnicas e composições unitárias para reparos, recuperação e proteção das estruturas de concreto armado de unidades escolares.** São Paulo: PCC.USP/FDE, 1998. p. 221. (Relatório PCC.USP, n. 10.124)
- ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M. A.; GASTALDINI, A. L. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolanas: um estudo preliminar. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais.** Foz do Iguaçu, 2001. CD-ROM.
- LIMA, R. C. **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto.** São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MANGAT, P. S.; O'FLAHERTY, F. J. Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 125-136, 2000.
- MARTINS, A. R.; MONTICELLI, I.; CAMARINI, G. Carbonatação em concretos submetidos a diferentes procedimentos de cura. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais.** Foz do Iguaçu, 2001. CD-ROM.
- MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Estudo da carbonatação em concretos e argamassas. **Revista Engenharia Ciência & Tecnologia**, Espírito Santo, v. 4, n. 5, p. 3-12, 2001.
- MEDEIROS, M. H. F.; SELMO, S. M. S. Desempenho de argamassas para reparos localizados em estruturas de concreto com corrosão das armaduras. In:

- Congresso Brasileiro do Concreto, 43., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais**. Foz do Iguaçu, 2001. CD-ROM.
- MEDEIROS, M. H. F. Estudo De variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. **Revista Engenharia Civil**, Minho, Portugal, n. 12, p. 55-64, 2001.
- MIRANDA, L. F. R. **Estudo de fatores que influenciam na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MITRE, M. P. **Avaliação da aderência de argamassas de reparo estrutural industrializadas preparadas em obra**. São Paulo: PCC.USP, 2001. (Relatório final projeto de iniciação científica, FAPESP)
- MITRE, M. P.; MEDEIROS, M. H. F.; SELMO, S. M. S.; MORENO Jr., R. Estudo da durabilidade da aderência de sistemas de reparo localizado para estruturas de concreto. In: 6º Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 6., Santo Domingo, 2001. **Anais**. Santo Domingo, República Dominicana, 2001. CD-ROM.
- MONTEIRO, E. C. B. Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras, sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos. Brasília, 1996. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília.
- MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação da técnica de extração eletroquímica de cloretos no reparo de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras**. São Paulo, 2002. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MORENO Jr., R. Estudo de fatores que afetam a aderência de argamassas de reparo para estruturas de concreto. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. (*No prelo*)
- NEPOMUCENO, A. A. Comportamiento de morteros de reparacion frente a la carbonatación y la penetración de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras - Estudio mediante la resistencia de polarización. Madrid, 1992. Tese (Doutorado) - Universidad Politecnica de Madrid, Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja"- CSIC.
- NINCE, A.A. **Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas na região Centro-Oeste**. Brasília, 1996. 176 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília.
- NUNES, F. L. **Influência das dosagem na carbonatação dos concretos**. São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- OHAMA, Y. Polymer-based admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, p. 189-212, 1998.
- PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. **Materials and Structures**, v. 25, p. 293-304, Junho, 1992.
- PARROT, L. J. Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete. **Materials and Structures**, v. 29, p. 164-173, abril, 1996.
- PAZINI, E.; CASTRO, P.; HELENE, P. Sistemas de reparación para estructuras dañadas por corrosión. In: CASTRO, P. **Corrosión en estructuras de concreto armado – Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y**

- reparaciones.** Mexico: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1998. Capítulo 9, p. 93-116.
- PING GU; BEAUDOIN, J. J.; TUMIDAJSKI, P. J.; MAILVAGANAM, N. P. Electrochemical incompatibility of patches in reinforced concrete. **Revista Concrete international**, p. 68-72, agosto, 1997.
- POSTON, R. W.; KESNER, K.; McDONALD, J. E.; VAYSBURD, A. M.; EMMONS, P. H. Concrete repair material performance – Laboratory study. **ACI Materials Journal**, n. 98-M16, p. 137-147, Março-Abril, 2001.
- RILEM **Measurement of hardened concrete carbonation depth. TC –CPC18.** 1988.
- RINCÓN, O. T.; CARRUYO, C. A.; HELENE, P.; DÍAZ, I. **Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion en estruturas de hormigon armado.** DURAR: Red Tematica XV. B Durabilidad de la Armadura – Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo, 1998.
- ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies. **Building and Environment**, v. 34, p. 597-606, 1999.
- ROSELL & VÁSQUEZ Alteraciones de tipo químico en el hormigón armado. In: BELLMUNT, R; CASANOVAS; X; CANOVAS, M. F.; DIAZ, C.; HELENE, P. R. L.; ROSELL, J.; ROSELL, J. R.; VÁZQUEZ, E. **Manual de diagnosis e intervención en estruturas de hormigón armado.** Barcelona: Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 2000. Capítulo 4, p. 49-57.
- SELMO, S. M. S. **Aço carbono em pastas de gesso de construção: Estimativa de taxas de corrosão por impedância e por método gravimétrico conjugado à análise de imagem.** São Paulo, 1997. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- SELMO, S. M. S.; MORENO Jr., R.; MITRE, M. P. Caracterização básica de argamassas de reparo para estruturas de concreto, industrializadas no Brasil. In: Encontro Nacional sobre Conservação e reabilitação de estruturas, Lisboa, 2000. **Anais.** Lisboa: LNEC, 2000. p. 805-814.
- SIMS, I. The assessment of concrete for carbonation. **Concrete**, p. 33-38, Novembro/dezembro, 1994.
- THOMAS, M. D. A.; MATTHEWS, J. D.; HAYNES, C. A. Carbonation of fly ash concrete. In: International Conference on Durability of Concrete, 5., Barcelona, 2000. **Anais.** Barcelona: CANMET/ACI, 2000. p. 539-556.
- TULA, L. S. **Contribuição ao estudo da resistência à corrosão de armaduras de aço inoxidável.** São Paulo, 2000. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- VAYSBURD, A. M.; EMMONS, P. H. How to make today's repairs durable for tomorrow – corrosion protection in concrete repair. **Construction and Building Materials.** v. 14, p. 189-197, 2000.
- VENQUIARUTO, S. D.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. A influência do teor e da quantidade de adições minerais na carbonatação do concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais.** Foz do Iguaçu, 2001. CD-ROM.

ANEXO A - PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DAS BARRAS

ANEXO A- PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DAS BARRAS

Limpeza das barras de aço carbono (ASTM G1-90)

O aço empregado foi do tipo CA-50 e diâmetro 6,3 mm e a seguir está descrito o procedimento de limpeza adotado para o mesmo, que foi baseado na ASTM G1-90.

Etapa 1 – Eliminação de resíduos de gordura:

Imersão em tricloroetileno – 10 minutos;

Imersão em acetona – 3 minutos;

Imersão em álcool isopropílico – 3 minutos;

Etapa 2 – Eliminação do produto de corrosão:

Imersão em solução de ácido clorídrico e água 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina – temperatura ambiente no ultra-som - Duração 1 minuto (Figura 99-A);

Imersão em solução de ácido clorídrico e água 1:1 com 3,5 g/l de hexametilenotetramina – temperatura de 70 °C - Duração 12 min (Figura 99-B);

Lavagem em água corrente – 1 minuto (Figura 99-C);

Imersão em água deionizada – 1 minuto no ultra-som (Figura 99-D);

Secagem com papel toalha;

Armazenamento em estufa a 80 °C.

Figura 99 – Ilustração do procedimento empregado na limpeza das barras: A) Imersão em solução de ácido clorídrico e água 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina, B) Imersão em solução de ácido clorídrico e água 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina, C) Lavagem em água corrente, D) Imersão em água deionizada.

Para a determinação do tempo de imersão das barras de aço na solução de ácido clorídrico e água 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina foi procedido como recomendado na ASTM G1-90, concluindo-se que o tempo de 12 minutos é o tempo ótimo como pode ser verificado na Figura 100.

Figura 100 – Variação da perda de massa com os ciclos de limpeza realizados nas barras de ensaio.

**ANEXO B - TABELAS DAS PROPRIEDADES DOS
PRODUTOS E SISTEMAS DE REPARO DA ENV 1504-
9/97**

O conteúdo desta tabela pode ser modificado, dependendo da finalização da EN 1504, Partes 2 a 7												
Princípio do reparo		Proteção contra o ingresso de agentes agressivos		Controle de umidade	Restauração do concreto			Controle de áreas anódicas				
Simbologia		Métodos de reparo										
<div><div></div> Propriedades para todos os usos</div> <div><div></div> Propriedades para certos usos</div> <div><div></div> Propriedades para aplicações especiais</div>		Impregnação	Revestimento superficial	Preenchimento de fissuras	Impregnação hidrófuga	Pintura superficial	Aplicação de argamassa manualmente	Remodelagem do concreto	Projeção de concreto ou argamassa	Pintura na armadura com tintas ativas	Pintura da armadura com tintas tipo barreira	Aplicação de inibidor ao concreto
pr EN	Propriedades											
813	1-Secagem superficial											
814	2-Tempo de manuseio ("pot life")											
815	3-Tempo em aberto											
816-1	4-Retração linear para polímeros+sistemas de proteção superficial											
816-2	5-Retração volumétrica para polímeros+sistemas de proteção superficial											
816-4	6-Retração linear para argamassas de aglomerantes hidráulicos											
817	7-Taxa de expansão											
818	8-Resistência à compressão											
819	9-Cloreto solúveis em água											
821	10-Conteúdo de álcalis											
822	11-Teor de ar											
823	12-Módulo de elasticidade na flexão + resist. à tração na flexão											
824	13-Coeficiente de expansão térmica											
825	14-Viscosidade											
826	15-Tempo de escoamento com o uso do copo de escoamento											
827-1	16-Compatibilidade de produtos de injeção com o concreto											
827-2	17-Compatibilidade de produtos de injeção com o aço											
827-3	18-Compatibilidade de produtos de injeção com o elastômero											
830	19-Temperatura de transição vítrea											
831	20-Módulo de elasticidade no ensaio de tração direta											
832	21-Tempo de assentamento ou tempo de enrijecimento											
833	22-Resistência à abrasão											
835	23-Desempenho da seção transversal											
836-1	24-Impermeabilidade ao CO ₂											
836-2	25-Permeabilidade ao vapor de água											

[illegible]

O conteúdo desta tabela pode ser modificado, dependendo da finalização da EN 1504, Partes 2 a 7												
Princípio do reparo		Proteção contra o ingresso de agentes agressivos		Controle de umidade	Restauração do concreto		Controle de áreas anódicas					
Simbologia		Métodos de reparo										
<div><div></div>Propriedades para todos os usos</div> <div><div></div>Propriedades para certos usos</div> <div><div></div>Propriedades para aplicações especiais</div>		Impregnação	Revestimento superficial	Preenchimento de fissuras	Impregnação hidrófuga	Pintura superficial	Aplicação de argamassa manualmente	Remodelagem do concreto	Projeção de concreto ou argamassa	Pintura na armadura com tintas ativas	Pintura da armadura com tintas tipo barreira	Aplicação de inibidor ao concreto
pr EN	Propriedades											
856-2	51-Adesão de produtos de injeção a base de epóxi ou cimento											
856-3	52-Adesão após ciclos térmicos											
856-4	53-Adesão após fadiga											
857	54-Estanqueidade											
858	55-Sensibilidade da aderência com o contato da água											
861	56-Resistência à água do mar e/ou água com alto teor de sulfato											
862	57-Tixotropia de produtos para a proteção da armadura											
866	58-Resistência ao fogo											
867	59-Emissão de gases após a polimerização											
	60-Resistência aos sais de degelo											
	61-Baixa resistividade do material de reparo											
	62-Espessura da camada											
	63-Módulo de elasticidade à compressão											
	64-Fluência na compressão											
	65-Espessura da camada											
816-4	66-Retração restringida											
	67-Resistência ao deslizamento											
	68-Expansão											
	69-Profundidade de penetração											
	70-Desempenho eletroquímico											
	71-Estabilidade dos álcalis											
	72-Fluência por envelhecimento											

**ANEXO C – CÓPIA DOS CATÁLOGOS DOS
PRODUTOS EMPREGADOS**

ANEXO C – CÓPIA DOS CATÁLOGOS DOS PRODUTOS EMPREGADOS

Produto 1 – Número referente apenas à Tabela 3 – página 22.

Argamassa seca de alta resistência para revestimentos

CARACTERÍSTICAS

Cor: cinza

Composição Básica: cimento

Primeiros Socorros: item 6, página 107

Validade: 6 meses

É uma argamassa para revestimentos que apresenta alta resistência e grande aderência. Impermeável e isenta de retração, não apresenta fissuras.

CAMPOS DE APLICAÇÃO

- Revestimentos e reparos em estruturas de concreto e nivelamentos de placas de base para máquinas e estruturas metálicas.
- Indicado para espessuras variando entre 3 a 7 cm. Para espessuras menores recomenda-se o REI.

MODO DE USAR

A superfície deve estar perfeitamente limpa, isenta de nata de cimento e partes soltas. Umedecer previamente o substrato, sem entretanto, encharcá-lo.

Acrescentar água ao produto e misturar por 4 minutos, preferencialmente em betoneira, até se obter a consistência desejada, que deve ser bem seca.

O produto, utilizado na consistência seca (tipo dry-pack), pode ser aplicado com colher de pedreiro ou mesmo com as mãos, utilizando luvas. Dar acabamento com desempenadeira.

Em locais sujeitos a calor intenso, sugere-se a realização de cura úmida ou com agentes de cura.

CONSUMO APROXIMADO

2,2 kg/m²/mm de espessura.

EMBALAGENS

- Sacos plásticos valvulados com 40 kg

ARMAZENAMENTO

Deve obedecer os mesmos critérios de estocagem do cimento.

Produto 2 – Número referente apenas à Tabela 3 – página 22.

Argamassa modificada com polímeros, para revestimentos e reparos

CARACTERÍSTICAS

Dois componentes (A+B). Cor cinza, após misturados.

Densidade: A: 1,36 g/cm³

B: 1,02 g/cm³

Composição Básica: A: cimento

B: emulsão acrílica

Primeiros Socorros: A: item 6, página 107

B: item 4, página 107

Validade: 6 meses

uma argamassa de cimento e polímeros, impermeável, de alta resistência e isenta de retração.

Apresenta consistência tixotrópica, podendo ser aplicado em superfícies horizontais e verticais.

Indicado para executar revestimentos e reparos de pouca espessura - 5 a 25 mm - em estruturas de concreto ou alvenaria. Para maiores espessuras indica-se a utilização do REV

CAMPOS DE APLICAÇÃO

- Revestimentos e reparos de poucas espessuras em estruturas de concreto e alvenaria.

MODO DE USAR

As superfícies devem estar perfeitamente limpas, isentas de nata de cimento e partes soltas. Substratos muito secos devem ser levemente umedecidos previamente.

Misturar os componentes pó e líquido (A+B) do REV por 4 minutos, preferencialmente em betoneira. Utilizar a argamassa no prazo máximo de uma hora.

Aplicar em camada de até 1,0 cm, com colher de pedreiro. Sarrafear e dar acabamento com desempenadeira metálica.

Indica-se realizar cura úmida ou com agente de cura: TR

CONSUMO APROXIMADO

2,0 kg/m²/mm de espessura.

EMBALAGENS

- Conjuntos (A+B) com 35 kg

ARMAZENAMENTO

Deve obedecer os mesmos critérios de estocagem do cimento.

Produto 3 – Número referente apenas à Tabela 3 – página 22.

Argamassa de alta resistência para reparos estruturais

DESCRIÇÃO:

um produto pré dosado bicomponente hidráulico, elaborada para permitir a execução de reparos superficiais e recuperação de estruturas de concreto, com espessura de até 70 mm, produzida dentro dos mais altos padrões internacionais da indústria, com tecnologia Master Builders Technologies.

BENEFÍCIO:

- Excelente resistência mecânica;
- Baixa permeabilidade;
- Ótima aderência em superfícies de concreto velho e/ou argamassas;
- Não apresenta fissuras nem trincas;
- Baixa retração.

CAMPO DE UTILIZAÇÃO:

- Reparos estruturais;
- Reparos de revestimento de alvenaria;
- Revestimento protetor de pisos industriais, submetidos ao trânsito de equipamentos pesados;
- Restauração de quinas (em cantos vivos de concreto);
- Proteção mecânica de impermeabilização.

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO:

Deve ser misturada em um recipiente limpo e de material não absorvente. Adicionar a parte líquida Componente B sobre a parte sólida Componente A, agitar de forma contínua para homogeneizar a mistura, preferencialmente em equipamento misturador de argamassa. Aplicar o material com colher de pedreiro ou desempenadeira metálica, comprimindo sobre a superfície uma espessura de até 30 mm por camada. Aplicar ponta de aderência com o componente B, com trincha, brocha ou através de inserção, entre camadas. Dar acabamento com desempenadeira metálica. Efetuar cura úmida.

RENDIMENTO:

O consumo é de 45 kg para revestir 2,2 m² com espessura de 10 mm.

INDICAÇÕES TÉCNICAS:

Forma:	componente A componente B	Pó cinza líquido branco
Densidade	componente A componente B	1,59 g / cm ³ 1,02 g / cm ³
Trabalhabilidade:		30 à 60 minutos
Resistência à compressão aos 28 dias		30 MPa

COMPATIBILIDADE:

Para utilização da EI n qualquer outra aplicação não mencionada nesta ficha técnica, favor entrar em contato com o nosso Departamento Técnico.

RECOMENDAÇÕES:

Em pavimentos e locais submetidos às condições climáticas severas, favor entrar em contato com nosso Departamento Técnico. Não é recomendada sua aplicação em superfícies expostas aos ataques ácidos ou materiais que os gerem.

EMBALAGENS:

Jogos: parte A (lata plástica) 40 kg
 parte B (frasco plástico) 5 kg

ARMAZENAMENTO:

Em condições ambientais adequadas e devidamente embalado, é válido por um período de 12 meses. Para tanto, solicita-se armazenar o produto em local coberto, sem umidade e raios solares, permanecendo fechado em sua embalagem original.

HIGIENE DO TRABALHO:

Este produto é impróprio para consumo humano. Evitar o contato com a pele e principalmente os olhos. É indicada, também, o uso de máscara contra pó, bem como o uso de luvas.

ASSESSORIA TÉCNICA:

Nosso Departamento Técnico está à disposição dos clientes na Assessoria Técnica e execução de ensaios de laboratório. Para tanto conta com uma equipe de engenheiros especialistas.

NOTA: Os dados mencionados neste folheto técnico estão baseados em provas de laboratório cuidadosamente controlados e em função de nossos conhecimentos e experiência atuais. Podem ocorrer variações dentro de limites razoáveis. Não podemos nos responsabilizar por aplicações improprias. Em caso de dúvida, consulte o nosso departamento técnico.

Produto 4 – Número referente apenas à Tabela 3 – página 22.

Argamassa de reparo reoplástica, fixotrópica, com retração compensada e resistente a sulfatos, para reparo de concreto em grandes espessuras

DESCRIÇÃO:

É um produto cimentício em pó, modificado com polímero e fibras sintéticas, monocomponente, pronto para o uso. Misturado com água, produz uma argamassa reoplástica e fixotrópica de altas resistências, com retração compensada e sem segregação, recomendada para reparos estruturais em concreto, em camadas de até 4 cm de espessura.

PROPRIEDADES:

- Altas resistências mecânicas;
- Extraordinária aderência à armadura e ao concreto;
- Grande impermeabilidade mesmo em ambientes agressivos;
- Aplicação manual ou por projeção;
- Longo tempo de trabalhabilidade;
- Não contém clareos nem partículas metálicas.

CAMPOS DE APLICAÇÃO:

- Reparo em elementos estruturais de concreto armado ou protendido, em pilares, vigas, tubuleiras de pontes e viadutos, etc;
- Trabalhos de reparos em pontes e obras marítimas;
- Trabalhos de reparos em indústrias;
- Proteção do concreto contra agressividade da água contendo sulfatos e clareos;
- Reparo de elementos de concreto sujeitos a cargas estáticas ou dinâmicas.

DADOS TÉCNICOS:

Módulo de Elasticidade:	7 dias = 25 GPa 28 dias = 30 GPa
Expansão:	0,10 % aprox.
Aderência concreto:	1,5-2 MPa aos 28 d.
Aderência aço:	Barra lisa = 4 MPa Barra corr. = 30 MPa

MODO DE UTILIZAÇÃO:

Recomenda-se consultar o _____ e seguir a Metodologia de Reparos:

1. Mistura:

- Abrir os sacos de _____ necessários para o trabalho, pouco tempo antes de começar a mistura. Verter no balança a quantidade mínima de água de amassamento segundo as indicações do Quadro 1. Juntar _____ rapidamente e de forma contínua;
- Misturar os produtos durante 3 a 4 minutos depois da totalidade de _____ tiver sido adicionada, de forma a garantir uma mistura homogênea e sem grumos;

- Juntar o resto da água (aproximadamente 0,5 litros por saco), até que a consistência requerida seja obtida. Misturar por mais 2 ou 3 min. O teor de água pode variar ligeiramente em relação aos valores indicados na Quadro 1, em função da temperatura ambiente e da umidade relativa.
- 2. Preparação da Superfície a Reparar:**
 - Remover o concreto ou tijolo deteriorados, e outros materiais desagregáveis, utilizando uma talhadeira ou escarificador, a fim de que a superfície a reparar fique rugosa, mas nivelada. Limpar a superfície de modo a eliminar óleos, gorduras e poeiras.
- 3. Colocação da Armadura:**
 - Se a profundidade da reparação for superior a 20 mm para grandes áreas, fixar uma malha ligeiramente afastada do concreto;
 - Em qualquer caso, a rugosidade da superfície não deve ser inferior a 5 mm de profundidade.
- 4. Saturação com Água:**
 - Logo que a armadura ou malha tenha sido colocada no lugar, saturar o concreto com água durante 6 horas antes da colocação da argamassa. Eliminar o excesso de água com a ajuda de uma esponja ou ar comprimido;
 - No caso da impossibilidade da saturação consultar a metodologia de reparos.
- 5. Aplicação da Argamassa:**
 - Após a mistura do C_{100} com água, de acordo com as indicações na a seção "Mistura", esta pode ser projetada ou aplicada com desempenadeira de madeira de modo a deixar a superfície nivelada;
 - Se desejado, o acabamento final pode ser lido utilizando uma desempenadeira de madeira ou plástica, ou esponja sintética;
 - O intervalo de tempo entre a colocação da argamassa e o acabamento deve ser de 30 minutos no verão e 1 hora no inverno. Em qualquer caso devem ser tomadas as mesmas precauções que com as argamassas tradicionais;
 - Pode-se utilizar pasta adesiva constituída pela própria C_{100} em alguns tipos de substrato de concreto;
 - A cavidade a ser reparada deve ter espessura mínima de 1 cm.

CURA:

As argamassas com relação compensada deverão sempre ser curadas com água ou composto de cura líquido tipo ALACTEMUL ou ALACTEMUL .

EMBALAGEM:

C_{100} é fornecido em sacos de 25 Kg.

ARMAZENAGEM:

C_{100} tem um tempo de vida de 6 meses, desde que a estocagem seja feita ao abrigo das intempéries e as embalagens estejam intactas e lacradas.

CONSUMO:

1950 kg/m³ aproximadamente.

PRECAUÇÕES DE MANUSEIO:

C_{100} não é tóxica, mas pode afetar a pele e os olhos. O uso de luvas e óculos é recomendado quando for manipulada.

NOTA: Os dados mencionados neste folheto técnico estão baseados em provas de laboratório cuidadosamente controladas e em função de nossos conhecimentos e experiência atuais. Podem ocorrer variações dentro de limites razoáveis. Não podemos nos responsabilizar por aplicações incorretas. Em caso de dúvida, consulte o nosso departamento técnico.

QUADRO 1.

Água requerida para produzir argamassa d

Tipo de Aplicação	Consistência Aconselhada	Flow* ASTM 230	Água de mistura	
			Mín.	Máx.
Projetado Normal	Plástica Plástica	45% 45%	15% 10,5%	19% 14%

*Método de teste modificado p/ 5 quedos.

APLICAÇÃO	Espessura em cm.		
	1-4	4-10	>10
VAZADO	SB8 Fluido	SB8 Fluido 20% de pedra 6-12 mm.	Conter a MBT
MANUAL/PROJETADO	SB8 Tixotrópico	SB8 Tixotrópico em camadas	Conter a MBT

Fig. 1 - Resistência à flexão e compressão do SB8 tixotrópico, a 20°C, misturado com 17% de água.

Fig. 2 - Volume acumulativo dos poros de SB8 tixotrópico (medido pelo porosímetro de mercúrio) comparado com argamassa tradicional com igual trabalhabilidade.

Produto 5 – Número referente apenas à Tabela 3 – página 22.

Argamassa para Reparos Estruturais

Pasta crua

Densidade: 2,10 (A+B)

UTILIZAÇÃO:

é uma argamassa fixotrópica, bicomponente, apresentando altas resistências mecânicas e utilizada na recuperação de estruturas, arestas e cavidades horizontais e verticais.

EMPREGO:

Substrato:

Deve estar limpo, isento de poeira, óleo, nata de cimento e partículas soltas, devendo ser lavado antes da aplicação, apresentando-se úmido mas sem estar saturado.

Mistura:

O conteúdo total do componente B (pó) deverá ser adicionado ao componente A (líquido) e misturado mecanicamente até obter-se uma mistura homogênea e sem grumos.

APLICAÇÃO:

Como argamassa comum, com desempenadeira ou colher de pedreiro.

INSTRUÇÕES DE SEGURANÇA:

Ambos os componentes de não apresentam risco à saúde quando manuseados corretamente. Recomendamos lavar bem as mãos após a utilização do produto.

No caso de contato com os olhos ou mucosas, lavar com água limpa em abundância.

DADOS TÉCNICOS:

Dosagem A:B (em peso): 1:6,7

Vida útil da mistura (pot-life): 40 – 60 minutos (25°C)

Consumo: 2,1 kg/m²/mm de espessura

Resistências Mecânicas (MPa):

Dias	1	3	7	28
Compressão	12,00	30,00	38,00	50,00
Flexão-tração	2,50	5,30	7,50	12,00

VALIDADE:

06 meses após a data de fabricação em local abrigado, fresco e seco nas embalagens originais e intactas.

EMBALAGEM:

Conjunto com 22 kg

Produto 6 – Número referente apenas à Tabela 3 – página 22.

Argamassa não retrátil, à base de cimento e polímero, para reparos superficiais

Usos

Para a execução de reparos superficiais e revestimentos permanentes em estruturas de concreto, blocos ou alvenaria, onde são necessárias baixa permeabilidade e ótima aderência ao substrato, em espessuras de 5 a 25 mm.

Modo de usar

Delimitar a área de reparo com disco de corte. Remover o concreto deteriorado e limpar a superfície do concreto e armadura. Tratar as barras de aço com

Saturar com água limpa o substrato de concreto. Aplicando a superfície seca. Aplicar ponte de aderência (1 parte A + 1 água + 3 cimento, em volume). Fazer a mistura mantendo a

utilizando um misturador universal ou uma, acoplada a furadeira de baixa rotação. Adicionar o componente B - pó - ao componente A - líquido - e misturar completamente. Aplicar o material com colher de pedreiro ou desempenadeira de madeira, comprimindo a argamassa contra a superfície. Sanfear e dar acabamento com desempenadeira metálica ou com uma espuma levemente umedecida. Fazer a cura química com

Aplicação por projeção

pode ser aplicado por projeção via úmida em reparos de grandes extensões, obtendo-se alta velocidade na aplicação e maiores espessuras, o que torna o método economicamente mais vantajoso.

Propriedades a 25 °C		
Resistência à compressão (MPa):	3 dias	28 dias
(NBR 5739)	16	28
Resistência à tração por flexão (NBR 12142):	13 MPa (a 28 dias)	
Penetração de água sob pressão (NBR10787):	0 mm (a 28 dias)	
Difusão de íons cloretos (método Taywood):	11x10 ⁻¹ cm ² /s	

Espessura

5 a 25 mm

Consumo

2,083 kg/m³

Limpeza

Limpar as ferramentas e materiais com água antes do endurecimento. Após a cura, o material só poderá ser removido mecanicamente.

Embalagem

Conjuntos de 35 kg

Armazenamento

A 25 °C, em local seco e ventilado.

Validade: 12 meses na embalagem original e lacrada.

Produto 7 – Número referente apenas à Tabela 3 – página 22.

Argamassa polimérica monocomponente à base de cimento para reparo e recomposição de concreto

Usos

Para a execução de reparos localizados e também recomposição ou revestimento de grandes áreas, em espessuras de 5 a 25 mm. O produto possui baixa permeabilidade à água, cloretos e ao dióxido de carbono. Quando misturado, o produto é tixotrópico, aplicável tanto em superfícies horizontais como verticais.

Modo de Usar

Delimitar a área de reparo com disco de corte. Remover o concreto deteriorado e limpar a superfície do concreto e armadura. Tratar as barras de aço com produto anticorrosivo. Saturar com água limpa o substrato de concreto, deixando a superfície seca. Aplicar ponte de aderência (1 parte de produto + 1 parte de água + 3 cimento, em volume). Fazer a mistura mecânica do produto com 3,3 a 3,7 litros de água por saco do produto, utilizando um misturador universal ou uma furadeira com bico de aço. Aplicar o material com colher de pedreiro ou desempenadeira de madeira, comprimindo o material contra a superfície. Sarrafeir e dar acabamento com desempenadeira metálica ou com uma espuma levemente umedecida. Fazer a cura química com

Propriedades a 25 °C

Resistência à compressão (MPa):	3 dias	28 dias
(NBR 5739)	14	25
Fator água / pó:	0,14	

Consumo

2,020 kg/m³

Limpeza

Limpar as ferramentas e materiais com água antes do endurecimento. Após a cura, o material só poderá ser removido mecanicamente.

Embalagem

Sacos de 25 kg

Armazenamento

A 25 °C, em local seco e ventilado.

Validade: 12 meses na embalagem original e lacrada.

Acrilato

Construction Business Team

Vinnapas® LL 512

Vinnapas® LL 512 is a redispersible powder based on an acrylate copolymer with very good resistance to saponification.

Vinnapas® LL 512 is particularly suitable for blending with inorganic binders, such as cement, anhydrite, gypsum and hydrated lime for the production of construction adhesives, trowelling compounds for floors and walls, plasters, powder paints, repair mortars and for concrete repair, or as sole binder for polymer-modified systems.

Technical data

Supply specification

Solids content DIN 53 189	59 ± 1 %
------------------------------	----------

Ash content 1 000 °C/30 min	13 ± 2 %
--------------------------------	----------

Apparent density DIN 53 466	450 ± 100 g/l
--------------------------------	---------------

Other properties of the powder

Appearance	White powder
------------	--------------

Stabilizing system	Poly(vinyl alcohol)
--------------------	---------------------

Particle size DIN 53 734	Max. 5 % over 400 µm
-----------------------------	----------------------

Properties of the redispersion

Predominant particle size Wacker method (Coulter)	0.5 - 12 µm
--	-------------

Minimum film-forming temperature DIN 53 787	Approx. 5 °C
---	--------------

Film properties	Opalescent, tough/elastic
-----------------	---------------------------

Applications

General

Vinnapas® LL 512 enhances the adhesion, flexural strength, plasticity, abrasion resistance and workability of modified compounds without appreciably affecting flow, thixotropy or water retention. It is therefore compatible with mortar additives used to achieve special processing characteristics.

Vinnapas® LL 512 contains a fine mineral filler as an-silblocking agent. It is free of solvents, plasticizers and film-forming aids.

Special applications

Tile and construction adhesives

Vinnapas® LL 512 is very highly suited for the production of construction adhesives of all kinds. In particular, it enhances adhesion, water retention, plasticity and the workability of the adhesive. We recommend the use of 2 - 6 % redispersible powder as additive. To obtain adhesives with good plasticity, even at very low temperatures (below 0 °C), we recommend the use of Vinnapas® powders RE 545 Z, RE 546 Z, RE 547 Z, RI 551 Z, RI 552 Z, LL 5060 or LL 5062.

Trowelling compounds

Vinnapas® LL 512 is especially recommended for enhancing trowelling compounds. It enhances adhesion, abrasion resistance, flexural strength, water retention and the workability of the trowelling compound. Vinnapas® LL 512 is highly suitable for use in combination with conventional inorganic binders, such as Portland cement, high-alumina cement, anhydrite, gypsum, lime or mixtures of these.

Vinnapas® is a registered trademark of Wacker Polymer Systems GmbH & Co. KG.

WACKER

Wacker Polymer Systems

Depending on the application, we recommend the addition of 1 – 7 % redispersible powder based on total weight.

Cement floor screeds and repair mortars

Vinnapas® LL 512 is very suitable for enhancing repair mortars and screeds. The addition of redispersible powder improves the adhesion, flexural strength, water retention, abrasion resistance and workability. The rate of carbonation is reduced.

We recommend adding 1 – 6 % redispersible powder.

Processing

To produce powder products such as dry mortars, adhesives or trowelling compounds, mix Vinnapas® LL 512 with the other dry materials using suitable equipment. Do not allow the temperature to rise excessively during mixing, otherwise the thermoplastic redispersible powder could agglomerate, forming small lumps of resin.

After sufficient water has been added, mortars or trowelling compounds can be mixed by hand or machine. Since mixing by hand only generates low shear forces, it is best to allow the mixture to mature by leaving it to stand for 5 minutes, and then to stir it again. This is usually unnecessary where forced-circulation mixers are employed.

Additional information

Hazardous chemicals regulations

Vinnapas® LL 512 is not classified as a hazardous chemical under the German "Gefahrstoffverordnung" of August 25, 1986, as amended on October 26, 1993, and therefore does not have to be labelled as such.

A manufacturer's certificate and a safety data sheet are available on request.

Safety

Vinnapas® LL 512 is a Class 1 explosion hazard as set forth in the various explosion precaution guidelines issued by BG Chemie and VDI (eg. VDI guideline 2263); it forms explosive air/dust mixtures. This also applies to compounds and formulations which contain over 20 % redispersible powder.

Miscellaneous

If Vinnapas® LL 512 is used for applications other than those recommended, the choice, processing methods and use of the end product are the sole responsibility of the customer. All legal and other regulations must be observed.

Storage

Vinnapas® LL 512 must be stored in a cool place and protected against humidity. Since the product is thermoplastic, it should not be stored under pressure during warm periods because of the risk of caking. Storage time should not exceed 6 months, beginning with delivery.

Blends of Vinnapas® LL 512 with hydraulic binders, fillers and pigments have better storage stability because these substances prevent caking. However, blends of this type still have to be protected against humidity.

Packaging

25-kg paper bags
Big Bags (sizes on request)

For more information concerning technical aspects,
product quality or safety requirements, please contact:

Wacker Polymer Systems GmbH & Co. KG
Construction Business Team
Postfach 1560
D-84483 Burghausen
Germany
Tel.: +49 8677 83-79 79
Fax: +49 8677 83-81 81
www.wacker-polymer-systems.com

If required for industrial use, please check delivery times with us. Please also notify us in advance of large orders.

The data presented in this leaflet are in accordance with the present state of our knowledge, but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this leaflet should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The recommendations do not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the product for a particular purpose.

Burghausen, 01.10.98
Printed on 11.10.01
L-B-B/Dt RH

A joint venture between
Wacker-Chemie and Air Products

EVA

Business Team Construction

Vinnapas® LL 5044

Vinnapas® LL 5044 is a water-redispersible vinyl acetate/ethylene copolymer powder that exhibits very good resistance to saponification. Because of its relatively high ethylene content, this resin is soft and flexible. Its glass transition temperature is below freezing point.

Vinnapas® LL 5044 is especially recommended for blending with inorganic binders, such as cement, anhydrite, gypsum and hydrated lime, in the production of construction adhesives, wall and floor trowelling compounds and repair mortars. It is also suited as sole binder in polymer-bound systems.

Properties of the redispersion

Predominant particle size Wacker method (Coulter)	1 – 7 µm
--	----------

Minimum film-forming temperature DIN 53 757	0 °C
---	------

Film properties	Cloudy, flexible
-----------------	------------------

Technical data

Supply specification

Solids content DIN 53 189	99 ± 1 %
------------------------------	----------

Ash content 1 000 °C/30 min	10 ± 2 %
--------------------------------	----------

Apparent density DIN 53 466	450 ± 50 g/l
--------------------------------	--------------

Other properties of the powder

Appearance	White powder
------------	--------------

Stabilizing-system	Polyvinyl alcohol
--------------------	-------------------

Particle-size DIN 53 734	Max. 4% over 400 µm
-----------------------------	---------------------

Applications

General

Vinnapas® LL 5044 enhances the adhesion, flexural strength, plasticity, abrasion resistance and workability of modified compounds without appreciably affecting flow, thixotropy or water retention. It is therefore compatible with mortar additives used to achieve special processing characteristics. If used in sufficient amounts, Vinnapas® LL 5044 impedes the penetration of water. To enhance plasticity, more than 5 % Vinnapas® LL 5044 of total weight should be added.

Vinnapas® LL 5044 contains a fine, mineral filler as antiblocking agent. It is free of solvents, plasticizers and film-forming aids.

Special applications

Tile and construction adhesives

To obtain thin-bed, hydraulic mortars with good frost resistance, we recommend using 30 – 50 % cement, 2 – 4 % Vinnapas® LL 5044 and about 0.3 – 0.5 % of a high-viscosity grade of methyl cellulose and, if necessary, organic fibres to reduce slump. To obtain adhesives with greater plasticity, the proportion of redispersible

Vinnapas® is a registered trademark of Wacker-Chemie GmbH

WACKER

Wacker Polymer Systems

perible powder should be increased, the amount of cement reduced. Adequate frost resistance is assured by the higher Vinnapas® LL 5044 content despite the reduction in cement content. Tile adhesives containing about 6 – 10 % LL 5044 can be used to bond tiles to tiles or, if suitably formulated, to organic substrates such as wood-based materials.

External insulation and finishing systems (EIFS)

Hydraulic, powdery adhesives for external insulation and finish systems should contain 25 – 45 % cement, 3 – 6 % Vinnapas® LL 5044 and 0.1 – 0.3 % of a suitable water retention agent such as methyl cellulose. To obtain adhesives with greater plasticity, it is advisable to use no less than 6 % Vinnapas® LL 5044, and to limit the amount of cement to 15 – 25 %. Expanded polystyrene sheets can be bonded exceptionally well with these adhesives. However, if sheets have been cut by hot wire, ensure that the surface is not too badly sintered. It is important to carry out preliminary tests on sheets of extruded polystyrene.

Self-levelling trowelling compounds

Vinnapas® LL 5044 is suitable for obtaining self-levelling trowelling compounds that show high plasticity and good adhesion to organic substrates.

For self-levelling floor trowelling compounds, we recommend using 1.5 – 4 % Vinnapas® LL 5044 in combination with 0.4 – 0.8 % casein. For fast-setting systems, we suggest a mixture of Portland cement and high-alumina cement. Often a defoaming agent must be added.

In the case of casein-free compounds, it is advantageous to combine Vinnapas® LL 5044 with other levelling enhancers such as Melment®, lignin sulfonates and condensation products of naphthalenesulfonic acid.

Trowelling compounds and sealing slurries

Vinnapas® LL 5044 is especially recommended for obtaining trowelling compounds that show high plasticity and good adhesion to smooth and organic substrates. These trowelling compounds have good adhesion to such substrates as rigid PVC, expanded polystyrene and polyurethane foam. Vinnapas® LL 5044 has a waterproofing effect in mortar when added in quantities of more than 8 %, and it is therefore recommended as an additive for sealing slurries.

Cement floor screeds and repair mortars

Vinnapas® LL 5044 is particularly well suited for modifying repair mortars, especially concrete renovation mortars in accordance with the German ZTV-SiB (Supplementary Technical Contractual Conditions for the Protection and Repair of Concrete Construction

Elements). Vinnapas® LL 5044 improves adhesion, flexural strength, abrasion resistance and workability. The rate of carbonation is reduced.

We recommend adding 1 – 6 % Vinnapas® LL 5044.

Modification of gypsum and anhydrite

The addition of Vinnapas® LL 5044 to trowelling compounds and boards containing gypsum as binder increases flexural strength, impact resistance and adhesion. To improve water retentivity, methyl cellulose should be added. Please note that Vinnapas® LL 5044 and the water retention agent will promote air entrainment, making a defoaming agent necessary for certain applications.

Processing

For the production of powder products such as dry mortars, adhesives or trowelling compounds, Vinnapas® LL 5044 is mixed with the other dry materials in suitable equipment. Temperatures should not be allowed to rise excessively during mixing because otherwise the thermoplastic redispersible powder could agglomerate, resulting in the formation of small lumps of resin.

After sufficient water has been added, mortars or trowelling compounds can be mixed by hand or machine. Since mixing by hand only generates low shear forces, it is best to allow the mixture to mature by leaving it to stand for 5 minutes, and then to stir it again. This is usually unnecessary where forced-circulation mixers are employed.

Additional information

Hazardous chemicals regulations

Vinnapas® LL 5044 is not classified as a hazardous chemical under the German "Gefahrstoffverordnung" of 26.08.1986, as amended on 26.10.1993, and therefore does not have to be labelled as such.

A manufacturer's certificate and a safety data sheet are available on request.

Safety

Vinnapas® LL 5044 is a class 1 explosion hazard as set forth in the various explosion precaution guidelines issued by BG Chemie and VDI (e.g. VDI guideline 2263); it forms explosive air/dust mixtures. This also applies to compounds and formulations which contain

a proportion of redispersible powder in excess of 20 %.

Miscellaneous

If Vinnapas® LL 5044 is used for applications other than those recommended, the choice, processing methods and use of the end product are the sole responsibility of the customer. All legal and other regulations must be complied with.

Storage

Vinnapas® LL 5044 must be stored in a cool place and protected against humidity. Since the product is thermoplastic, it should not be subjected to pressure nor stored under warm conditions because of the risk of caking. Storage time should not exceed 6 months.

Blends of Vinnapas® LL 5044 with hydraulic binders, fillers and pigments show better storage stability because these substances prevent caking. However, blends of this type still have to be protected against humidity.

Packaging

25 kg paper bags
Big Bags (sizes on request)

For more information concerning technical aspects, product quality or safety requirements, please contact:

Wacker Polymer Systems GmbH & Co. KG
Business Team Construction
Postfach 1560
D-84483 Burghausen
Germany
Tel.: +49-86 77-83-37 02
Fax: +49-86 77-83-58 20
www.wacker-polymer-systems.com

If required for industrial use, please check delivery times with us. Please also notify us in advance for large orders.

The data presented in this leaflet are in accordance with the present state of our knowledge, but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this leaflet should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The recommendations do not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the products for a particular purpose.

Burghausen, 10.03.99
Printed on 01.06.99
L-B-B/Or RH

A joint venture between
Wacker-Chemie and Air Products

ANEXO D – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

ANEXO D – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

1. Agregados do concreto de substrato e das argamassas tipo APO

Na Tabela 31 encontra-se um resumo da caracterização realizada para os agregados empregados na confecção do concreto e argamassas passíveis de preparo em obra (APO). A Figura 101 apresenta a curva granulométrica destes agregados, que se enquadram nos limites granulométricos da NBR 7211/83⁶¹, sendo o agregado miúdo classificado como areia média e o agregado graúdo como de graduação 1.

Figura 101 - Curvas granulométricas dos agregados usados no concreto de substrato e nas argamassas tipo APO.

⁶¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregado para concreto - especificação. NBR 7211**. Rio de Janeiro. 1983.

Tabela 31 – Caracterização dos agregados usados no concreto de substrato e nas argamassas tipo APO.

GRANULOMETRIA (NBR 7217/87)			
Abertura de peneira (mm)		% Retida acumulada em massa	
		Agregado miúdo	Agregado graúdo
25		0	0
19		0	1
12,5		0	58
9,5		0	95
6,3		0	99
4,8		0	99
2,4		3	99
1,2		17	99
0,6		53	99
0,3		86	99
0,15		96	100
Fundo		100	100
MÓDULO DE FINURA	NBR 7217/87⁶²	2,55	6,91
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA	NBR 7217/87	2,4 mm	19 mm
CLASSIFICAÇÃO	NBR 7211/83⁶³	Areia média	Graduação 1
DENSIDADE DE MASSA APARENTE	NBR 7251/82⁶⁴	1477 kg/m ³	1424 kg/m ³
ABSORÇÃO DE ÁGUA	NBR 9937/87⁶⁵	---	0,87%
DENSIDADE DE MASSA ESPECÍFICA	NBR 9776/87⁶⁶ NBR 9937/87	2600 kg/m ³	2742 kg/m ³
TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS	NBR 7219/87⁶⁷	1,4%	1,1%

⁶² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação da composição granulométrica dos agregados - Método de ensaio. NBR 7217.** Rio de Janeiro. 1987.

⁶³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregado para concreto - especificação. NBR 7211.** Rio de Janeiro. 1983.

⁶⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregado em estado solto - determinação da massa unitária - método de ensaio. NBR 7251.** Rio de Janeiro. 1988.

⁶⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo - método de ensaio. NBR 9937.** Rio de Janeiro. 1987.

⁶⁶ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação da massa unitária dos agregados - Método de ensaio. NBR 9776.** Rio de Janeiro. 1987.

⁶⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação das Impurezas orgânicas das areias para concreto - Método de ensaio. NBR 7219.** Rio de Janeiro. 1982.

2. Cimentos empregados

Os resultados de caracterização do cimento CPV ARI PLUS encontram-se na Tabela 32 e na Tabela 33. A indicação de algum problema na resistência inicial a 1 dia da amostra pode ter decorrido do prazo para a realização deste ensaio, que foi superior a 6 meses de estocagem do cimento.

Tabela 32 – Resultados de caracterização físico-mecânica do cimento CPV-ARI PLUS RS.

Ensaio					Normas	Resultados	Limites da NBR 5733/91
Finura – resíduo na peneira de 75µm (%)					NBR 11579/91	1,6 ⁽²⁾	≤ 6,0
Massa específica (g/cm ³) ⁽¹⁾					NBR NM 23/01	3,03	-
Área específica (m ² /kg) ⁽¹⁾					NBR NM 76/98	379	≥ 300 m ² /kg
Água da pasta de consistência normal (%)					NBR 11580/91	31,0	-
Início de pega (h:min)					NBR 11581/91	3:25	≥ 1h
Fim de pega (h:min)					NBR 11581/91	5:15	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)					NBR 11582/91	0,5	≤ 5
Resistência à compressão (MPa) – (NBR 7215/96)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova n°				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 5733/91
	1	2	3	4			
1	12,5	13,3	12,2	13,3	12,8	4,7	≥ 14,0
3	28,9	29,7	28,3	29,2	29,0	2,4	≥ 24,0
7	38,5	36,9	37,2	36,2	37,2	3,5	≥ 34,0

(1) ensaio a 23±2 °C;

(2) a amostra apresentou grumos de hidratação.

Tabela 33 – Resultados de caracterização química do cimento CPV-ARI PLUS RS.

Ensaio	Normas	Resultados	Limites da NBR 5733/91
Perda ao fogo - PF	NBR 5743/89	3,59	≤4,5 %
Dióxido de silício total – SiO ₂	NBR 8347/91	21,80	***
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	NBR 9203/85	5,63	***
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	NBR 9203/85	3,58	***
Óxido de cálcio total – CaO	NBR 9203/85	58,08	***
Óxido de magnésio – MgO	NBR 9203/85	2,76	≤6,5%
Anidrido sulfúrico – SO ₃	NBR 5745/89	2,75	≤3,5%
Óxido de sódio – Na ₂ O	NBR 5747/89	0,12	***
Óxido de potássio – K ₂ O	NBR 5747/89	0,65	***
TOTAL	***	98,96	***
Anidrido carbônico – CO ₂	NBR 11583/90	2,52	≤3,0%
Resíduo insolúvel – RI	NBR 5744/89	0,44	≤1,0%
Óxido de cálcio livre – CaO (livre)	NBR 7227/90	1,81	***
Equivalente alcalino em Na ₂ O (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)	***	0,55	***

(1) ensaio a 23±2 °C;

A Tabela 34 e

Tabela 35 apresentam os resultados de caracterização do cimento CII F 32.

Tabela 34 - Resultados de caracterização físico-mecânica do cimento CII F 32.

Ensaio					Normas	Resultados	Limites da NBR 5733/91
Finura – resíduo na peneira de 75µm (%)					NBR 11579/91	0,3	≤ 12,0
Massa específica (g/cm ³) ⁽¹⁾					NBR NM 23/01	3,10	-
Área específica (m ² /kg) ⁽¹⁾					NBR NM 76/98	377	≥ 260 m ² /kg
Água da pasta de consistência normal (%)					NBR 11580/91	27,4	-
Início de pega (h:min)					NBR 11581/91	3:50	≥ 1h
Fim de pega (h:min)					NBR 11581/91	5:00	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)					NBR 11582/91	0,5	≤ 5
Resistência à compressão (MPa) – (NBR 7215/96)							
Idade (dias)	Corpo-de-prova n°				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 5733/91
	1	2	3	4			
1	20,3	20,6	20,3	21,0	20,6	1,9	≥ 10,0
3	28,7	28,4	28,3	28,9	28,6	1,0	≥ 20,0
28	41,5	43,1	41,8	42,0	42,1	2,4	≥ 32,0

(1) ensaio a 23±2 °C.

Tabela 35 - Resultados de caracterização química do cimento CII-F 32.

Ensaio	Normas	Resultados	Limites da NBR 5733/91
Perda ao fogo – PF	NBR 5743/89	6,38	≤6,5%
Dióxido de silício total – SiO ₂	NBR 8347/91	16,70	***
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	NBR 9203/85	3,56	***
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃	NBR 9203/85	3,585,03	***
Óxido de cálcio total – CaO	NBR 9203/85	57,50	***
Óxido de magnésio – MgO	NBR 9203/85	6,65	≤6,5%
Anidrido sulfúrico – SO ₃	NBR 5745/89	2,83	≤4,0%
Óxido de sódio – Na ₂ O	NBR 5747/89	0,05	***
Óxido de potássio – K ₂ O	NBR 5747/89	0,39	***
TOTAL	***	99,09	***
Anidrido carbônico – CO ₂	NBR 11583/90	4,97	≤5,0%
Resíduo insolúvel – RI	NBR 5744/89	1,80	≤16,0%
Óxido de cálcio livre – CaO (livre)	NBR 7227/90	1,94	***
Equivalente alcalino em Na ₂ O (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)	***	0,31	***

A Tabela 36 apresenta os resultados do teor de álcalis solúveis em água destes dois cimentos.

Tabela 36 - Resultado da determinação do teor de álcalis solúveis em água dos cimentos, ensaio realizado de acordo com a ASTM C144/94⁶⁸.

MATERIAL	Teor (% em massa)		
	Na ₂ O	K ₂ O	Álcalis solúveis em água expresso em Na ₂ O
Cimento CP II-F 32	0,04	0,40	0,30
Cimento CP V ARI PLUS RS	0,01	0,57	0,39

3. Polímeros empregados

Um dos polímeros que foram empregados nas argamassas é o EVA (poliacetato de vinila-etileno) classificado como polímero em pó redispersível. A Tabela 37 apresenta as propriedades declaradas pelo fabricante deste material, que recomenda o produto para serviços de reparo e declara que ele aumenta a resistência de aderência, à flexão, à abrasão e melhora a trabalhabilidade, além de reduzir a carbonatação. A recomendação de uso é de 1 a 6 % em relação a massa de materiais secos.

Tabela 37 – Propriedades do EVA fornecidas pelo fabricante.

PROPRIEDADE	MÉTODO DE ENSAIO	DECLARADO
Conteúdo de sólidos	DIN 53 189	99±1%
Conteúdo de cinza	---	10±2% a 1000 °C/30 min.
Densidade aparente	DIN 53 466	450±50 g/l
Aparência	---	Pó branco
Tamanho de partícula	DIN 53 734	Máximo de 4% acima de 400 µm
Faixa de predominância de partículas	---	1 – 7 µm
Temperatura mínima de formação de filme	DIN 53 787	0 °C
Propriedades do filme	---	turvo e flexível

⁶⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for chemical analysis of hydraulic cement. ASTM C144/94**. Philadelphia, 1994.

O outro polímero utilizado foi um acrilato classificado pelo fabricante como um polímero em pó redispersível. O fabricante não definiu se é um acrilato de magnésio ou acrilato de cálcio e não informa que seja solúvel em água conforme classificação de Ohama (1998), na Figura 12. Na Tabela 38 constam as propriedades fornecidas pelo fabricante, que indica este produto para o uso em argamassas de reparo de base cimento, melhorando propriedades como a sua resistência de aderência, à flexão, à abrasão, a retenção de água e a trabalhabilidade. Além disso, declara que a taxa de carbonatação da argamassa é reduzida. A percentagem a ser usada é de 1 a 6 % em relação à massa de materiais secos.

Tabela 38 – Propriedades do acrilato fornecidas pelo fabricante.

PROPRIEDADE	MÉTODO DE ENSAIO	DECLARADO
Conteúdo de sólidos	DIN 53 189	99±1%
Conteúdo de cinza	---	13±2% a 1000 °C/30 min.
Densidade aparente	DIN 53 466	450±100 g/l
Aparência	---	Pó branco
Tamanho de partícula	DIN 53 734	Máximo de 2% acima de 400 µm
Faixa de predominância de partículas	---	0,5 – 10 µm
Temperatura mínima de formação de filme	DIN 53 787	5 °C
Propriedades do filme	---	Opaco, rugoso e flexível

4. Concreto do substrato

O concreto utilizado como substrato de aplicação das argamassas de reparo no ensaio de resistência de aderência ao cisalhamento, foi devidamente caracterizado e trata-se de um concreto de traço 1:2,24:3,12 com relação água/cimento 0,60, que equivale a um concreto de f_{ck} 25 MPa ($s_d = 4,5$ MPa). A Tabela 39 apresenta os resultados de resistência à compressão deste concreto, obtidos conforme a NBR 5739/94.

Também foram moldados corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm para determinação das resistências à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade nas mesmas condições de determinação

empregadas nas argamassas de reparo, apesar do método ser direcionado a argamassas. Uma preocupação na adoção deste procedimento foi a possibilidade de maior variação dos resultados, dada as reduzidas dimensões dos corpos-de-prova. Porém, os resultados da Tabela 40 se mostraram relativamente uniformes se comparados com os da Tabela 39.

É importante destacar que, segundo o trabalho de Moreno (2002), a resistência à tração na flexão média desse concreto aos 28 dias é 5 MPa, com ensaio sendo realizado segundo a NBR 12142/91⁶⁹ em corpos-de-prova de 150 mm x 150 mm x 500 mm, com vão igual a três vezes a altura do corpo-de-prova, enquanto na Tabela 40, o ensaio de flexão refere-se ao valor de 2,5 para essa mesma relação.

Tabela 39 – Resultados de resistência à compressão, ensaio realizado conforme a NBR 5739/94⁷⁰.

CORPO-DE-PROVA NORMALIZADO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)
CP1	31
CP2	34
CP3	28
CP4	37
MÉDIA	33
DESVIO PADRÃO	3,7

Tabela 40 – Resultados de resistência à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade do concreto de substrato, em corpos-de-prova reduzidos, em analogia à EN 196/90⁷¹.

CORPO-DE-PROVA REDUZIDO	COMPRESSÃO (MPa)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)
CP1	48	43	8
CP2	43	38	9
CP3	43	35	7
CP4	44	38	7
MÉDIA	44	38	8
DESVIO PADRÃO	2,5	3,1	0,9

⁶⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto – determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos – Método de ensaio. NBR 12142.** Rio de Janeiro, 1991.

⁷⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto - ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos; NBR 5739/94.** Rio de Janeiro, 1994.

ANEXO E – GRÁFICOS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA CONFORME ITENS 3.6.5 E 3.6.6

⁷¹ EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. EN 196-1. 1990.**

ANEXO E – GRÁFICOS DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA CONFORME ITENS 3.6.5 E 3.6.6

APO-2 – 3 dias

APO-2 – 28 dias

APO-2 – 63 dias

APO-3 – 3 dias

APO-3 – 28 dias

APO-3 – 63 dias

APO-4 – 3 dias

APO-4 – 28 dias

APO-4 – 63 dias

APO-5 – 3 dias

APO-5 – 28 dias

APO-5 – 63 dias

APO-6 – 3 dias

APO-6 – 28 dias

APO-6 – 63 dias

Al-1 – 3 dias

Al-1 – 28 dias

Al-1 – 63 dias

Al-2 – 3 dias

Al-2 – 28 dias

Al-2 – 63 dias

Al-3 – 3 dias

Al-3 – 28 dias

Al-3 – 63 dias

Al-4 – 3 dias

Al-4 – 28 dias

Al-4 – 63 dias

AI-5 – 3 dias

AI-5 – 28 dias

AI-5 – 63 dias

Al-6 – 3 dias

Al-6 – 28 dias

Al-6 – 63 dias

Al-7 – 3 dias

Al-7 – 28 dias

Al-7 – 63 dias