



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

JOSÉ ZACARIAS RODRIGUES DA SILVA JUNIOR

**ARGAMASSAS PARA REPARO DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO**

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

São Paulo
2001

JOSÉ ZACARIAS RODRIGUES DA SILVA JUNIOR

ARGAMASSAS PARA REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

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

Área de concentração :
Engenharia de Construção Civil

Orientador:
Paulo Helene

São Paulo
2001

SYSNO: 1189640

21/08/01

Defesa: 14/05/2001

145p.

DEDALUS - Acervo - EPBC



31200005933

BC

Universidade de São Paulo
Biblioteca da Escola Politécnica

FD- 2844

FICHA CATALOGRÁFICA

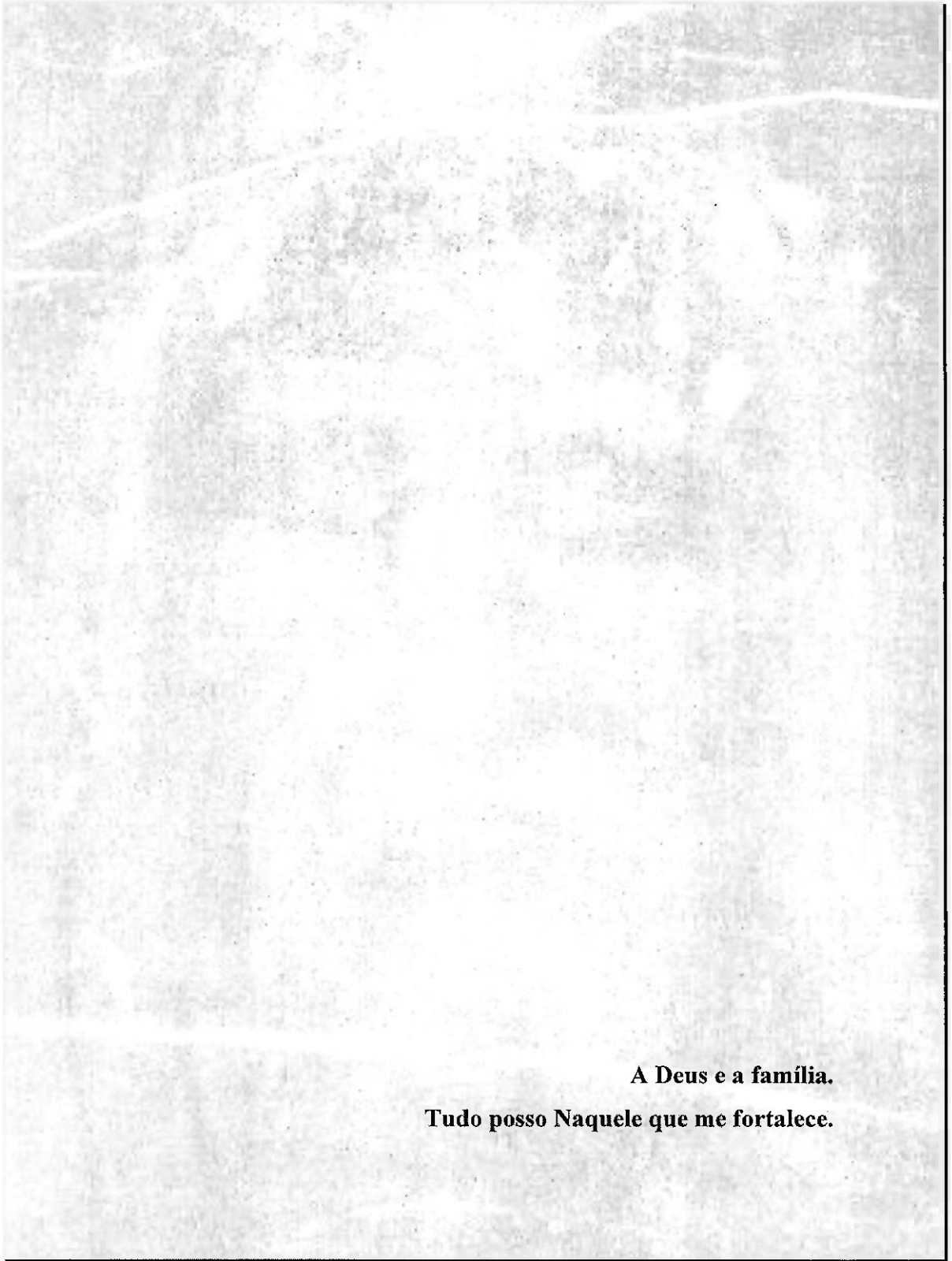
Silva Jr., José Zacarias Rodrigues

Argamassas para reparo de estruturas de concreto. São Paulo, 2001.

145p

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

1. Argamassa para reparo 2. Corrosão 3. Carbonatação
4. Durabilidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t



A Deus e a família.

Tudo posso Naquele que me fortalece.



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

**TERMO DE JULGAMENTO
DE
DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Aos 17 dias do mês de maio de 2001, às 08:30 horas, no Edifício Paula Souza da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores Doutores Paulo Roberto do Lago Helene, orientador(a) do(a) candidato(a), Jonas Silvestre Medeiros e Vladimir Antonio Paulon, iniciou-se a Defesa de Dissertação de Mestrado do(a) Sr(a). **JOSÉ ZACARIAS RODRIGUES DA SILVA JUNIOR.**

Título da Dissertação: "ARGAMASSAS PARA REPARO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO".

Concluída a arguição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado o(a) candidato(a):

Prof.Dr. Paulo Roberto do Lago Helene.....(*aprovado*)
 Prof.Dr. Jonas Silvestre Medeiros.....(*APROVADO*)
 Prof.Dr. Vladimir Antonio Paulon.....(*APROVADO*)

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pela Secretária de Pós-Graduação.

São Paulo, 17 de maio de 2001.
A COMISSÃO JULGADORA

Paulo Roberto do Lago Helene
Jonas Silvestre Medeiros
Vladimir Antonio Paulon

Secretária: Elisabete Ap^a F.S. Ramos

Obs: Resolução 4476, de 17.09.1997 Altera dispositivos do Regimento Geral da USP Art.109 - Imediatamente após o encerramento da arguição da dissertação ou da tese cada examinador expressará seu julgamento em sessão secreta, considerando o candidato aprovado ou reprovado.

Homologado pela C.P.G. em reunião realizada 23 / 05 / 2001.

Or./EP
70058
514330

AGRADECIMENTOS

No limiar de mais um degrau galgado na vida, aproveito para externar meus agradecimentos aqueles que de forma mais incisiva ou não, compartilharam deste trabalho.

Inicialmente a Deus pai todo poderoso que tudo vê nos consola e nos conforta nos momentos de agonia e aflição, e em lugar especial, ao Prof. Paulo Helene por me iniciar na pesquisa científica, e que como orientador não poupou esforços para que eu pudesse atingir ao objetivo esperado, da mesma forma em que sempre que necessário, teve uma palavra amiga de incentivo e de compreensão.

À Prof^ª Sílvia Maria de Souza Selmo, pela presença, ajuda, compreensão, estoicismo e solidariedade nos momentos de dificuldades e agruras, a quem muito devo pelo desenvolvimento desta dissertação.

A sra. Iracema Baena Guimarães da Silva minha mãe, a quem tudo devo, verdadeiro anjo tutelar que guiou meus passos na estrada da vida com altruísmo, amor, compreensão e incentivo para que eu chegasse ao objetivo.

À Maria da Graça e Regina Coeli (homenagem pós morte) minhas irmãs, duas grande baluartes nesta conquista, pois sem as suas ajudas não poderia ter compartilhado deste período de enriquecimento técnico científico que aqui obtive.

Ao Erich Zacarias meu filho, razão maior da minha vida, pela compreensão, estímulo e resistência à saudade provocada pela ausência causada pela busca de novos horizontes científicos.

À UNAMA Universidade da Amazônia pelo apoio, seu Reitor, Pró – Reitores, Diretores, Professores colegas e alunos que sempre que possível tiveram para comigo uma atitude de respeito, de confiança e de incentivo.

Aos amigos de turma, Pedro, Paulo, Leonardo, Leonel, Nelson, Salomon, Boni, Ana, Yeda, Cláudia, Jussara, Vanessa, Rubiane e a todos os colegas da Sala Asteróide, que sempre apoiaram e nunca faltaram com o auxílio nas horas de necessidade.

À equipe de laboratório pela inestimável ajuda e atenção dispensada na execução dos experimentos laboratoriais.

Às secretárias do PCC, pelo denodo e desprendimento no atendimento das necessidades e à equipe da biblioteca pela colaboração nas pesquisas e ajuda nas consultas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

RESUMO

ABSTRACT

INTRODUÇÃO	1
IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVAS DO TEMA	1
OBJETIVOS	4
TRABALHOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS SOBRE O TEMA	4
CONTEÚDO DESTE DOCUMENTO	6
1 CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	7
1.1 INTRODUÇÃO	7
1.2 VISÃO SISTÊMICA DA DURABILIDADE	9
1.3 MECANISMOS DE ENVELHECIMENTO E DETERIORAÇÃO	14
1.3.1 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO	14
1.3.2 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DA ARMADURA	15
1.3.3 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA COMO UM TODO	15
1.4 CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE	15
1.5 CLASSIFICAÇÃO DOS CONCRETOS	18
1.6 CORRESPONDÊNCIA ENTRE AGRESSIVIDADE DO MEIO E A DURABILIDADE DO CONCRETO	21

2	CORROSÃO DE ARMADURAS	23
2.1	PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DO AÇO PELO CONCRETO E DO MECANISMO DA CORROSÃO	23
2.2	PRINCIPAIS MECANISMOS DA CORROSÃO DO AÇO NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	28
2.2.1	CARBONATAÇÃO DO CONCRETO	29
2.2.2	PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO	32
2.3	PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM O PROCESSO DE CORROSÃO	38
2.3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO DE COBRIMENTO DA ARMADURA	38
2.3.2	PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CONCRETO DE COBRIMENTO DA ARMADURA	43
3	ARGAMASSAS DE REPARO	48
3.1	CLASSIFICAÇÕES MAIS USUAIS	48
3.2	ARGAMASSAS E GRAUTES BASE CIMENTO	50
3.3	ARGAMASSAS E GRAUTES ORGÂNICOS	51
3.4	ENSAIOS ACELERADOS PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL	52
3.4.1	ASTM E 632/88	52
3.4.2	BS 7543/92	54
3.5	FATORES INTRÍNSECOS E EXTRÍNSECOS ÀS ARGAMASSAS DETERMINANTES DOS SISTEMAS DE REPARO	56
3.6	RELAÇÃO GERAL DOS FATORES CONDICIONANTES DO COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS DE REPARO	57
3.6.1	CONDICIONANTES DO PROJETO DA ESTRUTURA A SER REPARADA	58
3.6.2	CONDICIONANTES DA EXECUÇÃO DOS REPAROS	61
3.7	ASPECTOS RELEVANTES DAS ARGAMASSAS DE REPARO	64
3.7.1	DURABILIDADE DOS SISTEMAS DE REPARO	65
3.7.2	FALHAS NO SISTEMA DE REPARO	66
3.7.3	TIPOS DE REPARO	67
3.7.4	SELEÇÃO DOS MATERIAIS DE REPARO	68
3.7.5	CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO EM USO	70
3.7.6	CONSIDERAÇÕES LOGÍSTICAS DE TRABALHABILIDADE	70
3.7.7	PARÂMETROS DE INSTALAÇÃO DE REPARO	70
3.7.8	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	71
3.7.9	INCOMPATIBILIDADE DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE	71

4 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REPARO**73**

4.1	MÉTODOS RELACIONADOS AO COMPORTAMENTO EM USO	73
4.1.1	OBJETIVO	73
4.1.2	ADERÊNCIA	73
4.1.3	CARBONATAÇÃO	75
4.1.4	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	76
4.1.4	ABSORÇÃO CAPILAR	76
4.1.5	EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	77
4.1.6	RETRAÇÃO	78
4.2	MÉTODOS DE ENSAIO PARA CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS	80
4.2.1	OBJETIVOS	80
4.2.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	80
4.2.3	RESISTÊNCIA À FLEXÃO	81
4.2.4	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	81
4.2.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE	82
4.2.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	82
4.2.7	VOLUME DE VAZIOS	83
4.2.8	CONSISTÊNCIA	85
4.3	METODOLOGIA DE CONTROLE	85
4.3.1	OBJETIVOS	85
4.3.2	CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE FORNECEDORES	85
4.3.3	PROCEDIMENTOS PARA RECEBIMENTO EM OBRA	86
4.3.4	ENSAIOS PARA RECEBIMENTO EM DEFINITIVO (ACEITAÇÃO)	86
4.3.5	ENSAIOS PARA UNIFORMIDADE	87
4.4	PROPRIEDADES GENÉRICAS DAS ARGAMASSAS E DOS SISTEMAS DE REPARO	88
4.4.1	NO ESTADO GRANULAR	89
4.4.2	NO ESTADO FRESCO	89
4.4.3	NO ESTADO ENDURECIDO	90
4.5	A NORMALIZAÇÃO ESTRANGEIRA SOBRE AS ARGAMASSAS DE REPARO	93
4.5.1	MÉTODOS DE ENSAIOS ASSOCIADOS A ESPECIFICAÇÕES PRESCRITIVAS	94
4.5.2	MÉTODOS DE ENSAIO ASSOCIADOS A ESPECIFICAÇÕES DE DESEMPENHO	99

<u>5 ESPECIFICAÇÕES</u>	<u>107</u>
5.1 DE COMPORTAMENTO EM USO	107
5.2 PRESCRITIVAS (DE CARACTERIZAÇÃO)	109
5.3 DISCUSSÃO DAS ESPECIFICAÇÕES	113
5.4 CONTROLE DE QUALIDADE	114
<u>CONCLUSÕES</u>	<u>116</u>
CONCLUSÕES PROPRIAMENTE DITAS	116
TRANSFERÊNCIA AO MEIO	118
CONTINUIDADE DAS PESQUISAS	119
<u>ANEXO A - NORMA ASTM E 632</u>	<u>120</u>
<u>ANEXO B - NORMA BS 7543</u>	<u>131</u>
<u>ANEXO C - QUADRO GERAL DE PROPRIEDADES X MÉTODOS DE ENSAIOS</u>	<u>136</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>138</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 - Evolução dos custos segundo a regra de Sitter (SITTER, 1983).	8
Figura 1. 2 - Formato de um projeto de durabilidade (CEB. 1997)	12
Figura 2.1: Diagrama de equilíbrio de Potencial / pH para o sistema Fe-H ₂ O, a 25°C, mostrando os óxidos e íons gerados em cada região de pH versus potencial; Diagrama simplificado de POURBAIX (1974) <i>apud</i> HELENE (1981). 25	25
Figura 2.2 - Modelo simplificado de célula de corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado (HELENE, 1986).	26
Figura 2. 3: Modelo de vida útil das estruturas de concreto, tomando-se como principal causa da deterioração o fenômeno de corrosão das armaduras, proposto por HELENE (1993).....	27
Figura 2.4: Representação do processo de carbonatação (RICHARDSON, 1988).	29
Figura 2.5 - Variação do pH com a distância da superfície do concreto. RICHARDSON (1988). ...	30
Figura 2.6 - Formação do complexo solúvel e a corrosão por pite (HELENE, 1993).	33
Figura 2.7: Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do gel cimentício do concreto (CASCUDO, 1997).	35
Figura 2.8: Modelo da concentração de cloretos, que penetram no concreto a partir do meio externo (CASCUDO, 1997).	37
Figura 2.9: Representação esquemática da reação entre o concreto e o ambiente agressivo às armaduras (NEPOMUCENO, 1992).	39
Figura 2.10: Distribuição do tamanho dos poros na pasta de cimento Portland endurecida (METHA, 1997).	40
Figura 3.1 – Diagrama de resumo dos procedimentos recomendados pela ASTM E 632 (ASTM E 632, 1988) para o desenvolvimento de ensaios para a previsão de vida útil de materiais e componentes construtivos; os itens mencionados são relativos ao texto original da norma traduzida no Anexo A.	53
Figura 3.2 - Tipos de falhas nos sistemas de reparo (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).....	67
Figura 3. 3 – Tipos de reparos (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).	68
Figura 3.4 – Influência da incompatibilidade do módulo de elasticidade nos materiais de reparo (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).....	72
Figura 4.1 – Influência do teor de cimento, umidade relativa de 50%, temperatura 20 °C e velocidade do vento de 1,0 m/s (NEVILLE, 1997).	80
Figura 4. 2- Representação dos tipos de poros em uma pasta hidratada (NEVILLE, 1997), com base no modelo de Rahman.....	84
Figura 4.3- Detalhe dos corpos de prova para execução do ensaio de compressão segundo a ASTM C 349 (ASTM,1997).	96
Figura 4.4- Equipamento e dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração da norma BS 6319 : Part 7 (BSI, 1985). 98	98
Figura 4.5 - Corpo do prova para ensaio segundo a NF P 18-851 (AFNOR, 1992), que estabelece ensaios de flexão sobre corpos de prova reconstituídos.	100
Figura 4. 6 - Detalhe dos corpos de prova do ensaio de aderência segundo a norma BS 6319: Part 4 (BSI, 1984).....	101
Figura 4. 7 - Tipos de ruptura dos corpos de prova no ensaio de aderência segundo NF P18-858 (AFNOR, 1988).	103
Figura 4.8 - Equipamento e corpos de prova do ensaio de aderência segundo NF P 18-858 (AFNOR, 1988).	104
Figura 4.9 - Ciclos térmicos segundo NF P 18-853 (1986), para ensaio de tração.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Classes de agressividade ambiental (HELENE, 1997).....	16
Tabela 1. 2- Classes de agressividade do ambiente em função das condições de exposição (HELENE, 1997).	16
Tabela 1.3 - Classificação da agressividade do ambiente com vista à durabilidade do concreto (CEB / FIP Model Code 1990).	17
Tabela 1. 4- Classificação da agressividade do ambiente sulfato (ACI 201.2R-92).....	17
Tabela 1. 5 - Classes de resistência dos concretos em função do risco de corrosão das armaduras (HELENE, 1997).....	20
Tabela 1. 6 - Classe de resistência dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação de compostos expansivos (HELENE, 1997).....	21
Tabela 1. 7 - Relação entre agressividade do ambiente e a durabilidade do concreto (HELENE, 1997).	21
Tabela 2.1: Termos relacionados à vida útil das estruturas, conforme o modelo de HELENE (1993), na Figura 2.3.	27
Tabela 2. 2-Vida útil de projeto recomendada pela BS 7543 (BS, 1992).....	28
Tabela 2. 3- Vida útil de projeto segundo CEN / EN 206 (CEN, 1994).	28
Tabela 2.4: Fatores que influenciam a carbonatação do concreto, segundo dados compilados da literatura.	31
Tabela 2.5 : Limites de referência para teores de cloretos livres (HELENE, 1993).....	36
Tabela 3. 1- Classificação das argamassas de reparo quanto ao aglomerante (GEHO, 1989).	49
Tabela 3. 2- Classificação das argamassas de reparo quanto ao reparo, aplicação e profundidade do sistema de reparo (HELENE, 1998).	50
Tabela 3. 3- Sugestão para cruzamento dos condicionantes dos materiais x propriedades para obtenção de um bom desempenho do sistema de reparo.	63
Tabela 3.4 - Argamassas para sistema de reparo superficial de concreto (CUSSON e MAILVAGANAM, 1996).	69
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas dos materiais de reparo (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).	69
Tabela 3. 6 - Requisitos dos materiais de reparo superficiais em relação à compatibilidade (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).....	71
Tabela 4.1 – Influência das condições climáticas na retração plástica. UR = 50%, e temperatura = 20°C (NEVILLE, 1997).....	78
Tabela 4.2 – Argamassa de reparo, quanto às propriedades intrínsecas mais importantes.....	92
Tabela 4.3 - Escolha da argamassa de reparo em função das condições de uso e do ambiente agressivo (LEVY & HELENE, 1998).....	92
Tabela 4.4- Vantagens e desvantagens na aplicação dos diversos tipos de materiais de reparo segundo a NF P 95-103 (AFNOR, 1993).	94
Tabela 5. 1 – Taxas de retração para todos os tipos de reparo (EMMONS & VAYSBURD, 2000).	108
Tabela 5.2 – Critério de desempenho preliminar (EMMONS & VAYSBURD, 2000).....	108
Tabela 5.3- Propriedades características das argamassas e concretos de reparo mais utilizados (GEHO, 1989).	109
Tabela 5.4 – Especificações técnicas para argamassas de reparo (EMMONS, VAYSBURD, 2000).	110
Tabela 5.5 – Métodos de ensaios padronizados para avaliação da retração livre (EMMONS, VAYSBURD, 2000).	111
Tabela 5.6 – Características do material segundo NF P 18-870 (AFNOR, 1993).	112

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	29
Equação 2.2	31
Equação 2.3	34
Equação 4.1	77
Equação 4.2	77
Equação 4.3	83
Equação 4.4	83
Equação 4.5	97
Equação 4.6.....	98

SILVA Jr, J.Z.R. **Argamassas para reparo de estruturas de concreto**. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 145p.

RESUMO

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado provocada pela carbonatação constitui uma das mais freqüentes manifestações patológicas no Brasil e no mundo, o que suscitou o desenvolvimento de materiais e técnicas de reparo que viessem a recompor a estrutura por ocasião de uma intervenção necessária. Um dos materiais para estas intervenções é a argamassa industrializada para reparo de estruturas de concreto. Ocorre entretanto que estas argamassas ainda carecem de uma normalização mais específica, razão pela qual esta dissertação tem como objetivo complementar, contribuir para o desenvolvimento desta normalização.

Para isto, discutiu-se a evolução do conceito de desempenho e sua aplicação nas argamassas de reparo, da mesma forma que dentro da evolução de normalização estrangeira, levantou-se um conjunto de normas e métodos de ensaio que se aplicam às argamassas de reparo para caracterizá-las e avaliá-las do ponto de vista do seu desempenho.

Discute-se também neste trabalho, os conceitos básicos da corrosão das armaduras seus mecanismos, os princípios de recuperação das estruturas de concreto armado e as propriedades genéricas das argamassas de reparo.

Faz-se ainda uma abordagem das especificações de caracterização e de desempenho destes materiais, e ainda dá-se ênfase ao controle de qualidade da aplicação destas argamassas nos sistemas de reparo.

SILVA Jr, J.Z.R. **Repair mortar for concrete structures**. São Paulo, 2001. Master of Science Thesis – Polytechnic School, São Paulo University, 145p.

ABSTRACT

The corrosion of reinforced concrete structures caused by carbonation constitutes one of the most frequent pathological manifestations in Brazil and in the world, which brought about the development of materials and repair techniques in order to repair the structure on the event of an indispensable intervention. One of the repair materials for these interventions is industrial mortar for concrete structures repair. However what occurs is that these mortars still need more specific standardization and to contribute for the development of this standardization is the main goal of this dissertation.

Therefore, this thesis were discussed the evolution of the performance concept and its application on repair mortars, and the evolution of foreign standards and testing methods which apply to repair mortars to characterize and evaluate them according to their performance on the repair system.

This work also discusses the basic concepts of concrete reinforcement corrosion, its mechanisms, repair strategies and techniques and generic properties of repair mortars.

Furthermore, a brief discussion on the characterization, specifications and performance of these materials is presented, also focusing on the quality control of these mortars application on repair systems.

INTRODUÇÃO

Importância e justificativas do tema

A manifestação patológica da corrosão das armaduras é uma das formas de deterioração das estruturas de concreto mais frequentes na construção civil. Esta afirmativa tem seu respaldo nas seguintes informações, de diversos países, compiladas por RINCÓN (1997), nas quais se verifica que os custos de correção das patologias geradas pelo fenômeno, são bastante elevados e de difícil decisão quanto à viabilidade técnica e econômica:

- nos Estados Unidos, metade das 575.000 pontes da infra estrutura viária, estão afetadas por corrosão devido principalmente ao uso de sais de degelo, e pelo menos 40% destas foram consideradas estruturalmente deficientes. Os custos de recuperação ascendem a US\$ 50 bilhões;
- no Reino Unido, as pontes das grandes autopistas, devido às condições severas de corrosão, têm os custos de recuperação estimados em mais de US\$ 1 bilhão;
- na Espanha, em 844 casos de manifestações patológicas em estruturas de concreto, a corrosão foi a terceira patologia de maior incidência, entre os problemas encontrados, representando 15% dos casos;
- mas no Brasil, dados disponíveis mostram percentagem de incidência ainda maiores. DAL MOLIN (1988) efetuou uma análise de 1512 casos de estruturas com defeitos patológicos e constatou a incidência de corrosão em 40% dos casos. ARANHIA (1994) chegou à conclusão que na Amazônia 60% dos processos patológicos em estruturas, são devidos à corrosão das armaduras. Outros estudos no Brasil, também reconhecidos por RINCÓN (1997), mostram que 20% a 58% dos problemas em pontes, viadutos e outras estruturas em ambientes marinhos e industriais são provocados por corrosão das armaduras.

A importância do tema pode ser também evidenciada pela crescente publicação de livros e manuais sobre o assunto, tais como os indicados no item relativo aos trabalhos e pesquisadores nacionais e internacionais sobre o tema nesta dissertação.

Entretanto, ainda não há uma metodologia consensual para inspeções e reparos das estruturas com corrosão das armaduras, ao contrário do pleno consenso sobre as causas principais, como resume ANDRADE (1992):

- a presença de íons cloreto;
- a diminuição da alcalinidade do concreto, pelo fenômeno da carbonatação.

Existindo corrosão e manifestações patológicas que possam comprometer a vida útil das estruturas, deve-se investigar, eliminar ou minimizar a causa do problema. Depois disto, o processo de reparação é decidido e restaura-se a estrutura até o estado mais próximo possível das suas condições originais.

Assim, a qualidade e a durabilidade do reparo de estruturas de concreto armado, dependem da correta inspeção e de um diagnóstico adequado do problema, seguido de procedimentos de recuperação adequados.

Além disso, a recuperação dessas estruturas de concreto armado necessita de um planejamento e de uma estratégia com objetivo de avaliar a ocasião mais propícia para sua realização, bem como para racionalizar os processos de reparo, para minorar os investimentos nesta área. Necessário também se faz ter uma estimativa da velocidade de evolução do processo de deterioração e da vida útil residual (ANDRADE et al, 1997).

Isto envolve um enfoque sistêmico de durabilidade, ou seja, a abordagem da durabilidade deve ser abrangente, uma visão holística que seja resultante das atividades coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo, planejamento, projeto, fabricação de materiais e componentes, execução, e uso da estrutura. (HELENE, 1997).

Todavia, os custos e as técnicas de recuperação de estruturas de concreto armado com corrosão são muito variáveis em função da causa e estágio da corrosão, bem como da tecnologia local disponível.

A corrosão causada por íons cloretos, por exemplo, é uma das mais difíceis de sanar e requer processos corretivos especiais, como a técnica da proteção catódica, que aliás segundo ANDRADE (1992), é a única eficaz para controlar um processo de corrosão já iniciado, inclusive por carbonatação, embora seja de custo elevado, de domínio restrito a apenas alguns centros especializados no mundo e requeira controle contínuo permanente uma vez implantada em uma estrutura.

Neste contexto, a recuperação de estruturas de concreto armado com corrosão de armaduras por recomposição das seções danificadas, pela chamada técnica¹ de “reparo localizado” é a mais utilizada em todo o mundo e, no Brasil, a única disponível no mercado.

Como matéria-prima fundamental e de grande influência no sucesso destas técnicas, estão as argamassas de reparo industrializadas, escopo desta dissertação. No Brasil, ainda não se têm dados oficiais sobre a fabricação, mas existem pelo menos quatro grandes produtores desses materiais no mercado nacional, a saber:

- Master Builders Technology;
- Otto Baumgart Indústria e Comércio S/A;
- Fosroc Brasil;
- Sika S/A Produtos Químicos para Construção.

O implemento nas técnicas de recuperação com materiais industrializados, tem sido crescente nas duas últimas décadas. No Brasil isto se deve ao fato de muitas obras construídas no surto desenvolvimentista dos anos 70 estarem agora sofrendo acentuado envelhecimento, em face das agressões ambientais e da ausência de planos de manutenção preventiva como verificado em inspeções realizadas nas obras.

Também, hoje em dia, com a crise econômica mundial, mais ênfase é dada à recuperação de estruturas deterioradas por envelhecimento natural ou outros agentes, como tentativa de aumento da vida útil de obras existentes e redução de custos de novos investimentos.

Obras de grande porte recuperadas na última década, listadas a seguir, levantadas pelo autor, fizeram uso vultoso de argamassas industrializadas, em reparos localizados:

- Ponte dos Remédios, em São Paulo, SP;
- Estádio Mário Filho (Maracanã), no Rio de Janeiro, RJ;
- Estádio Cícero Pompeu de Toledo (Morumbi), em São Paulo, SP;

¹ Termos de HELENE (1992) usados amplamente pelo meio técnico.

- Pontes na rodovia Nova Dutra, entre SP e RJ;
- prédios da COPESP, companhia estatal de fertilizantes, em São Paulo, SP.

A produção nacional de argamassas industrializadas é grande tendo em vista o aumento de estruturas deterioradas, a necessidade de se manter um programa de manutenção de edificações convencionais e industriais, principalmente prédios e escolas da rede pública.

Mas, a despeito do crescimento do consumo de argamassas de reparo industrializadas no país, ainda verifica-se a ausência de especificação e métodos de ensaio normativos desses produtos, inclusive em contradição com o Código de Defesa do Consumidor. Também é restrito o número de trabalhos que discutem as suas propriedades básicas e desempenho efetivo, em serviços de recuperação. Assim, todo o contexto até aqui apresentado, além de ter motivado, justifica a presente dissertação

Ressaltando a importância e alcance de em trabalho como este, Helene afirma que “há um contraste marcante entre as dimensões talvez modestas, da atividade normalizadora e a ressonância que ela provoca na produção, no consumo, na economia geral e até nas relações internacionais de comércio”(boletim ABNT, 1986).

Objetivos

Esta dissertação tem por objetivo principal, realizar uma pesquisa sobre o estado da arte das argamassas para reparo de estruturas de concreto. Como consequência deste levantamento, surge como objetivo complementar a contribuição para futura normalização brasileira das argamassas de reparo.

Trabalhos nacionais e internacionais sobre o tema

No Brasil, os trabalhos pioneiros na área de corrosão de estruturas de concreto, são do Prof. Paulo Helene, titular da Escola Politécnica da USP, sendo marco importante no assunto as seguintes obras desse autor: HELENE (1986, 1992, 1993).

NEPOMUCENO (1992), orientado por Andrade, desenvolveu trabalho na Escola Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, em Madrid, para obtenção do título de Doutor em Engenharia, com o título “Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en

estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la técnica de resistência de polarizacion”.

FIGUEIREDO (1994), orientado por Helene, na Escola Politécnica da USP, também desenvolveu trabalho de tese sobre técnicas de reparo: “Avaliação do desempenho de revestimento para proteção de armadura contra corrosão através de técnicas eletroquímicas” e que foi uma contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.

Outro pesquisador que também desenvolveu trabalhos embrionários de pesquisa sobre corrosão de armaduras de concreto, analisando efeitos do cimento CP II, foi BAUER (1995), também orientado por Helene, na Escola Politécnica da USP, em tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Na Universidade de Campinas – Unicamp, a prof^a Inês Joekes está a frente de um grupo de pesquisadores que estuda a corrosão no concreto, tendo concluído sua dissertação de mestrado, na qual avaliou diferentes sistemas de proteção para concreto aparente.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, também desenvolveu pesquisas concernentes à durabilidade das estruturas de concreto armado, orientadas em sua grande maioria pelo Prof. Paulo Helene, especialmente aquelas que tratam do assunto corrosão das armaduras.

No âmbito internacional, é indubitável a importância da pesquisadora ANDRADE (1992), do Instituto Eduardo Torroja na Espanha, pelos trabalhos publicados, especialmente pelo seu Manual para Diagnóstico de Estruturas de Concreto Armado Corroídas, traduzido no Brasil por Helene & Carmona.

No cenário internacional, ainda se destaca o pesquisador SCHIESSEL (1988) com trabalhos de grande valia como o intitulado “State of the art report”, publicado pelo comitê técnico “TC 60 – CSC: Corrosion of Steel in Concrete” da RILEM.

Ainda no âmbito dos comitês técnicos da RILEM, o “124 SRC: Strategies for the Repair of Concrete Structures Damage by Steel Corrosion” (RILEM, 1994), apresentou um resumo dos métodos de controle e monitoramento da corrosão.

Conteúdo deste documento

- Esta dissertação contém, além desta introdução em que se apresentam os objetivos, a importância do trabalho e os centros de pesquisa do país que estudam o tema, cinco capítulos assim definidos:
- no capítulo 1, aborda-se a questão da agressividade ambiental e sua importância na durabilidade do concreto, os mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas;
- no capítulo 2, discute-se a revisão dos conceitos básicos relativos à corrosão de armaduras, e à reparação de estruturas de concreto atacadas por esta patologia, tendo-se como abordagem principal, os princípios da proteção do aço pelo concreto, além das principais causas da sua corrosão nas estruturas de concreto armado;
- no capítulo 3, discute-se as argamassas de reparo, com sua classificação, propriedades, fatores que interferem nos sistemas de reparo e os condicionantes do projeto e da execução dos reparos;
- no capítulo 4, apresenta-se uma proposta dos métodos de ensaio aplicados à avaliação das argamassas de reparo;
- no capítulo 5, são apresentadas as especificações técnicas sobre as argamassas de reparo;

Em seguida, estão as conclusões propriamente ditas, a forma de transferência ao meio técnico e algumas sugestões para estudos futuros. Nos anexos A e B, são apresentadas respectivamente as normas ASTM E 632/88 traduzida e as tabelas da BS 7543/92. No anexo C está contido o resumo do levantamento das normas e métodos de ensaios nacionais e internacionais sobre as argamassas de reparo.

1 CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

1.1 Introdução

Na última década tem crescido de forma assustadora o número de estruturas de concreto armado que apresentam manifestações patológicas, sendo a mais freqüente a corrosão das armaduras, como consequência da degradação precoce das obras executadas.

Segundo NEVILLE (1997), é fundamental que as estruturas de concreto desempenhem a contento os requisitos para as quais foram projetadas, que mantenham as propriedades mecânicas e a utilidade que delas se espera, por um período definido de vida. Por isso o concreto deve resistir ao processo de deterioração ao qual se espera que ele seja submetido. Aí sim pode-se considerar o concreto como durável.

Portanto referir-se à durabilidade do concreto é o mesmo que dizer que o concreto tenha vida eterna, nem que possa suportar qualquer tipo de ação (NEVILLE, 1997). Quando ocorre uma deterioração originada por fatores externos ou por motivos internos ao próprio concreto, diz-se que a durabilidade é inadequada (NEVILLE, 1997).

O conceito de durabilidade é parte integrante dos projetos estruturais, e vem introduzido através de um dos quatro procedimentos abaixo, citados por HELENE (1997):

- com base nas experiências anteriores;
- com base em ensaios acelerados;
- através de métodos deterministas;
- através de métodos estocásticos ou probabilistas.

Atualmente esta visão já está inserida no meio técnico, devido aos avanços da área, ao passo que outrora, o conceito de durabilidade era valorativo, determinado apenas pela experiência e pelo bom senso.

Esta evolução se deve ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de materiais líquidos e gases agressivos através da estrutura porosa do concreto (HELENE, 1997).

Entretanto, cabe ressaltar que as medidas profiláticas que visam a garantia de durabilidade na fase de projeto são menos caras do que qualquer que seja a intervenção efetuada a posteriori. Estes custos de manutenção crescem de forma exponencial em função do tempo em que ela se realize.

SITTER (1983), citado por HELENE (1997), estabeleceu uma lei denominada de Lei dos cinco ou Regra de Sitter, pela qual a elevação do custo de reparação é demonstrada por uma progressão geométrica de razão 5, representada na Figura 1. 1 abaixo.

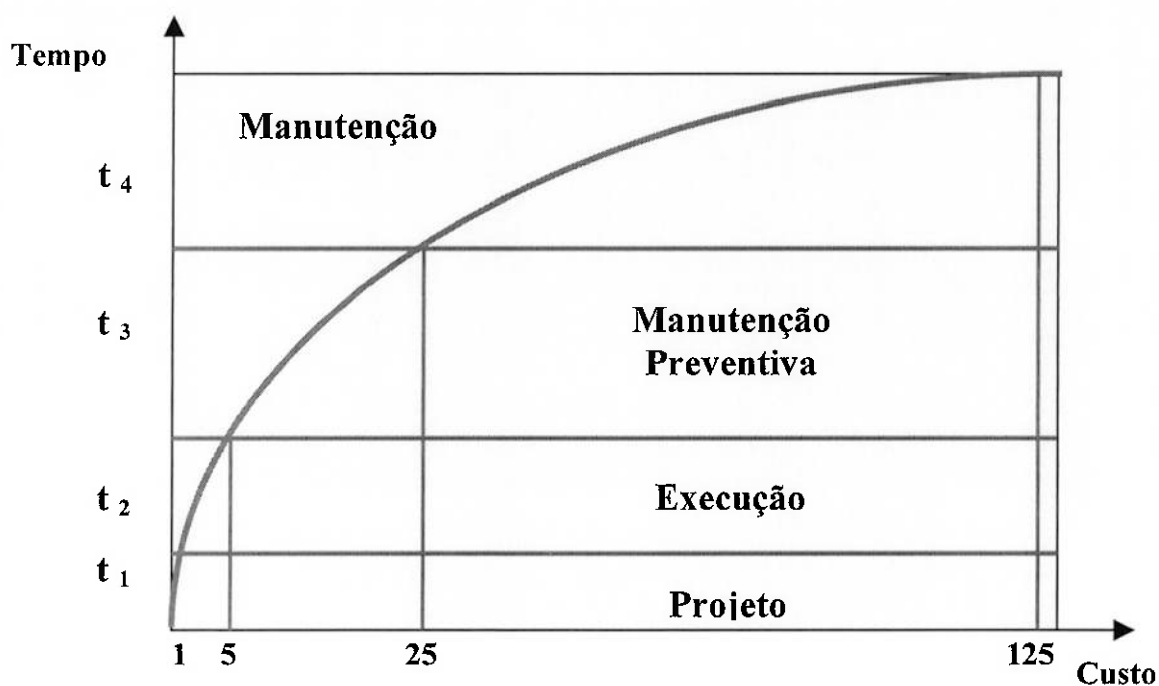


Figura 1. 1 - Evolução dos custos segundo a regra de Sitter (SITTER, 1983).

Essa lei pode ser traduzida segundo HELENE (1992), dependendo da etapa de execução em que a intervenção seja processada, como se mostra a seguir:

- fase de projeto – está ligada à zona 1, tendo menor custo: qualquer intervenção durante o projeto que vise aumentar a durabilidade da estrutura como, por exemplo aumento de cobrimento da armadura, aumento do fck, especificação do tipo de cimento e adições e demais medidas protetoras da estrutura;

- fase executiva – implica em um custo cinco vezes maior do que o custo das medidas tomadas na fase de projeto. Ou, todos os procedimentos tomados para melhorar o parâmetro durabilidade das estruturas de concreto armado, como a redução da relação a/c , resultariam em um ganho maior, pois determinariam a redução do custo final da estrutura;
- fase de manutenção preventiva – intervenções corretivas de diversas formas como pinturas, impermeabilizações, para recolocar o componente em condições de uso custam 25 vezes mais do que os procedimentos corretos tomados na fase de projeto;
- fase de manutenção corretiva – compreende o trabalho de anamnese e diagnose do problema, bem como reparo e reforço, quando necessário, que visem restabelecer o nível de expectativa de vida útil anteriormente prevista. O implemento destas medidas significa um acréscimo de custo de 125 vezes maior do que quando estas medidas preventivas são tomadas na fase de projeto.

1.2 Visão sistêmica da durabilidade

Com este conhecimento viabilizou-se a quantificação do tempo de vida útil das estruturas de concreto armado expressas em anos e não mais em critérios puramente qualitativos adequados a um estrutura submetida a um determinado grau de exposição.

Necessita-se portanto estabelecer uma correspondência entre a agressividade do meio e a durabilidade da estrutura de concreto (HELENE, 1997).

A oposição da estrutura de concreto armado à agressão do meio ambiente e ao seu uso, é função da resistência do concreto e da armadura, de tal forma que qualquer um dos dois que se deteriore primeiro, provocará o comprometimento da estrutura de forma global (HELENE, 1997).

Como o ambiente que agride o concreto não é o mesmo que agride o aço, é de bom alvitre se distinguir os ambientes agressivos ao concreto dos ambientes agressivos à armadura. Como consequência, a dosagem do concreto e a natureza dos materiais que fazem parte da mistura devem ser considerados de forma distinta; concretos resistentes a agressividades ao aço, e concretos resistentes à agressividades ao próprio concreto (HELENE, 1997).

Segundo o CEB (1997), tradicionalmente, o projeto de durabilidade de estruturas de concreto armado é baseado nas seguintes regras:

- cobrimento mínimo de concreto;
- relação a/c máxima;
- teor de cimento mínimo;
- limitação da abertura de fissuras;
- conteúdo de ar;
- tipo de cimento;
- tipo de aço;
- camadas de concreto e armadura.

Estas regras são válidas em função do tipo de exposição ambiental a que a estrutura está submetida, como: microclima, umidade, presença de gelo e sais de degelo, água do mar, etc. e as limitações estabelecidas por elas são baseadas nas pesquisas tecnológicas e na experiência prática.

Segundo o CEB (1997), durabilidade é a capacidade de uma estrutura permanecer com os requisitos de desempenho durante um período de tempo previsto sob a influência de fatores de degradação.

A pesquisa sobre durabilidade do concreto, durante várias décadas, tem produzido uma grande base de informações sobre os mecanismos de deterioração (CEB, 1997).

A inserção do conceito de durabilidade nos projetos não se limita a alguns valores requeridos como resistência, permeabilidade ou cobrimento de concreto. O uso de valores de limites prescritivos precisa ser alicerçado em um número pertencente ao conceito real de durabilidade como bem recomenda o CEB no elenco de procedimentos a seguir:

- definição da vida útil;
- projeto de durabilidade;

- garantia e controle de qualidade dos procedimentos durante a execução, assegurando-se de que os parâmetros projetados serão alcançados com uma probabilidade aceitável;
- avaliação dos parâmetros fundamentais da qualidade na estrutura para comparar o desempenho na prática com o desempenho estimado previsto no projeto;
- monitoramento e inspeção durante o uso, indispensável para prevenir possíveis falhas provocadas por ações dos ambientes;
- despassivação por carbonatação ou por cloretos.

Dependendo da definição do critério de desempenho, da agressividade ambiental e da estratégia de manutenção, o CEB (1997) propõe duas linhas básicas como estratégia de proteção:

- evitar a reação de degradação considerada;
- selecionar bons materiais e detalha-los de forma para que resistam à reação de degradação considerada.

A Figura 1. 2 mostra a formatação de um projeto de durabilidade.

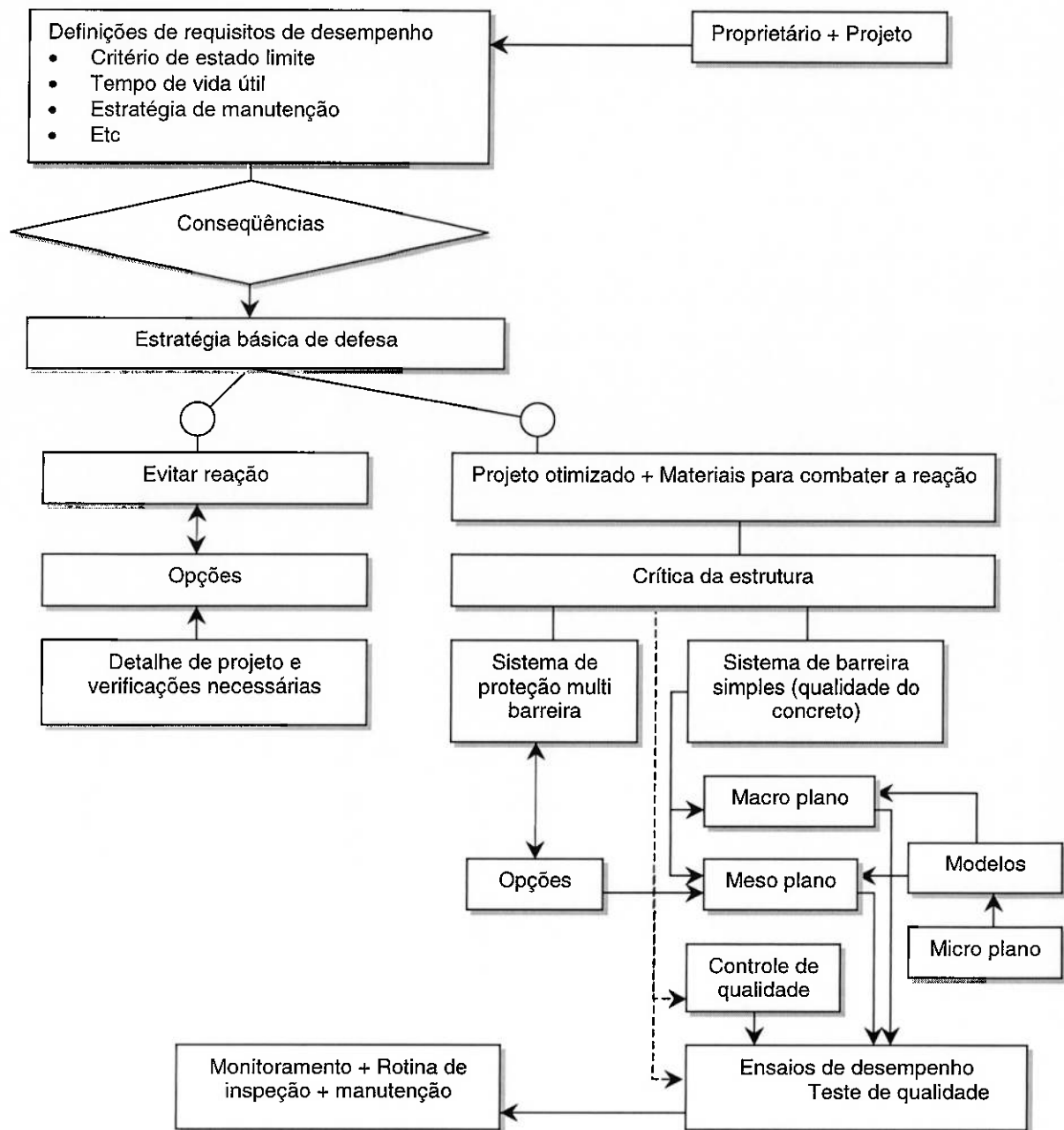


Figura 1. 2 - Formato de um projeto de durabilidade (CEB. 1997)

A estratégia A pode ser dividida em três fases distintas', a saber:

- mudança de meio de exposição, por exemplo, num reservatório, usar membranas e etc;
- seleção de materiais não reativos, como aço inoxidável etc;
- uso de inibidores de reação, como sendo, proteção catódica.

A estratégia **B** é uma oposição à deterioração, constituindo-se em projeto bem elaborado e escolha dos materiais.

A opção pela escolha da estratégia de proteção vai depender muito mais da agressividade do micro-ambiente. Para estruturas expostas a condições ambientais muito agressivas ou quando se tem como objetivo obter longa vida útil, multibarreiras de proteção são aconselhadas (CEB, 1997), como mostra-se a seguir:

- concreto de excelente qualidade;
- aumento do cobrimento;
- proteção extra para o concreto ou para a armadura;
- previsão de proteção posterior caso torne-se necessário.

De maneira complementar, para acompanhamento destas estratégias, deve-se monitorar a estrutura com sensores nas regiões mais sensíveis .

De qualquer forma, para considerar-se a durabilidade nos projetos de engenharia, é importante que se conheça com profundidade os mecanismos de envelhecimento e deterioração do concreto armado. Ou seja, o fundamental é a estrutura resistir ao meio ambiente onde se encontra, e isto não depende somente da qualidade do concreto mas também de critérios adequados de projeto. Segundo HELENE (1997), a revisão da NBR 6118, ressalta que para evitar o envelhecimento precoce e satisfazer as exigências de durabilidade dos usuários devem ser observados os seguintes critérios de projeto:

- prever drenagem suficiente;
- evitar formas arquitetônicas e estruturas inadequadas;
- garantir concreto de qualidade apropriada, particularmente nas regiões superficiais dos elementos estruturais;
- garantir cobrimentos de concreto apropriados para proteção às armaduras;
- detalhar adequadamente as armaduras;
- controlar a fissuração das peças;
- prever espessuras de sacrifício ou revestimentos protetores em regiões sob condições de exposição ambiental muito agressivas;

- definir um plano de inspeção e manutenção preventiva.

1.3 Mecanismos de envelhecimento e deterioração

Neste item, é necessário focar de maneira distinta os mais frequentes mecanismos de deterioração do concreto, do aço e da estrutura como um todo, e que são mencionados por HELENE (1997), sobressaindo-se a influência da agressividade do meio ambiente na durabilidade do concreto.

1.3.1 Mecanismos de deterioração do concreto

- **lixiviação:** que implica no carreamento e dissolução dos componentes hidratados da pasta de cimento, por ação de águas agressivas e ácidas. Este fenômeno implica na redução do pH das águas dos poros que ficam na superfície do concreto, com risco de despassivação das armaduras;
- **expansão:** esta variação de volume se deve à presença de águas subterrâneas que estejam contaminadas com sulfatos, gerando com isso reações expansivas e indesejáveis à estrutura de concreto. Em alguns casos a presença de sulfatos na água implica na precipitação da etringita e do gesso secundário, ambos danosos para a durabilidade do concreto;
- **reação álcali/agregado:** provocada pela reação entre os componentes alcalinos do cimento e a sílica em estado amorfo de alguns agregados. Dentre os agregados reativos pode-se citar a opala, calcedônia, tridimita, montmorilonita que podem desencadear a reação em presença de ambiente extremamente úmido. Esta reação traz como consequência o aparecimento de fissuras profundas e com desenho aleatório se for uma estrutura de massa contínua, e com certa ordenação se for uma estrutura delgada;
- **reações deletérias:** estas são provocadas pela mutação de produtos ferruginosos presentes em alguns agregados, oriundos de sua formação geológica, como exemplo a pirita que provoca o aparecimento de manchas de óxido de ferro, reentrâncias e protuberâncias superficiais nas peças de concreto.

1.3.2 Mecanismos de deterioração da armadura

- **Despassivação por carbonatação:** ocorre pela reação por difusão do CO_2 do ar com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto. Esta reação implica na redução do pH da solução dos poros que como consequência despassiva a armadura. Porém a despassivação danosa só ocorre em ambientes onde a umidade relativa esteja compreendida entre 60% e 98%, ou ainda onde existam ciclos de molhagem e secagem. Esta manifestação só pode ser verificada através de ensaios usando medidores de pH.
- **Despassivação por elevado teor de cloreto:** é ocasionado pelo processo de difusão, impregnação ou de absorção capilar de cloretos, oriundos de águas que contenham teores de cloretos tais que, ao excederem nas águas dos poros do concreto um determinado limite relativo à concentração de hidroxilas, provocam a despassivação das armaduras, advindo então a corrosão.

1.3.3 Mecanismos de deterioração da estrutura como um todo

São todos aqueles mecanismos que tem relação com os aspectos mecânicos tais como, deformações de origem térmica, fluência, fadiga, relaxação ou outros esforços que sejam previstos em qualquer que seja o tratado normativo.

1.4 Classificação da agressividade do meio ambiente

A agressividade do meio ambiente está intimamente ligada às interações químicas e físicas que atuam sobre as estruturas de concreto, não tendo qualquer relação com problemas mecânicos.

Segundo HELENE (1997), as classes de agressividades, de ambientes com bases nas condições de exposição da estrutura devem ser baseadas no micro e macroclima que age sobre a estrutura ou sobre parte dela.

Uma síntese sobre a agressividade ambiental, realizada por HELENE (1997), propiciou ao pesquisador em questão a elaboração de uma tabela com as classes de agressividade ambiental, para uso em projetos correntes, mostrada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1- Classes de agressividade ambiental (HELENE, 1997).

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

HELENE (1997) ainda propõe a utilização da Tabela 1. 2 para a avaliação da agressividade do meio ambiente em relação à estruturas, conforme o grau de exposição da estrutura.

Tabela 1. 2- Classes de agressividade do ambiente em função das condições de exposição (HELENE, 1997).

Macroclima	Microclima			
	Interior das edificações		Exterior das edificações	
	Seco ¹ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ² de molhagem e secagem	seco ³ UR ≤ 65%	úmidos ou ciclos ⁴ de molhagem e secagem
Rural	I	I	I	II
Urbano	I	II	I	II
Marinho	II	III	.....	III
Industrial	II	III	II	III
Específico	II	III ou IV	III	III ou IV
Respingos de maré	.....	.....	.....	IV
Submerso ≥ 3m	.....	.....	.....	I
Solo	.....	.....	não agressivo, I	úmido e agressivo, II, III, ou IV

Notas:

1. salas, dormitórios ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura;
2. vestiários, banheiros, cozinhas, garagens, lavanderias;
3. obras no interior do nordeste do país, partes protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos;
4. incluindo ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Um maior rigorismo se encontra na classificação da norma CETESB L 1.007, cujos limites orientativos para aplicações em casos especiais, se baseiam na concentração de determinadas substâncias agressivas no ambiente que envolve a estrutura. Em substituição a esta recomendação e no caso específico de agressividade ao concreto, uma forma mais rigorosa ainda pode ser a avaliação através determinações

específicas segundo referências propostas pelo CEB / FIP Model Code 1990, constantes da Tabela 1.3.

Tabela 1.3 - Classificação da agressividade do ambiente com vista à durabilidade do concreto (CEB / FIP Model Code 1990).

Classe de agressividade	pH	CO ₂ agressivo (mg/L)	Amônia NH ₄ ⁺ (mg/L)	Magnésia Mg ²⁺ (mg/L)	Sulfato SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Sólidos dissolvidos (mg/L)
I	> 6,0	<20	< 100	< 150	< 400	< 150
II	5,9 – 5,9	20 – 30	100-150	150 – 250	400 – 700	150 – 50
III	5,0 – 4,5	30 – 100	150-250	250 – 500	700	- < 50
IV	>45	> 100	> 250	> 500	> 1500	< 50

Nota:

1. No caso dos solos a análise deve ser feita em seu extrato aquoso;
2. Água em movimento, temperatura acima de 30°C ou solo agressivo muito permeável conduzem a um aumento de um grau na classe de agressividade;
3. Ação física superficial, tal como abrasão e cavitação, aumenta a velocidade do ataque químico.

A presença de sulfatos no ambiente onde está localizada a estrutura de concreto, cria uma expectativa de deterioração da mesma, pela reação que se desenvolve com o C₃A resultando expansões e deterioração do concreto.

A Tabela 1. 4 mostra a classificação da severidade do ambiente sulfato, com base no ACI 201.2R-92.

Tabela 1. 4- Classificação da agressividade do ambiente sulfato (ACI 201.2R-92)

Exposição	Concentração SO ₄ ²⁻	
	Solo (%)	Água (ppm)
Leve	< 0,1	<150
Moderada	0,1 à 0,2	150 à 1500
Severa	0,2 à 2,0	1500 à 10000
Muito severa	>2,0	> 10000

Vê-se então que o tipo de concreto é fundamental para a durabilidade da estrutura.

1.5 Classificação dos concretos

Potencialmente a qualidade do concreto é função da relação a/c e do grau de hidratação, sendo então estes dois requisitos o fundamento das principais propriedades do concreto. Entretanto, a qualidade efetiva do concreto na obra tem que ser garantida por uma série de procedimentos executivos, como preparo, mistura, lançamento, adensamento, desforma e cura. Entretanto, é sempre pertinente se referir à resistência à compressão do concreto por ser ela a propriedade mais importante e pelo fato de que todas as outras têm uma certa dependência dela. Além disso, é a de mais fácil controle. Por outro lado, deve-se fazer sempre referência ao tipo de cimento que resistirá à agressividade do meio ambiente.

Uma recomendação divulgada na literatura técnica e citada por HELENE (1997) mostra que a durabilidade da estrutura de concreto é obtida quando se utiliza a regra dos “4 C” mostrada a seguir;

- Composição ou traço do concreto;
- Compactação ou adensamento do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura;
- Cobrimento das armaduras.

Não existindo resultados experimentais nos ensaios dos concretos que serão utilizados nesta estrutura, pode-se adotar para o caso da corrosão de armaduras a Tabela 1. 5, proposta por HELENE (1997) e a Tabela 1. 6 com referência à deterioração do concreto.

Uma outra maneira de melhorar a resistência do concreto contra as agressividades ambientais, é o uso de cimentos com adições minerais. Isto porque as adições vem modificar a micro estrutura da pasta, melhorando suas propriedades em alguns aspectos e decrescendo em outros dependendo da adição que se estiver usando.

- Cimento Portland de Alto Forno

Em muitos países, o principal uso da escória moída é como adição ao clínquer portland. Assim, o cimento com elevado teor de escória de alto forno, ao reagir com a água, liberam baixo calor de hidratação, uma propriedade importante principalmente quando se lançam grandes massas de concreto.

Como a escória tem uma reação pozolânica com o Ca(OH)_2 que é um componente solúvel do cimento, estes cimentos são vantajosos do ponto de vista da resistência ao ataque químico. O cimento CP III é indicado para grandes massas de concreto e reduz a lixiviação.

- Cimento Pozolânico

A pozolana é conceituada como sendo um material aluminoso ou sílico aluminoso que por si só não tem elevado valor aglomerante, mas finamente moído e na presença de água, reage com o Ca(OH)_2 liberado pela hidratação do cimento a temperatura ambiente, gerando componentes com propriedades aglomerantes.

A adição de pozolana densifica a pasta de cimento reduzindo a porosidade aberta, evitando com isto a penetração de materiais agressivos do ambiente. Por outro lado, a reação pozolânica reduz a quantidade de cal da pasta, de tal forma que a velocidade de carbonatação é maior nestes cimentos. Ou seja, tem-se uma matriz densa porém que carbonata mais rapidamente (NEVILLE, 1997). Então o CP IV é o cimento que pela forma de reagir é indicado para prevenir a reação álcali-sílica e também à lixiviação.

- Sílica Ativa

A sílica ativa ou microsílica é um sub produto da siderúrgica produtora da liga ferro-silício e que se desprende na forma de gás se oxida e se condensa na forma de partículas de forma esférica e de elevada superfície específica (NEVILLE, 1997). É um material vítreo com grande reatividade com o Ca(OH)_2 , propiciando pastas mais densas, menor porosidade e melhorando principalmente a zona de transição, que é onde tem início a microfissuração do concreto. A sílica ativa reduz a permeabilidade e diminui a tendência a fissuração.

O aumento de densidade contribui para a melhoria das propriedades mecânicas do concreto, bem como aumenta a oposição as agressões do meio ambiente melhorando a durabilidade da estrutura.

- Filers

O filer é um material finamente moído com grãos com diâmetro aproximadamente igual ao do cimento, e que melhoram algumas propriedades do

concreto com, trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação e a tendência à fissuração.

São materiais inertes, mas que podem reagir de forma benéfica com os produtos de hidratação do cimento. Zielinska citado por NEVILLE(1997), constatou que um filers comum pode reagir com o C_3A e com C_4AF gerando como fruto desta reação o $3CaO.Al_2O_3.CaCO_3.11H_2O$. Os filers podem funcionar como pontos de nucleação na hidratação do cimento.

Esta breve síntese mostra a importância das adições minerais do cimento nas melhorias das propriedades e na durabilidade do concreto, e depreende-se que os concretos produzidos com os cimentos CP I e CP V desprovidos de adições minerais, são usados como redutores da profundidade de carbonatação. Já para reduzir o efeito da lixiviação a preferência vai para os cimentos CP III e CP IV. No que diz respeito à reação álcali-sílica a melhor opção é o cimento CP IV, e quanto a penetração de cloretos os cimentos mais indicados são os cimentos CP III e CP IV com adição de sílica ativa (HELENE, 1997).

Tabela 1. 5 - Classes de resistência dos concretos em função do risco de corrosão das armaduras (HELENE, 1997).

Classe de Concreto	Classe de Resistência (NBR 8953)	Máxima relação a/c	Deterioração por carbonatação	Deterioração por cloretos
			Teor das adições	Teor das adições
Durável	C50	0,38	10% de pozolana ou sílica ativa ou escória de alto forno	20% de pozolana ou sílica ativa 65% de escória de alto forno
Resistente	C35 C40 C45	0,50	10% de pozolana ou sílica ativa 15% de escória de alto forno	10% de pozolana ou sílica ativa 35% de escória de alto forno
Normal	C25 C30	0,62	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer	Qualquer	Qualquer

Tabela 1. 6 - Classe de resistência dos concretos frente ao risco de deterioração por lixiviação ou por formação de compostos expansivos (HELENE, 1997).

Classe de Concreto	Classe de Resistência (NBR 8953)	Deterioração por Expansão		Deterioração por cloretos
		Teor de C ₃ A no cimento anidro	Teor das Adições	Teor das Adições
Durável	C50	5%	20% de pozolana ou sílica ativa 65% de escória de alto forno	20% de pozolana ou sílica ativa 65% de escória de alto forno
Resistente	C35 C40 C45	5%	10% de pozolana ou sílica ativa 35% de escória de alto forno	10% de pozolana ou sílica ativa 35% de escória de alto forno
Normal	C25 C30	8%	Qualquer	Qualquer
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer	Qualquer	Qualquer

1.6 Correspondência entre agressividade do meio e a durabilidade do concreto

É fato comprovado que o meio ambiente tem ingerência direta na durabilidade das estruturas de concreto armado, em função dos parâmetros que definem o micro clima tais como temperatura, umidade, chuva etc, (CEB,1997). HELENE (1997) propôs uma tabela que cria uma relação entre a agressão ambiental e a durabilidade do concreto, apresentada a seguir na Tabela 1. 7.

Tabela 1. 7 - Relação entre agressividade do ambiente e a durabilidade do concreto (HELENE, 1997).

Classe de agressividade	Concreto recomendável
I Fraca	Efêmero, normal, resistente ou durável
II Média	Normal, resistente ou durável
III Forte	Resistente ou durável
IV Muito forte	Durável

Não obstante esta relação, inúmeras obras no país são executadas com concretos inadequados. Entretanto, para a garantia da durabilidade, medidas paralelas e posteriores de manutenção e proteção podem vir a propiciar uma vida útil compatível com a necessidade dos usuários. Ou seja, a validade da tabela está ligada ao uso adequado do concreto da situação.

2 CORROSÃO DE ARMADURAS

Considerando que esta dissertação visa discutir as argamassas de reparo industrializadas para recuperação de estruturas de concreto com corrosão das armaduras e sua normalização, antes necessário se faz comentar os principais conceitos relativos:

- ao ingresso dos principais agentes agressivos;
- ao processo de corrosão do aço no concreto;
- às propriedades do concreto que interferem nesses fenômenos;

2.1 Princípios da proteção do aço pelo concreto e do mecanismo da corrosão

O concreto, por si só, exerce uma barreira natural contra a corrosão das armaduras. Isto porque, no mecanismo de hidratação do cimento Portland, há liberação de Ca(OH)_2 que, na fase aquosa, aliado a outros álcalis do clínquer, atribuem ao meio um pH alcalino acima de 12, o que garante a passivação do metal. (RICHARDSON, 1988).

Não se pode afirmar que no estado de passivação a corrosão seja anulada, mas é drasticamente minorada pela resistência ôhmica da película ou filme de passivação (HELENE, 1986). É dessa maneira que as armaduras, dentro das estruturas de concreto, são protegidas da corrosão: pela alcalinidade do gel cimentício e pelo filme de passivação formado.

POURBAIX (1974) apresenta um diagrama de potencial versus pH, que demonstra as regiões onde o aço sofre a corrosão e onde está protegido pela passivação. A Figura 2.1 demonstra uma situação de potencial de pH que permite a passivação das armaduras; havendo diferença de potencial nas armaduras, ou queda no pH, por carbonatação, a região no diagrama é modificada e observa-se a possibilidade de ocorrência da corrosão.

A proteção alcalina do aço pelo concreto também deixará de ser efetiva, na medida em que o cobrimento das armaduras propicie as três seguintes condições necessárias ao estabelecimento de uma célula de corrosão, como bem resumido por HELENE (1986):

- eletrólito, que se constitui de íons em solução na água existente nos poros do concreto, gerando corrente de natureza iônica;
- oxigênio dissolvido na água dos poros do concreto, que regulará as principais etapas das reações de corrosão;
- diferença de potencial entre dois pontos da armadura, seja por aeração diferencial, umidade, concentração salina, tensão no concreto e/ou no aço, impurezas no metal, heterogeneidades inerentes ao concreto pela carbonatação ou pela presença de íons cloreto, entre outros.

Formam-se assim, pelas causas listadas, uma região catódica e outra anódica, entre as quais se estabelece uma corrente elétrica e, dependendo da sua intensidade e do acesso de oxigênio, haverá ou não um processo corrosivo prejudicial.

Um dos principais fatores que interferem na disseminação do processo corrosivo é a presença de íons agressivos no eletrólito, como os cloretos e os sulfatos, que podem acentuar a diferença de potencial existente na armadura, bem como facilitar a dissolução da camada passivadora e o transporte de carga.

Em síntese, a corrosão de armaduras numa peça de concreto armado é um processo de natureza eletroquímica, com zonas anódicas e catódicas, como mostra a Figura 2.2, que representa um modelo simplificado de célula de corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado, proposto por HELENE (1986) e reconhecido no meio técnico.

Um dos sintomas mais comuns e indicativos da instalação do processo corrosivo, nas estruturas de concreto é a fissuração do concreto de cobertura das armaduras. Segundo CÁNOVAS (1988), esta é causada pela expansão dos produtos de corrosão, que podem ter volume de 3 a 10 vezes superior ao volume original do metal corroído. O aumento de volume implica no surgimento de tensões internas no concreto, que chegam a valores de 15 MPa. Tal fissuração tende a acelerar o processo corrosivo, pois facilitará o acesso de oxigênio, umidade ou de íons agressivos, se for o caso.

Além de fissuração, um outro sintoma do processo de corrosão é a redução da aderência aço-concreto, também em virtude da expansão provocada pelos produtos de corrosão (ANDRADE, 1992).

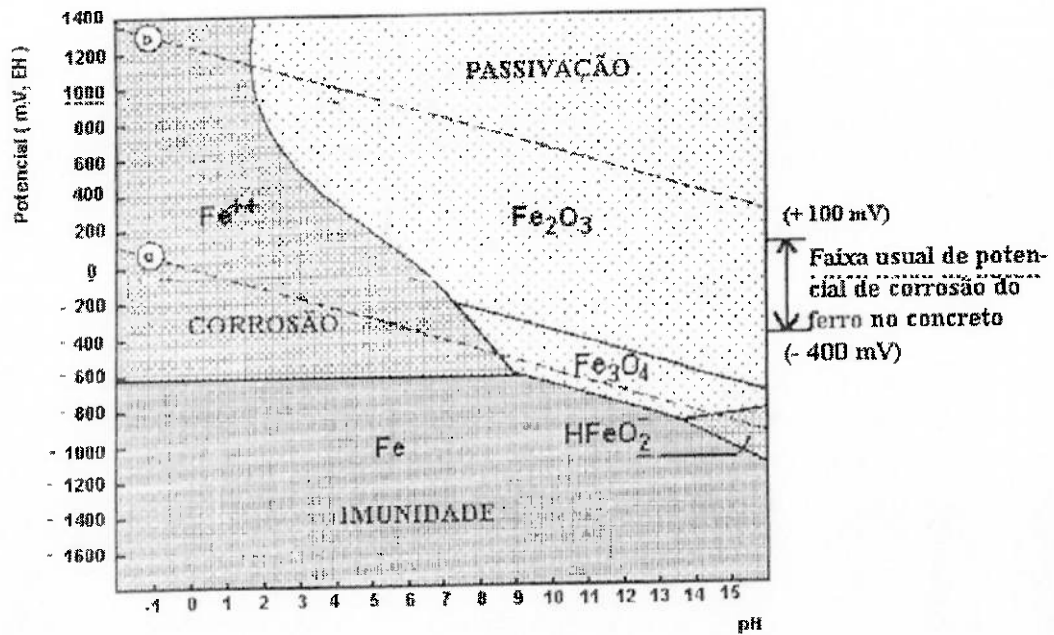


Figura 2.1: Diagrama de equilíbrio de Potencial / pH para o sistema Fe-H₂O, a 25°C, mostrando os óxidos e íons gerados em cada região de pH versus potencial; Diagrama simplificado de POURBAIX (1974) *apud* HELENE (1981).

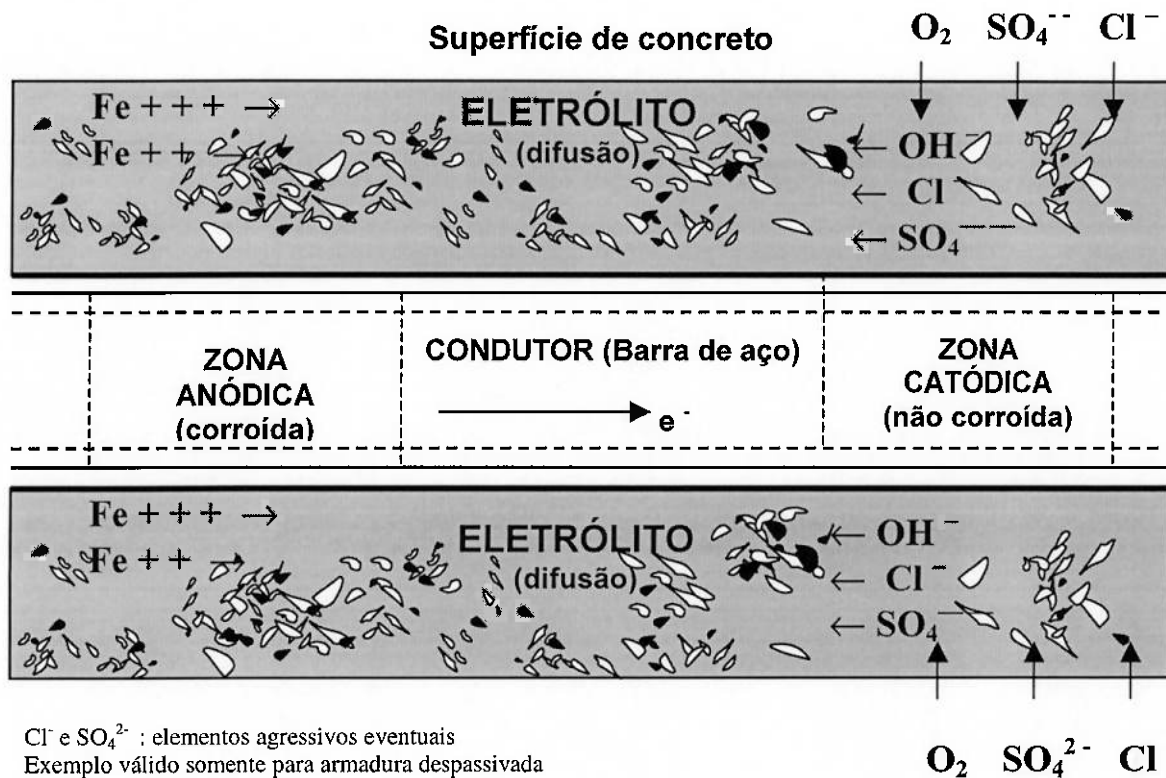


Figura 2.2 - Modelo simplificado de célula de corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado (HELENE, 1986).

As conseqüências e a evolução do fenômeno da corrosão estão contidas no modelo proposto por Helene a partir de Tuutti, que divide o processo em dois estágios: a iniciação e a propagação, como pode ser deduzido da Figura 2. 3 e pelos termos explicados na Tabela 2.1. A iniciação vai desde o momento da execução da estrutura até a ação dos agentes agressivos em atravessar o concreto de cobrimento, alcançar a armadura e despassivá-la. A propagação consiste na disseminação da corrosão até um limite inaceitável (CASCUDO, 1997).

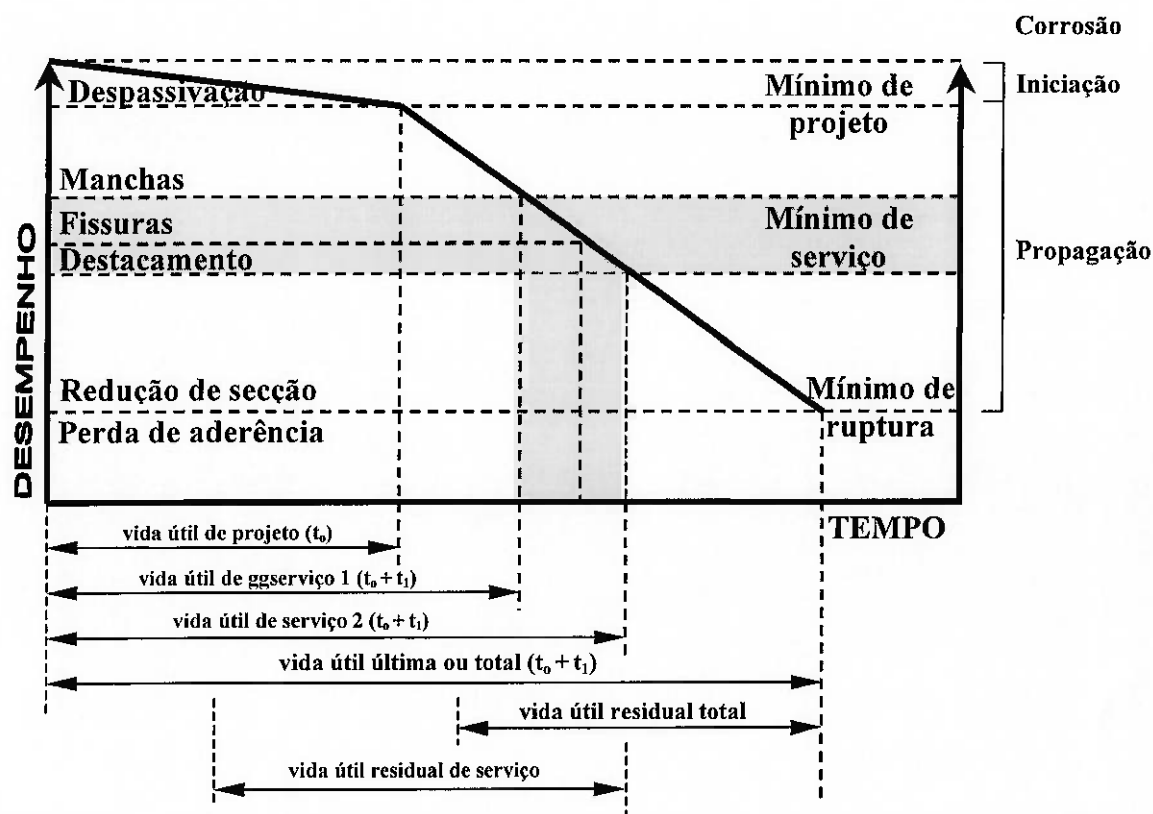


Figura 2. 3: Modelo de vida útil das estruturas de concreto, tomando-se como principal causa da deterioração o fenômeno de corrosão das armaduras, proposto por HELENE (1993).

Tabela 2.1: Termos relacionados à vida útil das estruturas, conforme o modelo de HELENE (1993), na Figura 2.3.

Vida útil	Espaço de tempo
Vida útil do projeto	Período para frente de CO_2 ou Cl^- atingir a armadura;
Vida útil residual	Manchas, fissuras ou destacamentos, a partir de uma dada vistoria;
Vida útil de serviço	Período de tempo em que aparecem manchas, fissuras ou destacamentos inaceitáveis;
Vida útil total	Período de tempo até o colapso total ou parcial da estrutura.

Em se tratando de vida útil, HELENE(1997), cita que em obras de caráter provisório, transitório ou efêmero, recomenda-se adotar a vida útil de projeto de pelo menos um ano. Afirma ainda este pesquisador, que para pontes e obras de caráter permanente, pode-se adotar tempos de 50, 75 ou mais de 100 anos dependendo das recomendações de organismos internacionais segundo levantamento procedido pelo mesmo, e constante da Tabela 2. 2 que apresenta a norma BS 7543 (BS 1992), e Tabela 2. 3 que apresenta a norma européia CEN/EN 206 (CEN, 1994).

Tabela 2. 2-Vida útil de projeto recomendada pela BS 7543 (BS, 1992)

BS 7543, 1992 Guide to Buildings and Buildings Durability of Elements, and Components Products	
Vida útil	Tipo de estrutura
10 anos	Temporárias
10 anos	Substituíveis
30 anos	edifícios industriais e reformas
60 anos	Edifícios novos e reformas de edifícios públicos
120 anos	Obras de arte e edifícios públicos novos

Tabela 2. 3- Vida útil de projeto segundo CEN / EN 206 (CEN, 1994).

Comitê Europeu de Normalização CEN / EN 206, 1994	
Vida útil	Tipo de estrutura
1 a 5 anos	Temporárias
25 anos	Substituíveis
50 anos	Edifícios novos
100 anos	Obras de arte novas

2.2 Principais mecanismos da corrosão do aço nas estruturas de concreto

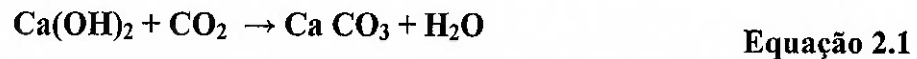
Os principais mecanismos da corrosão no aço nas estruturas de concreto de cimento Portland, conforme apontado por ANDRADE (1992), são:

- carbonatação do concreto, resultante da reação entre o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar atmosférico, e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado na hidratação do cimento;
- íons cloretos, que penetram por difusão iônica ou por outros mecanismos de transporte no concreto, até interferir na passivação das armaduras.

Os princípios do mecanismo de carbonatação e da penetração de íons cloretos no concreto de cobrimento das armaduras estão resumidos nos itens 2.2.1 e 2.2.2. Os principais fatores que controlam a penetração destes agentes agressivos no concreto, para as condições de exposição mais correntes, estão também sinteticamente discutidos no item 2.3

2.2.1 Carbonatação do concreto

A carbonatação é um fenômeno cuja reação principal acontece entre o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 liberado pela hidratação do cimento Portland e o CO_2 do ar diluído na fase aquosa dos poros do concreto, segundo a reação explicada na Equação 2.1, simplificada:



O concreto, em contato com o ar atmosférico, libera parcialmente a água livre para os poros mais próximos da superfície, e assim ocorre a evaporação. Após a evaporação, a água dos poros do concreto é repostada pelo ar, e com isto acontecem as reações entre o CO_2 da atmosfera e os componentes alcalinos do concreto. Este fenômeno altera as propriedades do concreto, além de permitir o desencadeamento da corrosão, por ter sido criada uma zona carbonatada, que desp passiva a armadura. A Figura 2.4 representa o processo de carbonatação (RICHARDSON, 1988).

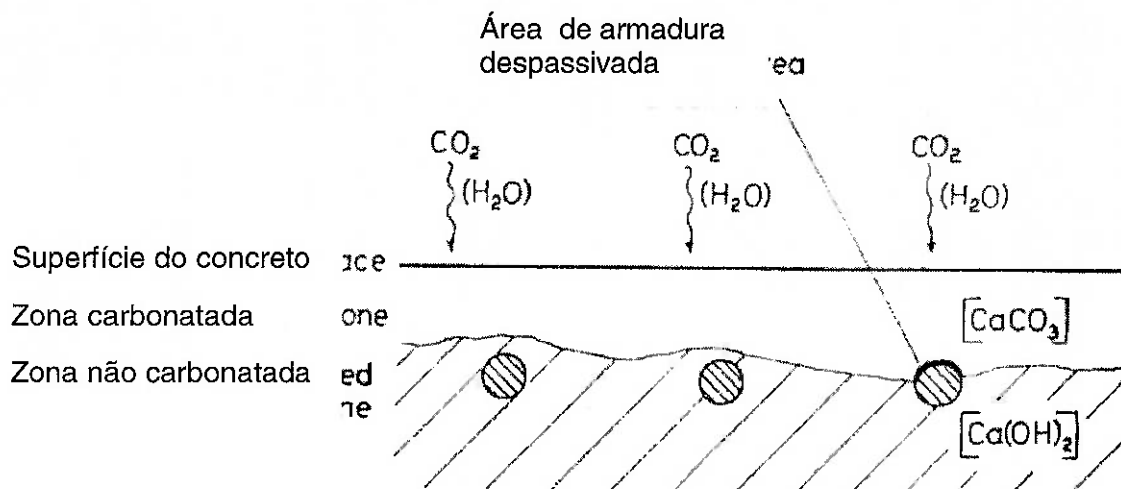


Figura 2.4: Representação do processo de carbonatação (RICHARDSON, 1988).

Entretanto, convém salientar que os outros álcalis presentes no cimento desempenham um papel importante na carbonatação; como parte integrante da reserva alcalina do concreto, conseguem ainda minorar o efeito da carbonatação por algum tempo, pois para que haja passivação das armaduras o pH tem que estar acima de 12; esses álcalis podem colaborar para tanto, ainda que em pequenos teores.

Dentre os aspectos que se apresentam no fenômeno químico da carbonatação, encontra-se a faixa de variação do pH entre o concreto carbonatado e o do não carbonatado. Esta oscilação é considerada pelo Comitê Euro Internacional do Beton e demonstrada na Figura 2.5 (RICHARDSON, 1988). Mostra-se que a mudança do pH ocorre com a variação da distância da superfície do concreto.

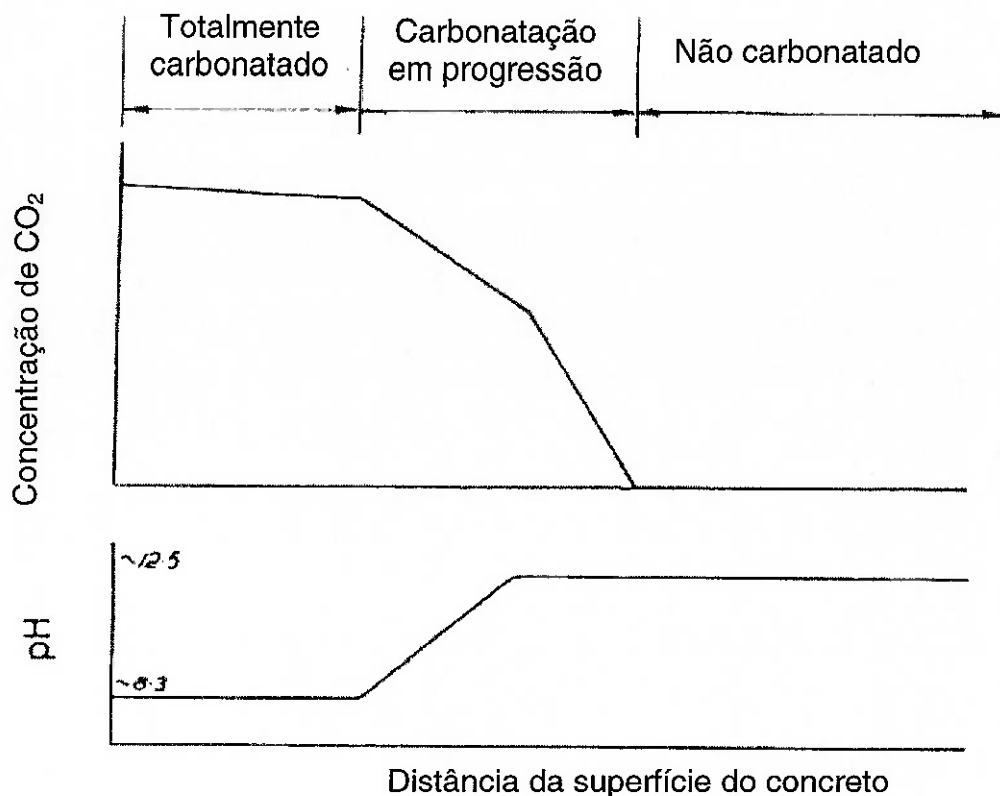


Figura 2.5 - Variação do pH com a distância da superfície do concreto. RICHARDSON (1988).

A água dos poros em equilíbrio com o concreto não carbonatado tem um pH acima de 12, devido ao Ca(OH)_2 dissolvido e, ainda, a álcalis solúveis do clínquer. (HELENE, 1986).

A entrada de CO_2 e a reação com o Ca(OH)_2 dentro do concreto, provocam a redução do pH, que pode conduzir à dissolução parcial e posterior carbonatação do silicato de cálcio. Em conseqüência, uma camada de concreto totalmente carbonatada apresenta um pH em torno de 8,3 (RICHARDSON, 1988). A camada intermediária localizada entre o concreto integralmente carbonatado e o não carbonatado pode possuir Ca(OH)_2 adicional, que se difunde para o interior da massa, devido à diferença de

concentração causada pela carbonatação. A espessura desta camada intermediária pode se limitar a poucos milímetros.

Como se trata de uma reação de um gás nos poros do concreto, como citado anteriormente, a microestrutura e a rede de poros são determinantes da velocidade desta reação. Porém, outros fatores associados ao tipo de concreto e ainda às condições de umidade ambiente também influenciam o mecanismo da carbonatação, como resume a Tabela 2.4. Cabe salientar que a carbonatação não se processará em baixas umidades relativas, pois o CO₂ deve se dissolver na água dos poros antes da reação se processar (RICHARDSON, 1988).

Tabela 2.4: Fatores que influenciam a carbonatação do concreto, segundo dados compilados da literatura.

Fator	Limites		Autores
Relação a/c	↑ Acelera	↓ Reduz	NEPOMUCENO (1992)
Tipo de cimento	↑ Com Adição	↓ Sem Adição	CASCUDO(1997)
Condições de cura	↑ Reduz	↓ Aumenta	NEPOMUCENO (1992)
Umidade do ambiente	↑ 50 – 70%	↓ ≠ 50 –70%	VERBECK (1958)
Conteúdo de CO ₂	↑ Aumento	↓ Reduz	NEPOMUCENO (1992)

É óbvio que há necessidade do controle do avanço da frente de carbonatação, para que se tenha uma previsão do tempo em que a armadura será despassivada e, assim, fixar uma vida útil de projeto das estruturas, com possibilidade de deterioração preponderante por este mecanismo. Atualmente o modelo proposto para tal previsão é o da Equação 2.2 aceito de forma unânime por especialistas e pesquisadores do assunto, como HELENE (1986), NEPOMUCENO (1992) e BAUER (1995).

$$e_{\text{co}_2} = K \cdot t^{1/2} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

e_{co_2} → espessura carbonatada;

K_{co_2} → coeficiente que depende da difusão de CO₂ no concreto dado, em mm/ano^{1/2};

t → tempo em anos.

Evidentemente, é preciso ressaltar a influência do tipo de cimento na velocidade de carbonatação, posto que os cimentos com adições são mais suscetíveis à

carbonatação do que os cimentos comuns, da mesma forma que a umidade é de fundamental importância na difusão do CO_2 .

Os concretos fabricados com cimentos de escória de alto forno (CP III) ou com pozolanas (CP IV) produzem matrizes de pasta mais densas, apresentam melhor desempenho quanto à penetração de íons cloreto em relação aos concretos fabricados com cimento Portland comum (CP I) ou composto (CP II). Isto foi comprovado por BAUER (1995) e, mais recentemente, por REGATTIERI (1999). Antagonicamente, aqueles concretos são mais suscetíveis à carbonatação.

ISAÍÁ (1995), em seu trabalho de misturas binárias e ternárias de pozolana em concreto de alto desempenho, também comprovou que os melhores resultados, no que tange à prevenção da corrosão das armaduras, foram conseguidos com cinza volante em mistura ternária com cinza de casca de arroz, na proporção de 20 e 30%, respectivamente.

Concluindo esta breve recapitulação sobre o fenômeno da carbonatação das estruturas de concreto armado, cabe lembrar que é um parâmetro fundamental na durabilidade e vida útil destas estruturas, mas não é fator determinante do processo corrosivo, pois, conforme explicado no item 2.1, é necessário que haja a presença simultânea de oxigênio e umidade nos poros do concreto.

2.2.2 Penetração de íons cloreto

Segundo o Comitê 222 do ACI (ACI, 1990), três são as teorias modernas que explicam os efeitos dos íons cloreto na corrosão do aço, a saber:

- teoria do filme de óxido – os íons penetram com facilidade no filme de óxido passivante do aço, pelos defeitos ou pelos poros do concreto;
- teoria da adsorção – os íons se depositam por adsorção na superfície metálica em competição com o oxigênio dissolvido ou com íons hidroxila. Os cloretos realizam a hidratação dos íons metálicos, o que permite maior facilidade na sua dissolução;
- teoria do complexo transitório – os íons Cl^- concorrem com os íons (OH^-) para produzir íons ferrosos pela corrosão. Precipita-se, então, um complexo solúvel de cloreto de ferro, que se difunde a partir das áreas anódicas destruindo a camada passivadora de $\text{Fe}(\text{OH})_2$, implementando com isso o processo corrosivo. Este complexo a curta distância do eletrodo, se rompe e precipita $\text{Fe}(\text{OH})_2$, e o íon

cloreto fica livre para o transporte de íons ferrosos da área anódica. A Figura 2.6 demonstra o desenvolvimento do processo.

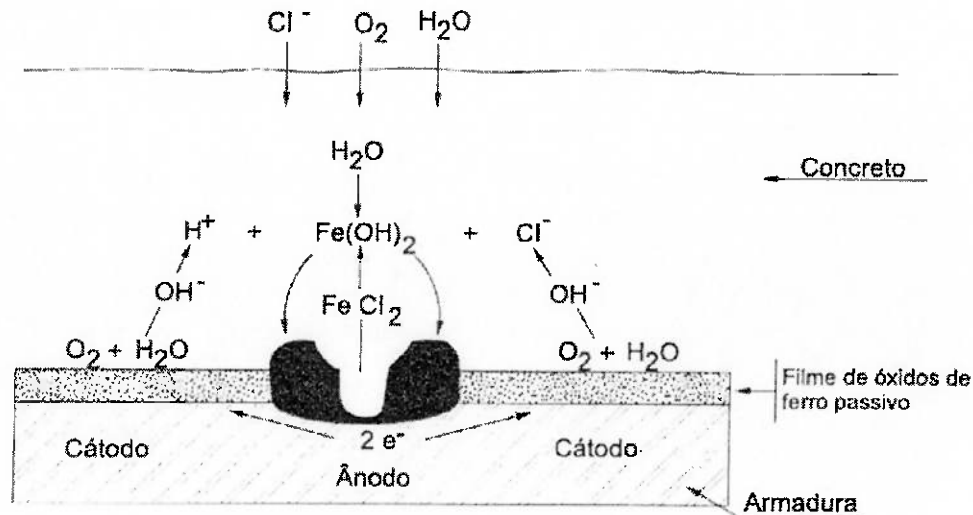


Figura 2.6 - Formação do complexo solúvel e a corrosão por pite (HELENE, 1993).

Muito embora o uso de argamassas industrializadas não seja recomendado para a recuperação de estruturas atacadas por íons cloretos, o mecanismo de deterioração por este agente será aqui brevemente revisto, pois na prática esta solução ainda é adotada de forma muito freqüente.

Os cloretos são os agentes que mais provocam corrosão nas armaduras. Estes íons podem ser introduzidos de forma deliberada no concreto, para acelerar a pega e o endurecimento, ou podem resultar da adição de agregados ou água de amassamento que estejam contaminados, (CASCUDO, 1997). Uma outra forma de penetração dos íons cloretos provenientes do meio ambiente é através da névoa salina, em regiões próximas ao mar.

Por outro lado, a penetração de íons cloreto no concreto, segundo sintetizado por HELENE (1993), acontece por:

- absorção capilar, como por exemplo ocorre no ciclo de molhagem de um concreto seco, com água contendo íons cloretos. Os cloretos penetram por sucção capilar de água;
- migração iônica, como ocorre quando se tem um campo elétrico;

- difusão, que ocorre por gradiente de concentração iônica, sendo que o modelo consagrado para explicar este fenômeno é a Segunda Lei de Fick, na Equação 2.3:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$\frac{\partial C}{\partial t}$ → é o fluxo de íons na direção x ;

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ → é o gradiente de concentração;

C → é a concentração de íons na solução;

D → é o coeficiente efetivo de difusão ou difusividade.

Seja por penetração ou pelos outros processos citados de contaminação, os cloretos podem se apresentar de três formas no concreto (BAKKER, 1986; ARYA & NEWMAN, 1990, *apud* Cascudo, 1993), conforme a Figura 2.7:

- quimicamente combinados, na fase alumino-férrico gerando o cloroaluminato (sal de Friedel);
- adsorvidos às paredes dos poros, principalmente do C-S-H;
- livres na fase aquosa, que são os que podem atuar no processo corrosivo, em particular sobre a resistividade elétrica e a mobilidade de carga no eletrólito.

Considera-se que os íons livres provocam a despassivação do aço, quando a relação Cl^-/OH^- alcança um limite crítico, da ordem de 0,4 a 0,6, em relação à massa do cimento, segundo compilado por HELENE (1993), a partir de diversos autores.

Além desta relação, é mais prático ainda dispor-se de limites para o teor total de cloretos livres, pois estes sim são os mais perigosos e agressivos à armadura. Os limites da Tabela 2.5 são considerados os mais orientativos entre aqueles levantados por HELENE (1993).

A Figura 2.7 mostra as três formas de retenção dos cloretos no concreto que se encontram em situação de equilíbrio.



Figura 2.7: Formas de ocorrência de íons cloreto na estrutura do gel cimentício do concreto (CASCUDO, 1997).

Tabela 2.5 : Limites de referência para teores de cloretos livres (HELENE, 1993)

País	Norma	Limite máximo * de Cl para o		Limite Referido a
		Concreto armado	Concreto pretendido	
Brasil	NBR 6118	0,05%	-	Água de Amassamento
	NBR 7197	-	0,05%	
	NBR 9062	-	0,05%	
Espanha	EH-88	0,40%	-	Cimento
	EP-80	-	0,10%	Cimento
Estados Unidos	ACI 222	$\leq 0,20\%$	$\leq 0,08\%$	Cimento
	ACI 201	$\leq 0,20\%$	$\leq 0,08\%$	Cimento
	ACI 318	$\leq 0,30\%$ ambiente normal $\leq 0,15\%$ ambiente cloretos $\leq 0,30\%$ ambiente seco	$\leq 0,06\%$	Cimento
Europa	CEB	$\leq 0,05\%$	$\leq 0,025\%$	Concreto Cimento
	CEB-FIP	$\leq 0,40\%$	$\leq 0,20\%$	
Europa	ENV 206	$\leq 1,00\%$ concreto simples $\leq 0,40\%$	$\leq 0,20\%$	Cimento
Inglaterra	CP-110	95% $\leq 0,35\%$ 100% $< 0,50\%$	100% $\leq 0,06\%$	Cimento
Japão	JSCE SP-2	$\leq 0,60 \text{ kg/m}^3$	$\leq 0,30 \text{ kg/m}^3$	Concreto

* % de íon cloreto (Cl⁻) • 1,648 = % equivalente de NaCl – cloreto de sódio
% de íon cloreto (Cl⁻) • 1,565 = % equivalente de CaCl₂ – cloreto de cálcio

A Figura 2.8 demonstra a tipologia da concentração de cloretos ao longo do cobrimento de concreto, desde a superfície até a armadura, em uma peça estrutural cuja contaminação acontece por penetração desses íons do meio externo.

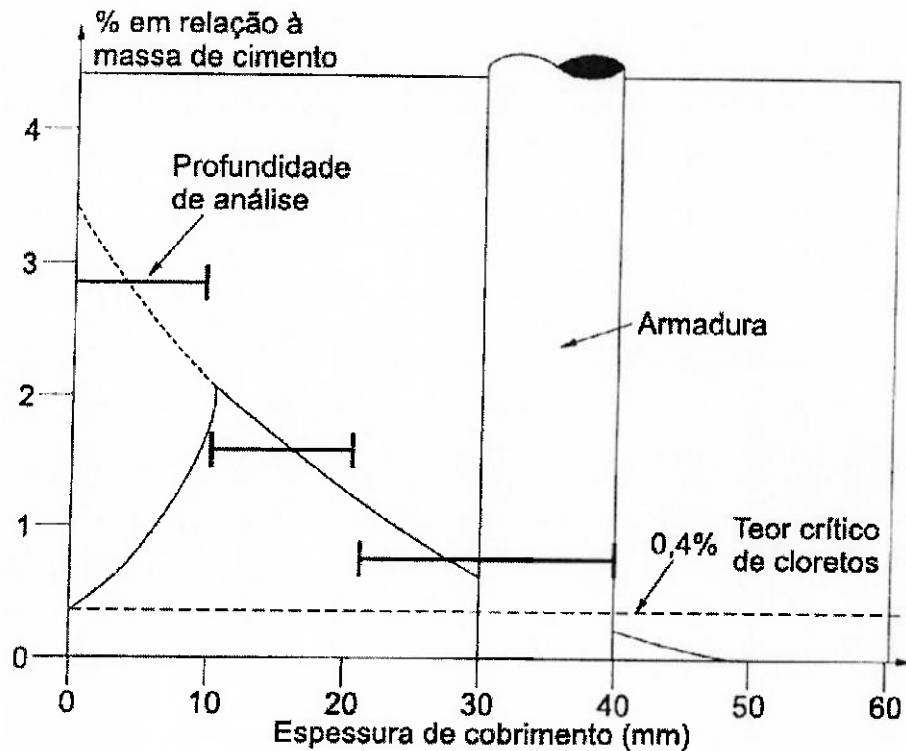


Figura 2.8: Modelo da concentração de cloretos, que penetram no concreto a partir do meio externo (CASCUDO, 1997).

O tempo de penetração dos íons cloreto até a despassivação da armadura, o chamado “período de iniciação”, depende de vários fatores (NEPOMUCENO, 1992):

- concentração de cloretos no meio exterior;
- relação água/cimento do concreto;
- natureza do cátion que acompanha o íon Cl^- ;
- composição química do cimento usado na produção do concreto;
- fissuras no concreto.

Estes fatores demonstram que a qualidade do concreto, as características do comportamento físico e mecânico da obra, definidas pelo projeto estrutural, as condições de serviço e o meio ambiente, são parâmetros determinantes da corrosão das

armaduras por íons cloreto, e uma vez que sejam bem controlados podem incrementar o tempo de vida útil das estruturas de concreto armado.

Como pode ser visto, o mecanismo da corrosão de armaduras por íons cloreto, não pode ser cessado por sistemas de reparo com argamassas comuns, ao contrário da corrosão por carbonatação, que é um processo bem mais fácil de ser controlado.

2.3 Principais fatores que afetam o processo de corrosão

2.3.1 Propriedades físicas do concreto de cobrimento da armadura

O cobrimento de concreto, que por si só já desempenha uma proteção física à armadura, constitui-se numa barreira natural contra agentes de deterioração como o oxigênio e a umidade, e garante a alcalinidade, que passiva o aço carbono. Ou seja, cria uma proteção química. Pois, mostra-se a grande importância do cobrimento na concepção de um projeto estrutural. A especificação errônea do concreto em relação ao ambiente onde será executada a estrutura, aliada à falta de uniformidade da sua espessura, pode desencadear o processo ou acelerá-lo, se já estiver implantado. A normalização brasileira carece de embasamento sobre isto, pois embora a NBR 6118 (ABNT, 1977) prescreva a espessura do cobrimento em relação ao ambiente, é omissa no que diz respeito à qualidade intrínseca do concreto, ou seja, à sua estrutura interna.

A microestrutura do concreto é fator preponderante no mecanismo de penetração dos agentes agressivos. Neste aspecto, a absorção capilar, a difusão e a permeabilidade são muito importantes no mecanismo de penetração. De forma antagônica, a capacidade de combinação dos agentes agressivos com o concreto, através das reações químicas ou da adsorção física, dificulta a penetração de agentes agressivos (NEPOMUCENO, 1992).

A Figura 2.9 representa a interação entre o concreto e o meio ambiente contaminado por agentes nocivos à durabilidade das armaduras (NEPOMUCENO, 1992).

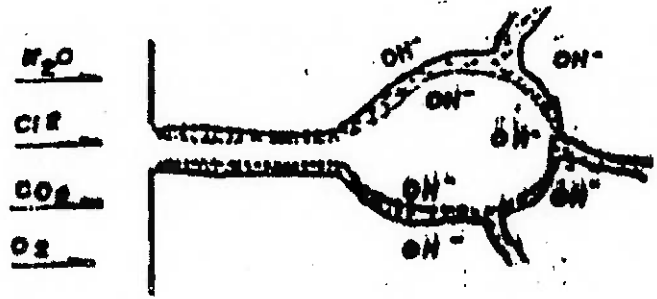


Figura 2.9: Representação esquemática da reação entre o concreto e o ambiente agressivo às armaduras (NEPOMUCENO, 1992).

- Porosidade

À medida que evoluem as técnicas de análise da microestrutura do concreto, cada vez mais considera-se que a estrutura dos poros do concreto é fator determinante tanto do fenômeno da carbonatação quanto da penetração de íons cloretos. Tal microestrutura começa a se formar já na fase de endurecimento da pasta, e quatro tipos de vazios podem ser inicialmente formados (RICHARDSON, 1988). A Figura 2.10 demonstra a distribuição dos tamanhos dos poros numa pasta de cimento.

Os poros capilares têm grande influência no mecanismo da corrosão, pois é através deles que a água pode penetrar. Os poros de gel são muito pequenos, o ar aprisionado fica isolado, e os poros dos agregados são normalmente isolados pelo envolvimento da pasta de cimento. Neste contexto, a intercomunicabilidade dos poros é de vital importância, pois permite a movimentação das substâncias e caracteriza a permeabilidade da pasta, enquanto que o tamanho dos poros é responsável pela velocidade do deslocamento das substâncias. (METHA, 1997).

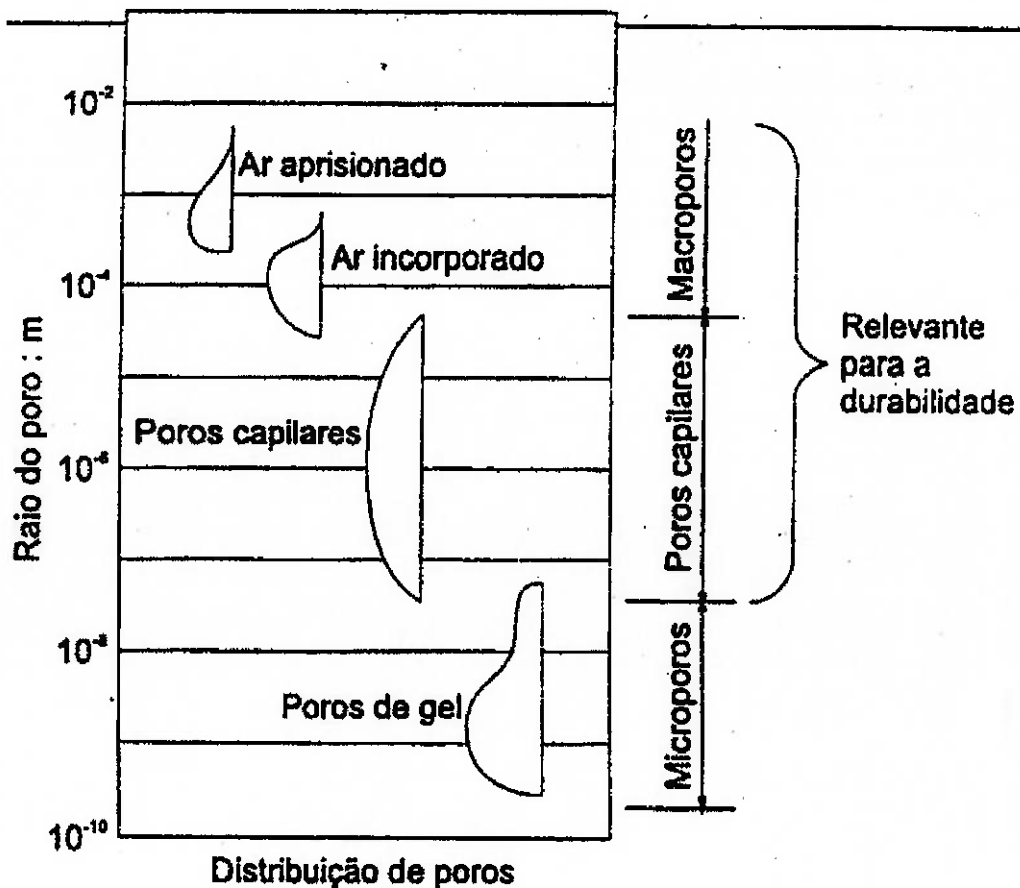


Figura 2.10: Distribuição do tamanho dos poros na pasta de cimento Portland endurecida (METHA, 1997).

A relação a/c comanda as propriedades da pasta ou gel de cimento Portland endurecido, pois determina a sua porosidade, e é um dos parâmetros mais importantes na iniciação da corrosão das armaduras, pois define a qualidade do concreto. Assim, a armadura será melhor protegida, quanto menor for a relação a/c do concreto, garantida a sua compacidade adequada. A redução da relação a/c , além de aumentar a resistência do concreto, retarda a difusão de cloretos e do CO_2 e reduz a penetração da umidade ambiente, fatores básicos na proliferação da corrosão das armaduras.

É sabido que a relação a/c tem maior importância que o próprio cobrimento da armadura (CASCUDO, 1997). Assim, o controle da relação a/c é o parâmetro fundamental na profilaxia desta patologia, posto que as demais propriedades listadas são altamente dependentes dela.

A seguir, explica-se resumidamente as propriedades da camada de cobrimento, que são determinadas pela porosidade e têm ingerência na penetração de agentes agressivos no concreto:

- **Difusão**

A difusão é a movimentação de uma substância no seio de outra, devido a uma diferença de concentração (NEPOMUCENO, 1992). Este fenômeno é regido pela Lei de Fick, já mencionada no item 2.2.2.

- **Absorção capilar**

É a ascensão ou penetração da água nos poros do concreto devido à tensão capilar que atua nos capilares. As propriedades dos líquidos que interferem na absorção são: a viscosidade, a densidade e a tensão superficial, enquanto que a estrutura dos poros (raio, continuidade dos capilares e a intercomunicabilidade) e a energia superficial alteram a ascensão capilar. A absorção capilar é importante na carbonatação, pois o fenômeno é função da porosidade aberta, ou seja, da interligação entre os poros, que possibilita a penetração de água e CO₂ para o interior da estrutura. A facilidade de ingresso da água e CO₂, depende do diâmetro dos poros, que possuem sucção capilar mais intensa quanto menor for o diâmetro. A afinidade do concreto com a água, aliada ao diâmetro dos poros, permite a difusão do CO₂, que culmina com a reação de carbonatação (HELENE, 1993).

- **Permeabilidade**

Este problema ocorre em estruturas submersas ou parcialmente submersas e pode acelerar a penetração dos agentes agressivos ao concreto e as armaduras.

Quando o concreto está em contato com o líquido sob pressão, este pode penetrar através dos poros capilares. Este fenômeno físico obedece à Lei de Poiseville, que considera um fluido no regime laminar constante e expressa o coeficiente de permeabilidade como uma função do volume do líquido que flui, do tempo, da espessura e da área da seção por onde penetra o líquido, da viscosidade do líquido e da diferença de pressão.

- **Fissuras**

O concreto armado fissura por diversas causas: e as mais comuns são:

- fissuras por deformação estrutural;
- fissuras por corrosão;
- fissuras por retração de reparos localizados em estruturas.

A expansão provocada pelos produtos resultantes da corrosão dentro do concreto causa fissuras que se caracterizam por acompanhar paralelamente as armaduras, devido ao aumento de até 6 vezes do volume anterior do aço da armadura, provocando pressões de expansão da ordem de 15 MPa (NIELSEN, 1976) *apud* HELENE (1993). A evolução do processo corrosivo conduz ao destacamento do cobrimento do concreto da peça estrutural, extinguindo-se dessa forma a vida útil de projeto da estrutura afetada, conforme modelo de HELENE (1993), na Figura 2.3, item 2.1.

NEPOMUCENO (1992) detectou que a dimensão das aberturas de fissuras nas juntas de reparo tem muito pouca interferência nos valores das taxas de corrosão. Entretanto, HELENE (1986) não compactua com esta linha de raciocínio, citando trabalhos de pesquisadores como Carpentier e Soretz, que ao ensaiar vigas com fissuras com aberturas de 0,2 a 0,3 mm concluíram que a corrosão é mais intensa quanto maior for a abertura da fissura.

É fundamental, entretanto, que se avalie a profundidade da fissura, para que se possa aquilatar se as mesmas atingem ou não a armadura, e com que abertura o fazem (HELENE, 1993).

É fato comprovado que a carbonatação acontece, de modo geral, ao longo das paredes da fissura, onde o processo é mais rápido, propiciando maior velocidade no surgimento das células de corrosão, induzidas pelas diferenças de pH e da aeração decorrentes da carbonatação (HELENE, 1993).

SUZUKI et al *apud* HELENE (1993) comprovaram, na Universidade de Osaka, a influência benéfica da relação a/c na redução dos efeitos da corrosão causada por fissuras, em prismas de concreto armado, sendo os experimentos controlados por potencial de corrosão, pelo método de resistência de polarização e pela verificação da perda de massa, no término dos ensaios. Os resultados, ao final de 140 dias de ensaio, indicaram que para uma mesma espessura de cobrimento de armadura, mantendo-se

constante a abertura da fissura, as armaduras pertencentes aos concretos com relação a/c igual a 0,35 apresentaram como perda de massa a metade da perda das armaduras dos concretos com relação a/c igual a 0,55.

O que se depreende disto é que muito embora a corrosão aumente com a abertura da fissura, a taxa de perda de massa avaliada através da corrente de corrosão depende mais da espessura de cobrimento e da relação a/c.

A resistência dos concretos aos diversos ambientes agressivos é função dos parâmetros abaixo, elencados por HELENE (1997):

- tipo e consumo de cimento;
- tipo e consumo de adições;
- relação a/c;
- natureza e D_{\max} do agregado.

2.3.2 Propriedades químicas do concreto de cobrimento da armadura

Por si só, o concreto já exerce uma barreira química natural, uma vez que resiste bem aos ataques químicos, desde que evidentemente seja utilizada uma dosagem conveniente e que o concreto seja bem denso e curado.

De forma geral, a deterioração química do concreto se dá ou pela decomposição dos produtos de hidratação do cimento, o que dá origem a outros produtos, que podem ser lixiviados se solúveis ou se expandir, se insolúveis. Esses compostos agressivos devem estar dissolvidos e agir basicamente o Ca(OH)_2 , muito embora o C-S-H também possa ser atacado (NEVILLE, 1997).

As formas mais comuns de ataque químico são:

- Efeitos da Carbonatação – muito embora já se tenha discutido anteriormente no item 2.2.1 do capítulo 2, faz-se necessário tecer alguns comentários adicionais sobre os fatores que influenciam na carbonatação. Atualmente o uso dos cimentos compostos é muito grande, e por isto mesmo é importante conhecer seu comportamento quanto à carbonatação. Nos cimentos com cinza volante, a sílica da cinza reage com o Ca(OH)_2 liberado pela hidratação do cimento Portland. Por isso o cimento possui um teor menor de Ca(OH)_2 na pasta, de modo que se faz necessário um teor menor de CO_2 para reagir com o Ca(OH)_2 e se transformar em

CaCO_3 . (NEVILLE, 1997). BIER (1987), mostrou que a profundidade de carbonatação é maior quanto menor o teor de Ca(OH)_2 . Entretanto existe um efeito secundário neste mecanismo: a densificação da pasta, que reduz a difusividade.

- Os concretos com cimento com escória de alto forno apresentam uma carbonatação muito intensa quando mal curados. Assim, os concretos fabricados com cimento com esta adição em elevados teores resultam em maiores profundidades de carbonatação (HORIGUCHI et al, 1994).
- Ataque por Ácidos – o concreto alcalino não resiste ao ataque dos ácidos fortes ou de materiais que possam originar ácido.

O concreto pode ser agredido por líquidos com pH menor do que 6,5, muito embora considere-se que as condições severas sejam aquelas em que o pH é menor do que 5,5.

O ataque se desenvolve a uma velocidade proporcional à raiz quadrada do tempo, pois a agressividade tem que atravessar a camada de produtos solúveis remanescentes depois da dissolução do Ca(OH)_2 (ROMBÈN, 1978).

O concreto também é agredido por água contendo CO_2 livre, chuvas ácidas que contenham ácidos sulfúricos e nítricos com pH entre 4,0 e 4,5 (NEVILLE, 1997).

Os cimentos compostos com escórias de alto forno, pozolanas e sílica ativa são uma boa alternativa na minoração da entrada de agentes agressivos, pois fixa a cal, normalmente o produto mais vulnerável ao ataque dos ácidos (NEVILLE, 1997).

- Ataque por Sulfatos – de modo geral os sais, quando dissolvidos, podem reagir com a pasta de cimento hidratada. Normalmente os sulfatos de sódio, potássio, magnésio e cálcio são encontrados em solos e em águas freáticas e realizam mais facilmente a interação química não só com o Ca(OH)_2 , mas também com outros produtos resultantes da hidratação do cimento. Os sulfatos presentes nas águas freáticas muitas vezes são provenientes de fertilizantes ou de efluentes industriais, que em algumas situações têm presente o sulfato de amônio, que deteriora a pasta de cimento, precipitando o gesso (SCHNEIDER et al, 1990).

O sulfato de cálcio ataca o aluminato de cálcio hidratado, precipitando um sulfoaluminato de cálcio denominado etringita, que, por ocorrer no concreto já endurecido, provoca sua desagregação.

O sulfato de magnésio ataca os silicatos de cálcio hidratados, precipitando sulfoaluminato de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e aluminato de cálcio hidratado. Na interação química com sulfato de magnésio há a precipitação de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, pouco solúvel, e por isso a reação prossegue, culminando com a deterioração do C-S-H (SEREDA & RAMACHANDRAN, 1975).

A profilaxia para reduzir a reação é limitar o teor de C_3A do cimento; a outra é diminuir o teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ da pasta de cimento hidratada, pela reação com a pozolana do cimento composto.

O efeito da pozolana é dicotômico, pois num primeiro estágio reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reduzindo a disponibilidade deste composto para reação com os sulfatos. Em segundo lugar, ao comparar-se um cimento comum com um mesmo teor de cimento composto, o resultado da hidratação apresenta menor quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no cimento composto (NEVILLE, 1997).

Para uma exposição moderada, recomenda-se o cimento tipo II, com pozolana ou escória de alto forno. Para uma exposição muito severa, recomenda-se uma mistura de cimento resistente aos sulfatos e pozolana (entre 25% e 40% do total em massa) ou escória (no mínimo 70%) (BRE, 1991).

- Efeitos da Água do Mar – o concreto, quando exposto à água do mar, está sujeito a diversas ações, inclusive ao ataque químico, à corrosão da armadura provocada por cloretos e à deterioração por sais entre outras. A intensidade da reação, é claro, depende da posição da estrutura de concreto em relação ao nível do mar.

Esta interação química é oriunda da presença de vários sais em solução. O nível de salinidade total gira em torno de 3,5% (NEVILLE, 1997). O pH da água do mar é variável entre 7,5 e 8,4 tendo-se como valor médio 8,2. Entretanto em experimentos não houve redução do pH da água dos poros da pasta de cimento endurecida, pois o menor valor observado foi 12 (GJORV & VENNESLAND, 1976). Entretanto, a presença de sulfatos na água do mar poderia provocar um ataque por sulfatos.

Recomenda-se o uso de cimentos com um teor máximo de C_3A de 8%, quando a quantidade de SO_3 for menor que 3%. Porém, quando o teor de SO_3 for igual ou menor que 2,5%, permite-se o uso de cimentos com até 10% de C_3A (PAILLIÈRE, RAVERDY & SERRANO, 1994).

- Deterioração por Sais – quando a estrutura de concreto está localizada no nível de flutuação da água do mar, com períodos intermitentes de secagem e molhagem, ocorre a evaporação da água pura dos poros e permanecendo parte dos sais dissolvidos em forma de cristais, especialmente os sulfatos. Ao serem submetidos a um novo ciclo de molhagem, estes cristais são reidratados, exercendo com isso uma força de expansão no interior da pasta que os envolve. A maior ocorrência da deterioração por sais se dá em regiões com elevada temperatura e insolação intensa, de maneira que a evaporação dos poros ocorra rapidamente até uma determinada profundidade a partir da superfície. Portanto, as superfícies molhadas intermitentemente, ou seja, na linha de maré e na faixa de respingos, são mais suscetíveis de serem atacadas. O ataque por sais pode ocorrer também quando o depósito de sais na superfície do concreto for dissolvido pelo orvalho e carregado pelo vento, evaporando a seguir (NEVILLE, 1997).

Agregados de baixa densidade e de absorção muito elevada não devem ser usados neste tipo de concreto, pois o risco da deterioração por sais é muito grande. Daí a necessidade de uma boa seleção dos agregados para concretos expostos à deterioração por sais. A deterioração por sais é de natureza física, e por isso o tipo de cimento não é um fator relevante, mas sim a escolha do concreto, no que concerne à sua baixa permeabilidade (MATHER, 1980). Isto implica na adoção de uma relação a/c baixa, uso de concreto bem adensado e bem curado, e sem fissuras causadas por retração, deformações térmicas ou tensões em serviço.

- Desagregação pela Reação Álcali-Sílica – esta deterioração tem como sintomatologia o aparecimento de fissuras cujas aberturas podem variar de 0,1 mm a 10 mm em situações extremas. Essas fissuras, cujo desenho irregular lembra um pouco uma teia de aranha, não têm ingerência direta nas resistências à compressão do concreto, porém permitem a introdução de agentes agressivos na estrutura (WOOD & JOHNSON, 1993). Outra característica das fissuras provocadas por esta interação é a sua movimentação através da estrutura; penetram nas partículas dos agregados e também através da pasta de cimento hidratada que os envolve (NEVILLE, 1997).

Se considerarmos que a fonte de álcalis do concreto advém do cimento, uma medida preventiva é reduzir o teor de álcalis do aglomerante. O teor mínimo de álcalis que pode desencadear a reação expansiva é de 0,6% do equivalente em óxido de sódio. A reação álcali-sílica acontece quando há elevadas concentrações

de OH^- , ou seja, com elevados valores de pH da água dos poros. O pH da água dos poros depende do teor de álcalis do cimento, por isso um cimento com elevado teor de álcalis chega a possuir um pH com limites compreendidos entre 13,5 e 13,9, enquanto que cimento com teores reduzidos tem pH de 12,7 a 13,1. Se considerarmos que uma unidade de pH corresponde a um aumento de 10 vezes na concentração de íon hidroxila, de forma antagônica a concentração de OH^- é dez vezes menor quando se usa um cimento com menor teor de álcalis, o que justifica a opção do uso de cimentos com menor teor de álcalis quando se tem agregados potencialmente reativos (HOBBS, 1988).

As propriedades químicas do concreto são de fundamental importância no concreto de cobrimento da armadura; com a prevenção contra todos os tipos de ataque químico garante-se a qualidade e a durabilidade das estruturas de concreto armado no que diz respeito às interações químicas do meio ambiente.

3 ARGAMASSAS DE REPARO

3.1 Classificações mais usuais

A evolução tecnológica levou a pesquisas de processos e materiais de reparo, classificados em função da espessura ou profundidade da cavidade, ou basicamente pelo material utilizado (CARMONA, 1996).

Nos itens 3.2 e 3.3 são explicados forma mais detalhada as classificações da AFNOR(1993), fazendo-se uso dos conceitos adaptados de HELENE (1992).A norma NF P 95-101 (AFNOR, 1993) classifica os materiais de reparo localizados em três categorias principais, segundo o tipo de aglomerante:

- produtos à base de aglomerantes hidráulicos;
- produtos à base de aglomerantes hidráulicos modificados;
- produtos à base de resinas sintéticas.

A norma em questão classifica ainda os produtos à base de resinas sintéticas em função do seu número de constituintes, ou seja:

- monocomponente, pronto para o uso;
- argamassa de dois componentes ou bicomponente, quais sejam:
 - resina base;
 - endurecedor (epóxi, poliuretana, metacrilato)
- argamassa de três componentes ou tricomponente, quais sejam:
 - resina base;
 - catalisador;
 - acelerador (poliésteres, acrílicos reticulados e certas poliuretanas).

Outra classificação, ainda mais abrangente, é a do grupo espanhol GEHO (1989), que consta da Tabela 3. 1.

Tabela 3. 1- Classificação das argamassas de reparo quanto ao aglomerante (GEHO, 1989).

Aglomerante	Base de cimento		Base orgânica	Base mista
Classes	Tradicionais (cimento <i>Portland</i>)	Não tradicionais	Ligantes à base de Resinas e polímeros	Ligantes hidráulicos com polímeros termoplásticos
Tipo	Pasta Argamassa Microconcreto Concreto	Cim. Portland + ag. Expansivo Cim. Portland + fosfato de Mg ou Al Cim. aluminoso Cim. de etringita	Polímeros Termofixos Resina epóxi Poliuretanos Resina poliéster	Acrílicos Acrilamidas Estireno-butadieno Acetato polivinílico
Propriedades Gerais	Materiais conhecidos, em que devem ser observados cuidados Quanto à aderência, retração e qualidade	Retração compensada Pega rápida Elevadas resistências mecânicas a curto prazo	Boa aderência Baixa permeabilidade	Alta resistência à flexão Alta resistência à compressão Melhor permeabilidade Melhor aderência Não há variação de trabalhabilidade

As normas de terminologia são fundamentais para o desenvolvimento normativo de qualquer área da engenharia, seja técnica ou comercial. No caso das argamassas de reparo, tais normas são desenvolvidas apenas no exterior, como nos E.U.A e na Europa, enquanto que no Brasil apenas HELENE (1992) contribuiu até hoje de forma mais incisiva, quando elaborou manual em que mostra uma visão completa das técnicas de reparo, reforço e proteção das estruturas de concreto afetadas por patologias diversas. Uma outra contribuição de HELENE (1998), foi a proposição da classificação das argamassas de reparo quanto ao reparo, aplicação e profundidade do sistema de reparo constante da Tabela 3. 2.

Tabela 3. 2- Classificação das argamassas de reparo quanto ao reparo, aplicação e profundidade do sistema de reparo (HELENE, 1998).

Tipo de Argamassas	Classificação			
	Quanto ao reparo	Quanto a aplicação	Quanto a profundidade	Quanto as propriedades
Base cimento	Tradicional	Manual	Superficial	Aderência / Retração
Modificada com polímeros	Industrializada	Manual / Projetada	Superficial	Boa aderência / Baixa permeabilidade / Resistência a compressão / Resistência a flexão
Argamassa e Graute base epóxi	Industrializada	Manual / Projetada	Superficial	Boa aderência / Baixa permeabilidade
Graute base cimento (Microconcreto)	Tradicional / Industrializada	Manual	Profundo	Boa aderência / Resistência a compressão / Retração
Argamassa base poliéster	Industrializada	Manual	Superficial	Boa aderência / Baixa permeabilidade
Argamassa sem retração	Tradicional	Manual	Profundo	Retração compensada / Altas resistências iniciais

3.2 Argamassas e grautes base cimento

A seguir descrevem-se as argamassas e grautes base cimento onde mostram-se algumas propriedades e sua formulação:

- Argamassas base cimento são as misturas produzidas à base de cimento Portland, que possam ser modificadas com polímeros, tenham na sua composição agregados com granulometria contínua e que atendam as curvas de Bolomey, ou com granulometria descontínua, no caso de elevada resistência à abrasão, contendo em sua formulação aditivos químicos e adições que lhes atribuam propriedades especiais. São também argamassas denominadas de base mineral, cujo mecanismo de endurecimento depende da reação entre o cimento e a água de amassamento. Essas argamassas são de consistência seca à plástica e têm tixotropia para serem aplicadas em superfícies verticais e inclinadas, têm retração compensada e resistência química sofrível;
- Grautes base cimento - têm como característica básica a fluidez, no estado fresco, e por serem auto-adensáveis, facilitam a recuperação de cavidades, com boa aderência, resistência e sem retração no estado endurecido. Este material é constituído por cimento Portland classe 32 ou 40, ou de cimento CP V-ARI, com

agregados de granulometria adequada e aditivos expansores e superplastificantes (HELENE, OLIVEIRA & FIGUEIREDO, 1989).

3.3 Argamassas e grautes orgânicos

São misturas em cuja formulação estão presentes as resinas orgânicas, e em que as reações para aglomeração e resistência são resultantes da polimerização e endurecimento dos componentes da resina sem ingerência da água. O cimento funciona como se fosse um microfíler preenchendo os vazios deixados pelo agregado miúdo e completando a distribuição granulométrica, porém sem contribuição expressiva no que diz respeito à resistência. São argamassas de elevado desempenho, boa aderência, elevada resistência química e mecânica, baixo módulo de deformação longitudinal, bem como deformação lenta superior ao concreto e às argamassas de cimento Portland.

- Argamassas base epóxi: contêm em geral dois ou três componentes, a saber: a resina epóxi, o endurecedor (amina e/ou poliamidas) e agregados selecionados. Possuem elevada resistência aos ácidos não-oxidantes, aos álcalis e também a alguns solventes orgânicos. Têm baixa resistência aos ácidos oxidantes e alvejantes. A resistência térmica não ultrapassa os 70 °C, e aceitam pH no intervalo de 2,0 a 14,0, possuindo elevada resistência mecânica e aderência;
- Argamassas base fenólica: materiais constituídos de resina fenolformaldeído com filer (sílica, carbono, coque pulverizado ou barita), contendo um catalisador ácido. São resistentes aos ácidos minerais, soluções de sais inorgânicos e a soluções levemente oxidantes, porém são pouco resistentes a agentes oxidantes fortes como os ácidos nítrico, sulfúrico e crômico. Aceitam soluções levemente alcalinas, têm tempo de vida (*shelf life*) curto, sua resistência térmica chega até 175 °C e toleram pH compreendido entre 0,7 e 9,0. Estes materiais devem ser mantidos refrigerados até o momento de seu uso;
- Argamassas base poliéster e base estervínlica: são formuladas a partir da resina poliéster e da resina estervínlica com constituição tricomponente: uma resina em solução, catalisador e fileres inertes com modificadores de formulação. Possuem elevada resistência química e mecânica e resistem também à maioria dos ácidos, porém, não resistem a produtos cáusticos nem a alvejantes. Aceitam um pH no intervalo de 0,9 a 14, e sua resistência térmica chega até 115 °C.

- Argamassas base furânica: são constituídas por resina líquida, catalisador e filler (sílica, carbono, barita ou coque pulverizado). Resistem bem aos ácidos não oxidantes, álcalis, muitos solventes, sais, gases, óleos, graxas e detergentes. Sua resistência térmica chega aos 200 °C e toleram um pH compreendido na faixa de 1,0 a 13. O calor serve como acelerador de cura do endurecedor, enquanto que o frio retarda o endurecimento.

Todas estas argamassas podem melhorar suas propriedades, e, se necessário, receber o reforço de fibras, que vão melhorar a resistência ao impacto e a sua tenacidade. Por serem mais facilmente adquiridas e por apresentarem menor custo, as argamassas base cimento são as mais consumidas.

Pela discussão apresentada neste capítulo, viu-se que o conceito moderno de visão sistêmica deve ser aplicado às tecnologias de reparo, posto que as argamassas disponíveis no mercado têm diversidade de aplicação, e cada caso, requer um levantamento das causas e do grau de exposição aos agentes de deterioração, sem o que não é possível a especificação e uso racional dos materiais de reparo.

3.4 Ensaios acelerados para previsão de vida útil

3.4.1 ASTM E 632/88

A ASTM E 632 (ASTM, 1988), que tem como título “*Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials*” apresenta conceitos, definições e diretrizes para ensaios acelerados de previsão da vida útil ou durabilidade dos materiais e componentes de construção - no Anexo A consta a sua tradução na íntegra. A Figura 3.1 contém um resumo do conteúdo dos principais itens desta norma.

I. Definição do Problema

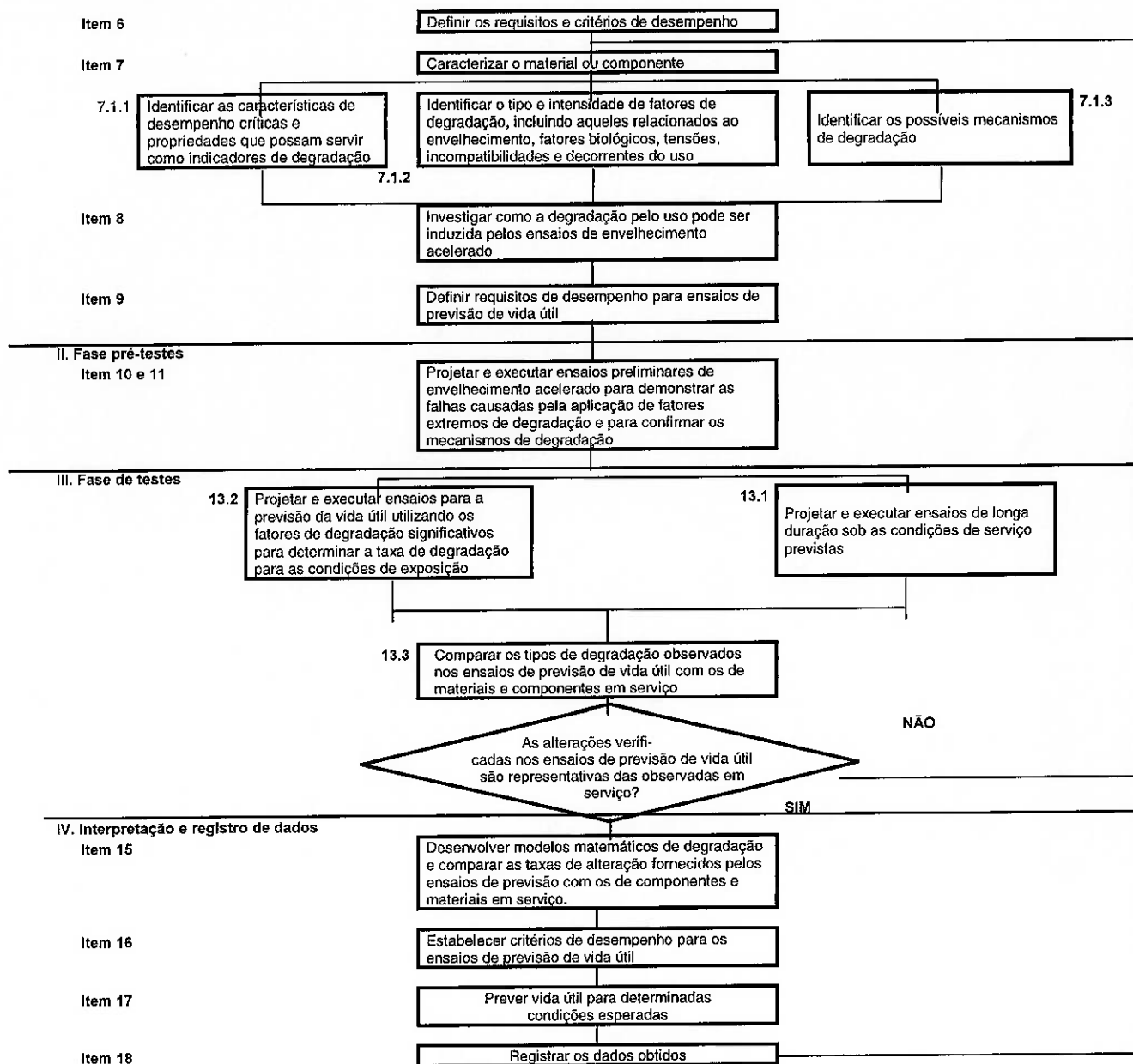


Figura 3.1 – Diagrama de resumo dos procedimentos recomendados pela ASTM E 632 (ASTM E 632, 1988) para o desenvolvimento de ensaios para a previsão de vida útil de materiais e componentes construtivos; os itens mencionados são relativos ao texto original da norma traduzida no Anexo A.

Como se pode verificar pelo Anexo A, a ASTM E 632/88 estabelece uma terminologia básica para os conceitos de vida útil dos materiais e componentes e orienta, acima de tudo, como se deve identificar as propriedades de desempenho críticas dos materiais e definir os métodos de avaliação dessas propriedades, em função das condições de execução e uso do produto em serviço.

A norma abrange as etapas a serem seguidas para o desenvolvimento de ensaios acelerados para previsão de vida útil de elementos e materiais de construção. A previsão de vida útil exige análises matemáticas, que não são descritas em detalhes; portanto, tanto as análises determinísticas como as probabilísticas podem ser usadas. Esta norma delinea um enfoque sistêmico para prever a vida útil, incluindo a identificação das informações necessárias, o desenvolvimento dos ensaios acelerados, a interpretação de dados e o relato dos resultados. No bojo de sua constituição, conceituam-se mecanismos de degradação, agentes de degradação, critérios de desempenho, agentes de incompatibilidade e identificação dos possíveis mecanismos de degradação um ponto importante, pois conhecendo-se a química do material é possível identificar mecanismos baseados nas reações químicas específicas, tais como hidrólise e foto oxidação. São tecidas ainda considerações referentes aos ensaios de envelhecimento acelerado, como por exemplo a degradação térmica, que pode ser acelerada pela exposição à temperatura superior àquela que será usada em serviço.

Em resumo, a ASTM E 632/88 orienta que a previsão da vida útil de materiais e componentes de construção se inicie pela fase de levantamento, na qual se definem os agentes e mecanismos críticos de deterioração. Na seqüência, recomenda-se verificar as propriedades críticas de desempenho sob a ação desses agentes e mecanismos críticos de deterioração, que devem servir como “indicadores de deterioração”. A partir daí, então, orienta que sejam definidos os ensaios de previsão de vida útil do componente, e recomenda compará-los com resultados dos ensaios em condições de serviço. Por fim, prescreve o desenvolvimento de modelos matemáticos de deterioração, a serem também calibrados, se possível com as mudanças ocorridas, em ensaios sob condições de serviço. Sugere, portanto, como estabelecer critérios de desempenho para ensaios acelerados de previsão de vida útil, e, se possível, como prever ou relacionar tais resultados à vida útil sob a expectativa das condições de serviço.

3.4.2 BS 7543/92

A norma BS 7543 (BSI, 1992), de título "*Durability of Building Elements, Products and Components*", tem em seu conteúdo as mesmas diretrizes gerais da ASTM E 632/88.

Apesar da semelhança de enfoque em relação à norma americana, a norma BS 7543/92 apresenta alguns tópicos mais evoluídos e que constam de tabelas apresentadas no Anexo B, analisados a seguir:

- A tabela B1 estabelece as categorias de vida útil dos projetos dos edifícios em função do seu uso;
- A tabela B2 contém um resumo das categorias para projeto de vida útil de componentes e partes da edificação, definindo os tempos de vida útil destes componentes, indicando inclusive as intervenções periódicas para a obtenção desta vida útil, e, ainda, tipificando os componentes que necessitam de manutenção ou substituição. Por meio desta tabela se pode verificar que os sistemas de reparo de estruturas devem no mínimo ter durabilidade equivalente à vida útil residual da estrutura;
- A tabela B3 contém um resumo dos termos associados à expressão de durabilidade, e tem uma importância fundamental por já estabelecer os mesmos em função das responsabilidades atribuídas a cada uma das partes envolvidas no processo construtivo;
- A tabela B4 apresenta os três níveis de manutenção dos componentes, a saber: após falha, em ciclos regulares ou logo após a detecção de uma falha por inspeções programadas. Verifica-se que o nível de manutenção 3 é o mais adequado para evitar danos maiores às estruturas afetadas por corrosão das armaduras;

A Figura. B1 exprime um fluxograma que inclui o caminho e os procedimentos que devem ser adotados para se chegar à previsão da vida útil: a **definição do problema**, quando são levantadas as necessidades, os requisitos, critérios de desempenho e características do material; a **preparação**, que envolve a identificação dos mecanismos de degradação que podem afetar o material, os efeitos da deterioração, a identificação do tipo dos fatores de deterioração; o **pré-teste**, que simula, num ensaio acelerado, a deterioração causada pelos fatores de degradação e indica o mecanismo de deterioração; o **teste**, que indica a mudança nos indicadores de deterioração, compara os resultados obtidos nos ensaios de previsão de vida útil e no ensaio de envelhecimento sob condições de uso; a última etapa seria o **juízo** ou decisão do procedimento para atingir a previsão da vida útil. É, portanto, uma súmula das atividades e procedimentos que devem ser

adotados para se estimar ou prever a vida útil dos componentes e materiais de construção.

3.5 Fatores intrínsecos e extrínsecos às argamassas determinantes dos sistemas de reparo

A rigor, entende-se que o termo “desempenho da argamassa de reparo” é impróprio, devendo-se lembrar que desempenho vem a ser, *a priori*, o comportamento do sistema de reparo em uso, e que diversos fatores intrínsecos e extrínsecos à argamassa, induzem ao êxito ou não dos sistemas de reparo, conforme se discute a seguir:

- A concepção do projeto do sistema de reparo a especificação adequada da argamassa, em função das condições de exposição e do acabamento final é importante para o bom desempenho dos sistemas de reparo, porque prescrições mais ortodoxas e conservadoras induzem a manifestações patológicas, pela carência de alguns detalhes que, se bem executados, podem levar à garantia da durabilidade e vida útil dos materiais ou componentes. É importante que nesta fase sejam levados em conta requisitos como o cobrimento e o espaçamento das armaduras, para que se melhorem as condições de lançamento e adensamento e se reduza ao máximo a possibilidade de vazios nos reparos, além da especificação da solicitação principal a que será submetida a estrutura a recuperar. É fundamental ainda, que o projeto informe o prazo para nova inspeção do reparo, para que seja realizada a manutenção do acabamento final, principalmente no caso de pinturas.
- Com relação à execução do sistema de reparo, o desempenho efetivo da argamassa de reparo em uma estrutura recuperada também depende de um perfeito procedimento da mistura, aplicação, preparo do substrato, compactação e cura. Portanto, a execução dos sistemas de reparo tem ingerência direta no desempenho final da estrutura recuperada. Assim, deve-se planejar e seguir a seqüência de procedimentos, desde a limpeza até a aplicação da argamassa, para que efetivamente se possa ter um bom desempenho do sistema de reparo.
- No que diz respeito à manutenção do sistema de reparo, há que se levar em conta as características do meio ambiente onde se procede o reparo e as condições de uso da estrutura a ser reparada. Para isso é imprescindível que se estabeleça o nível de

desempenho do sistema de reparo quanto ao período previsto para as inspeções de manutenção preventiva ou corretiva, o que dependerá do tipo de argamassa a ser usada, do grau de exposição a que ficará exposta a estrutura reparada, da espessura dos reparos e do acabamento final previsto.

- Com relação às propriedades intrínsecas da argamassa de reparo e dos demais materiais integrantes do reparo, as falhas de fabricação dos materiais irão obviamente desencadear manifestações patológicas precoces em reparos. Contudo, a principal parcela de responsabilidade dos materiais, cabe à correta especificação das suas características, após a devida análise sistêmica de todas as condições de projeto, execução e manutenção. A mera seleção errônea da argamassa de reparo, em função do tipo de ambiente em que vai ficar exposta, pode ser um agravante para acelerar o início da deterioração de um reparo. Os demais materiais que farão parte do sistema de reparo, soluções adesivas, aditivos e resinas somente devem ser especificados após o conhecimento de todas as condições de estrutura, técnica de reparo e manutenção posterior, para que haja compatibilidade entre o substrato, a argamassa de reparo e o seu acabamento final; com isso a garante-se durabilidade e um bom desempenho do sistema de reparo.

3.6 Relação geral dos fatores condicionantes do comportamento das argamassas de reparo

Conforme concluiu-se pelo item anterior, a especificação das argamassas de reparo deve levar em consideração os diversos fatores intervenientes no desempenho dos sistemas de reparo. Tais fatores, têm origens diversas e influência peculiar sobre o desempenho do sistema de reparo, variam de importância, dependendo da obra e do sistema de reparo em que serão implementados.

Assim lista-se, a seguir, a gama de fatores ou requisitos que têm ingerência no desempenho de sistemas de reparo, propondo-se faixas quantitativas de classificação. Mas se reconhece que é na sua ponderação quantitativa que reside a grande dificuldade de se aplicar o conceito de desempenho a materiais ou sistemas de reparo, por causa das inúmeras situações a que podem estar sujeitas as estruturas reparadas, situações estas que dizem respeito às condições ambientais e principalmente à presença e teores de agentes agressivos, aos quais ficará exposto o sistema de reparo.

Estas condições impedem que se tenha maior objetividade na aplicação do conceito de desempenho para materiais ou sistemas de reparo, pois é fato que uma argamassa usada num sistema de reparo e que possua propriedades adequadas em ensaios de laboratório pode não satisfazer às necessidades da estrutura a ser reparada.

3.6.1 Condicionantes do projeto da estrutura a ser reparada

Condições ambientais de exposição:

a) *Macroclima da obra a ser reparada*: condições climáticas da região onde se desenvolve a construção, devendo-se considerar os seguintes tipos de atmosfera:

- Rural;
- Urbana;
- Marítima, dividida em zonas de:
 - Respingos de maré,
 - Submersa: abaixo de 3 m,
- Industrial;
- Enterrada;
- Com flutuação do lençol freático;

b) *O microclima das peças a serem reparadas*: condições ambientais do local onde as peças estão localizadas.

- Interior do edifício;
- Exterior do edifício;

c) *Nível de exposição à umidade das peças após o reparo*: diz respeito ao grau de umidade do ambiente e o nível de exposição ao intemperismo, ou seja, aos ciclos de secagem e molhagem a que esta estrutura ficará exposta, quais sejam:

- Ambiente seco : $UR \leq 65\%$
- Ambiente úmido : $UR \geq 85\%$
- Ambiente com ciclos de molhagem e secagem.

Mecanismos e velocidade de ataque antes e após o reparo:

- d) *Idade da obra em recuperação*: para a estimativa da velocidade do ataque;
- <10 anos;
 - 10 a 20 anos;
 - 20 a 30 anos;
 - >30 anos;
- e) *Prazo decorrido desde a última intervenção*:
- 1 ano;
 - 5 anos;
 - 5 a 10 anos;
 - ≥ 10 anos.
- f) *Principal agente causador da deterioração*: a ser levantado no período de projeto ou de inspeção, para que então seja especificado o sistema de reparo. Esta definição, via de regra, é simples para o caso de armaduras atacadas apenas por carbonatação, mas deve estar bem definido se não há possibilidade de interação simultânea por outros agentes agressivos, sejam cloretos e sulfatos, ou ainda por reação álcali/agregado. Também o nível de deterioração por deformabilidade estrutural excessiva ou uso inadequado da estrutura deve ser previamente levantado, antes da especificação do sistema de reparo.

Características físicas e mecânicas do projeto estrutural:

- a) *Cobrimento da armadura* : requisito importante na durabilidade das estruturas de concreto, de cuja qualidade e espessura depende a penetração de agentes agressivos:
- Cobrimento reduzido de armadura – 15 mm;
 - Cobrimento normal de armadura – de 15 a 30 mm;
 - Cobrimento elevado de armadura – acima de 30 mm;
- b) *Espaçamento mínimo das armaduras nas peças a serem reparadas*: este parâmetro é muito importante nas condições de adensamento da argamassa de reparo, pois isto evita a maior presença de volume de vazios e, conseqüentemente, maior penetração dos agentes agressivos:

- Espaçamento reduzido: ≤ 10 mm;
 - Espaçamento normal: de 10 a 50 mm;
 - Espaçamento elevado: acima de 50 mm;
- c) *Densidade média das armaduras nas peças a serem reparadas*: a densidade da armadura tem relação muito íntima com a alínea b, pois em ambos os casos quanto maior a densidade da armadura maior a dificuldade de adensamento e colocação do reparo, recomendando-se ponderar a densidade das armaduras em :
- Densidade baixa;
 - Densidade média;
 - Densidade alta;
- d) *Solicitação crítica das peças reparadas*: diz respeito aos esforços que mais atuam nas peças a serem recuperadas, e cujo sistema de reparo deve estar apto a satisfazê-los:
- Compressão;
 - Tração;
 - Desgaste por abrasão;
 - Outros;
- e) *Classificação do tipo do concreto a ser reparado quanto a*:
- Resistência característica à compressão (f_{ck}) e ainda quanto a outros parâmetros físicos, disponíveis, tais como:
 - Absorção total de água e
 - Absorção total de água capilar ou sucção inicial (IRA).
- f) *Profundidade mínima e máxima de reparos*: este requisito, é importante para a metodologia e a tecnologia de aplicação do reparo, varia com a forma, a geometria e a dimensão do local a reparar, e ainda com o processo de limpeza do substrato, daí a classificação em:
- Espessura fina: ≤ 1 cm;
 - Espessura média: de 1 a 3 cm;

- Espessura grossa: >3 cm.

3.6.2 Condicionantes da execução dos reparos

a) *Método de aplicação das argamassas de reparo*: necessário se faz especificar a fluidez e a trabalhabilidade das misturas, para satisfazer às necessidades de lançamento do material segundo os locais de reparo e os processos a serem empregados, que podem ser de:

- Projeção mecânica;
- Projeção manual, com colher e desempenadeira (método tradicional);
- Projeção manual ou bombeada em formas;

b) *Rugosidade das seções a serem reparadas, após o preparo das superfícies*: a rugosidade do substrato é fundamental no êxito do reparo, posto que isto implica na melhoria da aderência do sistema de reparo, fundamento do bom desempenho de uma recuperação, e depende dos seguintes tipos de rugosidade do substrato:

- *Rugosidade baixa* – apicoamento manual do concreto, do que podem resultar superfícies de baixa a média rugosidade;
- *Rugosidade normal* – escovamento da superfície do concreto com escovas de aço ou ranhuramento por ferramentas adequadas;
- *Rugosidade elevada* – jateamento superficial do concreto com areia grossa, que resulta em superfícies de média a elevada rugosidade.

c) *Temperatura ambiente de aplicação das argamassas*: outro parâmetro importante para o êxito do reparo, pois dele depende o tempo disponível para a aplicação do material e o início do endurecimento da argamassa. É importante que todas as operações efetuadas no processo de recuperação estejam dentro do tempo de início de pega do produto. Pode-se considerar que as seguintes faixas de temperatura irão requerer propriedades distintas das argamassas de reparo:

- Abaixo de 10 °C;
- De 10 °C a 25 °C;
- De 25 °C a 35 °C;
- Acima de 35 °C.

É importante também que as argamassas de reparo possuam, além das propriedades mecânicas como resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração, um bom desempenho quanto à formação de macrocélulas, difusão de cloretos, difusão de CO₂, entre outros, pois tais propriedades são imprescindíveis para o êxito do projeto de reparo. Com o levantamento destes dados montou-se a Tabela 3. 3, cruzando-se as propriedades dos materiais e os condicionantes de reparo, para obtenção de um bom desempenho do sistema de reparo.

Tabela 3. 3- Sugestão para cruzamento dos condicionantes dos materiais x propriedades para obtenção de um bom desempenho do sistema de reparo.

Condicionantes (A)	(B) Microclima: - Interior - Exterior	(C) Ambiente: - Seco - Úmido - Ciclos de molhagem e secagem	(D) Temperatura (T): T < 10 °C 10 ≤ T < 25 °C 25 ≤ T ≤ 34 °C T > 35 °C	(E) Profundidade: - Espessura fina < 10 cm - Média 1 à 3 cm - Grossa > 3 cm	(F) Densidade de armadura: - Baixa - Média - Densa	(G) Cobrimento: - Reduzido - Normal - Elevado	(H) Espaçamento: - Reduzido - Normal - Elevado	(I) Solicitação: - Compressão - Tração - Impacto - Desgaste
Propriedades								
Consistência (A)				AE	AF		AH	
Adesão (B)								
Tempo de pega (C)			CD					
Retração (D)		DC						
Absorção (E)		EC						
Resist. comp. (F)								HI
Resist. tração (G)								HI
Módulo elast. (H)								HI
Difusão de CO₂ (I)	IA	IB				IG		
Difusão de Cl⁻ (J)	IA							

Esta tabela exemplifica o cruzamento entre condicionantes do reparo e propriedades dos materiais, para que se defina no levantamento inicial, as características de desempenho críticas do sistema de reparo, as necessidades da estrutura a reparar, e servir de suporte ao projeto de reparo, para obtenção da compatibilidade entre o substrato o material e o ambiente.

3.7 Aspectos relevantes das argamassas de reparo

Em função do aparecimento de inúmeras patologias, como fruto do envelhecimento do concreto, faz-se necessário a normalização dos materiais, de tal forma a coibir o seu uso indiscriminado e inadequado, o que pode vir a provocar o aparecimento de deterioração no reparo. Surgiu então o movimento para normalização destes materiais, tendo partido de HELENE a primeira contribuição neste sentido.

Posteriormente, seguiram-se apenas tentativas e iniciativas isoladas, principalmente dos projetos do CB – 18 e do Projeto Temático da FAPESP “ Pesquisa para Normalização de Materiais e Sistemas de Reparo de Estruturas de Concreto com Corrosão de Armaduras”, que adotou uma outra divisão, mostrada a seguir (HELENE, 1993):

- Sistemas de reparo por repassivação localizada – sistemas que simplesmente protegem o local reparado da estrutura pelo uso de materiais tais como argamassas, grautes, microconcretos e concretos de cimento Portland ou de base cimento Portland modificado com resinas. Este procedimento pode provocar o deslocamento das células de corrosão para regiões próximas do local reparado.
- Sistemas de reparo por barreira sobre a armadura – sistemas que protegem as armaduras por aplicação direta sobre as mesmas, como sendo as argamassas base epóxi, argamassas base poliéster, os “primers”, adesivos e pinturas epoxídicas.
- Sistemas de reparo por barreira sobre o concreto – sistemas que promovem uma proteção indireta à armadura por meio da criação de uma barreira aplicada sobre a superfície do concreto, com vernizes base epóxi, base poliuretana, base acrílica, pinturas de mesma base e revestimentos resistentes aos ambientes agressivos e de grande espessura.

- Sistemas de reparo por barreira química (inibição) – sistemas que promovem a proteção por inibição do processo corrosivo; e neste caso usam-se os inibidores orgânicos à base de Nitritos e Benzoatos.
- Sistemas de reparo por proteção catódica – sistemas que promovem a proteção catódica de natureza galvânica. É uma técnica que estabelece uma proteção mais abrangente, evitando o aparecimento de novas células de corrosão.

Entretanto, no mercado nacional só há a disponibilidade de certificados do tipo Referência Técnica, fornecidos pelo IPT de São Paulo à FOSROC BRASIL de dezembro de 1998, nos quais encontra-se a descrição do produto, a regulamentação e os critérios de avaliação, ou seja, os métodos de ensaio utilizados na avaliação do produto. Nestes certificados constam também a forma e metodologia de aplicação do material, o preparo do local de reparo, o modo de mistura, a maneira de lançamento da mistura na forma e a metodologia de cura do reparo, para que se possa obter o melhor desempenho do sistema de reparo. Dentro da metodologia de avaliação do material efetuaram-se os ensaios de caracterização do material seco através da granulometria, verificação da fluidez, perda de consistência, variação volumétrica, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, permeabilidade, difusividade de cloretos, carbonatação acelerada e dilatação térmica linear. Os resultados obtidos foram compatíveis com as informações prestadas pelo boletim técnico do fabricante. Apesar do amplo programa de ensaios executados não se sabe se os resultados obtidos satisfazem às necessidades do usuário. Por outro lado, outras indústrias simplesmente realizam os ensaios em seus próprios laboratórios e apresentam os resultados como prova de um bom desempenho, sem que nenhum órgão oficial tenha estabelecido os limites para aceitação e aplicação do produto. Urge portanto que se implemente e desenvolva o estágio de normalização dos materiais de reparo no Brasil.

3.7.1 Durabilidade dos sistemas de reparo

Muito embora haja uma necessidade cada vez maior de reparo de estruturas de concreto armado, a carência de informações técnicas, diretrizes e consenso sobre procedimentos, provoca uma série de divergências, no que tange à obtenção de maior vida útil e durabilidade dos reparos (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).

De acordo com NONU & CHAUDHARY (2000), um método de restauração da integridade de uma estrutura com danos é o reparo localizado das áreas afetadas, pela substituição do concreto pelos materiais de reparo. Porém, a durabilidade do reparo depende grandemente da sua aderência com o substrato de concreto e a proteção conferida ao aço da armadura. Portanto, deve haver coerência das propriedades físicas e químicas entre o substrato de concreto, o projeto de reparo e o uso da estrutura reparada (NONU & CHAUDHARY, 2000).

Tal durabilidade é fruto de uma perfeita interação e compatibilidade entre as propriedades dos materiais de reparo e o substrato. Isto implica na obtenção de reparos resistentes a tensões resultantes das modificações volumétricas de carga e de temperatura, sem que haja deterioração precoce.

As propriedades consideradas básicas de um material de reparo são o módulo de elasticidade, retração e *creep*, para o bom desempenho do reparo ao longo de sua vida útil. Entretanto, dá-se maior ênfase à seleção de materiais de reparo e às propriedades avaliadas em pequenas idades, como compressão, tração, aderência e retração. Avaliando-se criticamente as recomendações das normas e especificações de reparo, são observadas limitações e contradições dentro do seu escopo (MANGAT & O'FLAHERTY, 2000).

Portanto, a seleção dos materiais de reparo e o levantamento dos esforços e do ambiente onde será executada a intervenção implicam na redução das falhas do sistema de reparo.

3.7.2 Falhas no sistema de reparo

Segundo CUSSON & MAILVAGANAM (1996), a ausência de durabilidade nos sistemas de reparo se apresenta de diversas maneiras, como se mostra a seguir:

- **Fissuração a tração ao longo da espessura do reparo** – ocasionado pela redução da tensão de tração do material de reparo em relação à resistência de aderência na interface e ao substrato de concreto. Figura 3.2.a;
- **Cisalhamento do substrato de concreto abaixo da interface** – esta ocorrência tem como sintomatologia a delaminação do reparo, juntamente com uma camada da base de concreto que ficou aderida. Figura 3.2.b;

- **Falta de aderência entre o material de reparo e a base de concreto** – consequência da baixa resistência de aderência do reparo e do substrato de concreto.

Figura 3.2.c.

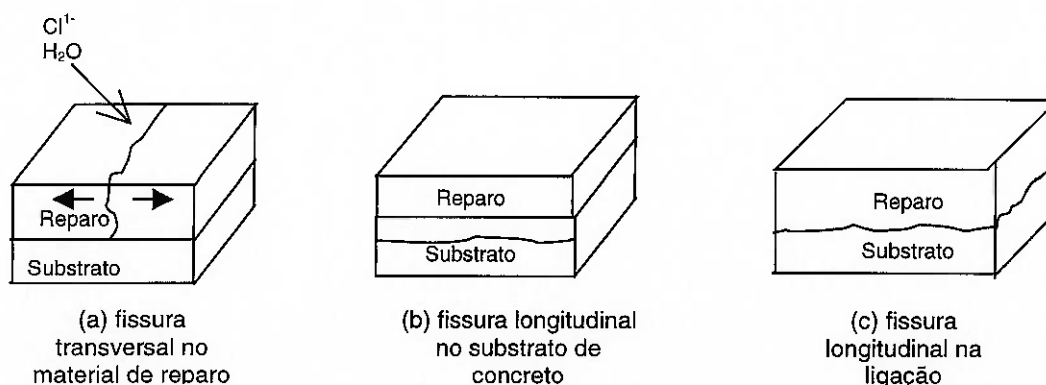


Figura 3.2 - Tipos de falhas nos sistemas de reparo (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).

3.7.3 Tipos de Reparo

Os reparos são classificados de duas formas distintas, dependendo da forma de aplicação do reparo:

Reparo não estrutural – reduz a permeabilidade, protege a armadura, aumenta a resistência à abrasão e principalmente a melhoria da estética Figura 3. 3.a;

- **Reparo estrutural** – Restabelece a capacidade de carga de projeto ou, ainda, melhora a monoliticidade de uma estrutura que não foi bem projetada Figura 3. 3.b.

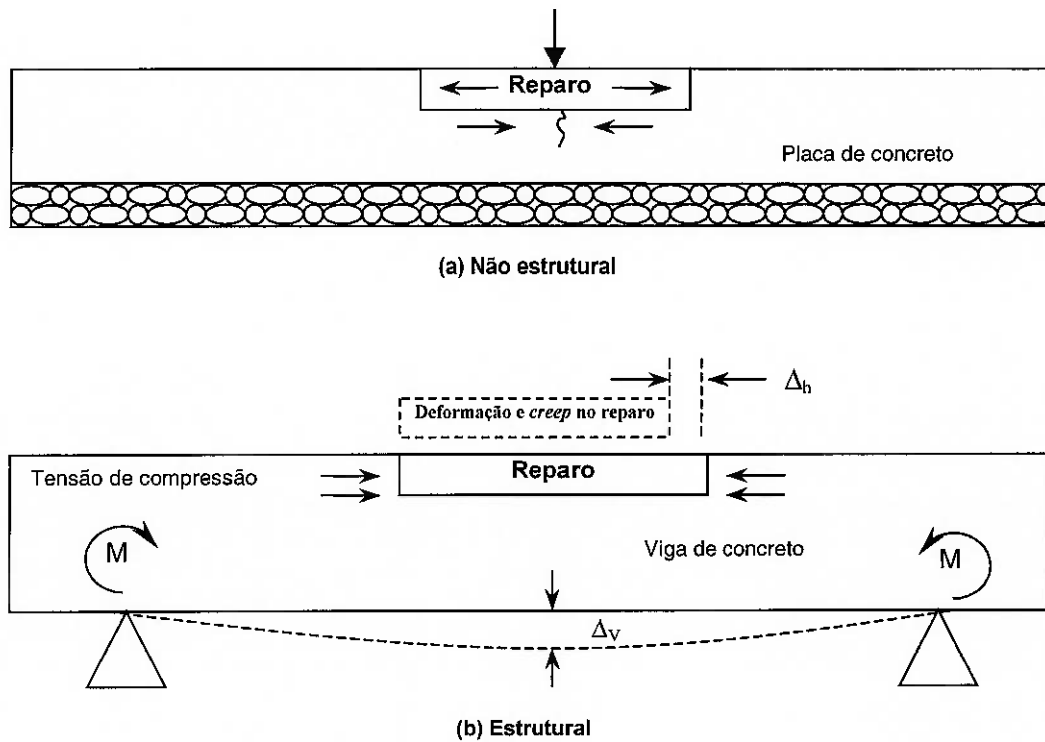


Figura 3.3 – Tipos de reparos (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).

3.7.4 Seleção dos Materiais de Reparo

Dentre as diversas classes de material de reparo, três grupos distintos se destacam, a saber:

- argamassas cimentícias;
- argamassas cimentícias modificadas com polímero;
- argamassas à base de resinas.

A Tabela 3.4 mostra os grupos de material para reparos superficiais segundo CUSSON & MAILVANAGAM (1996).

Tabela 3.4 - Argamassas para sistema de reparo superficial de concreto (CUSSON e MAILVAGANAM, 1996).

Argamassas cimentícias	Argamassas cimentícias com polímeros modificados	Argamassas à base de resinas
Cimento Portland (PC)	Estireno-butadieno	Epóxi
Cimento de alta alumina (HAC)	Acetato de vinila	Poliéster
Misturas de PC/HAC	Fosfato de magnésio	Acrílico
Grautes expansivos	Acrílico	Poliuretano

Para cada propriedade mecânica existente corresponde uma variedade de valores na avaliação para os três grupos de materiais. Esta diversidade de propriedades de materiais aderentes, conduz também ao aparecimento de tensões de tração e fissuração na interface, o que, como consequência, provoca o descolamento do reparo. A Tabela 3.5 mostra valores de algumas propriedades dos três grupos de materiais.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas dos materiais de reparo (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).

Propriedades mecânicas	Argamassas cimentícias	Argamassas cimentícias com polímeros modificados	Argamassas a base de resinas
Resistência à compressão (MPa)	20-50	30-60	50-100
Resistência à tração (MPa)	2-5	5-10	10-15
Módulo de elasticidade na compressão (GPa)	20-30	15-25	10-20
Coefficiente de expansão térmica (°C)	10	10-20	25-30
Absorção de água (% por peso)	5-15	0,1-0,5	1-2
Temperatura máxima de serviço	>300	100-300	40-80

Na seleção dos materiais de reparo devem ser levadas em conta as condições de exposição em serviço, a logística, parâmetros de instalação de reparo e características do material (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996). Paralelamente ao tipo de reparo, a seleção dos materiais usados na recuperação é de fundamental importância para que não haja incompatibilidade com o substrato de concreto, de tal forma que o reparo resista aos esforços e que não venha a deteriorar precocemente.

3.7.5 Condições de exposição em uso

As condições de exposição em uso têm ingerência no desempenho do sistema de reparo e, portanto, devem ser levadas em consideração no projeto de recuperação. As situações mais comuns de exposição estão elencadas abaixo:

- **Variação de umidade e temperatura:** as variações de temperatura, assim como os ciclos de secagem e molhagem, provocam retração e expansão dimensional;
- **Ciclos de gelo e degelo:** no concreto em fase de endurecimento, se saturado e exposto a baixas temperaturas, a água dos poros capilares congela, o que ocasiona a expansão;
- **Carregamentos por impacto, contínuos ou cíclicos:** estas solicitações podem provocar o esmagamento do concreto por transmissão de ondas diferenciadas dos materiais que tomam parte no reparo.

3.7.6 Considerações logísticas de trabalhabilidade

Dependendo da situação, a logística se sobrepõe a outros parâmetros na escolha dos materiais de recuperação. Algumas vezes a inacessibilidade do reparo impõe ao material uma situação que exige dele uma condição de lançamento auto-adensável, para satisfazer as condições de trabalhabilidade.

3.7.7 Parâmetros de instalação de reparo

Os parâmetros elencados abaixo são imprescindíveis no desenvolvimento de um projeto de reparo (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).

- **Tamanho e geometria dos reparos superficiais:** nos pequenos reparos a durabilidade depende em grande parte da capacidade de deformação do material; grandes reparos dependem também da tensão do material ao longo do tempo de uso da estrutura;
- **Presença de armadura no reparo:** tem por finalidade reduzir a tensão de cisalhamento na interface entre o reparo e o substrato e a tensão de tração no substrato de concreto;

- **Efeito da rigidez da seção:** a tensão de retração pode ser induzida no material de reparo de uma peça rígida por restrição à movimentação. Por isso, quando houver possibilidade de redução da retração, deve-se exigir um material de baixa retração.

3.7.8 Características do material

CUSSON & MAILVAGANAM (1996) estabeleceram na Tabela 3. 6, as propriedades mais importantes e relevantes que devem ser consideradas para a definição de um material de reparo durável e sem incompatibilidades, a tabela sugere a relação exigida entre a propriedade do material de reparo (R) e o substrato de concreto (C).

Tabela 3. 6 - Requisitos dos materiais de reparo superficiais em relação à compatibilidade (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).

Propriedade	Relação do material de reparo (R) com o substrato de concreto (C)
Tensão de retração	$R < C$
Coefficiente de deformação lenta (para reparos comprimidos)	$R < C$
Coefficiente de deformação lenta (para reparos tracionados)	$R > C$
Coefficiente de expansão térmica	$R = C$
Módulo de elasticidade	$R = C$
Coefficiente de Poisson	$R = C$
Resistência à tração	$R > C$
Desempenho à fadiga	$R > C$
Aderência	$R > C$
Porosidade e resistividade	$R = C$
Reatividade química	$R < C$

3.7.9 Incompatibilidade dos módulos de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma das mais importantes propriedades dos materiais de reparo, razão pela qual faz-se aqui uma abordagem resumida sobre esta medida que expressa o grau de deformabilidade do material, ou seja, materiais de baixo módulo são capazes de se deformar mais do que materiais de alto módulo quando submetidos a uma determinada carga. Por isso sua incompatibilidade tem fundamental

importância no êxito do reparo, como nos casos relatados a seguir: ao se aplicar um esforço externo paralelo ao plano de aderência, a diferença de módulos faz com que sejam geradas tensões a partir do material de menor módulo para o de maior, provocando assim a falência no material de maior módulo. Ao contrário, se o esforço for aplicado perpendicular à linha de aderência, a incompatibilidade tem menor influência; entretanto se o carregamento externo for de tração na mesma direção, aí sim esta incompatibilidade poderá provocar problemas de aderência. A Figura 3.4 mostra os efeitos da diferença entre os módulos de elasticidade dos materiais de reparo.

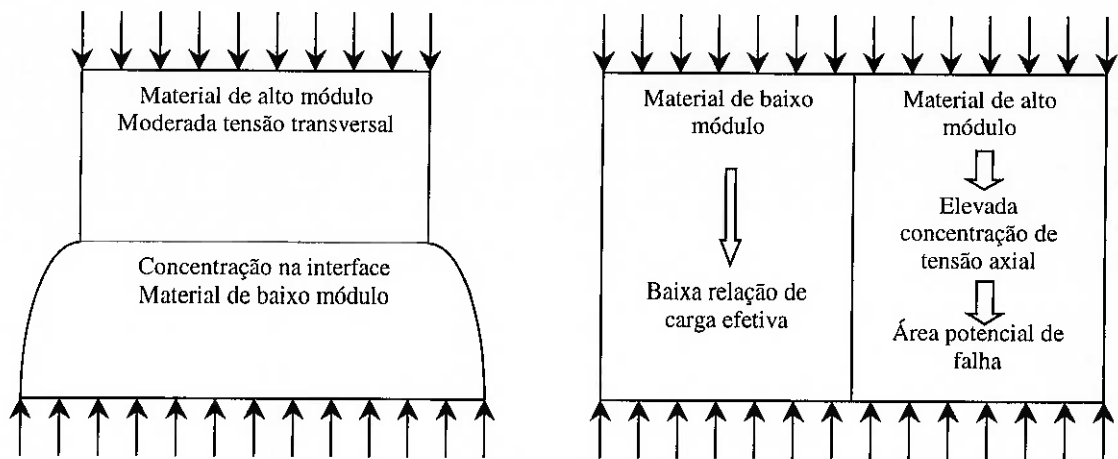


Figura 3.4 – Influência da incompatibilidade do módulo de elasticidade nos materiais de reparo (CUSSON & MAILVAGANAM, 1996).

4 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE REPARO

4.1 Métodos relacionados ao comportamento em uso

4.1.1 Objetivo

Estes métodos têm por objetivo avaliar o desempenho das argamassas de reparo levando em consideração principalmente o substrato sobre o qual o sistema de reparo vai ser executado.

4.1.2 Aderência

Na normalização internacional há uma grande variedade de métodos de avaliação das resistências de aderência, importante propriedade dos materiais de reparo, uma vez que o bom desempenho do sistema depende, entre outras coisas, do desenvolvimento de uma grande adesão entre o reparo e o substrato, provocada pela ligação existente entre as agulhas formadas pelo aglomerante e a porosidade do substrato, e também pela ação de materiais poliméricos existentes na composição das argamassas.

A norma BS 6319: Part 4 (BSI,1984) tem por finalidade avaliar a resistência de aderência das argamassas de reparo submetidas ao esforço de compressão. Os corpos de prova usados no ensaio são prismáticos, e possuem uma junta entre o material de reparo e o substrato formando um ângulo de 30° com o eixo principal do corpo de prova. O número de corpos de prova são de 4 (quatro) por argamassa, e os resultados devem ser comparados aos da argamassa de referência. O detalhe e dimensões dos corpos de prova para ensaio são mostrados no item 4.5.2.

A norma NF P 18-852 (AFNOR, 1986) tem como escopo definir as condições do ensaio de aderência de um produto ou sistema de produtos que se destinam a aplicações superficiais sobre concreto endurecido, submetidos a esforços de tração perpendiculares à superfície de contato. É aplicada aos produtos à base de aglomerantes hidráulicos ou resinas sintéticas, em cuja formulação não existam agregados com

diâmetros superiores a 5 mm. Estes ensaios são realizados sobre sistemas com superfícies úmidas e secas, sendo que os sistemas à base de resinas sintéticas podem ser aplicados de ambas as formas, enquanto que os produtos à base de aglomerantes hidráulicos são unicamente usados sobre superfícies úmidas.

O princípio do ensaio consiste na aplicação de uma camada de 1 cm do produto ou sistema de produtos sobre um corpo de prova de concreto com superfície normal; e após o endurecimento, procede-se o arrancamento por tração direta dos elementos cilíndricos do produto. Os corpos de prova são retirados de uma placa de 30x30x10 cm, sendo fixadas sobre ela pastilhas cilíndricas nas idades especificadas; e após isto é feito o arrancamento. Os corpos de prova devem ser curados sob água, e os cortes dos cilindros devem ser realizados entre os 14 e 21 dias de idade; continuam a ser curados até pelo menos os 90 dias. O relatório com o resultado do ensaio deve conter, além das resistências, o tipo de ruptura apresentada pelo corpo de prova. O equipamento e os corpos de prova usados no ensaio são mostrados no item 4.5.2.

A norma NF P 18-853 (AFNOR, 1986) define as condições de ensaio de aderência de um produto ou sistema de produtos destinados a aplicações superficiais sobre concreto endurecido, após variações cíclicas de temperatura, com solicitações de tração perpendiculares à superfície de contato.

Esta norma é aplicada aos produtos à base de aglomerantes hidráulicos ou de resinas sintéticas em cuja formulação existam agregados de diâmetro máximo igual ou inferior a 5 mm, e que possam ser aplicados sobre superfície úmida e superfície seca.

O ensaio consiste em aplicar uma camada do produto igual a 1 cm de espessura sobre uma superfície de concreto; após o endurecimento submete-se o conjunto a variações cíclicas de temperatura, e posteriormente procede-se o arrancamento por tração direta, dos elementos cilíndricos do produto. O equipamento e os corpos de prova usados no ensaio estão mostrados no item 4.5.2. Os ensaios são realizados com equipamentos e corpos de prova previstos na norma NF P 18-852 (AFNOR, 1986).

A norma NF P 18-858 (AFNOR, 1988), por sua vez, define as condições de ensaio de aderência de um produto ou sistema de produtos, destinados à aplicação sobre concreto endurecido submetido a solicitações de tração perpendiculares à superfície de contato. É aplicada a produtos à base de aglomerantes hidráulicos, em cuja formulação existam agregados com diâmetro máximo igual ou inferior a 5 mm, usados em reparos

sobre superfície úmida. O princípio do ensaio consiste em aplicar uma camada de 1 cm do produto sobre a superfície do concreto, e após o endurecimento do sistema, extrair por tração direta os elementos cilíndricos do produto.

A execução do ensaio obedece aos procedimentos constantes da norma NF P 18-852 (AFNOR, 1988).

4.1.3 Carbonatação

A carbonatação é um dos mecanismos de deterioração mais frequentes nas estruturas de concreto armado, e que pode contribuir para a propagação da corrosão das armaduras. Resultado da interação entre o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o CO_2 do ar que se difunde na fase aquosa dos poros do concreto, modifica as propriedades do concreto, por causa da criação de uma zona carbonatada que causa a propagação da corrosão das armaduras, reduzindo a vida útil das estruturas, razão pela qual sua avaliação é importante no desempenho dos sistemas de reparo. Tal fenômeno é observado pela mudança de pH do concreto através de dois indicadores: a fenolftaleína, que possui pontos de viragem entre 8,3 e 10, e a timolftaleína, que tem pontos de viragem entre 8,3 e 10,5 (ARTHUR, 1961); assim, qualquer um dos indicadores, fornece resultados confiáveis. Pode-se usar também o sumo do repolho roxo como indicador de pH, já que possui um ponto de viragem mais elevado e permite a verificação dos estágios da carbonatação. Além disso existem ainda outros indicadores como por exemplo o vermelho de methyl, cujo ponto de viragem varia no intervalo de 4,2 a 6,3, com condições de avaliar o fenômeno com maior precisão. HELENE (1986) cita a possibilidade de verificar-se a carbonatação utilizando-se o prisma de Nicol.

A norma RILEM CPC – 18 (RILEM, 1984) define os procedimentos para avaliação desta propriedade. A amostragem preconizada para este ensaio é de 2 corpos de prova por idade, para serem ensaiados nas idades de 28 e 63 dias, o que totaliza quatro exemplares por argamassa.

A metodologia deste ensaio obedece a duas etapas diferentes:

- **Cura:**

Em câmara úmida por um período de 7 dias (U.R. > 90% em temperatura de 23 a 25°C). Após a cura úmida inicial os exemplares permanecem em cura na umidade ambiente durante 9 dias para condicionamento (equilíbrio);

- **Verificação:**

Os exemplares que serão ensaiados aos 28 dias, permanecem na câmara de carbonatação durante 12 dias; neste estágio aplicam-se os indicadores de pH (fenolftaleína e timolftaleína) a cada 3 dias, ou seja, 4 verificações em dois exemplares destinados aos ensaios na idade de 28 dias. Os dois exemplares que se destinam ao ensaio na idade de 63 dias permanecem durante os 26 dias restantes na câmara de carbonatação; neste estágio aplicam-se os indicadores de pH a cada 3 dias. Neste ensaio empregar-se-á a concentração de 5 % de CO₂ e umidade relativa de 70%, o que é controlado pela presença de um lastro de H₂SO₄, segundo ASTM E 104 (ASTM, 1985).

4.1.4 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é um dos fatores decisivos no que diz respeito ao controle da velocidade da reação de corrosão, pois tem a função precípua de controlar o fluxo de íons que se movimentam na solução aquosa presente nos poros do concreto.

A norma ASTM G 57 (ASTM, 1992) instituiu e adaptou o método destinado a avaliar a resistividade elétrica do concreto de cobrimento, tanto no local como em laboratório, e que pode ser utilizado para avaliar os materiais de reparo.

4.1.4 Absorção Capilar

A absorção capilar é um dos parâmetros mais complexos de serem avaliados e controlados, posto que a matriz cimentícia é um material hidrófilo, ou seja, busca sempre a água. Esta absorção depende muito da forma e das dimensões dos poros, pois quanto menor seu diâmetro maiores são as pressões capilares, que implicam em maior profundidade do reparo a ser atingida pela água. Ao contrário, quanto maior o diâmetro dos poros menor a pressão capilar, menor a profundidade, porém maior quantidade de água absorvida. Na verdade o que é preciso evitar é a intercomunicabilidade entre os poros. Então, a avaliação da absorção capilar pode ser realizada através de corpos de prova de dimensões definidas, colocando-se uma das faces em contato com uma lâmina de água de aproximadamente 1 cm de água durante um tempo *t*. Verifica-se assim a massa de água absorvida por área (COUTINHO, 1972). Esta propriedade pode ser avaliada pela norma ASTM C 97 (ASTM, 1994), usando-se corpos de prova prismáticos de dimensões 10x10x10 cm, com averiguações no tempo de 1 minuto para cada exemplar.

A amostragem preconizada pela norma em questão é de 10 corpos de prova de cada material de reparo, curados em câmara úmida e secos em estufa durante as 24 horas que antecedem a data do ensaio e resfriados até a temperatura ambiente ao ar livre, sendo nesta oportunidade determinado seu peso. Após este procedimento são introduzidos os corpos de prova no reservatório, ficando imersos em uma lâmina de água de 1,5 cm; a verificação é feita após 1 minuto, tendo-se o cuidado de se retirar o excesso de água com uma estopa úmida. O próximo passo é a pesagem imediata do exemplar, para a determinação da diferença de massa (θ) e sucção segundo a Equação 4. 1 e Equação 4. 2 abaixo:

$$\theta P = \text{massa final} - \text{massa inicial} \quad \text{Equação 4. 1}$$

$$\text{Sucção} = \theta P / \text{área (grama / 187,5 cm}^2\text{)} \quad \text{Equação 4. 2}$$

A NBR também avalia esta propriedade através do método de ensaio de absorção de água por imersão NBR 9778 (ABNT, 1983). Este método também se fundamenta na absorção de água pela imersão dos corpos de prova das argamassas endurecidas.

4.1.5 Evolução da Resistência à Compressão

Considera-se que a resistência à compressão axial é a propriedade mecânica fundamental das argamassas de reparo, por ser a mais conhecida e de mais fácil avaliação. Importante portanto que se acompanhe a evolução desta propriedade ao longo do tempo, tendo em vista que o grau de hidratação dos aglomerantes hidráulicos evolui com o tempo, da mesma forma que se observa a forma de ruptura dos corpos de prova.

Este ensaio é realizado de acordo com a norma ASTM C 349 (ASTM, 1997), utilizando-se corpos de prova prismáticos com dimensões 4x4x16 cm usando suas extremidades para submete-los ao esforço de compressão nas idades que se deseja avaliar sua evolução. A norma em questão exige uma amostragem de 3 exemplares por idade, curados em câmara úmida à umidade de 75% até a data de ruptura.

4.1.6 Retração

Quando se estudam os efeitos do clima nas propriedades dos concretos e das argamassas, verifica-se a existência de duas formas de retração: Hidráulica e Térmica (CANOVAS, 1988):

Estas retrações provocam nos elementos estruturais contrações que se convertem em tensões de tração, que produzem fissuras se a peça estiver impedida de deformar-se. Segundo ANDRADE (1997), a retração por secagem é o fenômeno que consiste na contração resultante da variação de umidade das pastas de cimento, argamassas ou concretos, ou em quaisquer outros materiais de natureza porosa. Esta contração se apresenta logo após o adensamento (retração no estado fresco), e logo a seguir ao endurecimento (retração por secagem). Quando a água se desloca para o exterior de um corpo poroso ainda não totalmente rígido, a consequência é uma contração. Numa mistura cimentícia, a evaporação da água da superfície do concreto ou da argamassa pode acontecer quando a mistura ainda está em estado plástico. Isto vai provocar uma contração conhecida como retração plástica, uma vez que a argamassa ou concreto ainda está no estado plástico (NEVILLE, 1997). Ainda segundo NEVILLE (1997), a retração plástica é grandemente influenciada pela temperatura, pela umidade relativa e pela velocidade do vento. A Tabela 4.1 mostra a influência da temperatura, da umidade relativa e da velocidade do vento na retração plástica.

Tabela 4.1 – Influência das condições climáticas na retração plástica. UR = 50%, e temperatura = 20°C (NEVILLE, 1997).

Velocidade do vento (m/s)	Retração 8 horas após o lançamento (10^{-6})
0	1700
0,6	6000
1,0	7300
7 a 8	14000

A retração plástica induz o aparecimento de fissuração plástica, provocada pela contração numa área horizontal vasta, são mais difíceis contrações nesta direção do que na vertical. Essas fissuras apresentam um desenho paralelo, cujo espaçamento varia entre 0,3 mm e 1,0 mm, com elevada profundidade. Esta retração é tanto maior quanto maior o teor de cimento da argamassa e quanto menor a relação a/c (NEVILLE, 1997).

A retração é avaliada medindo-se a redução do comprimento do concreto, quando ele é submetido à perda de umidade e mantido a uma temperatura constante, sem que nenhum carregamento seja aplicado sobre ele.

A Figura 4.1 mostra a influência do consumo de cimento da mistura sobre a retração plástica, considerando-se umidade relativa de 50%, temperatura de 20 °C e velocidade do vento de 1,0 m/s (NEVILLE, 1997). A NBR 8224 (ABNT, 1983) estabelece um método de ensaio que utiliza corpos de prova cilíndricos ou prismáticos.

Os corpos de prova prismáticos, em função dos comparadores mecânicos disponíveis, podem ter as seguintes dimensões:

- 10 cm x 10 cm x 30 cm – concretos com agregados de dimensão máxima característica de até 38 mm.
- 15 cm x 15 cm x 60 cm – concretos com agregados de dimensão máxima característica de até 50 mm.
- 30 cm x 30 cm x 120 cm – concretos com agregados de dimensão máxima característica de até 100 mm.

Deverão ser moldados no mínimo 2 corpos de prova para cada idade e cada mistura, adotando-se os critérios da NBR 5738 (ABNT, 1984).

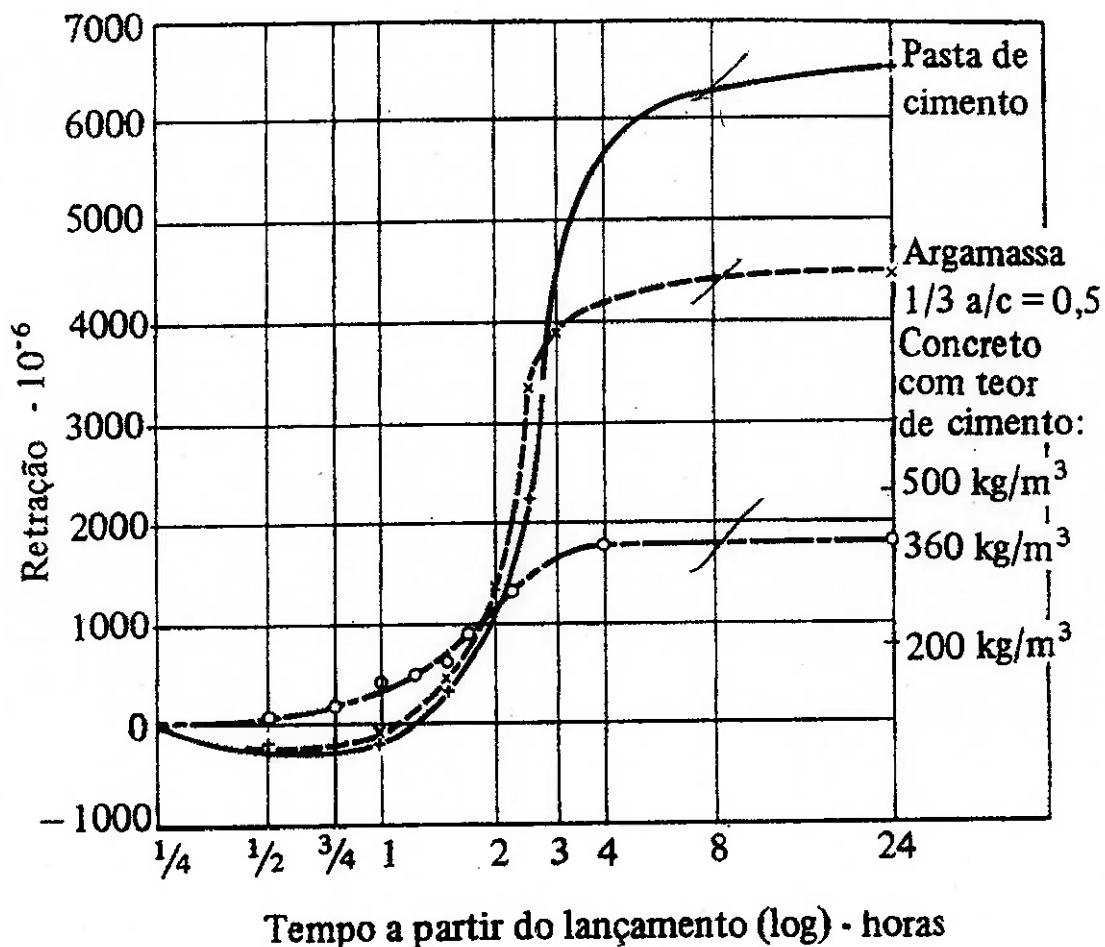


Figura 4.1 – Influência do teor de cimento, umidade relativa de 50%, temperatura 20 °C e velocidade do vento de 1,0 m/s (NEVILLE, 1997).

4.2 Métodos de Ensaio para Caracterização de Argamassas

4.2.1 Objetivos

Estes métodos de ensaio destinam-se a caracterizar as propriedades das argamassas de reparo, sem que seja considerado o contato com o substrato já existente.

4.2.2 Resistência à Compressão

É uma das mais importantes propriedades das argamassas de reparo, pois demonstra a capacidade de um material possuir um estado de resistência interna, de tal forma que possa resistir a esforços de compressão. É também um indicador de qualidade da argamassa, por estar diretamente relacionada à estrutura do aglomerante endurecido,

ainda que haja limitações quanto à sua adequação para informar sobre as propriedades de transporte de argamassas.

A norma BS 6319: Part 2 (BSI, 1983) descreve procedimentos para a avaliação desta propriedade das argamassas de reparo à base de resina. Os corpos de prova têm forma cúbica, com 40 mm de aresta, e são usados em misturas cuja formulação haja agregados de diâmetro inferior a 4,75 mm. A cura dos corpos de prova se efetua em câmara úmida.

A norma ASTM C 349 (ASTM, 1998) criou metodologia para determinar a resistência à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa, com dimensões 4x4x16 cm, oriundos do ensaio de flexão. Seu procedimento de cura é por imersão em água à temperatura de 23 ± 2 ° C, e o ensaio deve estar com a superfície seca. Os detalhes dos corpos de prova são mostrados no item 4.5.1.

4.2.3 Resistência à Flexão

A resistência à flexão é uma propriedade importante na caracterização das argamassas de reparo, posto que representa a capacidade do material de sofrer alongamentos e encurtamentos em uma mesma peça, quando submetida a esforços externos que venham a fletí-la.

A norma ASTM C 348 (ASTM, 1997) é um método de ensaio que determina a tensão de flexão de argamassas à base de cimento. Os corpos de prova usados neste ensaio são prismáticos, com dimensões 40x40x160 mm, condicionados sobre dois apoios e recebendo a carga através de um cutelo posicionado no meio do vão. O equipamento e os corpos de prova são os mesmos usados na determinação da resistência à compressão, de acordo com a norma ASTM C 349, uma vez que este ensaio é executado com as extremidades dos prismas submetidos à flexão.

4.2.4 Resistência à Tração

A tração é outra propriedade importante para os materiais de reparo, visto que está ligada ao estado de fissuração provocada por tensões de tração e relacionada à coesão interna das pastas de cimento. No momento em que se melhora esta propriedade é evidente que o grau de fissuração reduz, e o tempo de vida útil pode se estender, uma vez que a fissura é um caminho por onde os agentes agressivos penetram nas estruturas.

A norma BS 6319: Part 7 (BSI, 1985) apresenta uma metodologia de ensaio de tração para aplicação em materiais de reparo que não contenham materiais fibrosos e nem agregados com diâmetro maior que 3,35 mm, e utiliza corpos de prova com formato mostrado no item 4.5.1. O princípio do ensaio é submeter os corpos de prova a um esforço de tração, até que venha a se romper. Os corpos devem ser curados em câmara úmida até a idade de ruptura.

4.2.5 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é outra propriedade importante nos materiais de reparo, pois mostra a capacidade de deformação da argamassa e tem implicações nas deformações do sistema de reparo. É fato que quando o reparo é submetido a esforços externos constantes, a deformação cresce com o tempo, ou seja, a argamassa de reparo tende a fluir. Tal fluência depende, portanto, do módulo de elasticidade, razão da importância da capacidade de deformação do material.

A norma BS 6319: Part 6 (BSI, 1984) estabelece uma metodologia de ensaio que permite determinar o módulo de elasticidade das argamassas de reparo, o que consiste em submeter um corpo de prova prismático, cuja relação entre dimensões seja 4:1, a uma carga de compressão e controlar a deformação induzida por este esforço de compressão. O corpo de prova tem dimensões de 40x40x160 mm no qual são acoplados 2 *strain gages* centralizados e dispostos sobre o eixo do corpo de prova para medir as deformações provocadas pelo plano de carga estabelecido, e aí se calculam os módulos secantes ou tangentes, dependendo da necessidade. A cura dos corpos de prova deve ser em câmara úmida até a data de ensaio.

4.2.6 Absorção de Água por Imersão

A absorção das argamassas de reparo está intimamente ligada ao diâmetro e à intercomunicabilidade dos poros capilares, que compõem a estrutura da pasta e têm implicação no transporte de elementos agressivos à estrutura. Esta propriedade das argamassas de reparo é avaliada através do método ASTM C 97 (ASTM, 1996), em que se utilizam corpos de prova de forma cúbica, prismática, cilíndrica ou de qualquer outra forma regular, cuja menor dimensão não exceda 50,8 mm e nem a maior ultrapasse 76,2 mm.

O resultado do ensaio será calculado através da Equação 4. 3.

$$\text{Absorção, massa \%} = \left[\frac{(B-A)}{A} \right] \times 100 \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

A= peso do corpo de prova seco

B= peso do corpo de prova após a imersão

A norma NBR 9778 (ABNT, 1987) prescreve o método pelo qual se avalia a absorção de água, através da imersão.

A absorção é definida pela Equação 4.4:

$$\text{Absorção} = \left(\frac{M_{SAT} - M_S}{M_S} \right) \times 100 \quad \text{Equação 4.4}$$

As massa dos corpos de prova devem ser determinadas ao ar livre; as amostras são mantidas em estufa à temperatura de (105 ± 5) °C, e determina-se a massa da amostra após permanência na estufa entre 24, 48 e 72 horas. Depois deve-se resfriar a amostra ao ar seco e determinar a massa.

Após a secagem em estufa, e determinada a massa, procede-se a imersão da amostra em água à temperatura de (23 ± 2) °C, durante 72 horas. A amostra deve permanecer com 1/3 de seu volume imerso nas 4 primeiras horas, 2/3 nas 4 horas subsequentes, e nas 64 horas restantes deve haver imersão total.

4.2.7 Volume de Vazios

O volume de vazios é uma propriedade das argamassas de reparo porque tem relação direta com a sua resistência mecânica, bem como com a durabilidade dos reparos. Isso porque a resistência das argamassas não é devida somente à relação a/c, pois POWERS, citado por NEVILLE (1997), afirma que tem mais retidão estabelecer relação entre a resistência e a concentração de produtos sólidos da hidratação do cimento no espaço destinado a eles. POWERS, ainda citado por NEVILLE (1997), relacionou a evolução da resistência e a razão gel/espaço. Tal relação foi conceituada

como sendo o quociente do volume da pasta de cimento hidratada sobre a somatória dos volumes do cimento hidratado mais os poros capilares.

É fato, então, que a resistência das argamassas fazendo uma comparação com o concreto, está ligada diretamente ao volume de vazios (NEVILLE, 1997). Portanto, as argamassas de reparo tem suas propriedades mecânicas afetadas pela totalidade dos vazios existentes, quais sejam:

- ar aprisionado;
- ar incorporado, quando existir a presença do incorporador de ar;
- poros capilares;
- poros de gel.

Não só o volume, mas também as dimensões e a forma dos poros exercem influência nas resistências das argamassas. Fica claro então que a porosidade, conceituada como sendo o volume de todos os poros maiores que os poros de gel, é fator que influencia na resistência da pasta de cimento, e conseqüentemente nas argamassas. Então, é mister considerar também o efeito das dimensões e da distribuição dos poros na resistência. De modo geral, para um mesmo volume de poros, os poros de menor dimensão resultam em resistência maior das pastas e, por analogia, das argamassas (NEVILLE, 1997). A Figura 4. 2 representa os diversos tipos de poros existentes em uma pasta de cimento hidratada. A Figura 4. 2 representa os diversos tipos de poros existentes numa pasta de cimento hidratada.

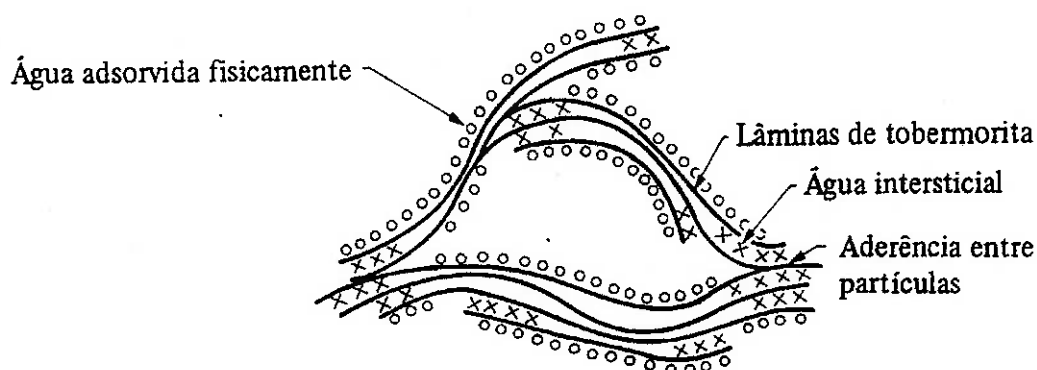


Figura 4. 2- Representação dos tipos de poros em uma pasta hidratada (NEVILLE, 1997), com base no modelo de Rahman.

4.2.8 Consistência

A consistência é uma das propriedades das argamassas de reparo no estado fresco relacionada à exigência de trabalhabilidade do material de reparo na aplicação sobre o substrato. A avaliação desta propriedade pode ser executada segundo a norma ASTM C 230 (ASTM, 1990), que tem como princípio a verificação do grau de fluidez da argamassa de reparo no momento de sua aplicação.

4.3 Metodologia de controle

4.3.1 Objetivos

A construção civil representa um percentual muito grande da massa de trabalho do país. Entretanto, é comprovado que os componentes por partes de uma construção estão via de regra em um nível inferior ao desejado. HELENE (1992) afirma que os motivos dessas deficiências são de origens diversas, contudo na grande gama dos problemas levantados observa-se a carência de um Programa de Controle de Qualidade dos produtos e componentes de uma edificação. O presente item tem, então, o objetivo de minorar este quadro, propondo métodos de ensaio que possam, no conjunto, contribuir para a melhoria da qualidade dos materiais de reparo.

4.3.2 Critérios para Seleção de Fornecedores

É uma avaliação que objetiva verificar a capacidade de determinado fornecedor de atender ao fornecimento de material, tanto no que diz respeito à pontualidade e exatidão da entrega dos produtos como também à manutenção da qualidade exigida para a satisfação das necessidades da obra (SOUZA, 1996). O usuário ou proprietário do empreendimento deve exigir do fornecedor, produtos em conformidade com as normas, através de ensaios efetuados em laboratórios, e cujos resultados venham a comprovar, pelos certificados emitidos, a compatibilidade do produto com os documentos normativos (HELENE, 1992).

Uma maneira de selecionar fornecedores é estabelecer algumas propriedades básicas das argamassas de reparo, que devem ser avaliadas no momento de seu recebimento.

4.3.3 Procedimentos para Recebimento em Obra

Segundo HELENE (1992) a implantação de um controle de qualidade em obra exige a ação de duas vertentes distintas: o controle de produção e o controle de recebimento. O primeiro deve ser executado pelo fabricante do produto e tem como enfoque principal a obtenção do produto especificado da forma mais racional e com custo menor. É preciso entre outras coisas, informar sobre a manutenção do processo produtivo e também sobre o nível de qualidade dos produtos fabricados (CAVANI, 1989). Já o controle de recebimento deve ser exercido pela fiscalização ou pelo proprietário, e visa avaliar a conformidade de certa característica do produto em relação ao especificado (CAVANI, 1989). Basicamente, a atividade de recebimento deve ser efetuada na obra, no momento da chegada do material, e consta de inspeção visual das condições do material, sua cor, textura, e condições de embalagem do lote recebido.

4.3.4 Ensaios para Recebimento em Definitivo (Aceitação)

Estes ensaios visam exercer um acompanhamento nas propriedades dos materiais de reparo, a fim de se verificar sua compatibilidade com as especificações. Os ensaios propostos para esta operação são:

- **Teor de aglomerantes;**

Do ponto de vista químico esta verificação é importante para o acompanhamento da qualidade do material, uma vez que sistematicamente é avaliado o conteúdo de aglomerante da mistura, mantendo-se assim uniforme o comportamento reológico e das propriedades das argamassas de reparo.

- **Resistência à compressão**

Esta propriedade é fundamental para a caracterização das argamassas de reparo, uma vez que depende da coesão da pasta de cimento, da sua aderência às partículas de agregado e, de certa forma, da resistência dos agregados (NEVILLE, 1997). A resistência à compressão das argamassas de reparo é avaliada pela norma BS 6319: Part 2 (BSI, 1983) e norma ASTM C 349 (ASTM, 1998).

- **Variação volumétrica**

A variação volumétrica provocada pela secagem é diferente do volume de água extraída. A água livre que se perde antes tem pouca ingerência no fenômeno da retração.

Entretanto, com a evolução da secagem a água adsorvida é retirada, e aí sim a variação de volume da pasta de cimento não restringida é quase igual à perda de uma camada de água “com espessura de uma molécula, da superfície de todas as partículas de gel” (NEVILLE, 1997). Por outro lado, não é interessante que haja uma expansão considerável provocada pelas reações de hidratação ou por adições exageradas inseridas no momento da fabricação das argamassas de reparo; isto provoca uma instabilidade volumétrica indesejável às argamassas de reparo.

- **Perda de consistência**

A consistência é representada pelo grau de fluidez e trabalhabilidade que as argamassas de reparo apresentam no momento da aplicação. A manutenção desta propriedade é importante, pois na medida em que se executa o reparo é indesejável que haja perda de consistência considerável. Esta propriedade é aferida pela norma ASTM C 230 (ASTM, 1990).

- **Massa específica**

Esta propriedade tem a finalidade de avaliar a densidade do material, e, ao contrário das propriedades anteriores, não é usada para rejeição do lote amostrado. O ensaio é executado segundo a norma NBR- 9778 (ABNT, 1987).

4.3.5 Ensaios para uniformidade

São ensaios que têm por objetivo verificar a permanência das propriedades dos materiais de reparo num mesmo nível de qualidade, para que não ocorram interferências no desempenho do sistema de reparo. Estes ensaios devem ser realizados de preferência no canteiro de obra, sob as mesmas condições de uso e ambientais a que o sistema de reparo vai ficar exposto. É estabelecida então uma relação comportamental entre o material aplicado no reparo e o ensaio executado com o mesmo material.

Para a verificação da uniformidade das argamassas de reparos, propõe-se a adoção dos ensaios a seguir:

- **Resistência à compressão**

É um ensaio que visa caracterizar a propriedade fundamental dos materiais cimentícios no estado endurecido. O uso desta metodologia, sob as mesmas condições ambientes da estrutura reparada, permite avaliar e acompanhar o grau de uniformidade

dos lotes de argamassa de reparo chegadas à obra. Este ensaio pode ser realizado segundo o método ASTM C 349 (ASTM, 1997), usando-se corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm.

- **Resistência à tração**

A avaliação desta propriedade fornece um dado importante sobre as argamassas de reparo no que diz respeito ao alongamento de ruptura, tensão de tração pura e ainda o módulo de deformação longitudinal. Os corpos de prova têm a forma de “8” e os ensaios são realizados segundo o método descrito na norma BS 6319: Part 7 (BSI, 1985).

- **Módulo de elasticidade**

Esta característica das argamassas de reparo diz respeito à deformabilidade do material na estrutura recuperada, pois a fluência da argamassa depende do seu módulo de elasticidade. A norma BS 6319: Part 6 (BSI, 1984) estabelece o método para a determinação do módulo de elasticidade, usando corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm.

- **Resistência à flexão**

Esta característica das argamassas tem relação com o módulo de ruptura, cuja base teórica é a análise de uma viga elástica, com proporcionalidade entre tensões e deformações; admite-se ainda que a tensão de tração na seção analisada seja proporcional à distância à linha neutra (NEVILLE, 1997).

- **Espectrofotometria infravermelho**

Na avaliação do teor de aglomerantes determina-se quantitativamente a massa de aglomerantes presentes na formulação. Já o espectrofotômetro infravermelho mensura, pela radiação absorvida, um comprimento de onda que caracteriza cada grupo de materiais por sua microestrutura, ou seja, a identificação se dá pelo arranjo molecular dos seus átomos.

4.4 Propriedades genéricas das argamassas e dos sistemas de reparo

Definidas as exigências a serem satisfeitas em função da exposição, do uso e do projeto da estrutura a ser reparada, a próxima etapa é o estabelecimento dos requisitos

de desempenho a serem atendidos pelas argamassas de reparo. Estas propriedades se agrupam em função da condição do estado físico da argamassa:

- *propriedades no estado granular;*
- *propriedades no estado fresco;*
- *propriedades no estado endurecido.*

4.4.1 No estado granular

A argamassa no estado granular é caracterizada pela composição granulométrica da mistura dos elementos que a compõe: o aglomerante hidráulico, os aditivos e o agregado miúdo. Essa caracterização se faz através da série normal de peneiras da ABNT, e, ao final desta análise, pode-se afirmar, grosso modo, que a quantidade de material retido na peneira 200 (0.075 mm) caracteriza a fração de agregado miúdo que compõe a argamassa, no estado seco.

4.4.2 No estado fresco

Uma das propriedades mais importantes das argamassas de reparo no estado fresco é sua consistência, que pode ser plástica, seca ou fluida e, dependendo da sua aplicação, ser manual, por projeção mecânica ou em fôrmas.

Uma outra propriedade é a coesão, que depende da formulação química e granulométrica dos materiais componentes das argamassas, principalmente dos aglomerantes, e que tem como consequência a forte atração entre as partículas que compõem a mistura.

A tixotropia é outra propriedade importante das argamassas de reparo, pois possibilita sua aplicação em superfícies verticais e inclinadas, sem que haja a segregação dos materiais.

A densidade de massa específica aparente é também importante, pois pode indicar o consumo de argamassa por metro cúbico, uma vez conhecida a relação água /materiais secos do preparo da argamassa.

A capacidade de adesão que responde pela aderência da argamassa ao substrato, no estado fresco.

O tempo de início de pega da argamassa é uma medida convencional que indica o tempo limite para a aplicação e compactação do sistema de reparo, para o início do endurecimento.

Quanto ao teor de ar incorporado, que se manifesta por microbolhas, é uma propriedade que, além de melhorar a plasticidade da argamassa, influencia na redução da porosidade capilar, além de modificar a sua densidade de massa aparente.

4.4.3 No estado endurecido

As propriedades elencadas neste item estão mais intimamente ligadas à previsão de durabilidade, pois algumas podem fornecer índices ou estimativas da vida útil dos reparos.

A absorção de água total das argamassas resulta da densidade da matriz aglomerante e do maior ou menor refinamento dos poros, que determina os caminhos de percolação do maior vetor de deterioração das estruturas de concreto armado, a água.

A propriedade da absorção capilar está intimamente ligada ao refinamento dos poros, que contribui para a garantia da durabilidade, pois a penetração de íons agressivos será reduzida por este efeito.

A difusão de CO_2 é outro requisito importante para a durabilidade das argamassas de reparo, pois a difusão deste gás na região reparada provoca o fenômeno da carbonatação, com conseqüente corrosão das armaduras. Esta propriedade, reduzida, conduz à maior tempo de vida útil das estruturas reparadas.

A permeabilidade à água é uma propriedade relacionada a situações em que exista um gradiente de pressão, pois a percolação da água pelo reparo pode provocar lixiviação de componentes da argamassa, principalmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A permeabilidade dos produtos à base de cimento não é função apenas da porosidade em si, mas também da dimensão, distribuição, forma e continuidade dos poros (NEVILLE, 1997).

Os reparos em estruturas marinhas devem levar em conta a difusão de cloretos, uma vez que a presença deste íon provoca a despassivação do aço, mesmo com o pH do meio elevado, corroendo as armaduras das estruturas.

Um outro requisito necessário às argamassas de reparo é o seu desempenho quanto à formação de macrocélulas, ou seja, o sistema de reparo não pode ter

desempenho diferente ao longo da estrutura reparada, para evitar o aparecimento de macrocélulas de corrosão, e conseqüentemente reduzir a durabilidade do reparo pelo aparecimento da corrosão das armaduras, em regiões antes não atacadas.

A retração por secagem é uma propriedade que pode ser determinante do desempenho dos sistemas de reparo, pois havendo retração as fissuras aparecerão como sintoma inicial, o que facilitará a penetração de agentes agressivos para o interior do reparo ou na sua interface com a estrutura original, facilitando o aparecimento de novas macrocélulas de corrosão.

No que diz respeito à aderência da argamassa ao concreto a ser reparado, esta é uma das propriedades primordiais, posto que uma boa ligação entre o substrato e o sistema de reparo reconstitui a monoliticidade da estrutura reparada.

Quanto à resistência à compressão maior ou igual ao concreto, tal critério é básico pois a partir daí tem-se um indicador do desempenho do sistema, já que as outras propriedades podem ser a ela relacionadas; portanto é importante que o reparo tenha uma resistência à compressão sempre maior do que a do concreto a ser reparado.

A resistência à tração é um requisito fundamental, pois é sabido que o concreto não tem um bom desempenho com relação à tração, e se o reparo melhorar esta propriedade pela presença de materiais poliméricos e aditivos químicos na sua composição, pode-se esperar a redução da fissuração, pelo fato da argamassa resistir mais aos esforços de tração.

No que tange à deformabilidade da argamassa, o módulo de elasticidade tem grande influência no desempenho do reparo, pois dependendo do tipo de estrutura que será reparada esta propriedade passa a ser crítica, o que exige perspicácia na sua seleção.

Estas propriedades elencadas sugerem a proposição da Tabela 4.2, abaixo, que contém as propriedades mais importantes das argamassas de reparo.

Tabela 4.2 – Argamassa de reparo, quanto às propriedades intrínsecas mais importantes.

Tipo de Argamassas	Características principais
Base cimento	Aderência / Retração
Modificada com polímeros	Boa aderência / Baixa permeabilidade/ Resistência à compressão / Resistência à flexão
Argamassa e Graute base epóxi	Boa aderência / Baixa permeabilidade
Graute base cimento (Microconcreto)	Boa aderência / Resistência à compressão / Retração
Argamassa base poliéster	Boa aderência / Baixa permeabilidade
Argamassa sem retração	Retração compensada / Altas resistências iniciais

Com base nessas propriedades recomenda-se então a Tabela 4.3, que mostra a classificação das argamassas de reparo em relação às condições de uso e agressividade ambiental.

Tabela 4.3 - Escolha da argamassa de reparo em função das condições de uso e do ambiente agressivo (LEVY & HELENE, 1998).

Tipo de Argamassa	Uso recomendado onde o meio ambiente apresenta	Profundidade do reparo recomendada
Argamassa base cimento modificada com polímeros base acrílica.	Baixa a moderada agressividade, região rural ou urbana.	1,0 a 5,0 cm
Argamassa e graute base epóxi.	Elevada agressividade. Ambientes industriais ou cidades litorâneas.	0,5 a 1,5 cm
Argamassa base poliéster.	Elevada agressividade. Ambientes industriais ou cidades litorâneas.	0,5 a 1,5 cm
Argamassa seca isenta de retração com agregados graúdos.	Baixa a moderada agressividade. Região rural ou urbana.	3,0 a 10,0 cm
Graute base cimento com adição de brita "0" ou pedrisco. (Microconcreto)	Baixa a moderada agressividade. Região rural ou urbana.	> 5 cm

4.5 A normalização estrangeira sobre as argamassas de reparo

Com o avanço do estágio de envelhecimento das estruturas de concreto armado e a necessidade de recuperação dos danos causados pelas manifestações patológicas mais freqüentes, como a corrosão das armaduras, as argamassas de reparo industrializadas surgiram como materiais imprescindíveis na metodologia de recuperação. Por isso mesmo necessitam de normalização, razão pela qual diversos organismos normativos se imbuíram da responsabilidade e produziram as normas que serão a seguir apresentadas.

O Grupo Español del Hormigón (GEHO, 1989) foi um dos primeiros a contribuir para a evolução da tecnologia das argamassas de reparo.

A norma NF P 95-103 (AFNOR, 1993) desenvolveu um trabalho que resume a aplicação dos materiais de reparo, seus usos, vantagens e desvantagens, e que permite concluir que estes materiais têm seu desempenho dependente da situação em que são empregados. A Tabela 4.4 mostra o resumo de produtos, suas vantagens e desvantagens na aplicação.

Tabela 4.4- Vantagens e desvantagens na aplicação dos diversos tipos de materiais de reparo segundo a NF P 95-103 (AFNOR, 1993).

Tipo de Produto	Vantagens	Inconvenientes
Aglomerantes hidráulicos modificados	Facilidade de utilização Aceitam umidade do suporte	Tendência à microfissuração
Betumes	Facilidade de emprego Autocolantes a frio ou a quente	Necessitam sempre de uma proteção do cobrimento Necessitam de um suporte seco Não resistentes à passagem de água (contrapressão)
Acrílicos	Resistentes aos raios ultravioletas Em emulsão aceitam a umidade do suporte	Não resistentes à passagem de água (contrapressão) Propriedades mecânicas médias
Epoxídicos	Aceitam geralmente a umidade do suporte Boa resistência mecânica Média flexibilidade Podem ser utilizados segundo as formulações Em revestimentos armados Em colagens de coberturas Boa resistência química	Bicomponentes Resistência média aos raios ultravioletas
Poliuretanas	Mono ou bicomponentes Flexibilidade extensa	Necessitam de um primer Sensibilidade à umidade Resistência variável aos raios ultravioletas, dependendo natureza do produto

A síntese da Tabela 4.4 mostra a preocupação e a evolução do trabalho normativo da AFNOR (Association Française de Normalisation) para a adequada seleção dos materiais na sua utilização

4.5.1 Métodos de ensaios associados a especificações prescritivas

Conceituam-se normas prescritivas como sendo normas auxiliares que definem propriedades básicas dos materiais. Neste item será apresentado um elenco de normas que prescrevem as características físicas e químicas a ser consideradas e selecionadas pelo projeto de reparo. No anexo C mostra-se um quadro geral do resumo do levantamento dos métodos x propriedades das argamassas de reparo. A seguir são descritos os métodos de ensaio que avaliam as principais características das argamassas de reparo.

- **Ensaio de compressão**

A resistência à compressão é uma das mais importantes propriedades das argamassas de reparo, pois demonstra a capacidade de um material de possuir um estado de consolidação interna, de tal forma que possa resistir a esforços de compressão, a propriedade mais difundida e de mais fácil controle na tecnologia dos materiais à base de cimento Portland. É também uma propriedade indicadora da qualidade da argamassa, por estar diretamente relacionada à estrutura do aglomerante endurecido, ainda que haja limitações quanto à sua adequação para informar sobre as propriedades de transporte das argamassas.

A norma BS 6319: Part 2 (BSI, 1983) descreve procedimentos para a avaliação desta propriedade das argamassas de reparo à base de resina.

Os corpos de prova têm forma cúbica com 40 mm de aresta, para misturas com agregados de diâmetro inferior a 4,75 mm. A cura dos corpos de prova deve ser efetuada em câmara úmida.

A norma ASTM C 349 (ASTM, 1997) criou método para determinar a resistência à compressão em corpos de prova prismáticos de argamassa, com dimensões de 4x4x4 cm, oriundos do ensaio de flexão, cujo procedimento de cura é por imersão em água numa temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$; para a realização do ensaio o corpo de prova deve estar com a superfície seca. No relatório de ensaio devem estar registrados a carga de compressão, o tipo de material usado, a tensão de compressão e a forma de ruptura.

A Figura 4. 3 mostra o detalhe dos corpos de prova para a execução do ensaio de compressão, segundo a ASTM C349 (ASTM, 1997).

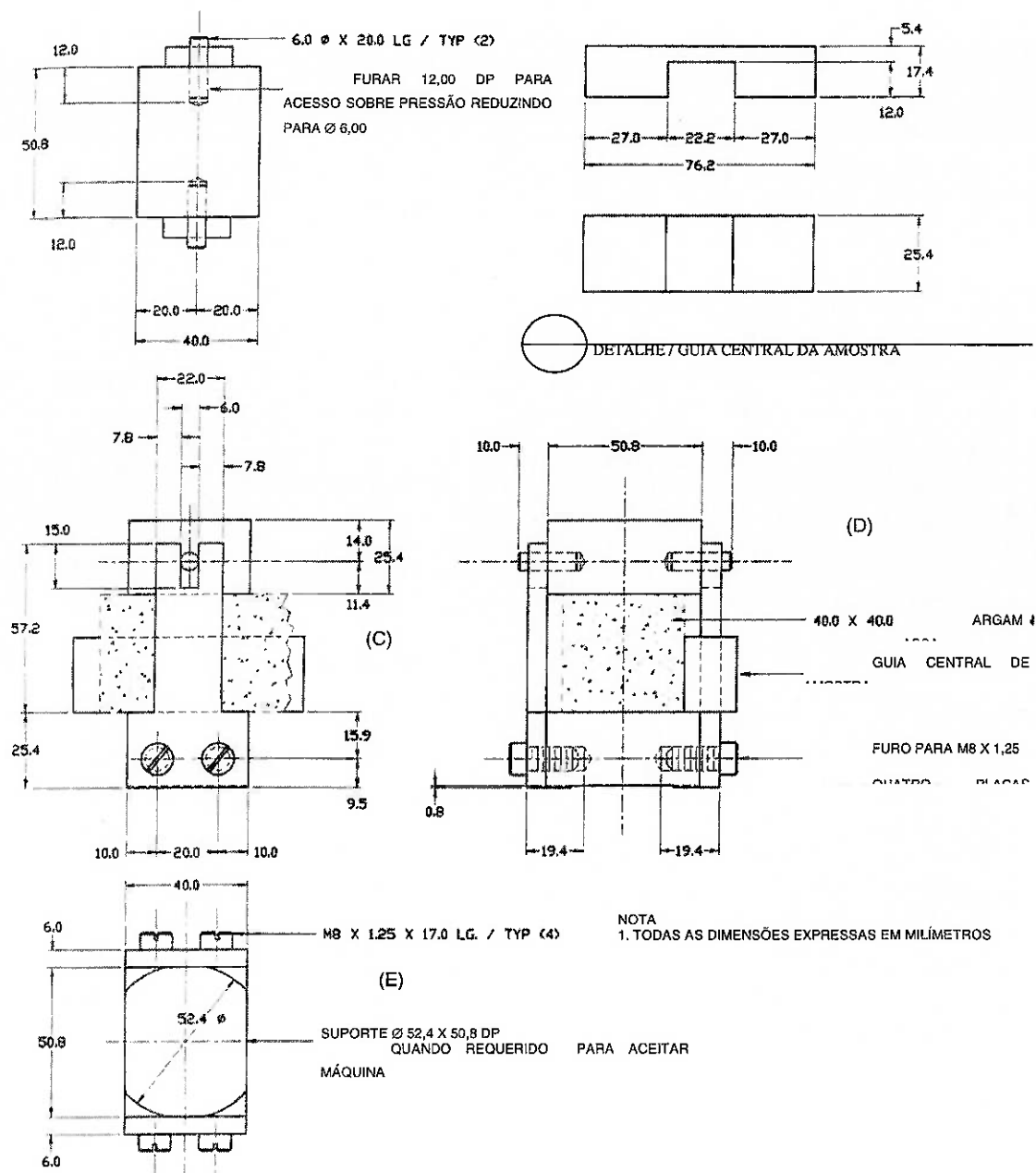


Figura 4.3- Detalhe dos corpos de prova para execução do ensaio de compressão segundo a ASTM C 349 (ASTM,1997).

A norma ASTM C 348-93 (ASTM, 1993) descreve procedimentos para a execução de ensaio de flexão em corpos de prova prismáticos de argamassas de reparo base cimento de dimensões 4x4x16, segundo a descrição do ensaio do item anterior; porções das extremidades destes corpos de prova são utilizados no ensaio de compressão, segundo método ASTM C 349 – 97:

- O ponto de aplicação da carga e os apoios devem ficar em pontos equidistantes;
- A carga será aplicada na posição normal com relação à superfície do corpo de prova;

- A direção das reações será paralela à direção da carga aplicada;
- O ensaio deve ser executado segundo uma taxa de velocidade de carga uniforme.
- Os corpos de prova devem ser curados em ambiente úmido, e retirados da câmara antes da execução do ensaio.

A tensão de flexão será calculada segundo a Equação 4. 5 a seguir:

$$S_f = 2,8 \cdot P$$

Equação 4. 5

Onde :

S_f = Tensão de flexão em KPa, e ;

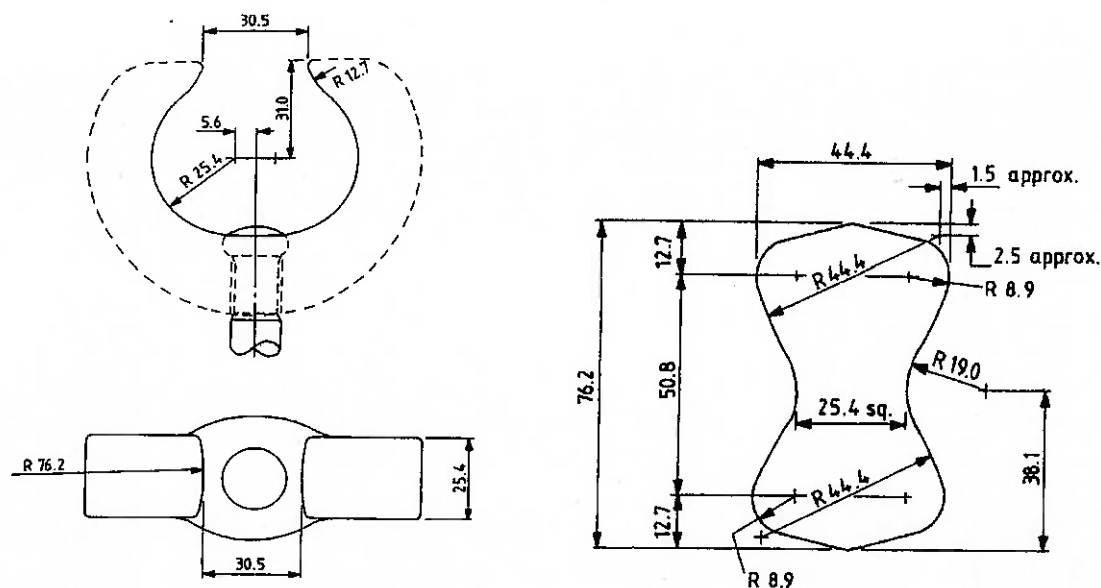
P = Carga máxima em N.

- **Ensaio de tração**

A tração é também propriedade importante para os materiais de reparo, pois está ligada ao estado de fissuração provocada por tensões de tração e relacionada à coesão interna da pasta de cimento endurecida. No momento que se melhora esta propriedade é evidente que o grau de fissuração reduz, e o tempo de vida útil pode se estender, uma vez que a fissura é um caminho por onde os agentes agressivos penetram nas estruturas.

A norma BS 6319: Part 7 (BSI, 1985) descreve o método de ensaio de tração em argamassas à base de resina para trabalho de recuperação. Esta norma apresenta uma metodologia de ensaio para aplicação em materiais de reparo que não contenham materiais fibrosos e nem agregados com dimensão maior do que 3,35 mm, e usa corpos de prova com formato de “8” mostrados na Figura 4.4.

O princípio do ensaio, é submeter os corpos de prova, com dimensões constantes da Figura 4.4, a uma força de tração até que o mesmo rompa. A cura dos corpos de prova se processa em câmara úmida até a idade da ruptura. No relatório devem constar além da resistência á tração, a forma de ruptura e a idade de ensaio.



Nota: Dimensões em milímetros.

Figura 4.4- Equipamento e dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração da norma BS 6319 : Part 7 (BSI, 1985).

• Ensaio de absorção

Esta propriedade é também determinada através do método ASTM C 97 (ASTM, 1996), que se utiliza corpos de prova de forma cúbica, prismática, cilíndrica ou qualquer outra forma regular em que a menor dimensão não exceda 50,8 mm e nem a maior dimensão ultrapasse 76,2 mm.

O resultado será obtido através da Equação 4. 6:

$$\text{Absorção, massa \%} = \left[\frac{(B - A)}{A} \right] \times 100 \quad \text{Equação 4. 6}$$

Onde:

A = massa do corpo de prova seco,

B = massa do corpo de prova após a imersão.

• Ensaio de módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é outra propriedade importante dos sistemas de reparo, pois demonstra a capacidade de deformação do sistema. É fato comprovado que quando o reparo é submetido a esforços externos constantes a deformação cresce com o tempo, ou

seja, a argamassa de reparo tende a fluir. Esta fluência depende portanto do módulo de elasticidade, razão pela qual é importante a capacidade de deformação.

A norma inglesa BS 6319 : Part 6 (BSI, 1984) estabelece uma metodologia de ensaio que permite determinar o módulo de elasticidade das argamassas de reparo. O princípio básico deste ensaio, é submeter um prisma retangular, cuja relação entre dimensões seja de 4:1, a uma carga de compressão e controlar a deformação por este esforço de compressão. O corpo de prova têm as dimensões de 40x40x160 mm, no qual são acoplados 2 *strain gauges* centralizados e dispostos sobre o eixo para realizar as determinações das deformações provocadas pelo plano de carga estabelecido; Daí se calculam os módulos secante ou tangente, dependendo da necessidade. Os corpos de prova são curados em câmara úmida até a idade de ruptura.

4.5.2 Métodos de ensaio associados a especificações de desempenho

- **Ensaio de flexão**

Embora as estruturas de concreto não sejam projetadas para resistir diretamente à flexão, o conhecimento desta propriedade é importante para a estimativa de carga sob a qual ocorrerá a fissuração. A ausência de fissuração é um requisito importante na durabilidade das argamassas de reparo.

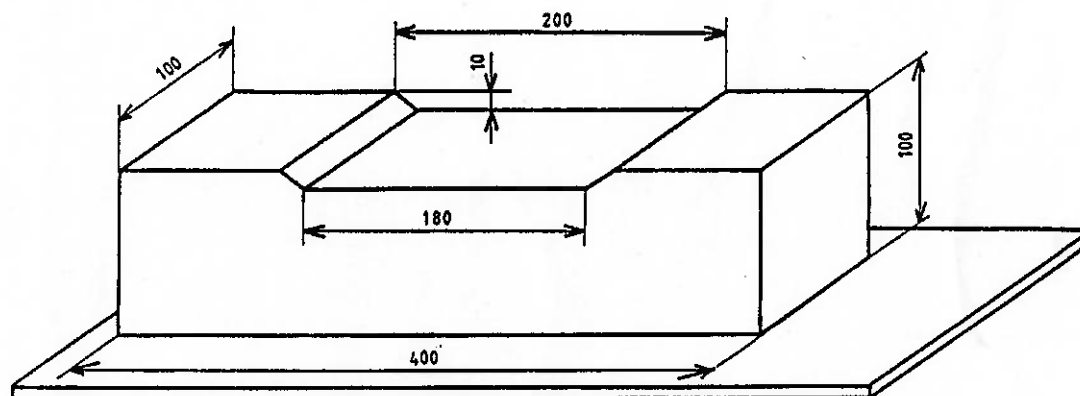
A norma NF P 18-851 (AFNOR, 1992) estabelece procedimentos para a realização de ensaios de flexão aplicados a produtos ou sistemas industrializados à base de aglomerantes hidráulicos ou resinas sintéticas, destinados ao reparo superficial de concretos submetidos a solicitações tangenciais de contato.

Os corpos de prova usados no ensaio são prismáticos, e o procedimento consiste na aplicação do produto ou sistema de produtos sobre uma das faces dos corpos de prova prismáticos de concreto, segundo a Figura 4.5, e submete-se o mesmo após ser reconstituído à um ensaio de flexão sob carga constante, em vão de 400 mm e com apoios distantes 300 mm entre si. A carga é aplicada no centro, em dois pontos distantes 100 mm um do outro.

O ensaio deve identificar a resistência à flexão, uma das propriedades mais importantes dos sistemas de reparo, pois define a capacidade de deformação do componente quando submetido a um esforço de tração na flexão, bem como mostra a eficiência da adesão entre os materiais componentes do sistema de reparo e, ainda, a

forma de ruptura. A cura dos corpos de prova deve ser em câmara úmida até a data de ruptura.

Mostra-se na Figura 4.5 corpo de prova para ensaio segundo a NF P 18-851 (AFNOR, 1992).



Nota: dimensões em milímetros.

Figura 4.5 - Corpo do prova para ensaio segundo a NF P 18-851 (AFNOR, 1992), que estabelece ensaios de flexão sobre corpos de prova reconstituídos.

- **Ensaio de aderência**

Há um número muito grande de métodos de avaliação das resistências de aderência, uma das propriedades mais importantes nos materiais de reparo, posto que o bom desempenho do sistema depende do desenvolvimento de uma grande adesão entre o reparo e o substrato, pela ligação existente entre as agulhas formadas pelo aglomerante e a porosidade do substrato, e muitas vezes também pela ação adesiva de materiais poliméricos existentes na composição das argamassas.

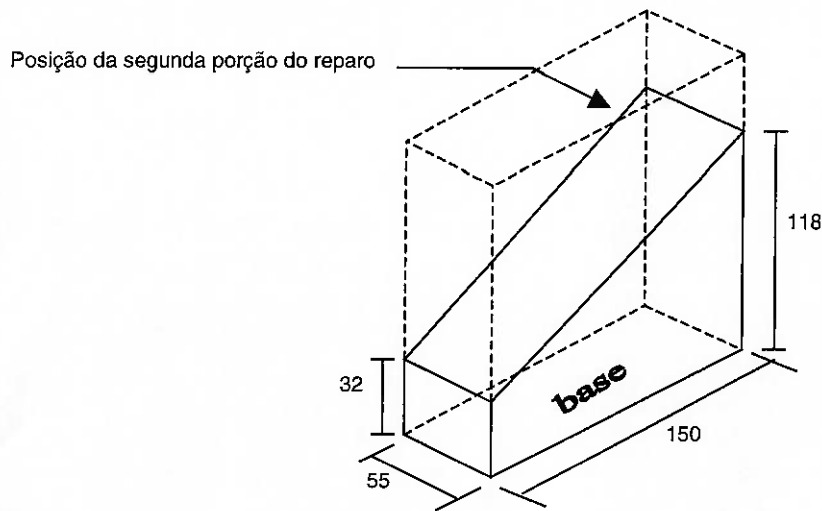
- **Ensaio de aderência ao cisalhamento por compressão**

A norma BS 6319: Part 4 (BSI, 1984) tem como finalidade a avaliação da resistência de aderência das argamassas de reparo à base de resina, submetidas a esforço de compressão.

Os corpos de prova usados no ensaio são prismáticos, e possuem uma junta entre os dois materiais, formando um ângulo de 30° com o eixo principal do corpo de prova.

São usados 4 (quatro) corpos de prova por argamassa, comparados à argamassa de referência.

A Figura 4. 6 mostra o detalhe e dimensões dos corpos de prova para o ensaio:



Nota: Dimensões em milímetros

Figura 4. 6 - Detalhe dos corpos de prova do ensaio de aderência segundo a norma BS 6319: Part 4 (BSI, 1984).

- **Ensaio de aderência à tração perpendicular à superfície de contato**

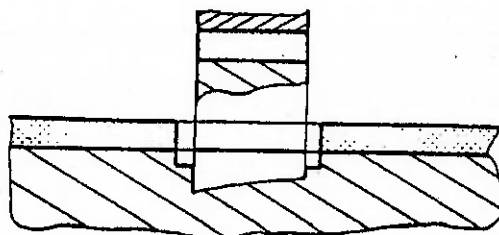
A norma NF P 18-858 (AFNOR, 1988) tem como objetivo definir as condições do ensaio de aderência de um produto ou sistema de produtos que se destinam a aplicações superficiais sobre concreto endurecido, submetidos a esforços de tração perpendiculares à superfície de contato. É aplicada aos produtos à base de aglomerantes hidráulicos ou resinas sintéticas, em cuja formulação não existam agregados com dimensão superior a 5 mm. Estes ensaios são realizados sobre sistemas com superfícies úmidas e superfície secas, sendo que os sistemas à base de resinas sintéticas podem ser aplicados de ambas as formas, enquanto que os produtos à base de aglomerantes hidráulicos são usados unicamente sobre superfícies úmidas.

O princípio do ensaio consiste na aplicação de uma camada de 1 cm do produto ou sistema de produtos sobre uma base de concreto com superfície normal; após o endurecimento, procede-se o arrancamento por tração direta de elementos cilíndricos do produto. A Figura 4. 7 mostra os tipos de ruptura dos corpos de prova e a Figura 4.8 mostra o equipamento usado no ensaio.

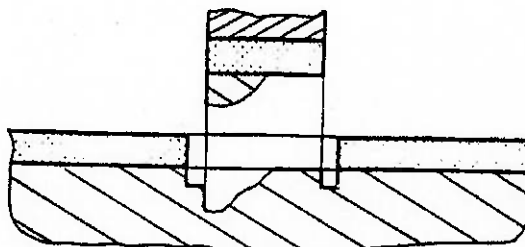
Os corpos de prova são retirados de uma placa de 30 x 30 x 10 cm; sobre ela serão fixadas pastilhas cilíndricas nas idades especificadas, depois realiza-se o arrancamento. Os corpos de prova devem ser curados sob água, e os cortes dos cilindros devem ser realizados entre os 14 e 21 dias de idade; depois continuam a ser curados até os 90 dias, pelo menos. O esforço de tração deve ser aplicado progressivamente a uma velocidade constante de 1,5 mm/minuto. O relatório do resultado deve registrar além das resistências, também o tipo de ruptura apresentada pelos corpos de prova.

Ruptura tipo 1

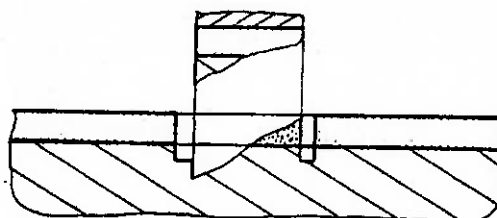
Total no concreto

**Ruptura tipo 2**

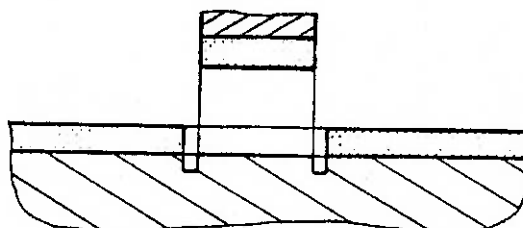
No concreto com descolamento da parte recuperada

**Ruptura tipo 2b**

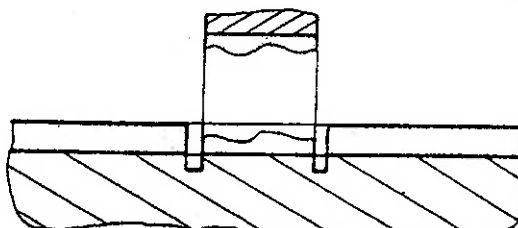
No concreto e parte recuperada

**Ruptura tipo 3**

Descolamento da parte recuperada

**Ruptura tipo 4a**

Ruptura na parte recuperada

**Ruptura tipo 4b**

Ruptura na parte recuperada, com descolamento parcial da parte recuperada

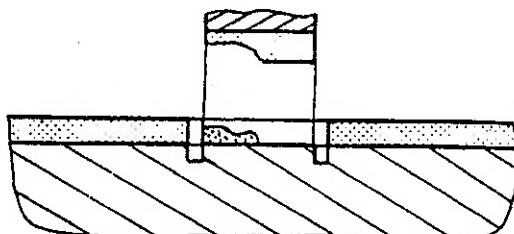


Figura 4. 7 - Tipos de ruptura dos corpos de prova no ensaio de aderência segundo NF P18-858 (AFNOR, 1988).

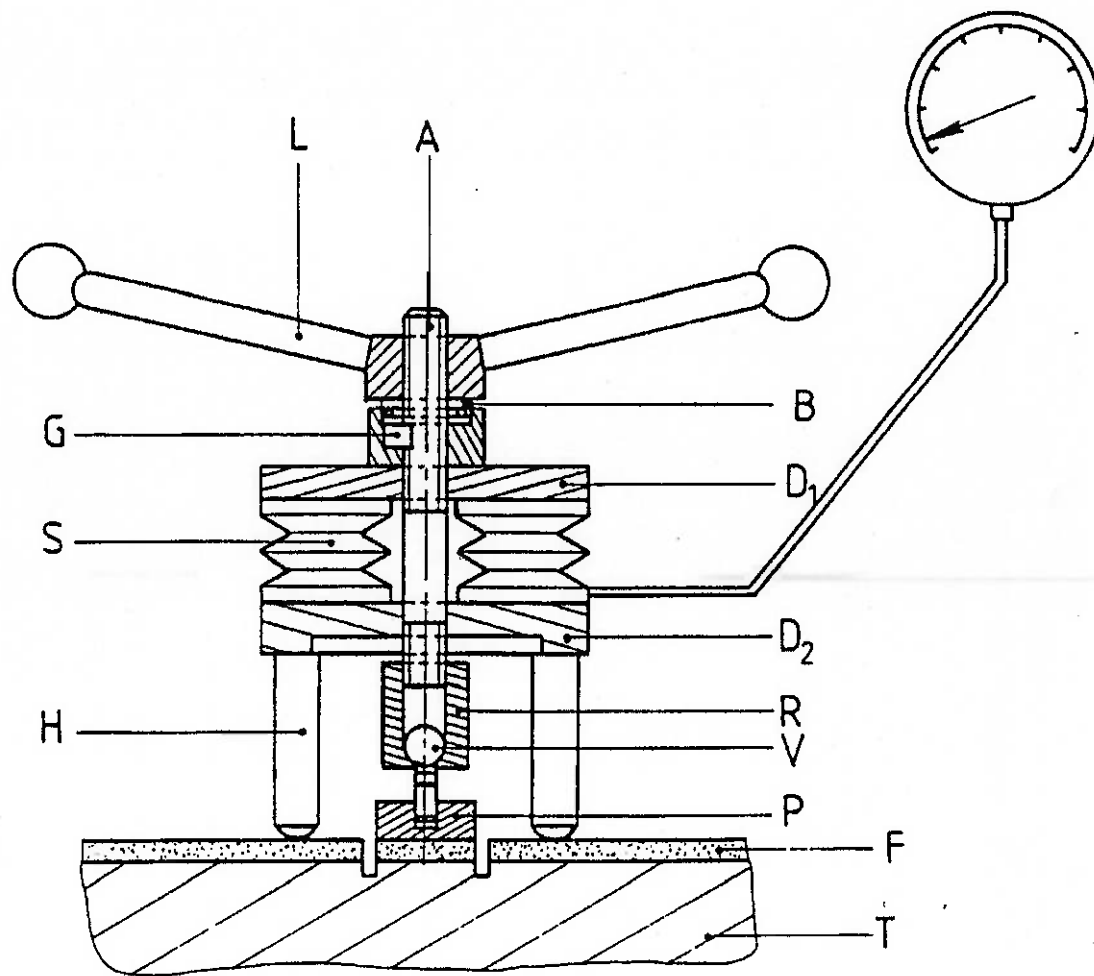


Figura 4.8 - Equipamento e corpos de prova do ensaio de aderência segundo NF P 18-858 (AFNOR, 1988).

- **Ensaio de aderência à tração perpendicular a superfície de contato submetida a ciclos de temperatura**

A norma NF P 18-853 (AFNOR, 1986) tem como objetivo definir as condições de ensaio de aderência de um produto ou sistema de produtos destinados a aplicações superficiais sobre concreto endurecido, após variações cíclicas de temperatura, com solicitações de tração perpendiculares à superfície de contato.

Esta norma se aplica aos produtos à base de aglomerantes hidráulicos ou de resinas sintéticas compostas com agregados com dimensão máxima igual ou inferior a 5 mm, e que possam ser aplicados sobre superfícies úmidas e secas.

O ensaio consiste em aplicar uma camada de 1 cm de espessura do produto sobre uma superfície de concreto, após o endurecimento submeter a variações cíclicas de temperatura, e após isto arrancar por tração direta os elementos cilíndricos do produto. Os corpos de prova devem ficar expostos a ciclos térmicos, como mostra a Figura 4.9, e os ensaios devem ser realizados segundo indicações da norma NF T 51 – 181.

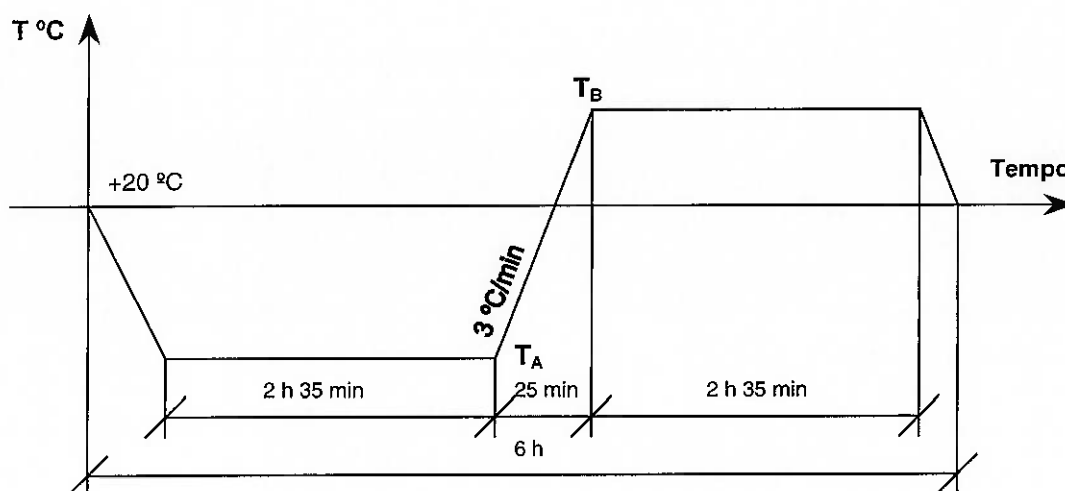


Figura 4.9 - Ciclos térmicos segundo NF P 18-853 (1986), para ensaio de tração.

Os ensaios são realizados por equipamentos e corpos de prova constantes da norma NF P 18-852 (AFNOR, 1986).

- **Ensaio de aderência à tração perpendicular à superfície de contato sobre superfície úmida**

A norma NF P 18-858 (AFNOR, 1988) tem por objetivo definir as condições de ensaio de aderência de um produto ou sistema de produtos destinados à aplicação sobre concreto endurecido, em solicitações de tração perpendiculares à superfície de contato.

É aplicada a produtos à base de aglomerantes hidráulicos, cuja formulação possua agregados com dimensão máxima igual ou inferior a 5mm, usados em reparos em superfícies úmidas.

O princípio do ensaio consiste em aplicar uma camada de 1 cm do produto sobre a superfície do concreto e, após o endurecimento, extrair por tração direta os elementos

cilíndricos do produto. A execução do ensaio obedece ao equipamento e corpos de prova constantes da norma NF P 18-852 (AFNOR, 1988).

5 ESPECIFICAÇÕES

5.1 De Comportamento em uso

As dificuldades na seleção de argamassas de reparo advêm da ausência de critérios de desempenho estabelecidos para utilização na tecnologia de reparo (EMMONS & VAYSBURD, 2000).

Segundo estes autores, a reduzida resistência à tração dos materiais à base de cimento, sua baixa deformabilidade e a tensão induzida pela restrição e a retração por secagem provocam o aparecimento de fissuras na estrutura reparada. Os mesmos afirmam ainda que a compatibilidade dimensional e a habilitação de um material de reparo para se opôr à fissuração dependem das seguintes situações:

Grau de restrição;

Magnitude da retração devido à secagem e a efeitos térmicos;

Quantidade de resistência aliviada devido ao *creep*;

Tensão de tração do material.

Os pesquisadores também afirmam que um reparo, para ser durável e resistente à fissuração, tem que possuir valores de retração por secagem, coeficiente de expansão térmica, módulo de elasticidade tão pequeno quanto possível e tensão de tração e *creep* tão elevados quanto possível. Esta abordagem sobre a retração por secagem induziu os pesquisadores a desenvolver para a retração por secagem uma especificação apresentada na Tabela 5. 1 – Taxas de retração para todos os tipos de reparo (EMMONS & VAYSBURD, 2000).

Tabela 5.1 – Taxas de retração para todos os tipos de reparo (EMMONS & VAYSBURD, 2000).

Taxas	Resultado dos ensaios %
1	$\geq 0,225$
2	0,200 a 0,224
3	0,175 a 0,199
4	0,150 a 0,174
5	0,125 a 0,149
6	0,100 a 0,124
7	0,075 a 0,099
8	0,050 a 0,074
9	0,025 a 0,049
10	$\leq 0,024$

Com base no resultado da pesquisa, critérios de desempenho preliminares foram propostos pelos pesquisadores, e constam da Tabela 5.2. Estes critérios são aplicados para reparos em superfícies de material com base cimento, submetidos a ambiente e carga normais. Não se aplicam às condições especiais, como reparo sob água, ou a tipos especiais de carregamento. Não é considerado o efeito do *creep* no desempenho do reparo.

Tabela 5.2 – Critério de desempenho preliminar (EMMONS & VAYSBURD, 2000).

Propriedades	Método de ensaio	Requisitos	
Tensão de tração mínima aos 7 dias	ASTM C78 (ASTM, 1994 C)	2,0 MPa	300 psi
Tensão de tração mínima 28 dias	ASTM C496 (ASTM, 1994 J)	2,75 MPa	400 psi
Módulo de elasticidade máximo	ASTM C469 (ASTM, 1994 H)	25 GPa	3600 psi
Retração por secagem máxima aos 28 dias	ASTM C157 (modificada) (ASTM, 1994 E)	0,04 %	-
Fissuração aos 28 dias	Anel de Coutinho	0	-
	Ângulo alemão	0	-
	Indicador de mudança de volume (SPS ensaio Plate)	0	-
Coefficiente de expansão térmica máxima	CRD - C 39-81	$11,7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$6,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$

5.2 Prescritivas (de Caracterização)

O GEHO (1989), após um trabalho de caracterização das argamassas de reparo européias, sugeriu as especificações e limites das propriedades das argamassas de reparo, que constam da Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Propriedades características das argamassas e concretos de reparo mais utilizados (GEHO, 1989).

Propriedades	Concretos e Argamassas a base de cimento	Sistemas à base de cimento-polímeros	Concretos e argamassas executadas à base de resinas epóxi	Concretos e argamassas executadas a base de poliéster
Resistência à compressão (MPa)	20 - 70	10 - 60	55 - 110	55 - 110
Módulo de elasticidade (GPa)	20 - 30	1 - 30	0.5 - 20	2 - 10
Resistência à flexão (MPa)	2 - 5	6 - 15	9 - 29	8 - 17
Resistência à tração (MPa)	1.5 - 3.5	2 - 8	9 - 29	8 - 17
Alongamento de ruptura (%)	0	0 - 5	0 - 15	0 - 2
Coefficiente de dilatação linear (por °C)	$7 - 22 \times 10^{-6}$	$8 - 20 \times 10^{-6}$	$25 - 30 \times 10^{-6}$	$25 - 30 \times 10^{-6}$
Absorção de água 7 dias a 25 °C (%)	5 - 15	0.1 - 0.5	0 - 1	0.2 - 0.5
Temperatura máxima de uso sob carga (°C)	Acima de 300 °C depende da dosagem	100 - 300	40 - 80	50 - 80
Tempo de desenvolvimento de resistência a 20 °C	1 a 4 dias	1 - 7 dias	6 - 48 horas	2 - 6 horas

Ainda dentro deste contexto, os pesquisadores EMMONS, VAYSBURD et al, (2000) levantaram os dados contendo especificações técnicas para argamassas de reparo constantes da Tabela 5.4, desenvolvida pela Hong Kong Housing Authority (HKHA, 2000).

As argamassas de reparo foram agrupadas em três áreas distintas, abaixo discriminadas:

- Características mecânicas: compressão, flexão, tração, aderência e módulo de elasticidade;
- Permeabilidade;
- Retração por secagem.

Tabela 5.4 – Especificações técnicas para argamassas de reparo (EMMONS, VAYSBURD, 2000).

Características das argamassas de reparo		Materiais de reparo		
Características		Classe 40	Classe 25	Classe 15
TM1	Faixa de resistência à compressão aos 28 dias em MPa (psi aproximado)	30 a 60 (4400 à 8700)	20 a 40 (2900 à 5800)	10 a 30 (1500 à 4400)
TM3	Tensão de tração mínima aos 7 dias em MPa (psi aproximado)	2,0 (300)	1,5 (220)	1,0 (150)
TM4	Faixa de módulo de elasticidade aos 28 dias em KN/mm ² GPa (psi aproximado)	15 a 25 (2200 à 3600)	9 a 15 (1300 à 2200)	5 a 9 (700 à 1300)
TM5	Tensão de aderência mínima aos 7 dias em MPa (psi aproximado)	2,0 (300)	1,5 (220)	1,0 (150)
TM6	Fissuração no ensaio do anel de Coutinho aos 7 dias	0	0	0
TM7	Permeabilidade ao ar mínima em segundos	200	150	100

A retração é uma propriedade muito importante na durabilidade das argamassas de reparo, tanto que os pesquisadores resumiram um conjunto de métodos de ensaio para avaliação da retração livre, constante da Tabela 5.5 abaixo:

Tabela 5.5 – Métodos de ensaios padronizados para avaliação da retração livre (EMMONS, VAYSBURD, 2000).

País	Norma/ especificação	Dimensões do prisma		Condições especificadas
		mm	pol	
Estados Unidos	ASTM C 157	25,0 x 25,0 x 285,0	1,0 x 1,0 x 11,0	23 °C (73 F), UR 50%
Reino Unido	BS 1881, Part 5 – 1970	75,0 x 75,0 x 310,0	3,0 x 3,0 x 12,0	Esta norma não relata deformação por secagem. Entretanto, as condições de ensaio não são incluídas
Canadá (Alberta Transportation & Utilites)	ATU B-391	25,0 x 25,0 x 285,0	1,0 x 1,0 x 11,0	Cura inicial por 24 h. por recomendação do fabricante. Após cura inicial: 23 °C (73 °F), UR 50%
Austrália	AS 1012 Part 3 – 1970	75,0 x 75,0 x 310,0	3,0 x 3,0 x 12,0	23 °C (73 F), UR 50%
Alemanha	DIN 52450 – 1985	37,5 x 37,5 x 155,0	1,5 x 1,5 x 6,0	Várias: 20 °C (68 F), UR 50% 23 °C (73 F), UR 50% 23 °C (73 F), UR 45% 20 °C (68 F), UR 95% 20 °C (68 F), seco
Hong Kong	HKHA	25,0 x 25,0 x 285,0	1,0 x 1,0 x 11,0	25 °C (81 F), UR 55%

A norma francesa NF P 18 – 870 (AFNOR, 1993) avançou e estabeleceu níveis de características mecânicas de produtos ou sistemas de produtos à base de resinas sintéticas ou de aglomerantes hidráulicos para reparo estrutural entre dois elementos de concreto que podem já estar endurecidos, ou um no estado endurecido e outro no estado fresco. Uma das características normalizadas para todos os produtos de colagem estrutural entre dois elementos de concreto endurecido, ou entre um elemento de concreto fresco e um endurecido, é a resistência à tração direta, avaliada pela norma NF P 18-871. Esta característica define duas classes, a saber:

- Classe 1 \geq 2 MPa ;
- Classe 2 \geq 3,5 MPa.

Estas classes variam com as seguintes situações:

- a) A família de produtos:

- à base resinas sintéticas:
 - à base aglomerantes hidráulicos:
- b) A natureza do suporte : seco ou úmido
- c) A posição do suporte : vertical ou horizontal.

Tais especificações estão resumidas na Tabela 5.6 que estabelece as características e os principais requisitos de acordo com esta norma.

Tabela 5.6 – Características do material segundo NF P 18-870 (AFNOR, 1993).

Especificação	Requisito de desempenho e norma de ensaio			
	Resistência à tração direta		Resistência ao cisalhamento por compressão	
	Critério	Norma de ensaio	Critério	Norma de ensaio
NF P 18-870	Classe 1 ≥ 2 MPa Classe 2 $\geq 3,5$ MPa	NF P 18-871	Classe 1 ≥ 25000 DaN classe 2 ≥ 45000 DaN	NF P 18-872

As normas que constituem estas especificações estão abaixo relacionadas:

- a) NF P 18 – 870 – (Outubro 1993) – produtos especiais destinados a construções em concreto de aglomerante hidráulico – Produtos ou sistemas de produtos à base de resinas sintéticas ou de aglomerantes hidráulicos para colagem estrutural entre dois elementos em concreto.
- b) NF P 18 – 871 – Produtos especiais destinados a construções em concreto hidráulico – Produtos para colagem estrutural entre dois elementos em concreto com superfície de aplicação horizontal. Ensaio de tração direta sobre cilindro serrado e reconstituído;
- c) NF P 18 – 872 – Produtos especiais destinados a construções em concreto hidráulico. – Produtos para colagem estrutural entre dois elementos em concreto com superfície de aplicação horizontal – Ensaio de compressão-cisalhamento em prisma serrado e reconstituído.

- d) NF P 18 – 873 – Produtos especiais destinados a construções em concreto hidráulico
- Produtos à base de resinas sintéticas para colagem estrutural entre dois elementos –
Ensaio de aderência sobre superfície vertical.

Este autor, considerando o levantamento destas especificações, tanto prescritivas como de comportamento em uso, existentes na bibliografia internacional, sugere que estes limites sirvam como balizamento e contribuição para a normalização das argamassas de reparo industrializadas brasileiras, posto que suas fontes são extremamente confiáveis.

5.3 Discussão das especificações

No contexto das especificações, existe uma diversidade de critérios, cada instituição ou pesquisador adotando uma postura relativa a determinados requisitos.

EMMONS & VAYSBURD, por exemplo, afirmam que um reparo, para ter durabilidade e resistência à fissuração, tem que possuir valores de retração por secagem, coeficiente de expansão térmica, módulo de elasticidade tão pequeno e tensão de tração e *creep* tão elevados quanto possível.

A AFNOR estabeleceu características, requisitos e critérios de desempenho com base na resistência à tração direta e na compressão por cisalhamento. Esta norma classificou os materiais de reparo em duas classes, baseadas nas resistências mínimas das características comentadas acima.

A HONG KONG HOUSING AUTHORITY, citada por EMMONS & VAYSBURD (2000), definiu uma tabela contendo especificações sobre os materiais de reparo, e também estabelecendo limites para as propriedades de compressão, tração, módulo de elasticidade, aderência, fissuração e permeabilidade dentro das três (3) classes estabelecidas pela HKHA para estes materiais.

Já o GEHO estabeleceu especificações prescritivas para as argamassas mais usadas na Europa, dentro de cada classe de aglomerante usado na formulação. Verifica-se que para cada propriedade estabelecida existe uma faixa de valores para aceitação do material, dependendo da sua formulação.

O que se observa é que não existe um consenso na definição das propriedades e nos critérios de avaliação do comportamento do sistema de reparo em uso. É claro que estas especificações dependem do tipo de estrutura, do ambiente e das condições de

desempenho críticas que revestem o sistema de reparo. Entretanto, se faz necessário e urgente uniformizar ou balizar estas especificações, requisitos e critérios, por meio de uma normalização que venha a preencher uma lacuna existente no âmbito dos usuários dos materiais de reparo.

5.4 Controle de Qualidade

Neste item objetiva-se estabelecer de forma sintética, uma recomendação para implementação de procedimentos para um programa de controle de qualidade das argamassas para reparo de estruturas de concreto.

Este procedimento pode ser utilizado tanto para argamassas industrializadas como para aquelas fabricadas na obra, quaisquer que sejam os volumes produzidos, e as propriedades especificadas no projeto de reparo

Apresenta-se a seguir os métodos de ensaios que fazem parte dos procedimentos de controle de avaliação das propriedades das argamassas para reparo na obra:

- Perda de consistência – ASTM C 230/90;
- Massa específica – NBR-9778/87;
- Resistência à compressão – ASTM C 349/98;
- Resistência à flexão – ASTM C 348/97;
- Módulo de elasticidade – BS 6319: Part 6/84.

- *Argamassas industrializadas*

Para as argamassas industrializadas a formação dos lotes para controle, deve seguir o roteiro seguinte:

- Formação dos lotes

Cada lote deve conter no máximo 5 T de argamassa, para o caso da produção e aplicação mecânica, não podendo este lote ultrapassar o período de tempo igual a 5 dias de trabalho.

- Amostragem

A cada lote de argamassa produzida e aplicada deve ser representado por uma amostra formada por um exemplar composto por pelo menos 6 corpos de prova prismáticos com dimensões 4x4x16 cm, extraídos da mesma amassada, antecedido pelo ensaio de consistência, para serem avaliados em cada propriedade especificada, nas idades de 7, 28 dias.

A amostra deve ser coletada de uma betonada escolhida aleatoriamente, cujo manuseio e operações de mistura sejam efetuadas pela mesma equipe e mesmo equipamento, para que os corpos de prova moldados sejam representativos de cada lote.

Deve-se identificar as amostras com a denominação das peças recuperadas, ou seja, pilares, vigas ou lajes de uma determinada área da estrutura que foi submetida à intervenção, data, hora da moldagem e todas as informações referentes ao material usado.

- Argamassas produzidas na obra

Para as argamassas produzidas na obra, a formação dos lotes para controle deve-se seguir o roteiro seguinte:

- Formação do lote

Cada lote deve ser composto por 5 m³ de argamassa preparada para aplicação na área à recuperar, não podendo este lote ultrapassar o período de tempo igual a 5 dias de trabalho.

- Amostragem

A cada lote de argamassa produzida e aplicada, deve ser representada por uma amostra formada por um exemplar composto por pelo menos 6 corpos de prova prismáticos com dimensões 4x4x16 cm, extraídos da mesma amassada, antecedido pelo ensaio de consistência, para serem avaliados em cada propriedade especificada, nas idades de 7 e 28 dias.

A amostra deve ser coletada de uma betonada escolhida aleatoriamente, cujo manuseio e operações de mistura sejam efetuadas pela mesma equipe e mesmo equipamento, para que os corpos de prova moldados sejam representativos de cada lote.

Deve-se identificar as amostras com a denominação das peças recuperadas, ou seja, pilares, vigas ou lajes de uma determinada área da estrutura, data, hora, traço usado relação a/c e todas as informações sobre a composição da mistura.

CONCLUSÕES

Conclusões propriamente ditas

Atualmente a comunidade técnica internacional está se preocupando em avaliar os níveis de desempenho dos sistemas de reparo constituídos por argamassas repassivantes de recuperação estrutural, para garantir que as obras reparadas tenham indubitavelmente maior tempo de vida útil e, por conseguinte maior durabilidade: as conseqüências serão a estabilidade, a monoliticidade, estética e a economia dos sistemas construtivos recuperados.

Tal preocupação é tão incontestável que mesmo as normas internacionais formaram comitês especiais para estudar o assunto e, ainda mais, criaram definições, conceitos, requisitos de desempenho, requisitos para durabilidade e critérios de desempenho para os diversos materiais e componentes de sistemas construtivos. Exemplo disso é a possibilidade de realização de uma análise comparativa entre o trabalho de duas instituições normativas internacionais, a ASTM E632 e a BS 7543, em que, com a acuidade devida, nota-se que a abordagem é a mesma, muito embora o enfoque seja diferente. Em ambos os casos as definições e conceitos sobre desempenho, vida útil, durabilidade, previsões, ações e efeitos são coerentes.

O grande problema, no entanto, é conhecer todas as propriedades e requisitos de desempenho das argamassas de reparo, dentro de um determinado ambiente, pois estas propriedades têm especificidades para cada tipo de região, e não se pode generalizar a aplicação desses materiais para todos os tipos de recuperação, o que pode acarretar redução da vida útil da estrutura recuperada.

O tempo de vida útil de um elemento ou material depende fundamentalmente da qualidade do concreto, para que não se deteriore precocemente; entre os parâmetros que definem qualidade e durabilidade, o mais importante é a relação a/c. O que se precisa avaliar é o seu comportamento ao longo do tempo sob determinada exposição ambiental em uma estação de envelhecimento natural, pois nem sempre os ensaios acelerados espelham a realidade do grau de agressividade do meio ambiente a que a argamassa ficará exposta. O que deve ser levado em conta é que o Brasil é um país de dimensões

continentais, portanto com regiões e microclima totalmente diferentes, e como consequência o grau de exposição também vai diferir; é óbvia a necessidade da execução de ensaios regionalizados ou a simulação dos diversos climas que caracterizam o país.

Para lograr-se êxito nos projetos de recuperação é muito importante que a especificação dos materiais envolvidos no contexto satisfaça às necessidades da estrutura a ser recuperada, levando-se em conta o ambiente a que ela está submetida, os agentes de intemperismo, os agentes de carga, os agentes cíclicos, como molhagem e secagem, e também as cargas cíclicas. Levantados estes problemas parte-se então para a especificação dos materiais e dos procedimentos para o trabalho de reparo, considerando-se que o sistema de reparo, venha a satisfazer as necessidades de desempenho e durabilidade da estrutura recuperada. E é necessário que se mantenham as propriedades das argamassas ao longo do tempo, o que depende de alguns parâmetros, tais como:

- composição e tipo dos materiais empregados;
- proporção das misturas;
- métodos de ensaios.

Tais parâmetros devem ser definidos após o levantamento da situação em que se encontra a estrutura deteriorada.

Tendo em vista estas conjecturas, urge que sejam estudados e desenvolvidos ensaios acelerados para argamassas de reparo, que simulem as condições ambientais e dos agentes de degradação, e mais, que estes ensaios venham a refletir os resultados das argamassas em condições adversas nas diversas regiões do país, pois alguns materiais se comportam bem em alguns ambientes e de forma antagônica em outros. Vale a pena sugerir também que se estabeleçam métodos de ensaios de ciclagem para as argamassas de reparo, como por exemplo:

- exposição ao ar;
- exposição ao CO₂;
- molhagem/secagem;
- exposição à umidade relativa;

- ciclos de variação de temperatura.

Este é um programa sugerido para a verificação do comportamento da argamassa às exposições cíclicas. Entretanto, é necessário que se conheça o comportamento da argamassa de reparo ao longo do tempo, razão pela qual devem ser criadas estações de envelhecimento natural em várias regiões do país, para que se tenha realmente a noção exata do comportamento em uso do material em cada região.

Tendo-se atingido o objetivo desta dissertação, pela pesquisa realizada e discussão procedida no capítulo 5, chega-se a concluir e a sugerir que as argamassas de reparo de uma forma mais abrangente, têm que possuir os níveis mínimos mostrados a seguir para as suas propriedades mais importantes:

- resistência à compressão – 10,0 MPa;
- resistência à flexão – 2,0 MPa;
- resistência à tração – 1,0 MPa;
- módulo de elasticidade – 5,0 GPa;
- coeficiente de expansão térmica – $7 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;
- absorção de água (%) massa – 0,1;
- temperatura máxima de serviço – 40°C;

Este trabalho além de ser uma pesquisa sobre o estado da arte dos materiais de reparo, é também uma contribuição à normalização nacional das argamassas de reparo, pelo levantamento da normalização e metodologias de ensaio aplicadas às argamassas estrangeiras, e ainda por apresentar terminologias e especificações usadas em outros países e que podem ser adequadas aos nossos sistemas de reparo.

Transferência ao Meio

É muito importante que haja projetos e procedimentos executivos coerentes para se lograr êxito no sistema de reparo, e por isso deve-se difundir este trabalho como contribuição a melhoria das reabilitações estruturais no país. Desta forma, a divulgação ao meio se dará através da difusão desta dissertação em palestras em instituições de ensino, institutos de pesquisa, empresas consultoras que elaboram projetos de reparo,

organismos de classe para ampliar os conhecimentos no âmbito da comunidade técnica e, finalmente em congressos de patologias e tecnologia de estruturas de concreto.

Continuidade das Pesquisas

Este trabalho é uma forma embrionária do estudo da metodologia de ensaios para a avaliação dos materiais de reparo e sua normalização, bem como o controle da qualidade dos sistemas de reparo. São sugeridas, portanto, como continuação da pesquisa as fases a seguir:

- estudo do desempenho dos sistemas de reparo;
- determinação das propriedades das argamassas de reparo produzidas no Brasil;
- procedimentos para a determinação de reparo compatível às necessidades do usuário, com maior tempo de vida útil.

ANEXO A -
NORMA ASTM E 632

NORMA DE PROCEDIMENTOS PARA DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS ACELERADOS PARA PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ELEMENTOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.

1 OBJETIVO

1.1 Esta norma abrange as etapas que devem ser seguidas para o desenvolvimento de ensaios acelerados para a previsão da vida útil de elementos e materiais de construção. Embora análises matemáticas sejam necessárias para a previsão da vida útil, não são descritas em detalhes, e tanto análises determinísticas quanto probabilísticas podem ser usadas.

Nota 1 – O ensaio comparativo é uma alternativa para identificação das etapas nesta prática, e envolve a comparação qualitativa dos resultados de um ensaio de elemento ou material similar de controle quando expostos a condições idênticas.

1.2 Esta norma delinea um enfoque sistêmico para a previsão de vida útil, incluindo a identificação das informações necessárias, o desenvolvimento dos ensaios acelerados, a interpretação dos dados, e o relatório dos resultados.

2 DESCRIÇÕES DE TERMOS ESPECÍFICOS DESTA NORMA

2.1 **ENSAIO DE ENVELHECIMENTO** – ensaio no qual elementos ou materiais de construção são expostos aos supostos agentes causadores da degradação.

2.2 **ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO** – ensaio de envelhecimento no qual a degradação dos elementos ou materiais de construção é intencionalmente acelerada acima da expectativa em serviço.

2.3 **AGENTE DE DEGRADAÇÃO BIOLÓGICA** – qualquer agente de degradação diretamente associado a organismos vivos, incluindo microorganismos, fungos e bactérias.

2.4 **ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO** – parte identificável de uma construção que pode incluir combinação de elementos ou materiais de construção, tais como uma parede ou um telhado.

2.5 **MATERIAL DE CONSTRUÇÃO** – material ou componente identificável que pode ser usado como elemento de construção, tais como tijolo, concreto, metal ou madeira.

2.6 **CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO CRÍTICOS** – propriedade ou grupo de propriedades de um elemento ou material de construção que devem ser mantidas acima de um certo nível mínimo, para que não percam sua capacidade de desempenhar as funções que lhe são requeridas.

2.7 **MECANISMO DE DEGRADAÇÃO** – seqüência de mudanças químicas e/ou físicas, que levam a alterações prejudiciais em uma ou mais propriedades de um elemento ou material de construção, quando expostos a um ou mais agentes de degradação.

2.8 **AGENTE DE DEGRADAÇÃO** – qualquer agente externo que afeta adversamente o desempenho de elementos e materiais de construção, incluindo agentes de intemperismo, biológico, mecânico, incompatibilidade e agentes de uso.

2.9 **DURABILIDADE** – a capacidade de manter suas funções em serviço, ao longo de um dado tempo específico.

2.10 **AGENTE DE INCOMPATIBILIDADE** – qualquer agente de degradação que resulta em interações químicas ou físicas prejudiciais entre elementos ou materiais de construção.

2.11 **ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO NATURAL** – ensaio no qual elementos ou materiais são expostos a fatores de degradação sob condições de serviço.

2.12 **CRITÉRIOS DE DESEMPENHO** – exigência quantitativa de um nível de desempenho para uma dada característica selecionada de um elemento ou material, necessária para satisfazer a um requisito de desempenho.

2.13 **REQUISITOS DE DESEMPENHO** – exigência qualitativa de desempenho requerida de um elemento ou material de construção.

2.14 **PREVISÃO DE VIDA ÚTIL** - ensaio que consiste na medição de uma propriedade em ensaio de envelhecimento, usado para a previsão de vida útil (ou para comparar durabilidades relativas) de elementos ou materiais de construção, num período de tempo menor do que sua expectativa de vida útil.

2.15 **ENSAIO DE AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADE** – ensaio para medir uma ou mais propriedades dos elementos ou materiais de construção.

2.16 **CAPACIDADE EM SERVIÇO** – capacidade de um produto, elemento, montagem ou construção de desempenhar a função (ões) para a qual é projetado e construído.

2.17 **VIDA ÚTIL (DE UM ELEMENTO OU MATERIAL DE CONSTRUÇÃO)** – período de tempo após a instalação durante o qual todas as propriedades se mantêm acima de um nível mínimo aceitável, em condições normais de manutenção.

2.18 AGENTES MECÂNICOS – qualquer agente de degradação que resulta de carregamentos externos aplicados, permanentes ou periódicos.

2.19 AGENTES RELATIVOS AO USO – qualquer agente de degradação resultante do projeto do sistema, das instalações, procedimentos de manutenção, desgaste ou fratura normal ou uso anormal.

2.20 AGENTES DE INTEMPERISMO – qualquer agente de degradação associado ao ambiente natural, incluindo radiação, temperatura, chuva e outras formas de água, congelamento e degelo, constituintes normais do ar, poluentes do ar e vento.

3 SIGNIFICADO E USO

3.1 É difícil desenvolver ensaios de envelhecimento acelerado para a previsão de desempenho em serviço a longo prazo, pelas razões que seguem:

3.1.1 Os mecanismos de degradação dos materiais de construção são complexos e raramente bem conhecidos;

3.1.2 Os fatores externos que afetam o desempenho são numerosos e difíceis de quantificar; por este motivo muitos procedimentos de ensaios acelerados existentes não incluem todos os fatores de importância, e aqueles incluídos raramente se relacionam quantitativamente com a exposição em serviço.

3.1.3 Os materiais são freqüentemente testados em configurações diferentes daquelas usadas em serviços.

3.2 A despeito de suas falhas, estes ensaios são usados para gerar dados necessários sobre durabilidade ou vida útil. Esta norma deve ser útil para grupos de normalização e outros que desenvolvem ensaios de previsão de vida útil, incluindo ensaios de envelhecimento acelerado.

4 PROCEDIMENTOS

4.1 Os procedimentos recomendados para o desenvolvimento de ensaios de previsão de vida útil que utilizam ensaios acelerados.

I - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

5 OBJETIVO

5.1 A etapa de definição do problema abrange as etapas em que o ensaio deve ser feito, e os agentes de degradação que devem ser incluídos no ensaio de envelhecimento.

6 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS E CRITÉRIOS DE DESEMPENHO EM SERVIÇO

6.1 Os requisitos e critérios de desempenho esperados em serviço definem o nível mínimo aceitável de desempenho ou de degradação a partir de um nível de desempenho inicial. Os níveis de desempenho devem ser baseados nas funções previstas para cada elemento ou material sob certas condições.

7 CARACTERIZAÇÃO DO ELEMENTO OU MATERIAL E IDENTIFICAÇÃO DO MECANISMO DE DEGRADAÇÃO

7.1 Deve-se caracterizar o elemento ou material tão detalhadamente quanto possível em termos de estrutura e composição, características críticas de desempenho, propriedades que podem servir como indicadores de degradação, variação e tipos de agentes de degradação aos quais haverá exposição, e todos os mecanismos possíveis pelos quais os agentes de degradação induzirão mudanças nas propriedades.

7.1.1 IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO CRÍTICO E PROPRIEDADES

- 7.1.1.1 As propriedades a serem usadas como indicadores de degradação podem ser iguais às propriedades críticas para o desempenho.
- 7.1.1.2 A primeira coluna da matriz inclui: um índice alfabético para cada um dos materiais ou componentes no elemento. Por exemplo, um elemento de parede pode incluir uma pintura exterior (A), um substrato exterior (B), um membro estrutural (C), isolante (D), um substrato interior (E) e uma pintura interior (F). As interfaces entre cada par de materiais podem por eles ser designadas por exemplo, A-B, B-C, A-C etc.
- 7.1.1.3 Considerar as características de cada material e interface na avaliação. A primeira linha da matriz é chamada “Mudanças Observáveis”. A lista de mudanças nas propriedades que podem ser proveitosas como medidas de degradação inclui mudanças observadas na pintura exterior (calcinação, fissuração, lascamento, escamação, vesícula, mudanças na cor (Δ cor), mudanças na aparência, (Δ aparência) etc.

7.1.2 IDENTIFICAÇÃO DO TIPO E VARIAÇÃO DOS FATORES DE DEGRADAÇÃO

- 7.1.2.1 Identificar o tipo e variação dos agentes de degradação para os quais o elemento ou material será exposto em serviço. Existe um elenco de agentes de degradação. Esta lista não é exaustiva, e outros possíveis agentes de degradação serão procurados em cada caso específico. Os agentes listados incluem, intemperismos biológicos, incompatibilidades e agentes de uso.
- 7.1.2.2 Agentes de intemperismo – incluem radiação, temperatura (elevada, baixa, cíclica), água (sólida, líquida e vapor), constituintes normais do ar, poluentes

do ar (gases, névoa e partículas), congelamento, degelo e vento. Algumas informações quantitativas dos agentes de intemperismo estão disponíveis em boletins climatológicos publicados. Estes dados usualmente serão suficientes para indicar a variação de intensidades às quais os elementos ou materiais serão expostos em serviço.

- 7.1.2.3 Agentes biológicos incluem microorganismos, fungos e bactérias.
- 7.1.2.4 Agentes mecânicos – consistem em cargas permanentes, tais como aqueles provocados pelo peso próprio de uma construção, e cargas dinâmicas, tais como carga de vento. As intensidades dos agentes mecânicos podem ser estimadas por cálculos de engenharia.
- 7.1.2.5 Incompatibilidades físicas e químicas entre materiais diferentes incluem corrosão causada pelo contato entre metais diferentes ou tensões causadas por materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica, rigidamente conectados.
- 7.1.2.6 Agentes de uso – incluem o projeto de sistema, procedimentos de manutenção e instalação, fratura e desgaste normal e uso anormal.
- 7.1.2.7 É difícil quantificar a intensidade em serviço de agentes biológicos, incompatibilidade, e de uso, mas limites extremos dentro da faixa de variação podem ser usualmente estabelecidos por critérios conservadores. Deve-se considerar cada um dos agentes de degradação que podem afetar o desempenho de um sistema construtivo, elemento ou material de construção nos projetos de ensaios de previsão de vida útil.

7.1.3 IDENTIFICAÇÃO DOS POSSÍVEIS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO

A etapa final do procedimento de caracterização é a identificação de todos os razoáveis e possíveis mecanismos pelos quais os agentes de degradação identificados induzem a mudanças nas propriedades dos elementos ou materiais. Os mecanismos podem ser definidos em vários níveis. Se muito se conhece sobre a química do material(s), pode ser possível identificar mecanismos baseados nas reações químicas específicas, tais como hidrólise e fotooxidação. De outra forma, se o conhecimento é pequeno sobre as reações químicas do material, mecanismos podem ser definidos em termos mais gerais, por exemplo, decomposição térmica, volatilização de constituintes, difusão de constituintes, corrosão, retração/expansão etc. Limitações no conhecimento disponível sempre existirão. Entretanto, é importante identificar alguns mecanismos de degradação, tanto quanto possível. Isto reduz a possibilidade de erro e melhora a base de estabelecimento para que os mecanismos induzidos pelos ensaios de envelhecimento acelerado sejam representativos daqueles que ocorrem em serviço.

8 CONSIDERAÇÕES REFERENTES AOS ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

Uma vez obtidas as informações das seções 6 e 7, recomendações podem ser feitas relacionando procedimentos específicos para acelerar os mecanismos de degradação, identificados os agentes de degradação selecionados. Por exemplo: a

degradação térmica é identificada como um possível mecanismo de degradação, então pode se considerar que este tipo de degradação pode ser acelerado pela exposição à temperatura maior que aquela esperada em serviço. Tomar cuidado para garantir que níveis extremos de agentes de degradação não resultem em mecanismos de degradação que não seriam experimentados em serviço. As recomendações feitas nestas etapas levam o trabalho básico para projeto preliminar de ensaios de envelhecimento acelerado.

9 DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DE DESEMPENHO PARA ENSAIOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

9.1 Definir requisitos de desempenho para ensaios de previsão de vida útil. As exigências do desempenho devem ser um resumo qualitativo das informações obtidas nas seções 7 e 8, que descrevem que ensaios devem ser feitos.

II - PRÉ - AVALIAÇÃO

10 OBJETIVO

10.1 A pré-avaliação demonstra que mudanças rápidas nas propriedades do elemento ou material podem, de fato, ser induzidas pela exposição a níveis extremos de agentes de degradação. Estas mudanças, se observadas, confirmam (ou regulamentam) os mecanismos identificados previamente, pelos quais as mudanças das propriedades ocorrem. Podem também contribuir para uma melhor compreensão dos agentes de degradação primárias, conduzindo à mudanças das propriedades e indicando propriedades provavelmente úteis como indicativos da extensão da degradação. Informações obtidas na pré-avaliação incluem indicações de (1) mudanças de propriedade provavelmente úteis como indicadores de degradação, (2) a ordem de importância dos fatores de degradação, (3) mecanismos pelos quais as propriedades mudam e (4) a intensidade requerida para os fatores de degradação, para se induzir rápidas mudanças de propriedades.

11 PROJETO DE PRÉ-AVALIAÇÃO

11.1 A pré-avaliação deve ser baseada nas informações obtidas nas seções 7, 8 e 9. Os ensaios devem permitir que várias propriedades a serem medidas antes e depois do envelhecimento acelerado determinem que propriedade pode ser melhor usada como indicador de degradação. Também é possível avaliar os agentes de degradação identificados na seção 7 e quais elementos ou materiais serão expostos em serviço, para determinar quais agentes são mais importantes.

11.2 A intensidade de agentes de intemperismo e mecânicos a serem usados na pré-avaliação pode variar nos limites quantitativos identificados na seção 7. Dados

climatológicos e de intemperismo para o mais extremo clima, no qual o elemento ou material será usado, podem fornecer subsídios para intensidade destes fatores na pré-avaliação. Podem ser usados cálculos de carga permanente, devido ao peso próprio, e cargas periódicas, devido à vento e impacto.

11.3 Agentes biológicos e de incompatibilidade podem não ser importantes, a não ser que combinados com valores extremos de agentes de intemperismo. Por exemplo: fungos e bactérias são mais ativos nos locais quentes e úmidos. A incompatibilidade física pode não ser importante, a menos que haja grandes mudanças de temperatura. Os efeitos dos agentes de incompatibilidade podem, portanto, usualmente ser avaliados em conjunto com ensaios para determinar os efeitos dos fatores de intemperismo.

11.4 Agentes de uso não são freqüentemente incluídos nos ensaios de previsão de vida útil. Práticas de instalação e manutenção são admitidas como feitas conforme recomendação do fabricante, e seu uso anormal é geralmente considerado além do objetivo destes métodos. Embora agentes de uso não estejam freqüentemente incluídos nos ensaios de envelhecimento acelerado, podem afetar a vida útil dos elementos e materiais de construção, e serão avaliados se considerados críticos

III - AVALIAÇÃO

12 OBJETIVO

12.1 A finalidade desta etapa é projetar e elaborar, ou melhorar, ensaios de previsão de vida útil para determinar a relação entre a taxa de degradação e a condição de exposição, de modo a projetar e elaborar ensaios em condições de serviço, que confirmem que os mecanismos de degradação induzidos pelos ensaios de envelhecimento acelerado são similares àqueles observados em serviço, e para medir as taxas de mudanças das propriedades em serviço.

13 DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS

13.1 ENSAIOS DE LONGA DURAÇÃO EM SERVIÇO – ensaios de longa duração em serviço devem enfatizar os agentes de degradação importantes para o elemento ou material. Estes ensaios podem ser ensaios em serviço do sistema completo de fato ou exposição de material selecionado em locais de intemperismo. É essencial desenvolver ensaios em que todos os agentes importantes sejam considerados. Quando possível os ensaios devem permitir que os mecanismos de degradação mais importantes sejam identificados num período de tempo relativamente curto. Entretanto, informações de largos períodos de exposição são também necessárias para ajudar na correlação das mudanças de taxas dos ensaios acelerados para aqueles ensaios em serviço. A intensidade ou magnitude dos fatores de degradação devem ser medidas durante o ensaio.

13.2 ENSAIO DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

13.2.1 A meta dos ensaios de previsão de vida útil é fornecer meios relativamente rápidos de mensurar as taxas de mudanças de propriedades típicas, que ocorrem em ensaios de longa duração. Ensaios de previsão devem ser normalmente desenvolvidos pelas informações obtidas na pré-avaliação. Em geral, a intensidade de fatores nestes ensaios será menor que na pré-avaliação, para reduzir a probabilidade de degradação por mecanismos que não são importantes em serviço. As propriedades medidas antes e depois do envelhecimento serão aquelas identificadas como mais profícuas ou mais importantes para a medição de degradação. Todos os agentes de degradação importantes devem ser incluídos nas condições de exposição.

13.2.2 A possibilidade de sinergismo deve também ser levada em conta no desenvolvimento dos ensaios de envelhecimento acelerado. Por exemplo, os efeitos combinados de agentes de intemperismo, tais como radiação solar, ciclos de temperatura e umidade podem ser maiores do que a soma dos efeitos dos fatores individuais. A intensidade ou magnitude dos agentes de degradação nos ensaios de envelhecimento acelerado devem ser medidos para auxiliar a determinação dos efeitos do aumento de intensidade e da relação das taxas de mudanças de propriedades em serviço e nos ensaios acelerados.

13.3 COMPARAÇÃO DOS TIPOS DE DEGRADAÇÃO – comparar os tipos de degradação obtidas no ensaio de envelhecimento acelerado e no ensaio em serviço. Se os ensaios iniciais de envelhecimento acelerado não induzem mecanismos representativos de degradação em serviço, altera-se o ensaio de envelhecimento após confirmar a informação obtida nas partes I e II.

IV - INTERPRETAÇÃO DE DADOS E RELATÓRIOS DE CONCLUSÕES

14 OBJETIVO

14.1 Esta etapa envolve a interpretação e relato de dados, bem como o acesso aos dados obtidos nos ensaios, previsão da vida útil do elemento ou material com baseado nos resultados do ensaio acelerado ou comparação das durabilidades relativas dos elementos ou materiais.

15 DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA COMPARAR TAXAS D MUDANÇAS.

15.1 Depois de confirmado que os mecanismos induzidos pelo ensaio de envelhecimento acelerado são os mesmos que aqueles observados em serviço, comparar as taxas de mudanças de propriedades em dois ensaios. Para o caso mais simples, em que a degradação se dá a uma taxa constante, determinar o fator de aceleração K.

$$K = R_{AT}/R_{LT}$$

Onde:

R_{AT} = taxa de mudança obtida no ensaio de envelhecimento acelerado, e ;

R_{LT} = taxa de mudança obtida no ensaio de longa duração em serviço.

15.1.1 Entretanto, a correlação entre os resultados de dois tipos de ensaios raramente é simples. Para correlações não lineares, podem ser necessárias a modelagem matemática da degradação observada em termos dos mecanismos de degradação conhecidos ou assumidos ou análises de dados usando os princípios de análise de confiança, de modo a estabelecer uma correlação satisfatória entre os fatores de mudança. Tais modelos devem bastar para o processamento de dados quantitativos sobre agentes de degradação em cálculos das taxas de mudanças de propriedades durante o período de ensaios.

16 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIO DE DESEMPENHO PARA ENSAIO DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

16.1 Estabelecer critério de desempenho que define o nível quantitativo mínimo aceitável de desempenho.

17 PREVISÃO DE VIDA ÚTIL OU COMPARAÇÃO DE DURABILIDADE RELATIVA

17.1 A expectativa de vida útil do elemento ou material pode ser prevista com base nos resultados dos ensaios de previsão de vida útil. Obter a previsão de vida útil pelo uso na informação da seção 15 para comparar as taxas de mudança nos ensaios de previsão de vida útil e ensaios em serviço. Uma alternativa para efetivamente prever a vida útil é comparar as durabilidades relativas de um número de elementos ou materiais que tenham sido ensaiados de modo similar. Tais comparações são frequentemente feitas para avaliar elementos ou materiais em termos de expectativa de desempenho ao longo do tempo.

18 RELATÓRIO DOS DADOS

18.1 Deve ser preparado um relato resumido dos resultados das análises nas partes I,II,III e IV. O relato é particularmente importante para outros que desejam usar ensaios ou entender as justificativas dos procedimentos e premissas. Por esta razão, supõe-se que o trabalho deva indicar as premissas feitas e fazer referência aos trabalhos que tenham afetado as decisões. É sugestão que o relatório inclua os elementos descritos nas partes I,II,III e IV.

19 PRECISÃO E VARIABILIDADE

19.1 Nenhuma informação quantitativa sobre a precisão ou a variabilidade desta norma pode ser fornecida porque os procedimentos gerais nos corpos de prova, instrumentação, e métodos não são suficientes para fazer análises estatísticas possíveis.

19.2 A precisão e variabilidade de qualquer previsão de vida útil dependerá de muitos agentes, incluindo a variabilidade dos corpos de prova, diferenças entre a condição de serviço esperada, a exatidão das previsões que conduziram as previsões e a precisão e variabilidade dos métodos usados uma vez que os erros podem ser muito grandes, o relato dos dados e as previsões devem conter uma clara indicação sobre as possíveis origens de erros e uma avaliação da precisão e variabilidade das previsões da vida útil.

ANEXO B -

NORMA BS 7543

Tabela B1 – Categorias de vida útil de projeto dos edifícios (a partir da BS 7543).

Categoria	Descrição	Vida do Edifício	Exemplos
1	Temporário	Até 10 anos	Alojamentos não-permanentes Edifícios temporários para exibição
2	Vida curta	Mínimo de 10 anos	Salas de aula temporárias Edifícios industriais para uso por tempo limitado Reforma interna em escritórios Edifícios para comércio varejista e armazenamento ¹
3	Vida média	Mínimo de 30 anos	Maioria dos edifícios industriais Reformas de edifícios residenciais
4	Vida normal	Mínimo de 60 anos	Edifícios para fins hospitalares ou educacionais Novos edifícios residenciais Reformas de alto padrão em edifícios públicos
5	Vida longa	Mínimo de 120 anos	Edifícios cívicos e outros edifícios de padrão elevado

Notas:

¹Períodos específicos podem ser determinados para edifícios particulares nas categorias 2 a 5, desde que não excedam o período sugerido para a categoria seguinte. Exemplo: edifícios para venda a varejo ou armazéns projetados para uma vida útil de 20 anos.

Tabela B2 – Categorias para projeto de vida útil componentes e partes da edificação.

Categoria	Descrição	Vida do edifício	Exemplos Típicos
1	Substituível	Vida útil inferior à do edifício. A substituição deve ser contemplada na etapa de projeto	Maioria dos acabamentos de piso e componentes de instalações.
2	Requer manutenção	A durabilidade ao longo da vida útil é atingida mediante tratamentos periódicos	Maioria dos revestimentos externos, portas e janelas
3	Durável	Apresenta durabilidade ao longo de toda a vida útil do edifício	Fundações e peças estruturais ²

Notas:

² Os edifícios podem incluir componentes que requeiram manutenção ou substituição (ver Tabela B3).

Tabela B3 – Expressão da durabilidade (resumo das orientações).

Expressão	Exemplos	Expressa em	Informações necessárias	Observações
Vida útil exigida	Exigências do cliente quanto ao edifício e suas partes	Anos de Serviço ¹	Nível de manutenção, uso e outros fatores que afetem a durabilidade; informações financeiras; grau de tolerância para alterações de aparência. Para componentes, indicar a vida útil de projeto do elemento, os ciclos de manutenção e substituição, detalhes das fixações e materiais adjacentes.	Os níveis de manutenção são dados na Tabela B4.
Vida útil prevista	Durabilidade dos materiais/ elementos de construção; assegurada pelo fabricante ou pelas normas aplicáveis	Anos de Serviço para condições especificadas ²	Condições assumidas; critérios para limitação da durabilidade; métodos utilizados para definir a expectativa de vida; durabilidade das partes do componente.	Devem ser acompanhados de um alerta quanto são defeitos associados, que devem ser citados especificamente e não de modo genérico.
Vida útil de projeto	Proposta do projetista ao cliente	Anos de Serviço ¹	Planilha de vida útil da na Tabela B2.	Expressas em relação à vida útil exigida como: (a) superior, (b) inferior ou (c) relacionada às características de uso, manutenção e previsão de renovação. Permitir margem de segurança além da vida útil prevista
Vida útil de serviço	Registros de durabilidade em serviço ⁴	Anos (ou décimos de anos) de serviço ³	Condições de uso (com base em condições reais a que o produto resistiu).	Há um estudo não publicado do BRE acerca dos meios pra registrar a vida útil e manutenção dos componentes.

Notas:

- ¹ Preferencialmente em uma das categorias de edifícios (tabela B1) ou componentes (tabela B2).
- ² Sendo normalmente indicada uma faixa, como por exemplo: 15 a 20 anos.
- ³ Quando aplicada a diversos itens simultaneamente, será expressa em uma faixa, como por exemplo: 30 a 50 anos.
- ⁴ Retro alimentação a partir de edifícios em uso.

Tabela B4 – Níveis de manutenção (além de limpeza diária ou de rotina).

Nível	Descrição	Vida do edifício	Exemplos
1	Apenas reparo	Manutenção restrita à restauração de itens a sua função original após falha	Substituição de válvulas e vidros quebrados
2	Reparo mais manutenção planejada	Trabalhos de manutenção feitos a intervalos de tempo, número de operações e ciclos regulares pré-determinados ¹	Ciclos de pintura externa ou pintura reflexiva em coberturas a cada 5 anos
3	Condição baseada em manutenção mais reparo	Manutenção feita a partir da inspeção sistemática e detecção da condição de determinado item	Inspeções de edifícios históricos, por exemplo, a cada cinco anos, levando ao planejamento dos serviços de manutenção

Notas:

¹ A duração de um ciclo de manutenção regular é fator importante, que deve constar no *brief* ou ser determinado durante o desenvolvimento do projeto.

A BS 8210 recomenda inspeções sistemáticas, como se segue:

- a) observação contínua e regular pelo usuário;
- b) inspeção visual a cada ano dos principais elementos sob supervisão de pessoal qualificado, e
- c) inspeção completa do edifício por pessoal qualificado pelo menos a cada 5 anos.

Pode haver requerimentos para inspeções mais frequentes.

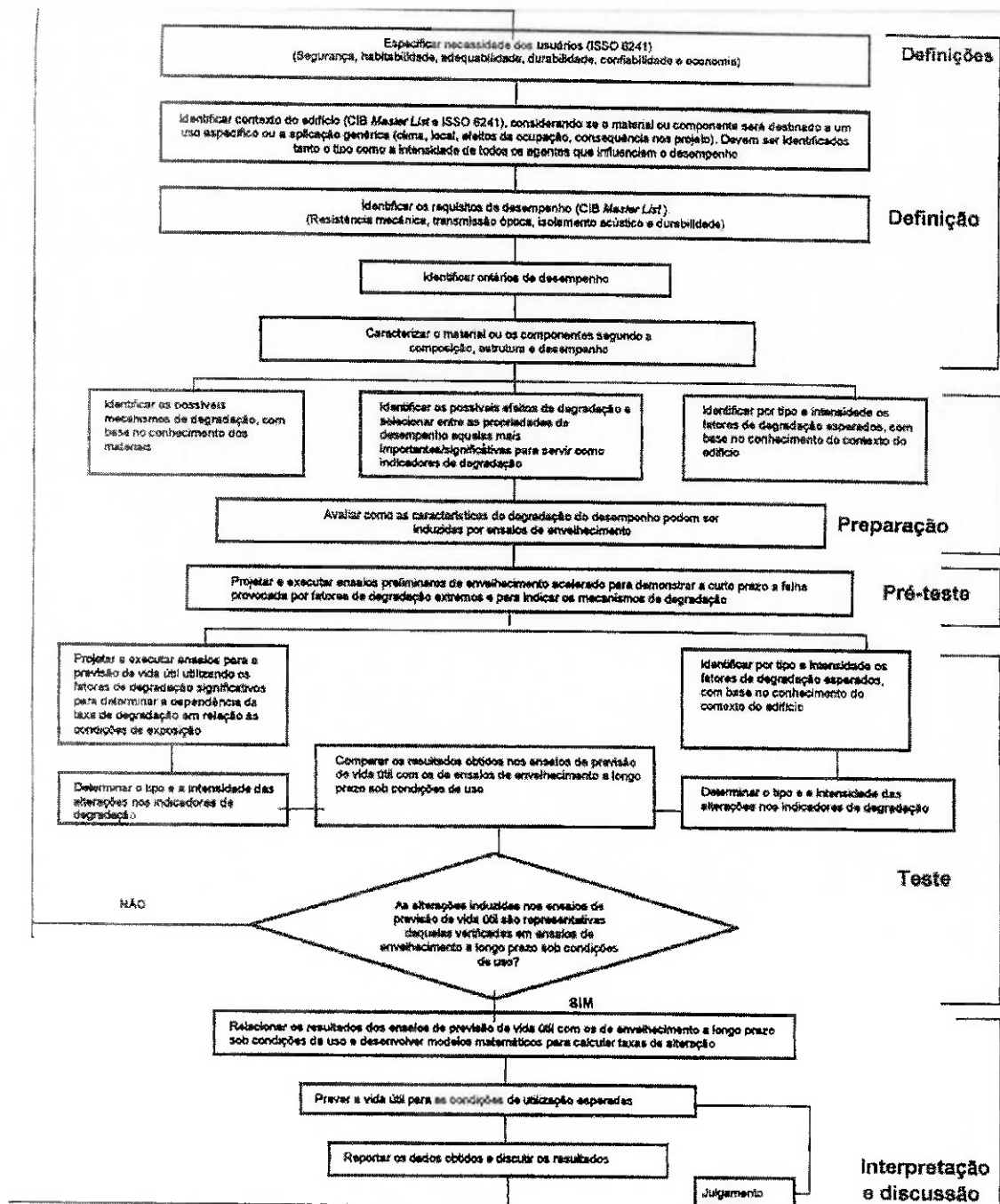


Figura B1 – Procedimento para tomada de decisão para previsão de vida útil (BS 7543:1992).

ANEXO C -
QUADRO GERAL DE PROPRIEDADES X MÉTODOS DE ENSAIOS

Tabela C1 - Quadro Geral de Propriedades X Métodos para Avaliação de Materiais de Reparo

Requisitos	AFNOR	BSI	ASTM	ABNT	DIN	RILEM
Flexão	P18 - 851-92	BS 6319: P 3/83	C - 348/95 E - 518/80		18555: P 3/82	
Tração	P18 - 871	BS 6319: P 7/85	C - 307		EN 1543/98	
Compressão	P18 - 872/86	BS 6319: P 2/83	C - 109/109 M - 98		18555: P 3/82	
Absorção/Massa Específica		BS 1881: P122/83	C - 97/96 C - 67/78	NBR 97778/83 NBR 9779/87		
M. Elasticidade		BS 6319: PART 6:84	C - 469/94			
Comp. Química			C - 267/97			
Ret. por Secagem			C - 596/96	NBR 8224/83		
Comp. Diametral	EN 196: PART 1/90	BS 4551 CL. 15/80	C - 780 - A8/91	NBR 7222/82	18555: P3/82	
Massa Específica				NBR 9778/87	18555: P3/82	
Consistência			C - 230/90			
Carbonatação						CPC 18/84

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTA TRANSPORTATION AND UTILITIES – ATU B 391 – Canadá 1992.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building code requirements for reinforced concrete - ACI Committee 318. In: _____. **ACI manual of concrete practice**. Farmington Hills, 1997.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide for evaluation of concrete structures prior to rehabilitation – ACI 364 IR. **ACI Materials Journal**, v.90, n.5, p.479-98, 1993.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide to durable concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete**. ACI 201.2R – Detroit, Michigan-1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Corrosion of materials** – ASTM G 01. Philadelphia, s.d.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials** - ASTM E 632. Philadelphia, 1982. Pg 56.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Maintening constant relative humidity by means of aqueous solutions** – ASTM E 104-1985.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic – Cement Mortar and Concrete** – ASTM C 157 – 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four –Electrod Method** - ASTM G 57 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement** - ASTM C 230 – 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic – Cement Mortars(using portions of broken in flexure)** – ASTM C 349 – 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens** – ASTM C 496 – 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)**– ASTM C 349 – 1997- pg 74.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic – Cement Mortars** – ASTM C 348 – 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone** – ASTM C 97 – 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (using simple beam with third-point loading)** – ASTM C 78 – 1994.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression** – ASTM C 469 – 1994.
- ANDRADE, C. et al. **Manual de inspeccion de obras dañadas por corrosion de armaduras**. Madrid, ICCT, 1992 pg 8,11,15,17.
- ANDRADE, C.; ALONSO, C.; SARRIÀ, J.; RÌO, O. Tecnicas de reparacion de estructuras dañadas por corrosion de armaduras. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4.; CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6., Porto Alegre, 1997. **Anais do CON PAT 97**. Porto Alegre, UFRGS, 1997. v.1, p.47-54 – pg 8,87.
- ANDRADE, W.P. et (Ed). **Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. Equipe de Furnas. Laboratório de concreto, departamento de apoio e controle técnico**. São Paulo: Pini, 1997.
- ARANHA, P. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na Região Amazônica**. Porto Alegre, 1994. Dissertação(Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – pg 7.
- ARMONA, F.; MAREGA, A. Retrospectiva da patologia no Brasil: estudo estatístico. In: Jornada em espanhol e português sobre estruturas y materiales, Madrid, 1988. **Colloquia 88**. Madrid, CEDEX, 1988. p.325-48.
- ARTHUR, I.V. **A Text book of quantitative inorganic analysis, including elementary instrumental analysis**. London,. Fellow of the Imperial College. Third edition – 1961.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e Concreto endurecido. Determinação da Absorção da água por Capilaridade NBR 9779-ABNT** -
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto Endurecido – Determinação da Fluência** – NBR 8224-ABNT – 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e Cura de corpos de Prova cilíndricos ou Prismáticos de Concreto** – NBR 5738-ABNT – 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Estruturas de Concreto** – NBR 6118-ABNT- 1977.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits à base de resines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du beton durci – Essai de flexion sur éprouvette évidée et reconstituée** -AFNOR P 18-851. Paris, 1992- pg. 76.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques destinés aux applications superficielles sur béton durci – Essai d'adhérence par traction sur éprouvette à surface rugueuse** - AFNOR P 18-858. Paris, 1988.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits destinés aux applications superficielles sur béton durci – Essai d'adhérence par traction sur éprouvette sciée** - AFNOR P 18-852. Paris, 1986.

- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits destinés aux applications superficielles sur béton durci – Essai d’adhérence par traction après cycles thermiques sur éprouvette sciée** - AFNOR P 18-853. Paris, 1986.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou systèmes de produits à base de liants hydrauliques pour collage structural entre deux éléments en béton** - AFNOR P 18-872. Paris, 1993.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits pour collage structural entre deux éléments en béton avec surface d’application horizontale** – AFNOR P 18-872. Paris, 1986.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Produits ou Systèmes de Produits à Base de Résines Synthétiques ou de Liants Hydrauliques pour Collage Structural Entre Deux Éléments en Béton** – AFNOR P 18 – 870- Paris 1993.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Reparation et Renforcement des Ouvrages en Béton et en Maçonnerie – Reprise du Béton Dégradé Serficiellement** – AFNOR P 95-101. Paris 1993.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Reparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Traitement des fissures et protection du béton** – AFNOR P 95-103.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **Reparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du beton dégradé superficiellement** – AFNOR P 95-101. Paris 1993 – pg 47.
- AUSTRALIAN STANDARD . **Method of Determination of Drying Shrinkage of Concrete**. AS 1012. Part 3 – 1970
- BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São Paulo, 1995. 2326 p. Tese (DOUTORADO) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pg 11.
- BAUER, R.J.F. **Revista IBRACON n^o 21**- São Paulo, 1998 – pg 113.
- BICZOK, L. **La corrosion del hormigon y su proteccion**. Bilbao, Urmo, 1981.
- BIER, Th. A. **Influence of tipe de cement and curing on carbonation progress and pore structure of hidrated cement paste** – Material Research Society Symposium. Pg 123-134 – 1987.
- BLACHERE, G. **The notion of performance in building. Building requirements**. In: SYMPOSIUM ON PERFORMANCE CONCEPT IN BUILDINGS, Philadelphia, 1972. **Proceedings** . Washington, National Bureau of Standards, 1972.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Guide to durability of buildings and building elements, products and components** - BS 7543. London, 1992- pg 56.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Method for determination of water absorption** - BS 1881:Part 122. London, 1983.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Testing of resin compositions for use in construction: method for measurement of compressive strenght** - BS 6319: Part 2. London, 1983.

- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Testing of resin Compositions for Use in Construction – Method for Determination of Modulus of Elasticity in Compression** – BS 6319: part 6 – London 1984.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Testing of resin compositions for use in construction: method for measurement of tensile strenght** - BS 6319: Part 7. London, 1985- pg 77.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Testing of resin compositions for use in construction: method for measurement of bond strenght (slant shear method)** - BS 6319: Part 4. London, 1984 – pg 79.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **The structural use of concrete. Part 1, design, materials and workmanship** - document 81/13842(Draft for Public Comment). London, 1982.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Determiration of Changes in Length on Drying and Wetting (initial drying, shrinkage and wetting expansion)** – BS 1881. London 1970.
- BROWNE, R. D. **Durability of building materials**. 1, 113, Elsevier, 1982
- BULDING RESEARCH ESTABILISHMENT. **Sulphate and acid resistence of concrete in the ground-** Digest N° 363, HMSO, London, julho 1991
- CAMPOS, **Revista IBRACON n° 21-** São Paulo, 1998 pg 113.
- CANOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado; coordenação técnica L. A. Falcão Bauer**. São Paulo; Pini, 1988.
- CARMONA, F. **Metodologia para recuperação, proteção e determinação da vida útil de estruturas de concreto em meio fortemente agressivo**. São Paulo, 1996. Tese (DOUTORADO)-Instituto Mackenzie. – pg 46,48,52.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, UFG, 1997 – pg 15, 30.
- CAVANI, G. R. **O certificado de homologação como instrumento para controle de qualidade de produtos e sistemas construtivos inovadores**. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – pg 51 pg 53,54,106.
- COMITE EURO INTERNATIONAL DU BETON. Design code . **Bulletin d’information**, p.215 – 214, 1995.
- COMITE EURO INTERNATIONAL DU BETON. Durability of concrete structures: state of the art report. **Bulletin d’information n° 148** – 1992 – Pp 248 – 253.
- DAL MOLIN, D. **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) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – pg 7.
- DEMING. W.E. **Quolity, productivity, and competitive position**. Cambridge, Center of Advanced Engineering Study, 1982. Pg 113.
- DEUTSCHE INDUSTRIE NORM. - **Determiration of Shrinkage and Sweling on Small Test Pieces** – DIN 52450 – Alemanha 1985.

- DIAZ, N.E. B. **Avaliação do grau de corrosão das armaduras em estruturas em concreto carbonatado** – São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pg 33.
- EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. et al **Selecting Durable Repair Materials: Performance Criteria**. Concrete International . March, 2000. Pg 109.
- EMMONS, P. H.; VAYSBURD. A. M.; Mc DONALD, J. E. **A rational approach to durable concrete repairs**. Concrete International, v. 15, n^o 9, p. 40 – 45. September 1993.
- FIGUEIREDO, E.J.P. **Avaliação de desempenho de revestimento para proteção da armadura contra corrosão através de técnicas eletroquímicas**: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado. São Paulo, 1994. Tese(Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pg 11.
- FOSROC. **Reparo e proteção do concreto**: a abordagem sistemática, manual técnico. Suzano, 1997.
- GJORV, O. E. & VENNESLAND, O. **Sea salts and alkalinity of concrete**. ACI Journal, 73, N^o 9, pg 512-516 – 1976.
- GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGON. **Encuesta sobre patologias de estructuras de hormigon**. Madrid, GEHO, 1992. (Boletim 10)
- GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGON. **Morteros de reparacion**. Madrid, GEHO, 1989. (Boletim 4). Pg 48,70,111.
- HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese(Docência-livre) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pg 10,23,30.
- HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo. Pini. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.
- HELENE, P.R.L. Vida útil das estruturas de concreto. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4.; CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6., Porto Alegre, 1997. **Anais do CON PAT 97**. Porto Alegre, UFRGS, 1997. v.1, p.1-30 – pg 8,31,59.
- HELENE, P.R.L. **Quais as Alternativas para Reparar Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão de Armaduras?** – Ingenieria Estructural- Publicación de la Asociación de Ingenieros Estructurales para la información y divulgación de temas científicos y técnicos – Año 7, n^o 16 – Buenos Aires, Argentina,1999. P 36 – 44.pg 42,44,45.
- HELENE, P.R.L.; **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto** – 2^a ed. – São Paulo: Pini, 1992.pg 72. Pg 10,47.
- HELENE, P.R.L.; MONTEIRO, P.J. Can local repairs be durable solutions for steel corrosion in concrete structure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE, 1994. **Proceedings**. Sheffield, Academic Press, 1994. v.2, p.1525-38.
- HELENE, P.R.L.; SOUZA, R. Controle de qualidade na indústria da construção civil In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tecnologia de edificações**. São Paulo, Pini, 1988. p.537-42. (Encarte IPT/DEd 072).

- HELENE, P.R.L.; TANGO.C.E.S. Controle de qualidade: uma proposta para normalização em alvenaria estrutural. In: COLÓQUIO SOBRE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS DE CONCRETO, São Paulo, 1977. **Anais**. São Paulo, IBRACON, 1977. Pg 106.
- HOBBS, D.W. **Álkali-Sílica Reaction in Concrete**. 183 pg. Thomas Telford, London – 1988.
- HORIGUCHI, K et al. **The rate of carbonation in concrete made with blended cement in Durability of Concrete**. ACI SP-145, pg 917-931-Detroit, Michigan – 1994.
- HONG KONG HOUSING AUTHORITY. **Métodos de ensaios para avaliação da retração livre**. HKHA, 2000.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Elaboração de normas mínimas de desempenho para habitações de interesse social**. São Paulo, IPT, 1995. (Relatório técnico, n.33800)
- ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: Um estudo de durabilidade com vista à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. 280 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pg 22.
- JOHN, V.M. **Avaliação da durabilidade de materiais componentes e edificações – emprego do índice de degradação**. Porto Alegre, 1987. Dissertação(Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- JURAN, J.M. **Planificacion y análisis de la calidad**. Trad. De Ismael Warleta de la Quintana. Barcelona, Reverté, 1981 pg 113.
- LEVY, S.M.; HELENE, P.R.L. **Metodologia, especificações técnicas e composições unitárias para reparos, recuperação e proteção das estruturas de concreto armado de unidades escolares**. São Paulo, PCC/USP, 1998. 221p. (Convênio Cooperação Técnica PCC-USP/FDE. EPUSP/PCC-CPqDCC/GEPE-MAT Relatório nº 10.124). pg 87.
- LIMA, M. G. **Inibidores de corrosão – Avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos**. São Paulo, 1996. 174 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pg 11.
- MALHOTRA, V.M., ed. **Supplementary cementing materials for concrete**. Öttawa, CANMET, c1987. 428 p.
- MANGAT, P.S. & O' FLAHERTY. **Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches**. CEMENT and CONCRETE RESEARCH, 30 pg 125 – 136, 2000
- MATHER, K. **Concrete weathering and Treat Island, Maine, in Performance of Concrete in Mrine Enviroment**. ACI SP-65, pg 101-111. Detroit, Michigan – 1980.
- MCCURRICH, L.H. et al. **Mortar repair systems: corrosion protection for damage reinforced concrete**. Bedfordshire, Fosroc Technology, s.d.

- MCCURRICH, L.H.; KAY, W.M. **Poliester and epoxy resin concrete**; P 2. Given at the resins and concrete symposium organised by The Plastics Institute and Institution of Civil Engineers. April, 1973
- MESEGUER, A. G. Para una teoria de calidad en construccion. **Informes de la construccion**, v.34, n.348, p.5-22, mar.1983.
- MITIDIARI FILHO, C.V. & SOUZA, R. **Avaliação de desempenho de sistemas construtivos inovadores destinados à habitações unifamiliares: desempenho estrutural**. São Paulo, 1988. Dissertação(Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- NEPOMUCENO, A.A. **Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras. Estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion**. Madrid, 1992. Tese(Doutorado) – Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politecnica de Madrid – pg 10.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo. Pini, 1997. Pg 69,99,100.
- NOUNU, G. & CHAUDHARY, Z. H. **Reinforced concrete repairs in beams**. Construction and Building MATERIALS – 13 , PG. 195 – 212, 1999.
- PAILLIÈRE, A. M, RAVERDY, M. & SERRANO, J.J. **Long term study of the influence of the mineralogical composition of cements on resistance to seawater: tests in artificial seawater and in the Channel, in Durability of Concrete**. ACI SP-145. Pg 423 –443. Detroit, Michigan, 1994.
- REGATTIERE, C.E.X. **Contribuição ao estudo da influência da dosagem do concreto na absorção capilar e penetração de íons cloreto**. São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 194 p.
- REPETTE, W.L. **Modelo de previsão de vida útil de revestimentos de proteção da superfície do concreto em meios de elevada agressividade**. São Paulo, 1997. Tese(Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- RICHARDSON, M.G. **Carbonation of reinforced concrete: its causes and management**. Dublin, CITIS, 1988. 205p.
- RILEM RECOMENDATIONS CPC-18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth Materials and Structures**. RILEM CPC-18 – 1984.
- RINCÓN, I.T. et al. **Manual de inspeccion, evaluation y diagnostico de corrosion en estructuras de hormigon armado**. Rio de Janeiro, CYTED, 1997. 205p.
- ROMBÈN, L. **Aspects of testing methods for acid attack on concrete**. CBI Research 1:78, 61 pg. Swedish Cement and Concrete Research Inst., 1978.
- SCHNEIDER,U. et al. **Stress corrosion of cementitious materials in sulphate solutions, Materials and Structures**. 23, N^o 134, pg 110-115 – 1990.
- SEREDA, P. J. & RAMACHANDRAN, V. S. **Predictability gaps between science and technology of cements – 2 Physical and mechanical behavior of hygrate cements**. J. Amer Ceramic Soc. 58. N^{os} 5-6, pg 249-253- 1975.
- SITTER, W.R. **Costs for service life optimization. The “Law of Fives”**. In : CEB-RILEM **Durability of concrete structures. Proceedings of the International Workshop in Copenhagen**. Copenhagen, 1983.

- SOUZA, R. **A contribuição do conceito de desempenho para avaliação do edifício e suas partes.** São Paulo, 1983. Dissertação(Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SOUZA, R. Avaliação de desempenho aplicado a novos componentes e sistemas construtivos para habitação. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tecnologia de edificações.** São Paulo, Pini, 1988. p.529-32. (Encarte IPT/DEd 002)
- SOUZA, R. **Sistema de gestão da qualidade para empresas construtoras.** São Paulo, Pini, 1995.
- SOUZA, R.; MEKBEKIAN, G. **Qualidade na aquisição de materiais e execução de obras.**São Paulo. Pini, 1996.
- SOUZA, R.; MITIDIERI FILHO, C.V. Avaliação de desempenho de sistemas construtivos destinados à habitação popular. Conceituação e metodologia. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tecnologia de edificações.** São Paulo, Pini, 1988. p.139-42. (Encarte IPT/DEd 059)
- SOUZA, V.C., RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto** – São Paulo. Pini, 1998.
- THOMAZ, E. Sistemas construtivos para habitações de interesse social: proposta de avaliação e classificação custo/benefício. In: SIMPOSIO IBERO AMERICANO SOBRE TECNICAS CONSTRUTIVAS INDUSTRIALIZADAS PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 3.; FORUM BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA – HABITAÇÃO, 1., São Paulo, 1993. **Anais.** São Paulo, IPT, 1993. v.3, p.591-8.
- TUUTTI, K. **Corrosion on steel in concrete.** Stockholm, CBI Forsking, Swedish Cement and Concrete Research, 1982. 486p.
- WOOD, J. G. M. & JOHNSON, R. A. **The appraisal and maintenance of structures with alkali-silica reation.** The Structural Engineer, 71, N^o 2, pg 19-23 – 1993.

- SOUZA, R. **A contribuição do conceito de desempenho para avaliação do edifício e suas partes.** São Paulo, 1983. Dissertação(Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SOUZA, R. Avaliação de desempenho aplicado a novos componentes e sistemas construtivos para habitação. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tecnologia de edificações.** São Paulo, Pini, 1988. p.529-32. (Encarte IPT/DEd 002)
- SOUZA, R. **Sistema de gestão da qualidade para empresas construtoras.** São Paulo, Pini, 1995.
- SOUZA, R.; MEKBEKIAN, G. **Qualidade na aquisição de materiais e execução de obras.**São Paulo. Pini, 1996.
- SOUZA, R.; MITIDIÉRI FILHO, C.V. Avaliação de desempenho de sistemas construtivos destinados à habitação popular. Conceituação e metodologia. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tecnologia de edificações.** São Paulo, Pini, 1988. p.139-42. (Encarte IPT/DEd 059)
- SOUZA, V.C., RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto** – São Paulo. Pini, 1998.
- THOMAZ, E. Sistemas construtivos para habitações de interesse social: proposta de avaliação e classificação custo/benefício. In: SIMPOSIO IBERO AMERICANO SOBRE TECNICAS CONSTRUTIVAS INDUSTRIALIZADAS PARA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 3.; FORUM BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA – HABITAÇÃO, 1., São Paulo, 1993. **Anais.** São Paulo, IPT, 1993. v.3, p.591-8.
- TUUTTI, K. **Corrosion on steel in concrete.** Stockholm, CBI Forsking, Swedish Cement and Concrete Research, 1982. 486p.
- WOOD, J. G. M. & JOHNSON, R. A. **The appraisal and maintenance of structures with alkali-silica reation.** The Structural Engineer, 71, N° 2, pg 19-23 – 1993.