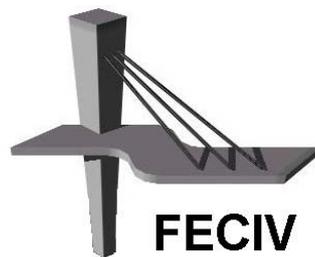




UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DA INTERFACE ENTRE O
CONCRETO E O MATERIAL DE REPARO
MEDIANTE MICROSCOPIA**



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Nº 09

Felipe Land Gondim

**ESTUDO DA INTERFACE ENTRE O CONCRETO E O MATERIAL
DE REPARO MEDIANTE MICROSCOPIA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia das Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Turibio José da Silva

UBERLÂNDIA, 11 DE AGOSTO DE 2005.

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer".

Albert Einstein

*Dedico esse trabalho aos meus pais, Tânia e Belchior,
que sempre acreditaram em meu potencial.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para realização deste trabalho e, em especial:

A Deus, pelo dom da vida concedido, pela inabalável crença Nele depositada, que me encoraja a levar adiante a consecução dos propósitos mais capitais. Obrigado, Senhor, por tantas pessoas especiais colocadas em meu caminho e por me fazer acreditar em todos os meus sonhos.

Aos meus pais, pelos valores humanos transmitidos, decisivos para a formação do meu caráter.

Ao meu orientador, Prof. Turíbio, sempre voltado a que seus aconselhados primem pela diligência, refutando a displicência, ainda que breve. Agradeço-lhe pela sugestão do tema, paciência, amizade e pelos ensinamentos que desaguaram no delta de minha insipiência.

Ao Professor, e agora amigo, Rafael Ariza, exímio incentivador, que, excedendo às suas obrigações profissionais, auxiliou-me, desobrigadamente, usando mão de lições imorredouras, que me serviram como verdadeiros esteios, fundamentando este trabalho. O seu auxílio transcende a docência.

Ao Prof. Noélio, que lapidou, usando por ferramentas a dedicação e o companheirismo, minha formação docente, até então em forma bruta.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela concessão do espaço físico do Laboratório de Tribologia dos Materiais, pelo mercê que sói caracterizar a atitude abnegada, despida de restrições a cursos.

A todos os professores eméritos da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, em especial ao Prof. João Fernando Dias, que contribuiu de maneira incisiva na elaboração desse trabalho.

A todos os funcionários, principalmente à secretária Sueli Maria, paradigma de funcionária, perspicaz, atenciosa, orgulho da Instituição de que faz parte e, primordialmente, prestativa.

À minha namorada Andréia, pela felicidade de tê-la ao meu lado e, principalmente, pelos momentos de ausência, vencidos com amor, carinho e, fundamentalmente, compreensão, apanágios que evitaram que medrassem os instantes de esmorecimento.

Aos meus amigos de longa data, todo o carinho e gratidão.

Ao meu afilhado Yann, que, apesar da tenra idade, inspira-me constantemente.

Aos amigos do mestrado pelos agradáveis momentos compartilhados ao longo do curso.

À Capes, pelo apoio financeiro durante grande parte desse trabalho.

À Degussa Construction Chemicals, pelo fornecimento dos materiais utilizados na pesquisa.

Ao Departamento de apoio e Controle Técnico – DCT.T – Furnas Centrais Elétricas pelo apoio técnico recebido.

GONDIM, Felipe Land *Estudo da Interface entre o Concreto e o Material de Reparo Mediante Microscopia*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2005. 143 p.

RESUMO

Ao longo da história da Engenharia Civil, testemunha-se o surgimento de uma nova era, na qual se enfatiza a qualidade em geral e, particularmente, a durabilidade das estruturas de concreto. Como resultado de uma incessante busca pela qualidade, observa-se uma evolução em um campo relativamente novo, designado por Patologia Estrutural, que se relaciona ao estudo de falhas estruturais em obras civis. Uma solução eficaz para este problema é a recuperação estrutural, que surge como um forte segmento de mercado da indústria da construção civil, motivando o desenvolvimento de uma série de materiais e procedimentos de recuperação que visam a restabelecer as condições originais da estrutura danificada e ampliar a sua vida útil. Para a proteção e recuperação das estruturas de concreto, foram desenvolvidos materiais específicos destinados a diferentes situações de aplicação. A microscopia, historicamente aplicada no seguimento das ciências biomédicas, tem sido difundida também para a ciência dos materiais, tornando-se uma ferramenta importante no estudo de diversas propriedades. O objetivo principal deste trabalho é investigar a forma de ligação e aderência entre o concreto e o material de reparo, mediante microscopia. Nesta pesquisa, foram analisadas 247 micrografias em 24 amostras de quatro tipos de argamassas de reparo dentre os encontrados no mercado. As características morfológicas típicas destes materiais foram estudadas com o auxílio do microscópio óptico (MO) e do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados apresentados neste trabalho auxiliam a compreensão da análise microscópica relacionada à aderência de um determinado material de reparo utilizado.

Palavras chave: recuperação de estruturas, aderência reparo-substrato, microscopia eletrônica de varredura, microscopia ótica, materiais de reparo.

GONDIM, Felipe Land *Study of the Interface Between the Concrete and the Material for Repair by using Microscopy*. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2005. 143 p.

ABSTRACT

During the history of the Civil Engineering, it is witnessed the appearance of a new age, which emphasizes quality in general, and durability, in particular, of the concrete structures. As a result of a continuable search for quality, an evolution in a relatively new field is observed, named Structural Pathology, which relates to the study of structural imperfections in constructions. An efficient solution for this problem is the structural repair, that appears as a strong market share of the industry of the civil construction, motivating the development of a number of materials and procedures of repair that aim to reestablish the original conditions of the damaged structure in order to extend its service life. For the protection and the restoration of the concrete structures, there were developed repair materials destined to different situations of application. The Microscopy, historically applied to the biomedical sciences, field has been spreaded out to the science of the materials field as well, becoming an important tool in the study of diverse properties. The main objective of this research is to investigate the form of linking and bond between repair mortars and concrete, by using microscopy. In this research 247 micrographs were analysed from 24 samples of four types of repair mortars amongst the ones found in the market had been analyzed. The typical morphologic characteristics of those materials were studied through of the optic microscope (OM) and the scanning electron microscope (SEM). The results presented in research provides the understanding of the microscopical analysis related to the bond of someone repair materials.

Keywords: structural repair, bond repair-concrete, scanning electron microscopy, optic microscopy, repair materials.

SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLOS

\forall	volume de fluido fixo não deformável
∂	diferencial parcial

Letras Romanas

a/c	água/cimento
cm	centímetro
°C	grau Celsius
C ₃ A	aluminato tricálcico
C ₆ AS ₃ H ₃₂	etringita
Ca(OH) ₂	hidróxido de cálcio
CO ₂	dióxido de carbono
CP	corpo de prova
CSH	silicato de cálcio hidratado
d	diferencial
dA	elemento de área infinitesimal
D	coeficiente de difusão
eV	eletrovolt
exp	exponencial
ln	logaritmo neperiano
mm	milímetro
m ²	metro quadrado
Na	número de Avogadro
\vec{n}	versor
pH	potencial de Hidrogênio
Pa	Pascal
[S]	concentração molar
Sc	superfície de controle
SO ₄ ⁻²	ânion sulfato
Vc	volume de controle

Letras Gregas

ΔG^*	energia de ativação
ε	constante dielétrica do meio
λ	distância entre planos atômicos
μ_0	potencial químico molar
μm	micrômetro

SIGLAS

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ABCP	<i>Associação Brasileira de Cimento Portland</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
BS	<i>British Standards Institution</i>
EN	<i>Norma Européia</i>
CAA	<i>Classe de Agressividade Ambiental</i>
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
GEHO	<i>Grupo Español del Hormigón</i>
MEV	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MO	<i>Microscopia Óptica</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NBR	<i>Norma Brasileira Registrada</i>
UK	<i>United Kingdom</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	5
1.3 OBJETIVO	7
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	8
CAPÍTULO 2 RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL.....	9
2.1 PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	9
2.1.1 Origem.....	10
2.1.2 Sintomas e causas	11
2.1.3 Sistemas e mecanismos de deterioração.....	12
2.1.3.1 Reação álcali-agregado.....	14
2.1.3.2 Corrosão da armadura.....	15
2.1.3.3 Lixiviação	18
2.1.3.4 Expansão por sulfato	19
2.1.4 Diagnóstico.....	20
2.2 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO	23
2.2.1 Preparação superficial	24
2.2.2 Reparos superficiais.....	25
2.2.3 Pontes de aderência	27
2.3 MATERIAIS DESTINADOS AO REPARO.....	27
2.3.1 Classificação dos materiais de reparo.....	28
2.3.2 Materiais constituintes e sua funcionabilidade.....	30
2.3.2.1 Aglomerante	30
2.3.2.2 Agregado miúdo	30
2.3.2.3 Aditivos	31

2.3.2.4 Adições	31
2.3.3 Desempenho e propriedades das argamassas de reparo	32
2.3.4 Requisitos de compatibilidade entre a argamassa de reparo e a estrutura de concreto	34
2.3.4.1 Compatibilidade de deformações	34
2.4 ADERÊNCIA	35
2.4.1 Mecanismo de aderência das argamassas de reparo	36
2.4.1.1 Adesão inicial-estado fresco	37
2.4.1.2 Adesão final-estado endurecido	38
2.4.2 Fatores que influenciam no mecanismo de aderência	43
2.4.2.1 Porosidade do substrato de concreto	43
2.4.2.2 Tratamento superficial do substrato	44
2.4.2.3 Natureza e proporção dos materiais constituintes da argamassa	45
2.4.2.4 Retração plástica e por secagem inicial da argamassa	46
2.4.3 Critérios de aderência	47
CAPÍTULO 3 MICROSCOPIA.....	49
3.1 MICROSCOPIA APLICADA AO CONCRETO	49
3.1.1 Microscopia dos materiais à base de cimento	50
3.1.1.1 Microscopia do clínquer	50
3.1.1.2 Hidratação da pasta de cimento	51
3.1.1.3 Relação água/cimento	52
3.1.1.4 Reatividade álcali-agregado	53
3.1.2 Zona de transição e formação de microfissuras.....	54
3.1.2.1 Análise da superfície da fratura do concreto em 3 dimensões	56
3.1.2.2 Análise da microfissura do concreto em 3 dimensões.....	57
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	58
4.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
4.2 DESCRIÇÃO DOS BLOCOS USADOS PARA OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS	59
4.2.1 Caracterização do concreto.....	59
4.2.2 Preparo do substrato e descrição e aplicação das argamassas de reparo	61
4.2.2.1 Preparo do substrato	61
4.2.2.2 TIPO 1 – Argamassa de alta resistência – Blocos 1 e 2.....	62

4.2.2.3 TIPO 2 – Argamassa monocomponente para recapear e / ou estucar - Blocos 3 e 6.....	62
4.2.2.4 TIPO 3 – Argamassa de reparo de concreto em grandes espessuras – Blocos 4 e 5.....	63
4.2.2.5 TIPO 4 – Ponte de aderência com adesivo epóxico e argamassa similar ao concreto do substrato - Blocos 7 e 8.....	64
4.2.3 Resistência à compressão das argamassas de recuperação.....	64
4.3 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	65
4.3.1.1 Preparação das amostras fraturadas.....	66
4.3.1.2 Preparação das amostras polidas.....	70
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	76
5.2 ESTUDO EM AMOSTRAS FRATURADAS.....	77
5.2.1 Resultados obtidos via MEV.....	78
5.2.1.1 Interface com o material de reparo TIPO 1.....	78
5.2.1.2 Interface com o material de reparo TIPO 2.....	80
5.2.1.3 Interface com o material de reparo TIPO 3.....	82
5.2.1.4 Interface com o material de reparo TIPO 4.....	84
5.3 ESTUDO EM AMOSTRAS POLIDAS.....	85
5.3.1 Resultados obtidos via MO.....	87
5.3.1.1 Interface com o material de reparo TIPO 1.....	87
5.3.1.2 Interface com o material de reparo TIPO 2.....	89
5.3.1.3 Interface com o material de reparo TIPO 3.....	91
5.3.1.4 Interface com o material de reparo TIPO 4.....	92
5.3.2 Resultados obtidos via MEV.....	93
5.3.2.1 Interface com o material de reparo TIPO 1.....	94
5.3.2.2 Interface com o material de reparo TIPO 2.....	96
5.3.2.3 Interface com o material de reparo TIPO 3.....	98
5.3.2.4 Interface com o material de reparo TIPO 4.....	99
CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
6.1 CONCLUSÕES.....	102
6.1.1 Conclusões gerais.....	102

6.1.2 Conclusões específicas	103
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHO	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
ANEXO A INTRODUÇÃO À MICROSCOPIA.....	108
ANEXO B TEORIA DA DIFUSÃO.....	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Carbonatação do concreto em função da umidade.....	17
Figura 2.2 – Fluxograma genérico para a diagnose de uma estrutura convencional.....	22
Figura 2.3 – Anatomia de um reparo de concreto.	24
Figura 2.4 – Requisitos principais para compatibilidade de deformações entre sistemas de reparo localizados e estruturas de concreto.	35
Figura 2.5 – Molhagem de um sólido por um líquido.	37
Figura 2.6 – Esforços atuantes em virtude da retração da argamassa de reparo	46
Figura 3.1 – Seção polida do clínquer.	51
Figura 3.2 – Análise da imagem ao redor do grão de areia	54
Figura 3.3 – Reconstrução da superfície de fratura do concreto	57
Figura 4.1 – Blocos preparados para a recuperação.	61
Figura 4.2 – Esquema do bloco recuperado.	65
Figura 4.3 – Extração das amostras.	65
Figura 4.4 – Refinamento geométrico das amostras.	66
Figura 4.5 – Amostra fraturada.....	66
Figura 4.6 – Processo de preparação das amostras para sua metalização.	67
Figura 4.7 – Pré-Câmara de vácuo.	68
Figura 4.8 – a) Processo de metalização das amostras, b) Emissão da luz característica do ouro	68
Figura 4.9 – Amostras metalizadas e fixadas na haste.	69

Figura 4.10 – Inserção das amostras na câmara de vácuo do MEV.....	70
Figura 4.11 – a) Invólucro metálico b) Proteção à superfície.....	71
Figura 4.12 – Moldagem da resina; a) Invólucro metálico b) Proteção à superfície.....	71
Figura 4.13 – Posicionamento da amostra; a) Camada base, b) Inserção da amostra.....	72
Figura 4.14 – Embutimento das amostras.....	72
Figura 4.15 – Lixamento das amostras.....	73
Figura 4.16 – Eliminação dos resíduos; a) Limpeza, b) Secagem.....	73
Figura 4.17 – Politriz elétrica.....	74
Figura 4.18 – Polimento das amostras.....	74
Figura 4.19 – Amostra polida.....	75
Figura 5.1 – Aspecto visual das amostras fraturadas.....	78
Figura 5.2 – Microfissuras na interface substrato-material de reparo TIPO 1.....	79
Figura 5.3 – Má qualidade na extensão da aderência na interface substrato - material de reparo TIPO 1.....	80
Figura 5.4 – Interface entre o material de reparo e o agregado graúdo.....	80
Figura 5.5 – Mau contato na interface substrato-material de reparo TIPO 2.....	81
Figura 5.6 – Presença de etringita na interface entre os materiais.....	82
Figura 5.7 – Mau contato entre o substrato e o material de reparo TIPO 3.....	83
Figura 5.8 – Região da interface substrato-reparo com vazios.....	84
Figura 5.9 – Mau contato entre o substrato e o material epóxico.....	85
Figura 5.10 – Aspecto visual das amostras polidas.....	86
Figura 5.11 – Interface substrato-material de reparo TIPO 1 caracterizada pela presença de vazios.....	88
Figura 5.12 – Interface reparo-agregado.....	88
Figura 5.13 – Material de reparo poroso.....	89

Figura 5.14 – Microfissuras na interface substrato - material de reparo TIPO 2.	90
Figura 5.15 – Poros no material de reparo.	90
Figura 5.16 – Interface substrato – material de reparo TIPO 3 com boa extensão da aderência.	91
Figura 5.17 – Microfissura no reparo.	92
Figura 5.18 – Interface substrato – material de reparo TIPO 4 com boa extensão da aderência.	93
Figura 5.19 – Poros no material de reparo TIPO 4.	93
Figura 5.20 – Aspecto visual das amostras polidas metalizadas.	94
Figura 5.21 – Procedimento para visualização da interface.	95
Figura 5.22 – Interface substrato-material de reparo TIPO 1 caracterizada pela presença de vazios.	96
Figura 5.23 – Interface substrato-material de reparo TIPO 2 caracterizada pela presença de vazios.	97
Figura 5.24 – Bom contato entre o substrato e o material de reparo TIPO 3.	98
Figura 5.25 – Boa extensão da aderência na interface substrato-material epóxico-reparo.	99
Figura 5.26 – Boa extensão da aderência na interface substrato-material epóxico.	100
Figura 5.27 – Bom contato entre o material de reparo e o adesivo epóxico.	101
Figura A.1 – Sistema de aquisição de imagens por microscopia ótica.	118
Figura A.2 – Primeira idéia de um corpúsculo de luz propagando-se pelo espaço.	120
Figura A.3 – Inflexão de um raio de luz elementar dirigindo-se da esquerda para a direita.	120
Figura A.4 – Corpúsculo de luz girando sobre si mesmo e propagando-se segundo uma perpendicular ao eixo do giro.	121
Figura A.5 – Os lados do corpúsculo e do raio de luz.	122
Figura A.6 – A transmissão de uma perturbação através de um meio intermediário.	123
Figura A.7 – A refração corpuscular de Descartes.	124

Figura A.8 – A refração corpuscular de Newton.....	124
Figura A.9 – Refração ondulatória.....	125
Figura A.10 – Composição vetorial da luz.....	127
Figura A.11 – Propagação da luz.....	127
Figura A.12 – Polarização da luz.....	128
Figura A.13 – Componentes básicos de um MEV.....	128
Figura A.14 – Esquema de um canhão de elétrons tradicional.....	131
Figura A.15 – Sistema ótico eletrônico do MEV.....	132
Figura A.16 – Formação de imagem através da detecção de elétrons secundários e relação de aumento no MEV.....	133
Figura A.17 – Detector de elétrons secundários.....	134
Figura A.18 – Detector de elétrons espalhados.....	134
Figura B.1 – Difusão atômica, a) lacunas, b) interstícios.....	135
Figura B.2 – Energia de Ativação.....	137
Figura B.3 – Difusão atômica num gradiente de energia livre.....	137
Figura B.4 – Evolução do perfil de concentração dos átomos de boro no silício, em função do tempo: (a) tempo $t = 0$; tempo t qualquer; tempo $t = \infty$	140
Figura B.5 – Representação gráfica da equação B.19.....	141
Figura B.6 – Representação da Segunda Lei de Fick.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto.....	11
Tabela 2.2 – Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.....	13
Tabela 4.1 – Resultado dos ensaios de caracterização química do cimento segundo normas brasileiras.	59
Tabela 4.2 – Resultado dos ensaios de caracterização física do cimento.....	60
Tabela 4.3 – Resistência dos corpos de provas aos 7 e 28 dias.....	60
Tabela 4.4 – Resistência dos corpos de provas das argamassas de reparo.....	64
Tabela 5.1 – Quantidade de micrografias em amostras fraturadas.....	78
Tabela 5.2 – Quantidade de micrografias em amostras polidas.	86
Tabela 5.3 – Quantidade de micrografias em amostras polidas metalizadas.	94
Tabela A.1 – Relação entre velocidades.....	126

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O concreto é um material de elevado consumo em todo o mundo, amplamente utilizado para fins estruturais devido ao seu baixo custo, se comparado a outros materiais e principalmente devido às suas características mecânicas e a facilidade de ser moldado. Helene (1992) afirma que o concreto, ao longo da história, tem provado ser o material estrutural mais eficiente, superando com larga vantagem outras alternativas viáveis, como a madeira e o aço.

O concreto, como todos os demais materiais destinados ao emprego estrutural, sofre a ação de intempéries, que podem variar conforme as características do local e condições de utilização. O fato de não ser um material inerte o faz bastante vulnerável.

John (1987) afirma que todo material, ao interagir com o meio ambiente, sofre transformações. A durabilidade não é uma propriedade intrínseca do material, pois se relaciona com a interação de suas características físicas e químicas com o ambiente onde se encontra e os esforços atuantes em sua vida útil.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração.

A NBR 6118 (ABNT, 2003), apresenta classes de agressividade do ambiente relacionadas às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e

outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto. Estabelece critérios de qualidade mínimos para o concreto, relacionados ao f_{ck} e a relação água/cimento, levando-se em conta as condições de exposição dos elementos da estrutura de concreto às intempéries.

A definição desta classe de agressividade ambiental (CAA) é fundamental na concepção do projeto estrutural, pois indicará os valores mínimos de resistências características à compressão do concreto que devem ser respeitados, os valores mínimos do cobrimento de armadura, os valores máximos para relação água/cimento e as máximas aberturas de fissuras permitidas.

Para Repette (1997) os meios ou ambientes quimicamente agressivos são condições a que as estruturas de concreto armado são expostas e que podem provocar sua deterioração por ataque químico. Os agentes químicos podem entrar em contato com o concreto nas formas líquida, sólida ou gasosa. Os ataques mais freqüentes e severos acontecem pela ação de líquidos, onde o solvente mais comum é a água. O ataque por gases é considerável desde que ocorra sua dissolução em solvente, novamente sendo a água o mais freqüente solvente. O ataque por agentes químicos sólidos, secos, é bastante raro.

O macroclima de uma determinada região geográfica pode ser determinado pela variação abrupta de agentes agressivos ao concreto, como a temperatura, chuvas, ventos e umidade relativa do ar. Tais agentes, associados a outros de carácter mecânico, oriundos da concepção estrutural e da funcionabilidade da estrutura, são passíveis de variações ocasionadas por diferentes situações de aplicação. A vida útil da estrutura pode ser determinada pela associação de todas estas variáveis às características intrínsecas do concreto, como resistência mecânica e susceptibilidade aos agentes agressivos, que definem suas características construtivas finais e determinam os processos e a velocidade de deterioração das estruturas.

De acordo com Moreno (2002), é notória a ressalva de que, em uma mesma edificação, elementos estruturais localizados em áreas diferentes podem estar expostos a um conjunto de condições específicas e distintas, que define um microclima e velocidades de deterioração diferenciadas, via de regra apenas percebidas em fase de inspeção e de diagnóstico de uma dada manifestação patológica.

Para que uma estrutura em concreto não atinja o fim de sua vida útil, é necessário que se desenvolvam atividades de manutenção preventivas e corretivas. Em ambas, o objetivo é prolongar a sua utilização, eliminando os problemas gerados pelos processos de deterioração, de maneira a manter ou recuperar as características da estrutura próximas ao seu nível de desempenho inicial e garantir segurança aos usuários.

No que tange à atividade de manutenção, efetivamente, de acordo com Helene (1992), os problemas patológicos ou defeitos nas estruturas de concreto, salvo raras exceções, apresentam manifestações externas ou danos característicos, como manchas superficiais, fissuras, corrosão das armaduras, ninhos de concretagem, entre outros, a partir dos quais é possível deduzir um diagnóstico conhecendo-se a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, assim como se podem estimar suas prováveis conseqüências.

Cada ocorrência patológica demanda uma recuperação com procedimentos e materiais distintos para a sua solução, havendo tecnologias de recuperação de estruturas em evolução constante. Um caso específico é a técnica de reparos localizados, que hoje é muito empregada em circunstâncias que demandam uma correção superficial do concreto e, em geral, têm por objetivo mitigar um processo crescente de corrosão das armaduras, processo esse tido como de grande incidência e de alta periculosidade em virtude das graves conseqüências geradas.

Segundo os estudos de Oliveira e Souza (2003), as patologias no Brasil apresentam a seguinte distribuição:

- 80,46% das estruturas que apresentam deslocamento do concreto possuem elementos estruturais com corrosão de armaduras;
- 68,97% das estruturas analisadas apresentam peças de concreto com deslocamento do concreto e do revestimento;
- em 73,33% dos laudos de vistoria em que são cadastrados problemas de desagregação do concreto, também são detectadas situações de corrosão das armaduras;
- em 48,51% dos casos de deformação excessiva, há fissuração do concreto, comprometendo, destarte, o estado de utilização das estruturas sintomizadas;

- a calcinação da massa de concreto provocada pelas altas temperaturas produzidas por incêndios é responsável por 12,87% dos casos de deformação excessiva da estrutura, por 11,73% dos casos de fissuração do concreto e por 26,67% dos casos de desagregação do concreto.

Segundo o Boletim do Massachusetts Institute of Technology (MIT; 1997), a corrosão do aço e a deterioração resultante das estruturas de concreto armado é uma das causas mais importantes do crescimento dos prejuízos para a infraestrutura urbana nos Estados Unidos da América. Anualmente, são gastos 50 bilhões de dólares em reparos causados por corrosão somente com pontes da rede federal americana. Segundo o mesmo documento, estima-se que o custo para reparos de estruturas de concreto armado siga da ordem de US\$ 200 (duzentos dólares) por metro quadrado de superfície exposta.

Uma outra referência relativa aos custos envolvidos diretamente com reparos localizados para concreto é dada por Chan; Ainsworth e Read (1991). Segundo esses autores, o orçamento anual de manutenção do Departamento de Moradias de Hong Kong gira em torno de 140 milhões de dólares, dos quais cerca de 13 milhões são gastos especificamente com reparos superficiais para concreto.

Não há um momento certo para realização de uma vistoria. Pode ser efetuada em qualquer momento da vida em uso da estrutura e normalmente é estimada no momento de uma intervenção ou atividade de manutenção corretiva, podendo-se realizar o diagnóstico que indicará o período entre a idade atual da edificação e o prazo de vida útil residual.

Para Helene (1993), a vida útil residual corresponde ao período de tempo em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções, iniciando-se da data de uma vistoria.

Segundo Da Silva (1998), a vida útil, apesar de diversos estudos e conceituação, é de difícil determinação, devido aos diversos fatores envolvidos e da aleatoriedade dos fenômenos.

A recuperação das estruturas de concreto é de capital importância à preservação das obras civis, já que ameniza os investimentos, muitas vezes altos, necessários para uma eventual substituição, principalmente em obras de grande porte.

Entretanto, é de suma importância o domínio tecnológico dos materiais e dos serviços de reparo a serem utilizados, de modo que se garanta resistência e durabilidade às estruturas reparadas, prazos consideráveis de vida útil residual e, assim, o devido retorno financeiro dos investimentos em manutenção.

Pode-se verificar que as iniciativas para a normalização dos materiais e serviços de recuperação das estruturas não são simples, uma vez que seus requisitos de desempenho podem variar em grande escala, conforme o tipo de obra, a concepção de projeto e o grau de deterioração da estrutura, bem como pelas características ambientais.

Tais fatores determinam a necessidade de uma análise técnico-científica qualificada da situação em que se encontra a estrutura, definindo o processo de execução dos serviços de recuperação e os materiais a serem empregados, para garantir a sua durabilidade e eficácia.

Os métodos de análise de imagens estão sendo cada vez mais usados para avaliar e entender, de forma mais pertinente, o comportamento de concretos, argamassas e pastas de cimento.

A análise de imagens é uma ferramenta para investigação da estrutura e morfologia de um material em escala microscópica seja ele concreto, argamassa, pasta de cimento, metais ou polímeros. Essa investigação é importante para assegurar que as associações entre as propriedades e a estrutura (e defeitos) do material estejam suficientemente compreendidas, e, estabelecidas estas relações, prever o seu comportamento.

1.2 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

As condições de precariedade em que se apresentam as estruturas de concreto armado quanto à qualidade e durabilidade acarretam uma crescente preocupação em todo o mundo, sobretudo pelos altos custos de recuperação. Torna-se necessário, cada vez mais, um vasto conhecimento do emprego de técnicas corretivas.

Para Clímaco e Nepomuceno (1994), a normatização específica destinada a programas de manutenção são ainda bastante precárias, apesar de ser crescente o reconhecimento da importância da manutenção estrutural, mesmo nos países desenvolvidos.

Está sendo elaborada na Europa uma norma que se refere à proteção e reparo das estruturas de concreto, denominada Norma Européia EN 1504 – “Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity”. A norma encontra-se em fase final de elaboração, sendo que, várias partes foram concluídas entre 1998 e 2004.

De acordo com Kay e Wyatt (1997), o Comitê Técnico do Comité Européen de Normalisation (CEN), responsável pela EN 1504, identificou seis temas principais relativos a produtos e a sistemas de reparo que serão objeto dessa série de normas técnicas, como segue:

- A. Sistemas de proteção de superfícies;
- B. Argamassas e concretos para reparos estruturais e não-estruturais;
- C. Aderência estrutural;
- D. Injeção para concreto;
- E. Graute para ancoragem de armaduras e para preenchimento de vazios superficiais;
- F. Prevenção à corrosão das armaduras.

A nova norma é dividida em dez partes. Os temas citados anteriormente constituem as partes 2 a 7 da EN 1504. As demais partes apresentam definições gerais (Parte 1), controle de qualidade e avaliação da conformidade (Parte 8), princípios gerais para o uso de produtos e sistemas (Parte 9) e, por último, aplicação dos produtos e sistemas em campo e controle de qualidade dos serviços.

Segundo Ribeiro, Gonçalves e Catarino (2000), a EN 1504 contribuirá para a sistematização das atividades de reparo e recuperação de estruturas de concreto, incluindo o diagnóstico, o projeto de reparo, a execução e o controle de qualidade.

No Brasil, o aumento acentuado de aplicações de técnicas corretivas em obras de concreto vem estimulando o interesse pelo desenvolvimento dos sistemas e materiais de reparo e pelos planos de normatização do governo federal extensivos a todos os serviços e materiais ofertados pelo mercado brasileiro.

Não há norma brasileira que se refira sequer a materiais e técnicas básicas de manutenção corretiva das estruturas de concreto. Entretanto, constata-se que houve um grande aumento da oferta de materiais para este fim no mercado, tais como as argamassas de reparo industrializadas, e de aditivos e adições, que também podem ser utilizados nessas argamassas ou nas tradicionais, formuladas de maneira empírica.

No que se refere ao desempenho de argamassas de reparo, vários trabalhos podem ser citados, como os de Chaves e Da Silva (2004) e Evangelista (2004), respectivamente um artigo e uma dissertação de mestrado da Universidade Federal de Uberlândia. Em outras universidades, podemos citar a dissertação de Moreno Junior (2002) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a tese de Helena Caraseck (1996).

Entende-se que a aderência das argamassas de reparo é um requisito determinante do desempenho e da durabilidade de todo e qualquer reparo localizado. Por isso, é de fundamental importância o conhecimento dos fatores que influenciam no seu mecanismo de aderência. No entanto, no Brasil, pouco se sabe sobre os fatores intrínsecos à sua interface com o substrato. Justifica-se, portanto, o estudo dos fatores ligados à interface da argamassa de reparo e o substrato.

Assim, analisando essa interface entre o concreto e o material de reparo, mediante microscopia, o presente trabalho visa a contribuir para o entendimento do mecanismo de aderência que possibilite ponderar a eficácia da utilização de argamassas industrializadas, que sejam adequadas à execução de reparos localizados em estruturas de concreto, de forma prática, racionalizada e econômica.

1.3 OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo geral a ampliação do uso da microscopia em análises que envolvem o concreto e argamassas. O objetivo específico foi investigar, valendo-se da microscopia óptica e da eletrônica, a forma de ligação e extensão da aderência entre alguns materiais de reparo existentes no mercado, de características físico-químicas variadas, e o substrato de concreto visando obter informações de desempenho qualitativo por comparação de imagens.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por seis capítulos: os três primeiros apresentam a revisão bibliográfica a respeito do tema elegido; os seguintes referem-se à metodologia experimental, aos resultados e às conclusões.

O Capítulo 1 apresenta a dissertação, evidenciando a magnitude do tema, dos objetivos da pesquisa e de seu conteúdo.

No Capítulo 2, a recuperação estrutural é apresentada como uma solução eficaz para problemas patológicos. Serão apresentados técnicas e materiais de reparo, características, classificação, descrição de seus materiais constituintes e suas funções.

Em seguida, o Capítulo 3, versa sobre o surgimento da microscopia óptica e eletrônica, e sobre a sua aplicação ao concreto.

A fase experimental é apresentada no capítulo 4, em que cada etapa e critérios, desde a preparação das amostras são descritos.

Os resultados experimentais e a sua análise estão dispostos no Capítulo 5, seguindo a linha de atividades previstas no programa experimental.

O Capítulo 6 traz as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL

2.1 PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Helene (1992) define por Patologia das Estruturas como sendo o estudo de todas as etapas que constituem o diagnóstico de um problema estrutural. Na realidade, pode ser entendido como um campo da engenharia que se destina ao estudo das origens, causas, sintomas, mecanismos e conseqüências de falhas nas estruturas.

Para Cánovas (1998), a patologia é função da qualidade da própria edificação, uma vez que tais falhas podem ser consideradas como frutos do descaso com que a durabilidade estrutural vinha sendo tratada nos últimos anos.

Souza e Ripper (1998) classificam-nas como simples, de diagnóstico e profilaxia evidentes, e complexos, que requerem um maior conhecimento sobre o assunto, e, ainda, afirmam que a durabilidade estrutural está intimamente ligada a procedimentos que lhe garantam um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção, ou seja, o período de tempo no qual suas características estruturais correspondem aos limites mínimos especificados.

A durabilidade estrutural é abordada de maneira inédita em normas brasileiras pela NBR 6118 (2003), que se refere às principais diretrizes e aos critérios de projeto e menciona os mecanismos de degradação relativos ao concreto e à armadura.

A exigência de rigorosos controles de qualidade no processo de aquisição e seleção dos componentes do concreto é imprescindível, uma vez que uma eleição incorreta, pode implicar prejuízos a suas características, que deverão atender àquelas prescritas em normas

técnicas, como sua durabilidade. Tais características também estão relacionadas com a homogeneidade e com a compactação, que dependem da qualidade da dosagem do concreto e da tecnologia empregada em sua fabricação e manejo. São dois os fatores mais importantes que vão influir na dosagem e tecnologia do concreto: um é a relação agregado/cimento e o outro, a relação água/cimento (CÁNOVAS, 1988).

Segundo Kropp et al (1995), a cura do concreto, seu lançamento, sua compactação e até sua resistência à compressão são fatores que estão relacionados com o controle da sua durabilidade, assim como as propriedades e características de seus componentes.

Para Souza e Ripper (1998), certas características como densidade, compacidade, capilaridade, permeabilidade, porosidade e fissuração, além da resistência mecânica, são de extrema importância para se identificar a qualidade do material e determinadas pela quantidade de água presente no concreto. O intemperismo deve ser visto como fator de extrema importância pelo profissional na concepção do projeto e em sua execução, pois pode interferir significativamente na durabilidade do concreto.

Outrossim, o conhecimento e o entendimento de todas as etapas de um problema patológico são necessários para que se determine a real condição da estrutura deteriorada. Isso permitirá uma avaliação mais precisa das anomalias existentes, suas causas, conseqüências e providências a serem tomadas, além de métodos de tratamentos adequados. Será possível, a partir de tais conhecimentos, projetar e executar estruturas de concreto armado de uma maneira mais racional, prolongando, assim, sua vida útil.

2.1.1 Origem

Helene (1992) divide o processo de construção civil em cinco etapas: planejamento, projeto, fabricação de materiais e componentes fora do canteiro, execução e uso. O fato de certos problemas só se manifestarem na última etapa, se dá pelo fato de abranger um período maior. A técnica de correção adotada depende de uma correta identificação da etapa na qual se iniciaram os fenômenos patológicos, o que também permite encontrar, para fins periciais, os responsáveis pela falha.

Vários pesquisadores, segundo Souza e Ripper (1998), têm procurado relacionar, percentualmente, as causas dos problemas patológicos às diversas etapas do processo construtivo (Tabela 2.1). As conclusões, às vezes, são conflitantes, por apresentarem uma linha de pesquisa não-uniforme, ou seja, devido ao fato de os estudos terem sido realizados em diferentes continentes e de situações que podem ter dificultado a definição de parâmetros.

Tabela 2.1 – Análise percentual das causas de problemas patológicos em estruturas de concreto.

FONTE	CAUSAS DOS PROBLEMAS PATOLÓGICOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO			
	Concepção e Projeto	Materiais	Execução	Utilização e Outras
Edward Grunau Paulo Helene (1992)	44	18	28	10
D. E. Allen (Canadá) (1979)	55	← 49 →		-
C.S.T.C. (Bélgica) Verçoza (1991)	46	15	22	17
C.E.B. Boletim 157 (1982)	50	← 40 →		
Fundação Armado Álvares Penteado Verçoza (1991)	18	6	52	24
B.R.E.A.S. (Reino Unido) (1972)	58	12	35	11
Bureau Securitas (1972)	← 88 →			12
E.N.R. (U.S.A) (1968-1978)	9	6	75	10
S.I.A. (Suíça) (1979)	46	-	44	10
Dov Kaminetzky (1991)	51	← 40 →		16
Jean Blénot (França) (1974)	35	-	65	-
L.E.M.I.T. (Venezuela) (1965-1975)	19	5	57	19

Adaptado: Souza e Ripper (1998).

2.1.2 Sintomas e causas

A natureza, origem, causa e os mecanismos envolvidos podem ser identificados pelas manifestações externas características evidenciadas na maioria dos problemas patológicos, segundo Helene (1992).

As fissuras, as manchas superficiais, a corrosão de armaduras e os ninhos de concretagem são os sintomas ou manifestações patológicas mais comuns nas estruturas de concreto. As fissuras são patologias características das estruturas de concreto armado, devido à baixa resistência do concreto à tração. A importância de seu estudo está na influência direta ou indireta sobre a durabilidade da construção e nos efeitos psicológicos que causam às pessoas (COSENZA, 1998).

As razões da fissuração são de origem dinâmica e nem sempre é possível identificá-las. Entretanto, sabe-se que uma mesma causa produz idênticos tipos de fissuras, de maneira que cabe ao engenheiro especialista, conhecendo-a, prever um futuro quadro de fissuras, identificando, mediante uma análise detalhada, o fenômeno e determinando as suas conseqüências.

É dever do profissional, além de um diagnóstico preciso, a indicação e execução de uma alternativa corretiva que garanta à estrutura, no mínimo, a resistência mecânica e a vida útil de projeto. É de fundamental importância que a estrutura, uma vez reparada, não volte a se deteriorar. Para isso, é preciso identificar as causas e origens da deterioração para que se possa proceder aos reparos necessários.

2.1.3 Sistemas e mecanismos de deterioração

A identificação dos agentes que desencadeiam os mecanismos de deterioração do concreto é essencial para uma correta recuperação estrutural. Quando um problema relacionado a uma insatisfatória durabilidade é identificado, é necessário o diagnóstico das causas patológicas para um procedimento de recuperação eficaz e de uma adequada manutenção. Esta intervenção objetiva, além de recuperar as características da estrutura, eliminar ou, em último caso, reduzir ao máximo os efeitos dos agentes e dos mecanismos que provocam a deterioração.

Tais agentes podem ser entendidos como carregamentos, variações térmicas, presença de umidade, incompatibilidade de materiais, contaminação por íons deletérios, entre outros. A determinação das conseqüências reais de um problema no comportamento da estrutura pode ser evidenciada pelo conhecimento dos sintomas, mecanismos e agentes causadores. Assim, torna-se possível estabelecer quais e como serão as intervenções do projeto de

recuperação. A compreensão dos mecanismos envolvidos, baseados em sintomas característicos, deve ser a mais exata possível, pois estabelece uma correta definição dos procedimentos e da especificação de materiais utilizados na execução do projeto de recuperação da estrutura.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), existem mecanismos de envelhecimento e deterioração que agem e provocam efeitos deletérios ao concreto que deverão ser considerados (Tabela 2.2), havendo também aqueles que geram problemas, em geral, de maneira indireta, como as ações mecânicas e térmicas.

Tabela 2.2 – Principais mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto armado.

PRINCIPAIS MECANISMOS DE ENVELHECIMENTO E DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO			
MECANISMOS	AGENTES	AÇÃO	SINTOMATOLOGIA
1. Lixiviação	Águas puras, carbônicas, agressivas e ácidas.	Carrear compostos hidratados da pasta de cimento.	- Superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial; - Eflorescência de carbonato; - Elevada retenção de fuligem/fungos.
2. Expansão	Águas e solos contaminados por sulfatos	Reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado	- Superfície com fissuras aleatórias e esfoliação; - Redução da dureza e do pH.
3. Expansão	Agregados reativos	Reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos.	- Expansão geral da massa do concreto; - Fissuras superficiais e profundas.
4. Reações deletérias	Certos agregados	Transformações de produtos ferruginosos presentes nos agregados.	- Manchas, cavidades e protuberância na superfície do concreto.
5. Despassivação da armadura	Gás carbônico da atmosfera	Penetração por difusão e reação com os hidróxidos alcalinos dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução.	- Em casos mais acentuados, apresenta manchas, fissuras, destacamentos do concreto, perda da seção resistente e da aderência. Obs: Requer ensaios específicos.
6. Despassivação da armadura	Cloretos	Penetração por difusão, impregnação ou absorção capilar, despassivando a superfície do aço.	- Ao atingir a armadura, apresenta os mesmos sinais do item 5. Obs: Requer ensaios específicos.

Adaptado: Reis (2001).

Para Mehta e Monteiro (1994), entre os mecanismos físicos responsáveis pela degradação do concreto armado incluem-se a abrasão, a erosão e a cavitação, a cristalização de sais nos

poros e os devidos aos extremos de temperatura, tais como congelamento e fogo. Os mecanismos químicos incluem a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas ou por água pura, e reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reações álcali-agregados e corrosão de armaduras no concreto.

2.1.3.1 Reação álcali-agregado

Hasparyk (1999) afirma que a reação álcali - agregado é dividida em três categorias:

- Reação álcali – sílica: é o tipo de reação expansiva mais conhecida e a que ocorre mais rapidamente. Caracteriza-se pelo arranjo desordenado da sílica amorfa, de tetraedros construídos ao redor de um átomo de silício reagido a íons de hidrogênio e aos íons hidroxilas da solução alcalina;

- reação álcali – silicato: é considerada responsável pela deterioração de estruturas de concreto no Brasil. É a reação entre os álcalis disponíveis do cimento e alguns tipos de silicatos eventualmente presentes em certas rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), rochas metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, quartzitos e hornfels) e ígnea (granitos);

- reação álcali – carbonato: este tipo de reação é completamente distinto das reações álcali – sílica e álcali – silicato. É caracterizada pela reação de desdolomitização que é a reação que ocorre entre a dolomita e os íons hidroxilas presentes em certos agregados.

Segundo Monteiro et. al (1995), a reação álcali-agregado, ou álcali-sílica é decorrente da interação entre a sílica reativa, presente em certos agregados, e a solução alcalina, resultante da hidratação de cimentos com taxa de álcalis superior a 0,6%. Essa reação produz um sistema coloidal que, quando na presença de água, expande-se em volume, provocando fissuração e desintegração do concreto.

De acordo com Moreno (2002), os álcalis presentes no cimento podem gerar produtos expansivos na presença de certos agregados reativos, como a opala, a calcedônia, as sílicas amorfas e determinados calcários.

Fan e Hanson (1998) acreditam que a deterioração do concreto pela reação álcali-agregado pode ser evitada ou minimizada seguindo alguns métodos, como evitar o uso de agregados reativos, limitar o conteúdo de álcalis no cimento e incorporar o uso de pozolanas ou outras misturas. Mehta e Monteiro (1994) afirmam que o controle da expansão também pode ser feito regrido o acesso de água ao concreto e lavando agregados contaminados.

2.1.3.2 Corrosão da armadura

A corrosão pode ser definida, segundo Gentil (1996), como sendo a deterioração de um material, normalmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos. Ocorre principalmente em ambiente marinho, em atmosferas salinas, ou em lugares muito úmidos e com atmosferas contaminadas.

Para Repette (1997), trata-se de um processo eletroquímico no qual o ferro metálico é transformado em óxidos e hidróxidos de ferro, causando aumento de volume dos compostos originais e redução da seção das armaduras, perda de aderência entre o concreto e o aço, e fissurações e destacamentos do concreto. Em condições normais as armaduras embebidas apresentam estado de passivação propiciado pela alta alcalinidade inerente à solução dos poros de cimento. Esta passivação, no entanto, é geralmente anulada pela carbonatação do concreto que envolve as armaduras e/ou pela presença de íons cloreto atingindo a superfície das barras de aço. O ingresso de cloretos e de dióxido de carbono através do cobrimento do concreto é principalmente governado pelos fenômenos de absorção e difusão, sendo que a taxa de corrosão é dependente das características do concreto, da temperatura e da concentração de oxigênio e teor de água nos poros do concreto.

Durante a corrosão eletroquímica, há uma reação de oxidação na região anódica, de onde os elétrons migram através do condutor elétrico até a região de caráter catódico, onde reagem com alguma substância presente no eletrólito de forma a produzir uma reação de redução.

Tuutti (1982) afirma que substâncias como cloretos tem a capacidade de desestabilização do filme passivante das armaduras, imersas no concreto, além do que participa das reações

de óxido-redução no fenômeno de corrosão das armaduras. Atuam como formadores de compostos transitórios, não são os produtos finais de corrosão.

Segundo Repette (1997) a corrosão do concreto, por vezes chamada degradação por ataque químico do concreto, os processos químicos ocorrem principalmente na porção da pasta hidratada de cimento e na superfície de alguns agregados, causando dissolução ou expansão de alguns dos seus componentes. O ataque químico pode ser diferenciado em ataque ácido, ataque por sulfatos e ataque alcalino.

O concreto, quando bem executado, protege a armadura da corrosão, pois atua como uma barreira física que impede ou retarda a chegada dos agentes agressivos, e uma barreira química, formada por óxidos, a partir de reações superficiais da armadura com os compostos alcalinos do concreto.

A corrosão é um fenômeno intimamente relacionado à presença de oxigênio e água. Portanto, após a despassivação da armadura, para que tal fenômeno se evidencie, é indispensável o seu contato com o ar atmosférico, umidade e, ainda, o estabelecimento de uma célula de corrosão eletroquímica, proveniente de uma diferença de potencial intrínseca da estrutura, devido a sua heterogeneidade.

A despassivação da armadura se deve principalmente a dois mecanismos deletérios:

a) Despassivação por carbonatação

Devido à ação do dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera, que penetra por difusão e reage com os componentes hidróxidos alcalinos da solução dos poros da pasta de cimento hidratada, na presença de umidade, formando basicamente carbonatos e água, reduzindo o pH dessa solução. A redução do pH (valores inferiores a 9), ao atingir a armadura, e na presença de umidade, promove a corrosão do aço, com aparecimento de manchas, fissuras, destacamento do concreto e perda de seção resistente da armadura, podendo promover o colapso da estrutura ou de suas partes.

Para Tutti (1982) a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, geralmente, varia entre 0,03 e 0,1 %. O valor máximo é uma aproximação para áreas urbanas, acentuado pelo tráfego e atividades industriais, e o mínimo é um valor admitido para áreas rurais.

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

Segundo Verbeck apud Cánovas (1988), a carbonatação máxima ocorre a uma umidade relativa do ar de 60%, enquanto num ambiente saturado ou seco, tem-se uma carbonatação de apenas 20% do máximo anterior, conforme mostrado na Figura 2.1.

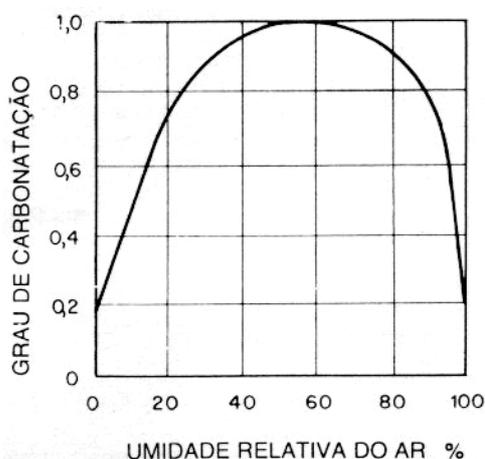


Figura 2.1 – Carbonatação do concreto em função da umidade.

Fonte: Verbeck apud Cánovas (1988).

b) Despassivação por íons cloro (cloretos):

Ocorre por penetração do íon cloreto através de processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto que, ao superarem, na solução dos poros do concreto, um certo limite em relação à concentração de hidroxilas, despassivam a superfície do aço e instalam o processo de corrosão. É considerado, de forma consensual, o principal agente causador da corrosão em armaduras, e o que provoca os danos mais severos nas estruturas de concreto armado (TUUTTI, 1982).

Os pites são crateras que constituem o ânodo da reação e progridem em profundidade, podendo chegar a produzir a ruptura puntual das barras (ANDRADE, 1992).

Os efeitos são os mesmos provocados pela corrosão por carbonatação, mas muito mais difíceis de serem corrigidos, pela dificuldade da remoção do cloreto, mesmo por técnicas especiais.

Segundo Helene (1997), há também os mecanismos que atuam na estrutura propriamente dita, relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação, entre outros. Para cada mecanismo de deterioração, há procedimentos distintos a serem realizados e muitas vezes materiais alternativos a serem empregados.

Segundo Tuutti (1982), o concreto tende a permanecer mais umido na presença de grandes quantidades de cloretos, aumentando o risco de corrosão pela diminuição de sua resistividade elétrica. São fontes comuns de cloretos os aditivos, os agregados contaminados por sais, águas de amassamento contaminadas e a penetração de soluções com sais degelantes, salmouras industriais, maresias ou névoas de ambiente marinho ou água do mar.

2.1.3.3 Lixiviação

Trata-se de um fenômeno causado pela ação de águas puras e moles (geralmente pobres em sais), carbônicas, agressivas e ácidas, que têm a habilidade de dissolver alguns compostos hidratados da pasta de cimento, destacando-se o hidróxido de cálcio e os compostos aluminosos.

Os danos causados ao concreto são proporcionais ao fluxo e a renovação da água pura em contato com o mesmo. A solubilidade e expansibilidade dos compostos formados pela reação dos compostos do cimento hidratado com os ânions e cátions das respectivas dissoluções desses sais são responsáveis diretos pela agressividade de sais ao concreto. Sais de amônio, como os nitrato e sulfato de amônio, são apontados como os mais agressivos, causando intensa dissolução de compostos do cimento hidratado. Sais de magnésio também causam enfraquecimento da capacidade aglutinante do cimento, devido às reações de substituição entre o Mg^{2+} e o cálcio do silicato de cálcio hidratado, CSH. Por outro lado, o ataque simultâneo por sulfatos e magnésio é particularmente intenso na geração de produtos expansivos (REPETTE, 1997).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), estas águas, quando em contato com a pasta de cimento Portland, tendem a hidrolisar ou a dissolver os produtos que contêm cálcio. Sua consequência pode ser o risco de desenvolvimento de fungos e bactérias, além da redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais do concreto, com risco de despassivação da armadura.

Tal mecanismo ocorre na presença de água corrente ou infiltração sob pressão, que pode arrastar o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) até a superfície de concreto, deixando os outros constituintes do cimento sujeitos à decomposição química. Esse processo deixa resíduos de géis de sílica e alumina com baixa ou nenhuma resistência, além da diminuição do potencial hidrogeniônico (pH) do concreto.

Segundo Sobral apud Tinôco (2001), para que ocorra um dano considerável é imprescindível que o ataque se manifeste durante um longo período de tempo. Desta forma, na prática, tal ataque não é tão comum, e ocorre somente com águas praticamente puras, como as destiladas, as provenientes de chuva, as da condensação de vapores, as resultantes do degelo etc.

O hidróxido de cálcio em presença do ar atmosférico transforma-se em carbonato de cálcio, pelo processo conhecido como carbonatação. O produto dessa reação pode depositar-se na superfície externa do concreto, causando uma desagradável aparência. Surgem como resultado da lixiviação as formações do tipo estalactites e estalagmites. Este fenômeno também pode ser denominado de eflorescência (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.1.3.4 Expansão por sulfato

O ataque por sulfatos é principalmente caracterizado pela reação entre o íon sulfato, vindo da solução agressiva, com os compostos hidratados de aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) do cimento (REPETTE, 1997).

Ocorre por ação de águas ou solos, com a pasta de cimento hidratado, que contenham ou estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e danosas. Os sulfatos, segundo Biczók apud Tinôco (2001), estão presentes em ácidos ou sais que contenham o ânion sulfato (SO_4^{-2}), provenientes de águas residuais industriais, diluídos sob a forma de ácido sulfúrico, de águas de subsolo ou de água do mar.

São considerados responsáveis pela maioria dos processos de destruição de argamassas e concretos, causados pela formação de sais, sendo normalmente precedidos de lixiviação. Este ataque é considerado o mais freqüente e perigoso dentre todos os ataques químico

Segundo Repette (1997), se existe quantidade de água suficiente nos poros do concreto, a reação entre estas substâncias gera sulfoaluminatos de cálcio e/ou ferrosulfatos de cálcio, os quais incorporam uma grande quantidade de moléculas de água, apresentando um volume bastante maior do que os dos produtos que lhes deram origem. Este aumento de volume acarreta o surgimento de tensões internas no concreto, podendo conduzir a fissuras e a perdas de resistência e durabilidade.

O ataque por sulfato pode-se manifestar na forma de expansão do concreto ou na perda progressiva de resistência e massa, dependendo da concentração e fonte dos íons sulfatos na água de contato e da composição da pasta de cimento no concreto.

Souza e Ripper (1998) mencionam que a ação de águas sulfatadas pode ser responsável, após algum tempo, pela total desagregação do concreto. Os principais sulfatos, como os de magnésio, potássio, cálcio, sódio e amônio, são encontrados em águas subterrâneas, em águas do mar e, em alguns casos, em águas poluídas com dejetos industriais. Quando são transportados para o interior do concreto, dão origem à formação de um sal, conhecido por sal de *Candlot*, e levam à sua desagregação.

Segundo Helene (1997), o concreto que sofre ataque por sulfatos irá apresentar fissuras aleatórias na superfície, esfoliação e redução significativa da dureza e resistência superficial, com a conseqüente redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais.

A redução da permeabilidade é a melhor medida preventiva contra o ataque de sulfatos, obtida pelo alto consumo de cimento, baixa relação água/cimento (a/c), compactação adequada e cura apropriada.

2.1.4 Diagnóstico

Segundo Johnson apud Vanderlei (1996), “diagnosticar as causas da deterioração de uma estrutura de concreto consiste essencialmente em proceder por eliminação até chegar a uma conclusão”. Entretanto, após propor uma marcha a seguir para formular um diagnóstico,

acrescenta que nem sempre procedendo desta forma se chegará a alguma conclusão, devido à limitação de nossos conhecimentos atuais, porém mais comumente devido a uma falta de dados, principalmente no que se refere aos antecedentes da obra.

Para Cánovas (1998), uma simples inspeção de um técnico experiente pode diagnosticar determinadas manifestações patológicas. Porém, mediante a complexidade do problema, será essencial verificar o projeto, investigar as cargas que atuam sobre a estrutura, além da análise minuciosa de como a obra foi executada.

Souza e Ripper (1998) apresentam uma metodologia genérica (Figura 2.2) para a inspeção de estruturas convencionais, dividida em três etapas básicas: levantamento dos dados, análise e diagnóstico.

A necessidade ou não de adoção de medidas especiais é verificada na primeira etapa do levantamento dos dados, que fornece subsídios para que a análise possa ser feita corretamente. A segunda etapa conduz o analista a um perfeito entendimento do comportamento estrutural e de como surgiram e desenvolveram as manifestações patológicas. Na última etapa faz-se o diagnóstico, que somente é realizado após a conclusão das duas primeiras etapas, e que, dependendo de uma série de fatores (econômicos, técnicos, de segurança e de conforto), poderá levar a diversas conclusões, inclusive a de demolição estrutural.

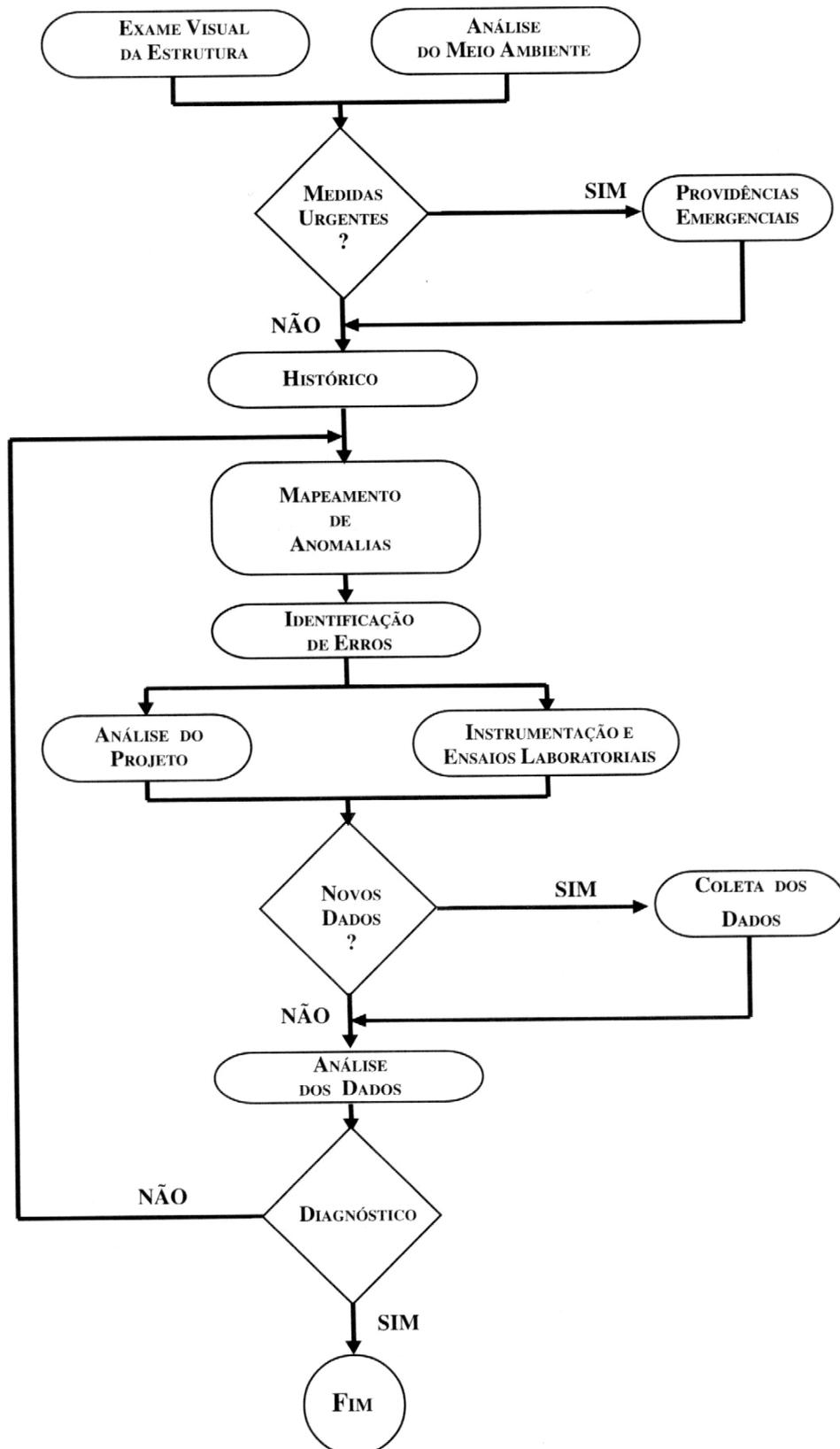


Figura 2.2 – Fluxograma genérico para a diagnose de uma estrutura convencional.

Fonte: Souza e Ripper (1998).

2.2 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO

Uma vez identificadas as causas da deterioração de uma estrutura de concreto armado, mediante um preciso diagnóstico, torna-se necessária uma manutenção corretiva e um procedimento racional de recuperação deve ser iniciado.

Fatores como o descaso em relação ao controle da qualidade dos serviços e de materiais empregados em projetos cada vez mais arrojados, aliado ao avanço tecnológico e à dinâmica vivenciada pelas construções, estão levando as estruturas, tidas como recentes, a necessitarem de um processo de recuperação estrutural precocemente.

A recuperação estrutural visa, tão-somente, a reconstituição das características geométricas, de resistência e desempenho originais de uma estrutura de concreto.

Segundo Souza e Ripper (1998), de acordo com a profundidade, com o grau de deterioração e, conseqüentemente, com a finalidade almejada, os serviços de recuperação são classificados em reparos rasos (profundidade inferior a 2 cm), semiprofundos (profundidade entre 2 e 5 cm) e profundos (profundidade acima de 5 cm).

Os considerados rasos também são classificados de acordo com a área a ser reconstituída: em pequenas (até 15 m²) ou grandes áreas (maior que 15 m²).

Clímaco et al. (1997) comentam que a complexidade do setor de reparos se deve à necessidade de se obter a avaliação precisa das condições da estrutura, exigindo altos conhecimentos e condições operacionais, que envolvam o uso de técnicas e materiais especializados para o desenvolvimento do projeto de reparo (Figura 2.3).

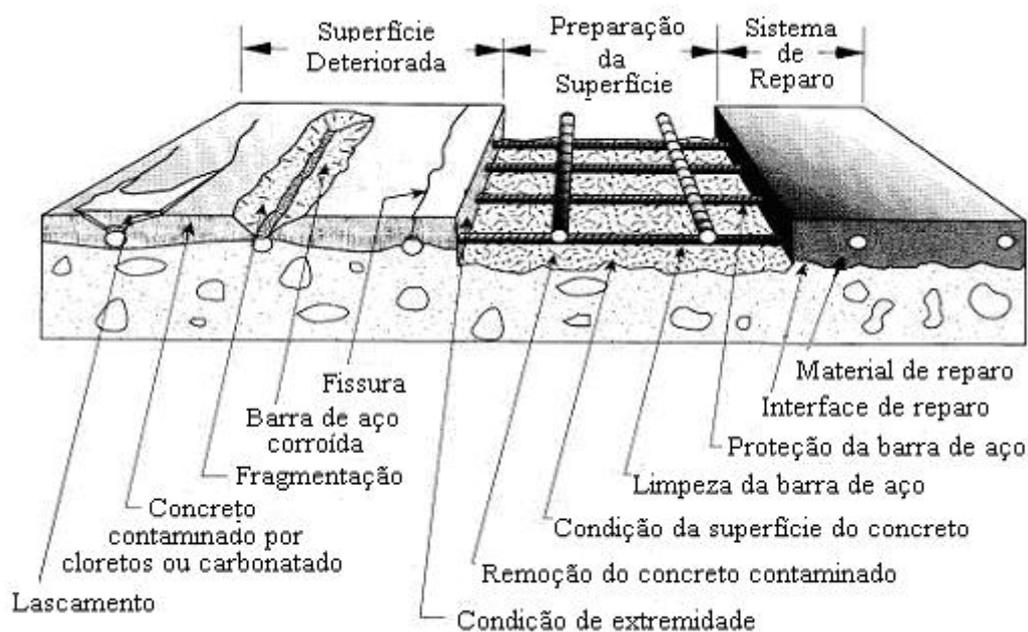


Figura 2.3 – Anatomia de um reparo de concreto.

Fonte: Emmons e Vaysburd (1993).

2.2.1 Preparação superficial

Segundo Moreno (2002), se não forem cessados os agentes da degradação, os reparos superficiais, sejam localizados ou aplicados a grandes áreas, apenas podem contribuir na formação de uma barreira temporária entre o agente agressivo e o concreto, melhorando a estanqueidade do sistema.

Helene (1992) afirma que alguns autores consideram que os procedimentos de preparo e de limpeza do substrato são responsáveis por 50% ou mais do sucesso de um reparo. Para Emmons (1994), essa etapa é uma das mais críticas do processo de recuperação estrutural, uma vez que influencia diretamente na qualidade da aderência entre o reparo e o substrato de concreto.

Uma correta definição da área a ser analisada, feita com o auxílio de um disco de corte, evita um número desnecessário de recortes, o que acarretaria um aumento no quadro fissuratório do reparo.

Dentre os procedimentos mais comuns de preparo do substrato destacam-se: a escarificação manual (ponteiros e marretas) e mecânica (martelos rompedores

pneumáticos), a utilização de discos de desbaste e de corte, lixamento e escovamento manual e/ou elétrico, o jato de areia seco ou úmido, máquina de desbaste superficial e a remoção. Já a limpeza da superfície pode ser feita através de aspiração a vácuo, jatos de água fria e quente, jato de ar comprimido, vapor, soluções ácidas e alcalinas, solventes e aspiração a vácuo.

O jato d'água a alta pressão é, hoje, o método mais utilizado para a retirada do concreto contaminado, garantindo à superfície uma boa rugosidade para a aplicação do material de reparo.

Piancastelli (1998) afirma que é necessário cuidar para que o contorno das aberturas seja bem definido, de modo a favorecer a aderência e a aplicação dos materiais de reparo.

Para Reis (2001), o preparo do substrato é responsável por grande parte do sucesso do reparo estrutural, ou seja, o concreto-base deve ter resistência adequada e solidez para receber o tratamento, sendo essencial também a preparação da superfície da junta.

2.2.2 Reparos superficiais

Cada técnica específica de reparo de estruturas varia de acordo com a situação em que a estrutura se encontra e com os mecanismos preponderantes de deterioração. Podem-se relacionar intervenções que visam apenas à proteção de elementos estruturais e seu reparo superficial localizado ou de grandes áreas, reconstituindo a seção transversal do elemento e sua estética, ou reforços estruturais para recomposição da capacidade portante ou mesmo para sua ampliação.

Król e Halicka apud Moreno (2002), define de forma completa e objetiva as diferentes situações enfrentadas:

- 1. Reparo:** reconstituição dos fragmentos danificados da estrutura quanto ao fluxo dos esforços internos não é afetado, e os estados limites último e de utilização são satisfeitos.
- 2. Reconstituição:** renovação de elementos estruturais completamente danificados, que cessaram de desempenhar seu papel estrutural devido à deterioração. A reconstituição

retoma ou restitui o estado inicial dos esforços internos e as funções de desempenho e serviço da estrutura.

3. Reforço: adaptação do elemento estrutural para produzir aumento na sua capacidade de carga, o que normalmente causa a redistribuição dos esforços internos. Pode ser obtido, por exemplo, com o aumento da seção transversal do elemento, aplicação de armaduras, protensão, entre outros.

4. Reconstrução: geralmente significa a mudança do esquema estrutural com o objetivo de modificar o projeto inicial e, assim, as funções dos elementos. Está ligado com a redistribuição das forças internas.

As argamassas estudadas neste trabalho têm a função de serem aplicadas como reparos superficiais e não para situações de reforço estrutural.

Para a maioria dos mecanismos de deterioração mencionados, os reparos superficiais podem ser aplicados, sendo mais eficientes em circunstâncias em que se pode cessar a ação dos agentes causadores da deterioração.

Se não forem cessados os agentes da degradação, os reparos superficiais, sejam localizados ou aplicados a grandes áreas, apenas podem contribuir na formação de uma barreira temporária entre o agente agressivo e o concreto, melhorando a estanqueidade do sistema.

Para Moreno (2002) a técnica de reparo superficial consiste basicamente da aplicação de uma camada de argamassa de reparo de espessura limitada, em geral inferior a 50 mm, de maneira a reconstituir a seção transversal de um elemento estrutural de concreto. Um dos requisitos mais importantes para a aplicação dessa técnica se refere ao controle da espessura total ou profundidade do reparo, que não deve ultrapassar os 50 mm, podendo esta espessura ser limitada a valor ainda menor conforme a formulação da argamassa.

Quando há a necessidade da limpeza das armaduras, é preciso que se faça a remoção do concreto afetado até se identificar a região íntegra, conhecida como substrato, e executar a limpeza dessa superfície. É necessária a utilização de equipamentos adequados, tais como martetele hidráulico, ponteiros, entre outros. A limpeza da superfície deve ser feita por

jateamento de areia ou escovamento, para que resulte isenta de partículas soltas, pó ou outro material que interfira na aderência da argamassa ao concreto.

Após o procedimento descrito, em função da profundidade ao redor da barra de aço, aplica-se a argamassa, manualmente ou por projeção mecânica, e em camadas, até recompor a seção do elemento estrutural. O acabamento superficial da argamassa pode ser dado com uma desempenadeira, de acordo com as características do reparo e dos materiais utilizados.

É importante ressaltar que, além da espessura final, da extensão do reparo e da sua função, deve ser levada em consideração uma série de outras variáveis, como a compatibilidade entre materiais, a umidade local, diferenças de temperatura, posição do reparo, entre outros.

2.2.3 Pontes de aderência

É necessária a presença de um agente adesivo, denominado ponte de aderência, que assegure a eficiência da ligação entre o substrato e o material de reparo. A aderência é uma propriedade básica e fundamental para qualquer sistema de reparo.

Entretanto, Clímaco e Nepomuceno (1994) demonstram, experimentalmente, que alguns materiais comercialmente apresentados como tendo propriedades adesivas, não têm efeito ou são, até mesmo prejudiciais à resistência de aderência. López apud Tinôco (2001) considera que o adesivo epóxi possui uma alta aderência em virtude de seu caráter polar, apesar de requerer cuidados especiais para sua aplicação, principalmente no que diz respeito à limpeza e às condições do substrato.

Helene (1992) afirma que a resina epóxi necessita de um substrato seco para a sua utilização, e é altamente sensível a temperaturas superiores a 70°C.

2.3 MATERIAIS DESTINADOS AO REPARO

A necessidade de uma análise apurada, por parte do meio técnico-científico, do desempenho de materiais destinados ao reparo durante sua aplicação e no decorrer de sua vida útil se justifica perante a vasta quantidade destes existentes no mercado e o surgimento de novos.

Piancastelli (1998) aponta como principais características destes materiais: resistência à compressão, à tração e ao cisalhamento; base química; módulo de elasticidade; resistência a ataques químicos; características dimensionais; aderência ao substrato; “pot-life” (tempo disponível para aplicação do produto após seu preparo); “open-time” (tempo no qual o produto é capaz de desempenhar sua função, após a mistura). Tais características devem ser levadas em consideração quanto aos materiais a serem utilizados.

2.3.1 Classificação dos materiais de reparo

Andrade (1992) divide os materiais de reparo em três tipos fundamentais: materiais de base cimentícia, de base orgânica e mistos.

a) Materiais de base cimentícia

Tais materiais objetivam a restauração do meio alcalino, essencial à passivação da armadura. Possuem como base o cimento Portland, cimento aluminoso, misturas de cimento Portland e aluminoso e grautes com agentes expansivos; e podem ser subdivididos em tradicionais e em não tradicionais. Aqueles possuem o cimento portland como base, ao passo que estes, além deste componente, possuem algum tipo de aditivo ou adição mineral visando a melhora de algumas de suas propriedades.

Segundo Oliveira e Souza (2003), as argamassas de cimento Portland são materiais tradicionalmente empregados na recuperação de estruturas de concreto armado. Além de proporcionar boas condições de resistência e coesão ao longo do tempo, podem apresentar ótimo desempenho no manuseio e durabilidade mediante a introdução de aditivos e adições, tais como: sílica ativa, cinza volantes, escória de alto forno, superplastificantes, polímeros e impermeabilizantes.

Dentre os materiais não tradicionais, a argamassa modificada com látex é a mais estudada, uma vez que existe uma grande gama desses produtos no mercado, principalmente aqueles prontos para aplicação. Devido à facilidade de aplicação, sem necessidade de tecnologia especial, esse tipo de argamassa é um material bastante utilizado em reparos.

b) Materiais de base orgânica

Geralmente são pouco permeáveis e apresentam boa aderência. Atuam como barreira contra a penetração de agentes agressivos na estrutura, bem como de oxigênio e umidade. Entretanto, como são de natureza química diferente do substrato de concreto, possuem algumas desvantagens quanto ao coeficiente de expansão térmica, ao módulo de deformação e à compatibilidade.

Podem ser classificados como termoplásticos (resinas acrílicas, estirenobutadieno etc.) ou como termoendurecedores (resinas epóxi, poliéster, poliuretanos etc.).

As argamassas de base epóxi são produtos obtidos com agregados miúdos e um ligante polimérico, que apresentam excelentes propriedades físicas, além de boa aderência a diversos tipos de superfície. Segundo Piancastelli (1998), as resinas epóxi não apresentam retração durante a polimerização, entretanto, depois de endurecidas, apresentam um coeficiente de dilatação térmico bastante superior ao do concreto.

c) Materiais mistos

São aqueles constituídos de cimento portland e algum outro material polimérico ou resina orgânica, com o objetivo de melhorar a qualidade do produto final.

Segundo Moreno (2002), outras classificações podem ser adotadas, como a do GEHO (1989) e a de Helene (1992), bastante semelhantes e também baseadas na natureza do aglomerante.

Cabe salientar que as combinações dos tipos de aglomerante e de adições poliméricas ou inorgânicas determinam uma razoável gama de propriedades e de possibilidades de formulação das argamassas de reparo.

No entanto, não há qualquer literatura que discuta critérios racionais para a dosagem dessas argamassas, principalmente das formuladas a base de cimento Portland, que sempre apresentam a possibilidade de serem dosadas em obra.

2.3.2 Materiais constituintes e sua funcionabilidade

Serão apresentadas, de maneira sucinta, as características e funções principais dos materiais constituintes das argamassas de reparo a base de cimento Portland.

2.3.2.1 Aglomerante

Os aglomerantes formam a matriz cimentícia das argamassas, responsável pela aglutinação dos agregados e pelo desenvolvimento do mecanismo de aderência ao substrato.

O desenvolvimento da resistência mecânica, e de todas propriedades físicas das argamassas, irá, de alguma forma, depender tanto das características do aglomerante quanto de outros parâmetros intrínsecos associados à dosagem ou à produção da argamassa. Podem-se citar: a relação água/cimento, a proporção agregado/cimento, a idade da argamassa, entre outros.

A escolha do cimento Portland preferencialmente não deve levar em conta somente a sua composição química potencial, mas deve ponderar quais são os ensaios de desempenho das argamassas nas condições o mais próximas possível à sua aplicação e às propriedades determinantes da durabilidade dos reparos.

Se avaliados os catálogos técnicos dos fabricantes de cimento, qualquer tipo de cimento estrutural pode ser usado para a produção de argamassas de reparo, exceto em meios agressivos. No entanto, os cimentos tipo V - ARI são, em geral, preferidos pela garantia de maior resistência inicial que apresentam. Assim, são muito freqüentes estudos tecnológicos com este tipo de cimento e poucas informações se tem sobre o desempenho de outros tipos quanto à aderência, como é o caso do cimento composto tipo CPII.

2.3.2.2 Agregado miúdo

A função do agregado miúdo é de enchimento e estruturação da argamassa, constituindo um material pouco deformável, que suporta parte da retração do cimento. Nas argamassas de reparo, podem ser utilizadas areias naturais ou artificiais, provenientes da britagem de rochas. O agregado miúdo mais utilizado para a produção de argamassas e de concretos é a areia natural, extraída de rios. Para seu uso, devem ser isentas de matéria orgânica, argila e

outras impurezas que possam prejudicar ou mesmo comprometer o desempenho das argamassas.

As propriedades das argamassas dependem significativamente das características da areia empregada, principalmente da sua granulometria e do teor de finos. Deficiências na granulometria ou excesso de finos podem exigir uma maior demanda de água, que pode alterar suas propriedades físicas e mecânicas.

2.3.2.3 Aditivos

Os aditivos são produtos químicos formulados para melhorar ou modificar algumas propriedades de argamassas e concretos, tanto no estado fresco como no estado endurecido, de acordo com a aplicação do material.

Os aditivos normalmente são usados em baixos teores e classificados segundo sua ação principal em concretos e argamassas, sendo de maior interesse para uso em argamassas de reparo os aceleradores de pega e endurecimento, os retardadores, os redutores de água, os expansores e os impermeabilizantes.

Segundo Helene apud Moreno (2002), com base em conceitos da RILEM, considera-se como aditivo todo produto adicionado até o máximo de 5% em relação à massa de cimento. Acima dessa porcentagem, tal produto deve ser considerado como adição e, em geral, seu teor passa a ser indicado no traço da argamassa.

2.3.2.4 Adições

São matérias primas que, misturadas ao clínquer na fase da moagem, contribuem na composição dos diversos tipos de cimento disponíveis no mercado. A utilização de adições também objetiva a melhora das propriedades das argamassas.

Algumas adições podem substituir parte do aglomerante se adicionadas em proporções convenientes.

Podem-se citar algumas razões da utilização das adições, como o aproveitamento de resíduos poluidores (ecológica), preservação de jazidas (estratégica) e a diminuição no consumo de energia (econômica).

Tipos de Adições:

a) Filer Calcário

Calcário moído, quimicamente inerte, adicionado ao clínquer durante a moagem para diminuir a permeabilidade e porosidade de concretos e argamassas e melhorar a trabalhabilidade.

b) Escória de Alto Forno

Produto não metálico, constituído essencialmente de silicatos e aluminatos de cálcio, resultante do tratamento do minério de ferro.

c) Pozolana

Material silicoso natural, não aglomerante por si mesmo e que, finamente dividido, reage com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando os mesmos compostos resultantes da hidratação dos cimentos.

d) Sílica Ativa

Subproduto da produção de silício metálico e ligas de ferro-silício, composto de partículas extremamente finas (100 vezes menores que as do cimento) de dióxido de silício amorfo. Atuam na pasta de cimento por efeito de micro filer e efeito pozolânico.

2.3.3 Desempenho e propriedades das argamassas de reparo

A determinação de propriedades adequadas que a argamassa de reparo deve possuir é fundamental para a garantia de qualidade de um reparo superficial.

De acordo com o Grupo Español del Hormigon (GEHO, 1989), os fatores que devem ser levados em conta para selecionar uma argamassa de reparo, conforme as características do local a se reparar, são:

1. O grau de deterioração da estrutura, suas causas e evolução, assim como a resistência do concreto a ser reparado;
2. Espessura a ser executada, uma vez limpa a superfície;
3. Local que deve ser preenchido, ainda que os reparos sejam superficiais. Existem situações em que há vazios no interior do concreto, em geral, onde existem armaduras;
4. As condições de temperatura e umidade do ambiente;
5. As solicitações físico-químicas às quais a estrutura está exposta;
6. O tempo disponível para a execução do reparo, que é função das exigências para alcançar as resistências solicitadas.

Segundo Wood; King e Leek (1990) apud Moreno (2002), as principais propriedades de uma argamassa de reparo são divididas em três grupos:

a) Propriedades físicas: diagrama tempo/resistência, diagrama tensão/deformação, resistência à tração, resistência de aderência, deformação lenta, coeficiente de expansão térmica, retração por secagem, deformações cíclicas por molhagem (ou umedecimento) e secagem, permeabilidade e resistência à difusão.

b) Propriedades químicas: conteúdos de álcalis, de C_3A e de cloretos.

c) Propriedade eletroquímica: resistividade.

É necessário determinar o tipo de argamassa a ser empregada em paralelo à definição das condições da estrutura a ser reparada e das técnicas de execução do serviço, e, sobretudo, quais são suas propriedades críticas, de forma que as propriedades finais do sistema de reparo possam contribuir para a durabilidade e o desempenho da estrutura em manutenção.

Cabe salientar que após as atividades de reparo, segundo Helene (1992), é necessário que sejam tomadas medidas de proteção da estrutura, com a implementação de um programa de manutenção periódica, que deve levar em conta a importância da obra, a vida útil residual prevista, a agressividade das condições ambientes de exposição e a natureza dos materiais e medidas protetoras de acabamento adotadas.

2.3.4 Requisitos de compatibilidade entre a argamassa de reparo e a estrutura de concreto

De acordo com Emmons e Vaysburd (1996), as propriedades físicas, químicas e eletroquímicas definem a compatibilidade em um sistema de reparo entre a argamassa e o substrato, responsável pela garantia de que a estrutura reparada suportará as tensões induzidas por cargas, mudanças de volume e as influências químicas e eletroquímicas do material de reparo e do ambiente, sem abalo e deterioração em determinado ambiente e dentro de certo período de tempo.

Segundo Vaysburd; Emmons (2000) apud Medeiros, a indústria da construção não se atenta a dois tópicos relacionados à corrosão prematura em estruturas de concreto reparadas: fissuras (pela retração por secagem e a outros fatores) e incompatibilidade eletroquímica (por força das mudanças na interface causadas pelo reparo). Estes seriam uma das origens dos problemas de compatibilidade.

2.3.4.1 Compatibilidade de deformações

O reparo localizado em estruturas de concreto armado coloca materiais distintos em contato e, por isso, anseia por uma análise do sistema quanto às possíveis diferenças na mudança do volume dos materiais envolvidos, quando submetidos às variações de umidade, temperatura e carregamento. Podemos entender, equivocadamente, que, quando se trata de reparos à base de argamassas de cimento Portland, essa questão torna-se desprezível, pelo simples fato de serem essas argamassas da mesma natureza do concreto.

Contudo, segundo Emmons et al.(1993), as mudanças de volume das argamassas precisam ser controladas em reparos de concreto, para evitar ou minimizar a ocorrência de fissuras na interface com o concreto.

A Figura 2.4 destaca em preto os principais requisitos que devem ser levados em consideração na escolha de opções de argamassa de reparo, com relação à obtenção da compatibilidade de deformações, tendo-se por objetivo evidenciar e sintetizar a complexidade dos requisitos envolvidos.

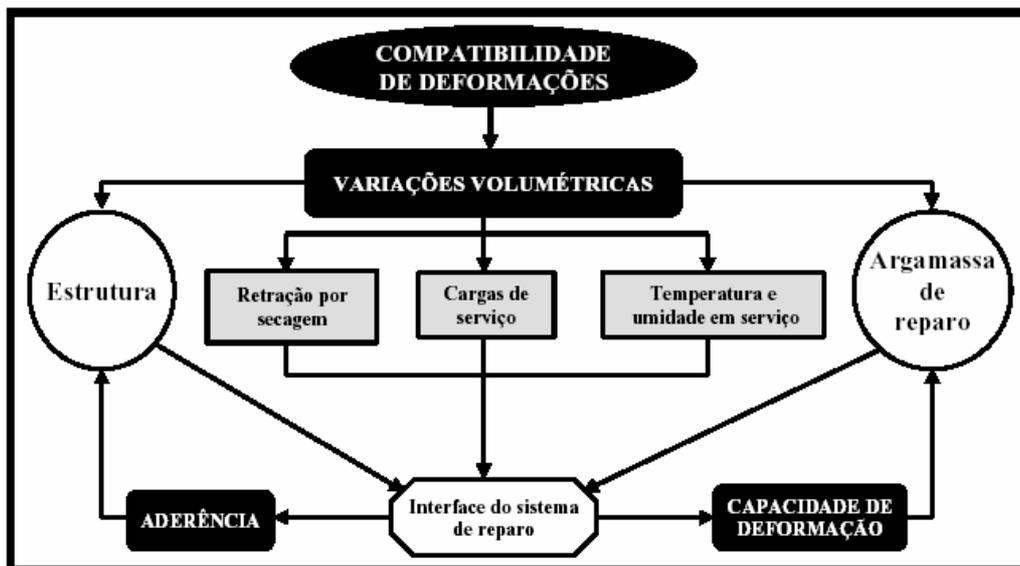


Figura 2.4 – Requisitos principais para compatibilidade de deformações entre sistemas de reparo localizados e estruturas de concreto.

Fonte: Selmo (2001) apud Medeiros (2002).

A aderência nos sistemas de reparo é a propriedade responsável pela capacidade de a peça reabilitada trabalhar de forma monolítica com a estrutura. Moreno (2002) realizou pesquisa recente sobre o tema.

2.4 ADERÊNCIA

O termo aderência pode ser entendido como a capacidade de fixação do material de reparo ao substrato ou base de aplicação.

É usado, genericamente, para descrever tanto a resistência mecânica como a extensão do espalhamento ou contato resultante entre o material de reparo e a superfície da estrutura de concreto a ser reparada.

Trabalhos antigos ou recentes, como a dissertação de mestrado de Moreno (2002), também adotam essa terminologia, com origem em conceitos físicos clássicos adotados referentes à tecnologia de argamassas.

Coutinho (1973) apresenta quatro tipos de aderência: aderência mecânica em escala macroscópica, aderência entre as superfícies de ligação da pasta e do agregado, aderência na escala das dimensões da rede cristalina e aderência de origem química.

É responsável pela transferência efetiva das deformações e, conseqüentemente, dos esforços a que a estrutura estará sujeita ao longo do tempo, bem como pela proteção das armaduras reparadas.

O desempenho global do sistema de recuperação executado com argamassas em estruturas de concreto, seja superficial localizado ou estrutural, está intimamente relacionado com a aderência, tida como uma propriedade básica e fundamental para qualquer sistema de reparo. A deficiência desta propriedade pode comprometer o desempenho global do sistema.

Fissuras na interface ou falhas de aderência, que tornam o sistema mais permeável e possibilitam o ingresso de agentes agressivos ao concreto ou às armaduras, são tidas como prejudiciais.

2.4.1 Mecanismo de aderência das argamassas de reparo

Segundo Moreno (2002), o mecanismo de aderência entre os materiais cimentícios é um fenômeno complexo devido à natureza heterogênea dos substratos de concreto e dos materiais destinados ao reparo.

O mecanismo de aderência entre as superfícies das argamassas e dos substratos porosos desenvolve-se em duas etapas distintas.

A primeira é a adesão inicial que ocorre no estado fresco, no momento em que a argamassa no estado plástico entra em contato com o substrato poroso. A segunda, que se processa ao longo do intervalo de tempo em que se desenvolvem as reações de hidratação das partículas dos aglomerantes, ou seja, com o endurecimento da argamassa, é definida como aderência propriamente dita.

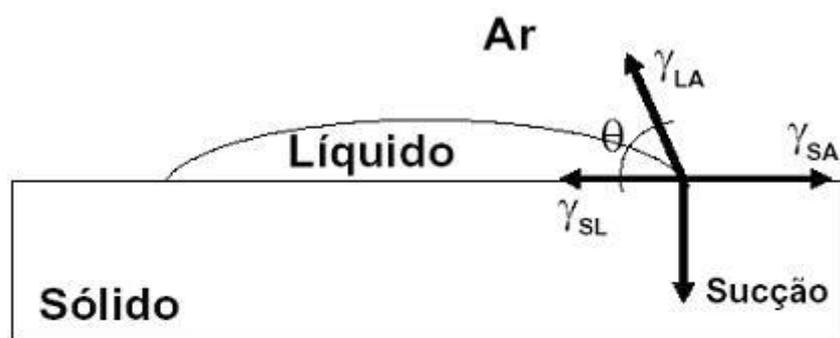
É importante elucidar os mecanismos básicos pelos quais se desenvolve a aderência entre o material de reparo e o substrato, levando-se em consideração os fenômenos envolvidos.

2.4.1.1 Adesão inicial-estado fresco

De acordo com Carasek (1996), a adesão inicial das argamassas está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante. Para uma melhor compreensão da influência das características da argamassa na adesão inicial, pode-se reportar parte da teoria das ligações interfaciais.

Segundo Houwink e Salomon (1973) apud Carasek (1996), o trabalho de adesão é a energia de ligação interfacial entre sólidos e líquidos, e varia em função das tensões superficiais e do ângulo de contato formado entre os dois materiais, como mostra a Figura 2.5.

Pode-se observar que uma redução do ângulo de contato entre as superfícies do material sólido e do líquido pode aumentar a adesão entre os dois materiais.



Legenda

γ_{LA} - tensão superficial líquido/ar, em N/m^2 ;

γ_{SL} - tensão superficial sólido/líquido, em N/m^2 ;

γ_{SA} - tensão superficial sólido/ar, em N/m^2 ;

θ - ângulo de contato.

Figura 2.5 – Molhagem de um sólido por um líquido.

Fonte: Carasek (1996).

O equilíbrio do sistema é dado pela força de sucção representada na Figura 2.5. Para Adamson (1990) apud Carasek (1996), o fenômeno da capilaridade ocorre em interfaces que são suficientemente móveis para assumir uma forma de equilíbrio. Como lida com estados de equilíbrio, a capilaridade trata do comportamento macroscópico e estatístico de interfaces, mais do que com detalhes de suas estruturas moleculares. As forças de capilaridade variam em função tanto da reologia da pasta constituinte da argamassa quanto

da porosidade do substrato, e influem de forma determinante no processo de adesão inicial, no qual a argamassa encontra-se em estado fresco ou plástico.

Moreno (2002) afirma que, no caso das argamassas de reparo aditivadas, pode-se inferir que a tensão superficial do sistema, governada pela sua composição e modificada principalmente pela presença de aditivos tensoativos ou de adições, influencia na adesão inicial entre a argamassa fresca e o substrato de concreto, bem como na sua extensão de espalhamento, em geral denominada extensão de aderência.

A capacidade de molhagem do substrato é inversamente proporcional ao valor da tensão superficial da pasta aglomerante e à sua viscosidade, reduzindo, assim, o ângulo de contato entre as superfícies, aumentando o contato físico e implementando a adesão e a extensão de aderência do reparo com o concreto. É notória a ressalva de que uma possível variação da viscosidade das argamassas de reparo é função das características dos elementos estruturais e peculiaridades dos serviços, além das características da argamassa. A forma de aplicação e a posição da superfície do substrato são exemplos típicos. A adesão e fixação do material fresco ao substrato, geralmente, possuem caráter imediato.

2.4.1.2 Adesão final-estado endurecido

A aderência é constituída de duas propriedades, a extensão de aderência e a resistência de aderência produzida entre a argamassa endurecida e a base porosa.

Segundo Carasek (1996), quando a argamassa no estado plástico entra em contato com a superfície absorvente, o substrato, parte da água de amassamento, que contém em dissolução ou em estado coloidal os constituintes do aglomerante, penetra pelos poros e cavidades do substrato. No interior destes, ocorrem fenômenos de precipitação, seja dos géis de silicato do cimento, seja do hidróxido de cálcio. Transcorrido algum tempo, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base.

O fenômeno da adesão está associado à ligação de uma interface formada por superfícies de materiais distintos das forças atrativas fundamentais da natureza, que unem átomos para formarem moléculas, e moléculas para formarem líquidos ou sólidos. Tais forças são conhecidas como forças intermoleculares e são classificadas, segundo Gandur (2001), como:

a) Forças de Van der Waals

$$(P + an^2/V^2)(V-bn) = Nrt \quad 2.1$$

onde:

a e b = constantes que descrevem as interações entre átomos ou moléculas, não consideradas pela equação dos gases ideais.

V = unidade de volume

n* = número de moles

T = unidade de temperatura

R = constante dos gases reais

A Equação 2.1 foi uma das primeiras tentativas de descrição dos gases não-ideais. As interações entre átomos ou moléculas são as seguintes:

Interações Dipolo-Dipolo.

Para Gandur (2001), a eletronegatividade diferenciada dos átomos que constituem uma molécula pode causar a presença de cargas virtuais, os dipolos, em função de uma distribuição não uniforme dos elétrons. A energia potencial de interação entre dois dipolos pode se obtida por:

$$\Phi^p = \mu_1 \mu_2 / r^3 [2\cos\theta_1\cos\theta_2 - \text{sen}\theta_1\text{sen}\theta_2\cos(\phi_1-\phi_2)] \quad 2.2$$

onde:

μ_1 = momentos dipolares das moléculas i

r = distância que separa os centros dos dipolos

Interações Dipolo - Dipolo Induzido

Moléculas com uma distribuição uniforme da nuvem eletrônica podem ser polarizadas por dipolos, o que define um dipolo induzido. A energia potencial, dessas interações é dada por:

$$\Phi^i = (-\mu_1^2 \alpha_2 + \mu_2^2 \alpha_1) / r^6 \quad 2.3$$

onde:

α = polarizabilidade da molécula

Forças de Dispersão (ou de London)

Trata-se da força de adesão mais comum, encontrada em, praticamente, todos os materiais. Surge da formação de dipolos instantâneos, provocando a formação de dipolos induzidos instantâneos quando átomos ou moléculas com distribuição de carga uniforme se aproximam. A energia potencial de interação é dada por:

$$\Phi^D = -3/4 (\alpha_1^2 C_1 / r^6) \approx -3/4 (\alpha_1^2 I_1 / r^6) \quad 2.4$$

onde:

C_1 = constantes moleculares

I_1 = potenciais de ionização

b) Pontes de Hidrogênio

Trata-se de um caso particular das interações dipolo-dipolo, que contém o hidrogênio ligado a elementos eletronegativos como o F, O, N e Cl. Sua energia de ligação é bem maior que as obtidas pelas interações de Van der Waals. São de extrema importância na adesão, devido à presença comum de hidroxilas em superfícies.

c) Interações por Compartilhamento de Pares de Elétron

As Ligações Covalentes são ligações formadas pelo compartilhamento de elétrons das camadas externas dos átomos que constituem uma molécula. A quantidade de ligações covalentes está relacionada com a flexibilidade da molécula. Em termos de adesão, trata-se da interação de maior energia entre duas superfícies.

As interações ácido-base são do tipo doador-receptor e podem ocorrer na interface entre substratos, resultando em adesão. Tornaram-se bastante populares atualmente para descrever fenômenos de adesão.

Gandur (2001) afirma que as interações que sempre atuam em uma interface são as resultantes das forças de dispersão, seguidas das interações ácido-base, quanto à frequência de ocorrência.

d) Forças eletrostáticas

Surgem da interação entre átomos ou moléculas carregados eletricamente por cargas de sinais opostos. Trata-se de uma das maiores forças de interação entre átomos e moléculas (exceção feita às ligações covalentes). Sua energia potencial de interação é dada por:

$$\Phi^{EI} = q_1 q_2 / 4\pi\epsilon r \quad 2.5$$

onde:

- q = carga dos átomos ou moléculas
- r = distância que separa os átomos ou moléculas
- ϵ = constante dielétrica do meio

Esta definição refere-se ao fenômeno interfacial. Por outro lado, o termo adesão também é empregado como referência à energia necessária para se romper uma junta adesiva, que relaciona a dissipação de energia ao longo de todo um volume desta junta, quando esta é solicitada em um esforço de separação.

Cada uma delas possui características específicas, como o grau de aproximação entre as moléculas e a configuração eletrônica das duas superfícies, e envolvem elementos físico-químicos definidos, como as pontes de hidrogênio, que é um caso particular das interações de dipolos dipolo, que contêm os hidrogênios ligados a elementos eletronegativos.

Carasek (1996) admite, quanto ao desenvolvimento da aderência no estado endurecido, e para estabelecer uma relação entre as forças intermoleculares e provenientes do embricamento mecânico promovido pelos cristais hidratados do cimento, a existência de uma parcela de aderência que, embora pequena, possivelmente inferior a 10 % do total, é oriunda de ligações polares covalentes entre os átomos do cimento e do substrato.

Este foi o resultado obtido de uma série de experimentos em que foram unidas duas placas de vidro através de uma camada de argamassa, de modo a simular a preparação de corpos-de-prova de alvenaria para o ensaio de resistência de aderência à tração direta. Sendo a superfície do vidro extremamente lisa, o efeito de travamento mecânico torna-se desprezível, podendo-se avaliar a parcela de aderência polar covalente. Independentemente do tipo de argamassa de cimento ensaiada, a resistência obtida foi sempre em torno de 0,021 MPa, que representa menos que 10 % das resistências de aderência à tração direta normalmente encontradas com corpos-de-prova com tijolos, ou seja, substratos porosos, nos quais prevalece a aderência mecânica.

No caso das argamassas mais resistentes, como as de reparo, que atingem resistências de aderência à tração direta da ordem de 0,5 MPa a 3,0 MPa, ou até mais pode-se esperar que esta relação seja ainda menor. Isso ocorre devido às maiores resistências mecânicas à tração e ao cisalhamento da argamassa, que promovem o desenvolvimento de uma interface também mais resistente.

Carasek (1996) afirma que é praticamente um consenso entre autores de que a resistência de aderência da argamassa endurecida ao substrato é um efeito essencialmente mecânico, que ocorre basicamente devido à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação. Tomando isto como verdade, concluímos que as forças intermoleculares possuem uma influência considerada desprezível no caso da aderência entre argamassa e substrato poroso, sendo a interação mecânica a grande responsável pela ligação promovida entre as duas superfícies.

Outrossim, as características e propriedades tanto do concreto quanto da argamassa de reparo determinam o sucesso de um reparo, assim como as variáveis inerentes ao procedimento de aplicação do material de reparo, como o tratamento superficial do concreto.

Moreno (2002) afirma que a aderência entre argamassa e concreto é inicialmente determinada pela reologia da argamassa no estado fresco e pela porosidade do substrato, que definem a intensidade do fenômeno da capilaridade. Os constituintes da argamassa e sua proporção de dosagem definem a reologia da mistura fresca, enquanto as características dos substratos são determinadas por sua porosidade intrínseca e pela técnica de reparo empregada, incluindo o aumento da rugosidade e a possibilidade de aplicação ou não de um “veículo”, como ponte adesiva entre a argamassa e o substrato.

Joisel (1981) acredita que exista uma relação entre a tensão de cisalhamento existente na interface, ou resistência de aderência ao cisalhamento (τ), e a resistência à tração da argamassa (σ), que indique a eficiência da resistência de aderência entre os dois materiais.

De maneira simplificada, os níveis de aderência propostos por Joisel estabelecem que, para uma relação τ/σ aproximadamente igual a 1, a aderência é considerada perfeita; até 1/3, aderência média e, por último, próxima a 1/6, considera-se fraca.

2.4.2 Fatores que influenciam no mecanismo de aderência

As propriedades do material de reparo aplicado, a preparação da superfície do concreto e a técnica aplicada na intervenção atuam e influenciam de maneira direta na aderência entre reparo e substrato. Sua durabilidade é depois influenciada pelos agentes atuantes, sobre os reparos e a estrutura recuperada.

2.4.2.1 Porosidade do substrato de concreto

De acordo com Carasek (1996), os substratos podem ser caracterizados, dentre outras propriedades, pela porosidade, pela capacidade de sucção de água e pela textura superficial. Destas, a capacidade de sucção de água e a porosidade exercem maior influência na aderência, pois o movimento de água e de outros líquidos nos sólidos porosos depende em grande parte da sua microestrutura, ou seja, do tamanho efetivo, configuração e distribuição dos seus poros.

Sabe-se que a relação água/cimento, considerando o processo de formação da microestrutura heterogênea e porosa dos concretos, e para um mesmo procedimento de cura, é função direta da porosidade e o grau de interconexão entre os poros capilares, gerados pela percolação e evaporação de parte da água no interior da pasta de cimento. Então, estima-se que concretos de menor resistência estrutural podem ser mais facilmente reparados que concretos de alta resistência.

Segundo Phillipe (1993) apud Sato (1998), a água na fase líquida, em contato com a superfície porosa do concreto, é transferida para o interior do material predominantemente pelo processo denominado capilaridade, e que irá definir a sua capacidade de sucção de água.

Para uma argamassa de reparo rica em aglomerante, bastante fluida e pouco coesa, o gel cimentício penetra facilmente pelos poros e cavidades do substrato. Como efeito positivo, há a formação de uma profunda ancoragem, porém, no caso de excesso ou perda de água da interface com o substrato poroso, as camadas da argamassa mais próximas ao substrato tornam-se extremamente porosas, gerando falhas de aderência que podem comprometer o reparo.

No mercado, encontramos limites de fluidez e de coesão para que o material possa ser aplicado, tido como ideal aquele que não se solte do substrato, em qualquer posição, e que se mantenha íntegro e coeso depois de aplicado.

2.4.2.2 Tratamento superficial do substrato

No afã de se ampliar a aderência entre os dois materiais, a adesão inicial e a resultante resistência de aderência podem ser modificadas através da introdução de um meio que permita o transporte de partículas aglomerantes em solução proveniente da argamassa de reparo no estado fresco, independentemente das propriedades intrínsecas do concreto a ser reparado.

No caso da total nulidade de água nos poros capilares da matriz da argamassa do concreto ou caso haja uma umidade desprezível, a ponto de considerarmos a superfície como seca, o contato entre a argamassa de reparo e o concreto ocasiona uma perda relevante da água de amassamento na região próxima à superfície de ligação, que varia em função da formulação da argamassa e de variáveis de dosagem, como a relação água/cimento, implicando mudanças na microestrutura da argamassa nessa região.

O fato de a superfície possuir um teor controlado de umidade caracteriza uma condição favorável ao processo, uma vez que permite a ligação efetiva entre as superfícies, facilitando o acesso das partículas de cimento em processo de hidratação a tais superfícies, e, ao mesmo tempo, não prejudicando as propriedades reológicas da argamassa nas camadas próximas à ela, além de promover uma ligação mais eficiente, no que tange à sua resistência de aderência e área de contato.

A superfície de contato em questão pode apresentar poros que estejam totalmente saturados de água, impossibilitando ou prejudicando o ingresso das partículas de cimento e, conseqüentemente, a ligação.

Neste caso, pode ser considerada inadequada a execução de reparos localizados, argamassas pouco coesas e extremamente fluidas devido à necessidade de aplicação em posições desfavoráveis à adesão inicial adequada ou em situações de difícil acesso, e principalmente devido à necessidade de baixa retração e mínima permeabilidade.

Assim, a penetração das partículas de cimento na microestrutura do concreto deve recorrer a um mecanismo de transporte que garanta sua hidratação na parte interior dos poros capilares, resultando em um ancoramento satisfatório e com elevada resistência.

Tal mecanismo se relaciona intimamente com a aplicação de água, nata de cimento ou uma outra “ponte de aderência” específica para auxiliar a ligação entre o material de reparo e a microestrutura porosa da base.

Certifica-se então que o tratamento realizado na superfície do substrato é de notória importância para a obtenção de uma adesão eficaz. É importante ressaltar que a aplicação de qualquer mecanismo destinado ao sucesso da aderência deve ser realizado considerando limites para cada elemento do processo.

2.4.2.3 Natureza e proporção dos materiais constituintes da argamassa

A variação da natureza e a proporção dos constituintes da argamassa de reparo podem alterar suas propriedades intrínsecas e sua aderência.

Pode-se dizer que o cimento protagoniza o mecanismo de aderência. O estudo da influência da pasta de cimento Portland no mecanismo de aderência é fundamental para a evolução e o domínio da tecnologia, não só de argamassas de reparo industrializadas, mas, também, daquelas preparadas em obra.

Não se encontram estabelecidos no mercado nacional os limites de composições e respectivas influências do cimento no comportamento das argamassas de reparo, uma vez que não existem indicadores de limites das adições ativas ou inertes, em relação à aderência e deformabilidade dessas argamassas.

De acordo com Selmo (1989) apud Moreno (2002), a resistência de aderência à tração de argamassas mistas de cimento e cal não aditivadas pode ser correlacionada de forma satisfatória com a relação água/cimento das misturas frescas, tendo sido verificado isto para dois tipos de substrato, concreto e cerâmico, em diferentes idades. O consumo de cimento por metro cúbico de argamassa pode também ser relacionado à aderência.

Para Carasek (1996), a aderência à tração é uma propriedade que apenas se relaciona diretamente ao consumo de cimento, já que este também reporta os efeitos da incorporação de ar em argamassas, técnica utilizada em seus estudos.

2.4.2.4 Retração plástica e por secagem inicial da argamassa

A aderência do material de reparo ao substrato é afetada pelo índice de retração da argamassa, influenciado pela relação água/cimento, finura do agregado miúdo e das adições usadas e está, intimamente, relacionado às condições ambientais de exposição do reparo.

Uma retração elevada pode ocasionar uma fissuração que torna o material de reparo extremamente permeável na interface com o substrato, facilitando, assim, a penetração de agentes agressivos e de umidade, estimulando os mecanismos de degradação da estrutura originalmente presentes, conforme Figura 2.6. Esta retração pode ocorrer devido à falta de molhagem do substrato de concreto e de condições ambientais muito agressivas, devido à temperatura ou presença de ventos.

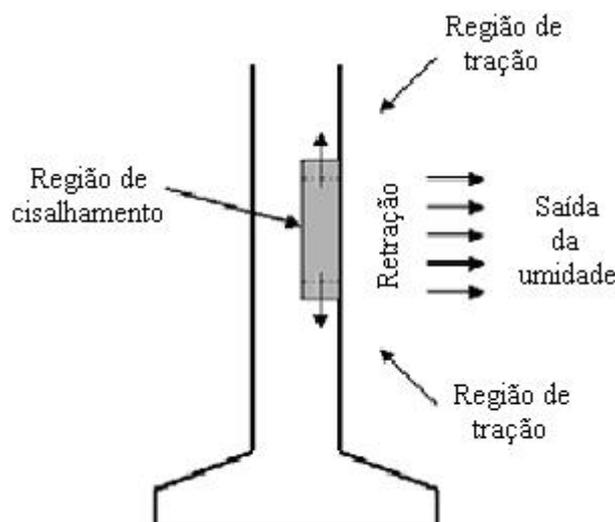


Figura 2.6 – Esforços atuantes em virtude da retração da argamassa de reparo

Fonte: Medeiros (2002).

Segundo Powers (1960), a retração por secagem de materiais cimentícios é causada principalmente pela contração do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na pasta endurecida de cimento mais água, quando a umidade do gel é diminuída. A pasta de cimento saturada não permanece dimensionalmente estável quando exposta a ambientes

que possuem saturação mais baixa (umidade ambiente), porque a perda da água adsorvida fisicamente pelo C-S-H resulta na tensão de retração. Isto ocorre inicialmente a uma taxa elevada e diminui em função do tempo com a idade do material. Tais conceitos estão de acordo com Mehta e Monteiro (1994), que indicam a presença conjunta da fluência. No mesmo sentido, segundo Neville (1997), foi mostrado que os silicatos de cálcio hidratados passam por uma mudança de tamanho da rede cristalina de 1,4 nm para 0,9 nm com a secagem, sendo que a causa fundamental da retração pode ser buscada antes na estrutura física do gel do que nas suas características químicas e mineralógicas.

O procedimento de cura desempenha papel fundamental para o sucesso de um reparo, já que a retração por secagem ocorre principalmente nas primeiras idades e durante o processo de endurecimento. A argamassa de reparo pode apresentar uma retração acentuada devido à sua pequena espessura e grande área de contato com o ambiente, facilitando a perda de água para o meio.

Conclui-se que, para obtenção de sucesso na realização de um reparo, deve-se adequar o material de reparo ao concreto a ser reparado e analisar em conjunto as condições de execução, além dos cuidados básicos com o preparo da superfície antes da aplicação.

2.4.3 Critérios de aderência

O critério estabelecido por diferentes normas e instituições geralmente se baseia no ensaio de resistência de aderência por arrancamento à tração.

Moreno (2002) cita em seu trabalho, como primeira referência, o artigo técnico de número 38 da The Concrete Society, Reino Unido. Segundo Decter e Keeley (1997), o valor mínimo para a resistência de aderência de argamassas de reparo aplicadas em concreto, prescrito pela Concrete Society Technical Report (UK) 1991, é de 0,8 MPa, obtido por meio de ensaio de arrancamento à tração.

No Japão, a norma JIS A 6203 apud Moreno (2002), que se refere a requisitos de qualidade para dispersões poliméricas e pós de polímero redispersíveis como modificadores de cimento, aponta que a resistência de aderência destas argamassas poliméricas deve ser superior a 1,0 MPa.

Conforme Lutz (2000) apud Moreno (2002), o German Committee on Reinforced Concrete (Comitê Alemão do Concreto Armado) recomenda quatro categorias ou tipos de argamassas de reparo que devem ser aplicadas em função dos requisitos de recuperação do concreto. A aderência é avaliada pelo ensaio de resistência de aderência à tração direta, e os critérios variam para cada categoria de argamassa de reparo e em função de algumas situações impostas pelo ensaio, como quando realizado em campo, para argamassa aplicada em viga de concreto de 1 m, para argamassas aplicadas a 5 °C ou 30 °C ou após ciclos de gelo-degelo. Os valores mínimos estabelecidos vão de 1,0 MPa, para argamassa de reparo superficial quando o ensaio é realizado em campo, até 2,5 MPa, para argamassas de reparo submetidas a condições de serviço mais severas e cuja função exige maior ligação entre reparo e estrutura.

CAPÍTULO 3

MICROSCOPIA

3.1 MICROSCOPIA APLICADA AO CONCRETO

No estudo dos materiais de construção, sabe-se que há uma relação de dependência entre o processo de fabricação, sua microestrutura e suas propriedades. Dessa forma, a análise de imagens vem colaborar para melhorar o nível de conhecimento destes materiais, sendo uma ferramenta adequada para avaliar as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processamento e seu uso. A análise de imagens exerce um papel importante, particularmente na tecnologia do concreto, pois com ela há possibilidade de relacionar, de alguma forma, a microestrutura com suas propriedades físicas e mecânicas.

Algumas técnicas de caracterização são amplamente aplicadas. Dentre elas: Microscopia eletrônica de varredura (MEV); Microscopia eletrônica de transmissão (MET); Microscopia Ótica (MO), Difração de raios X (XRD); Microanálise de raios X (EDX); Microscopia de força atômica (AFM); Espectroscopia de massa por íons secundários (SIMS); Espectroscopia de fotoelétrons (XPS); Espectroscopia de elétrons Auger (AES); Espectroscopia Raman; Fluorescência de raios X (XRF); Absorção Atômica; Espectroscopia de retrodispersão de Rutherford (RBS); Luminescência, Tempos de Vida; Medidas de constantes dielétricas; Microsonda; Análise Térmica e outras (UMINHO – 2003).

Originou-se da necessidade de se obterem soluções específicas sobre os materiais, cujas técnicas convencionais para avaliação de suas propriedades não forneciam respostas adequadas. As técnicas de análise dessas imagens se desenvolveram muito rapidamente graças ao progresso na aquisição das imagens e também ao desenvolvimento de algoritmos

e softwares para medir sua interpretação. Assim, permite assegurar que a associação entre as propriedades e a estrutura do material seja suficientemente compreendida, e que o seu comportamento seja previsto.

Historicamente, métodos manuais ou semi-automáticos usados para medir as características dos poros já tinham sido publicados em 1898. Com o rápido progresso da tecnologia de computadores e softwares, da aquisição, armazenagem, apresentação de imagens, e dos novos algoritmos, várias técnicas de observação microestrutural estão sendo desenvolvidas e graças ao desenvolvimento de microscópios cada vez mais potentes.

Pesquisadores da área da engenharia civil também passaram a usar a análise automática de imagens para caracterizar seus materiais por um método mais acessível e com bases estatísticas. As mudanças morfológicas ocorridas durante o processo de fabricação e de uso, e a estreita ligação entre a microestrutura e as propriedades físicas e mecânicas dos materiais podem ser mais bem analisadas com o uso destas técnicas.

Com isso, está sendo possível atender às expectativas quanto ao desenvolvimento de novos materiais, como os concretos de alta e ultradesempenho, novos concretos leves, ou concretos de pós-reativos.

Os trabalhos baseados em análise de imagem estão sendo publicados, o permite tornar a análise de imagem um recurso imprescindível para o desenvolvimento da tecnologia do concreto.

3.1.1 Microscopia dos materiais à base de cimento

Para entender a relação entre as propriedades físicas e a microestrutura, é necessário ter acesso à diversidade da morfologia e suas características e à sua heterogeneidade.

3.1.1.1 Microscopia do clínquer

A análise microscópica do clínquer proporciona informações úteis sobre a sua estrutura e processo de produção. A avaliação microscópica de seções polidas proporciona uma inspeção visual sobre o tamanho dos cristais, sua morfologia, distribuição dos cristais e quantidade presente. O emprego do microscópio óptico é mais difundido e menos oneroso

e necessita da análise de imagens para separar suas fases. As seções podem ser ou não atacadas por compostos químicos para evidenciar a presença de determinada fase. Mais recentemente, desenvolvem-se pesquisas para a obtenção de dados do clínquer por análise semi-automática, cujas imagens são obtidas em diferentes tons de cinza e processadas por computador, como mostra a Figura 3.1.

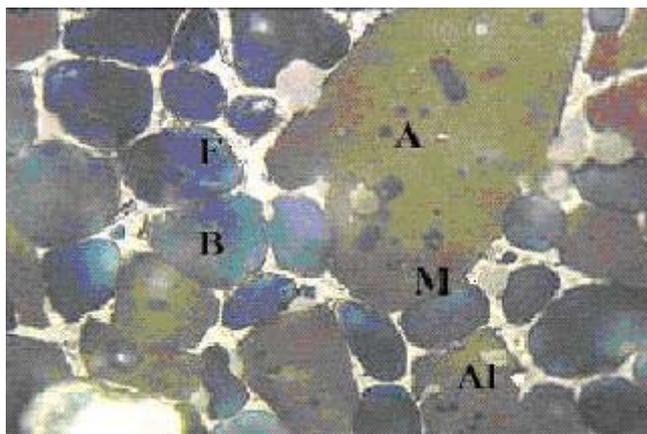


Figura 3.1 – Seção polida do clínquer.

Fonte: DIAMOND E HUANG (2001)

3.1.1.2 Hidratação da pasta de cimento

Vários métodos têm sido utilizados para o estudo da hidratação da pasta de cimento, como a difração de raios-X e a análise termogravimétrica, cada qual com suas dificuldades e limitações. Assim, técnicas de microscopia para o estudo da hidratação do cimento vêm sendo aprimoradas constantemente. Uma técnica para analisar o grau de hidratação do concreto consiste em preparar a amostra e observá-la por elétrons retroespalhados. As várias fases presentes são diferenciadas através de tons de cinza. Essas imagens são analisadas em um software de computador que calcula as áreas em uma escala escolhida, que vai de escura à brilhante. Escolhendo-se um determinado brilho, os pontos que contêm aquele nível de cinza são vistos na tela com um contraste de cor apropriado, sendo mostrada a porcentagem daquele nível de brilho na imagem. (ASH et al., 1993).

A pasta de cimento Portland endurecida é constituída essencialmente de três níveis de cinza: os produtos de hidratação, os grãos anidros e os poros. Para a análise das imagens em argamassas e concretos há um nível a mais e os grãos de agregados são facilmente identificados na imagem, e então removidos pelo computador, pois o que interessa é a pasta de cimento hidratado. Na área da imagem observada elimina-se a área

correspondente aos agregados, as áreas ocupadas pelos poros e pelos grãos anidros (identificados pelos tons de cinza). O resultado de cada imagem é a área ocupada pela pasta de cimento hidratado. O resultado final é a média da área ocupada pela pasta de cimento hidratado obtida em dez imagens feitas de maneira aleatória na amostra. A ampliação empregada pode ser de até 450 vezes (ASH et al., 1993).

3.1.1.3 Relação água/cimento

A relação água/cimento é um parâmetro importante para o concreto não só pela relação direta com a sua resistência, mas também pela sua influência quanto à durabilidade do concreto. Isso ocorre devido à estreita ligação entre a relação a/c e a porosidade capilar da pasta de cimento. Uma porosidade capilar elevada resulta em permeabilidade a agentes agressivos, tais como líquidos nocivos e gases. Portanto, a determinação da relação a/c de concretos endurecidos é relevante para um diagnóstico da deterioração, assim como para assegurar a qualidade do concreto em geral. Métodos ópticos têm sido desenvolvidos para determinar a relação a/c do concreto endurecido, usando seções delgadas. O método é baseado no princípio de que a intensidade da fluorescência do epóxi em pastas de cimento é proporcional à porosidade capilar. Quanto maior a intensidade da fluorescência, maior a porosidade capilar e maior também a relação a/c. Neste caso, a intensidade de fluorescência de seções delgadas em amostras de concreto com uma relação a/c não conhecida é comparada visualmente com uma série referencial de seções delgadas de concreto com relação a/c conhecida, cimento bem definido, e cura sob condições padronizadas por 28 dias (ELSEN, 1995).

A relação a/c medida é calculada como a média dos valores das áreas selecionadas. A principal desvantagem desse método é que as áreas relevantes são definidas interativamente pelo operador para cada imagem, consumindo muito tempo. Outra desvantagem é que esse método não é totalmente reprodutível. As áreas examinadas são definidas e, assim, influenciadas pela subjetividade do operador, que poderá escolher as mesmas áreas; neste caso, o resultado pode não ser representativo da amostra. No método semi-automático de entrada de dados, o operador define uma série de parâmetros para o início das medições, entre elas os tons de cinza para seleção da pasta de cimento. Após essa operação, as medidas são executadas automaticamente. No método totalmente

automático, uma seção delgada é “escaneada” e o nível cinza do histograma para cada imagem é acumulado e armazenado.

3.1.1.4 Reatividade álcali-agregado

Segundo Hasparyk (1999) a reação álcali-agregado é um fenômeno patológico que pode levar à ruína do concreto, quando uma investigação preliminar criteriosa não é realizada com os materiais a serem empregados na estrutura. Essa reação envolve certos agregados contendo minerais reativos e as soluções alcalinas presentes no concreto ou argamassas. São vários os constituintes mineralógicos causadores da reação que, dependendo do tipo reativo, podem ser variáveis. Uma vez instalada a reação, e na presença de umidade, são gerados produtos expansivos capazes de causar tensões internas que podem exceder a resistência à tração do concreto, levando à sua fissuração.

A durabilidade das estruturas de concreto tem sido fator relevante e preocupante dentro do meio técnico. Hoje, esta durabilidade vem sendo bastante estudada quanto à reação álcali-agregado, que é uma patologia que afeta as estruturas em longo prazo. Mesmo que as causas da deterioração do concreto sejam investigadas por muito tempo, a compreensão dos mecanismos de expansão é ainda bastante limitada (MONTEIRO et. al, 1995).

Hasparyk (1999) afirma que a reação álcali-sílica pode ocorrer na presença: da sílica amorfa (opala), do quartzo criptocristalino fibroso (calcedônia), de polimorfos cristalinos metaestáveis de sílica (cristobalita e tridimita), do quartzo microcristalino ou “tensionado” e nas formas amorfas ou precariamente cristalinas (vidros e mineralóides).

Grandes construções têm sido afetadas pela reação álcali-agregado: barragens, pontes, torres e pavimentos de aeroportos. A possibilidade de ocorrência da reatividade álcali-agregado está sendo investigada com o auxílio da microscopia. Em alguns estudos, a microscopia é usada como uma ferramenta de auxílio para verificação da formação do gel expansivo em concretos produzidos com agregados potencialmente reativos. Neste caso, mesmo os concretos que não apresentam expansão podem apresentar a formação do gel, verificado por meio de microscopia eletrônica (VALDUGA, 2002).

3.1.2 Zona de transição e formação de microfissuras

A zona de transição do concreto é a região delimitada pela interface do agregado e a pasta de cimento. Apresenta espessura de, aproximadamente, 30 μm , dentro da qual a porosidade aumenta à medida que se aproxima da superfície do agregado. Embora sejam constituídas dos mesmos elementos, a estrutura e as propriedades da zona de transição diferem daqueles correspondentes à matriz da pasta.

Somente com o desenvolvimento das técnicas de análise de imagens foi possível observar essa região, cujas características são tão importantes para compreender os fenômenos que ocorrem na macroestrutura do concreto. Vários resultados de investigações da zona de transição por análise de imagens têm sido divulgados, e o exame das amostras por MEV tem produzido resultados que comprovam o comportamento do concreto em diversas situações. (DIAMOND e HUANG, 2001).

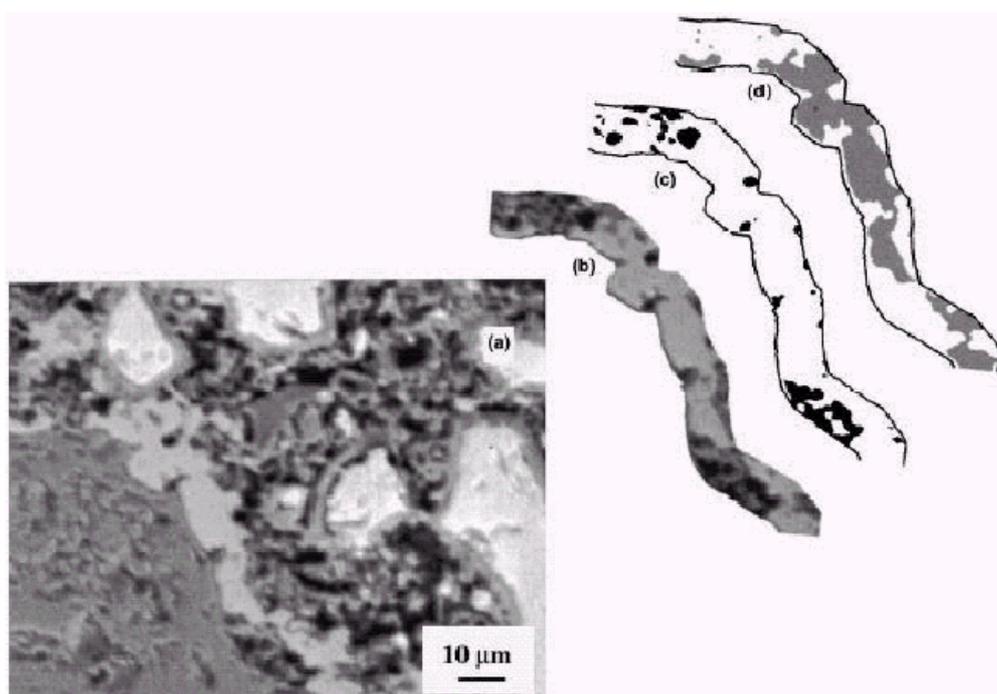


Figura 3.2 – Análise da imagem ao redor do grão de areia.
(a) área da imagem, (b) níveis de cinza da zona de transição.
(b) (c) e (d) imagem binária segmentada mostrando os poros e o hidróxido de cálcio, respectivamente.

Fonte: DIAMOND E HUANG (2001)

Além da grande quantidade de cristais de hidróxido de cálcio orientados e de vazios capilares, uma característica da zona de transição é a formação de microfissuras. Qualquer que seja a sua origem (mecânica, física, ou química), a degradação dos materiais à base de cimento freqüentemente origina-se do início e da propagação de microfissuras.

Estudos indicam que a presença de microfissuras pode influenciar de maneira significativa as propriedades mecânicas e de transporte de massa do concreto. Por esse motivo, a otimização e/ou a atribuição das propriedades macroscópicas do material requer o desenvolvimento de uma ferramenta segura que seja capaz de quantificar as suas características microestruturais (AMMOUCHE, 2000).

Pesquisas empregando a microscopia em materiais à base de cimento têm avaliado as microfissuras do concreto. Neste caso, tenta-se relacionar a influência do estado de microfissuras do concreto (ou argamassa) com as propriedades físicas, ou avaliar a evolução da microfissura com aplicação de um carregamento (ação térmica, retração, fissura ou carregamento mecânico). Dois métodos diferentes podem ser utilizados para análise das microfissuras: uma por observação e outra por análise quantitativa (RINGOT e BASCOUL, 2001).

A primeira dificuldade em usar imagens para investigação de modelo de fissuras vem do fato de que as imagens fornecem uma informação local do material. Na maioria das vezes, há uma desproporção entre o tamanho da amostra extraída e das dimensões das imagens. As técnicas baseadas em imagens fornecem uma quantidade de dados que são abundantes, mas parciais em apenas um campo, devendo haver cuidado quando da análise desses campos.

A segunda dificuldade está na segmentação das fissuras, que consiste em reconhecê-las dentro das imagens. No passado, essa operação era feita manualmente. Hoje se emprega a análise de imagens para esse fim, por meio de um processo automático.

Freitas (2001) analisou imagens obtidas de amostras de concretos, relacionando a formação de microfissuras ao grau de hidratação.

3.1.2.1 Análise da superfície da fratura do concreto em 3 dimensões

A superfície da fratura de concretos pode ser investigada com o auxílio de programas que, por meio de imagens, reconstituem essa superfície. A forma de como estudar a natureza e as características da superfície de fratura é uma área de pesquisa importante que vem sendo desenvolvida na área das ciências dos materiais e de mecânica da fratura.

Devido às limitações de métodos experimentais anteriores, as superfícies de fratura em materiais como concreto são apenas idealizadas como planos 2D, o que condiciona a validade dos parâmetros de medidas da fratura, resultando em conclusões incorretas. Assim, a maioria das informações sobre a micro e mesoestrutura, e os mecanismos de fadiga dos materiais são ignoradas, e um problema a ser solucionado é a maneira de medir e quantificar corretamente a superfície da fratura do concreto (WU, 2000).

Atualmente, tem-se utilizado uma nova técnica experimental baseada em triangulação a laser e reconstrução da fratura superficial em 3D. Os resultados da reconstrução de um objeto padrão e da superfície de fratura de uma amostra de concreto indicam que essa técnica tem uma precisão aceitável. Comparado com os métodos de análises tradicionais, esse método é adequado para determinar a dimensão da fratura e outros parâmetros da superfície da fratura.

A análise quantitativa da rugosidade e a característica da fratura das superfícies de concreto são realizadas de acordo com o parâmetro de rugosidade R_s (que é a razão da área atual superficial com superfície projetada). Esses estudos mostram que a verdadeira área superficial da fratura é cerca de 45,4% maior do que a área nominal da fratura (WU, 2000).

Dois métodos de cálculo da dimensão da fratura estão sendo empregados: a técnica *slit-island* e a análise da seção vertical da superfície. Essas novas técnicas podem ser um grande avanço para medir precisamente os parâmetros da fratura e eventualmente aumentar o nível de conhecimento sobre os mecanismos de fadiga do concreto.

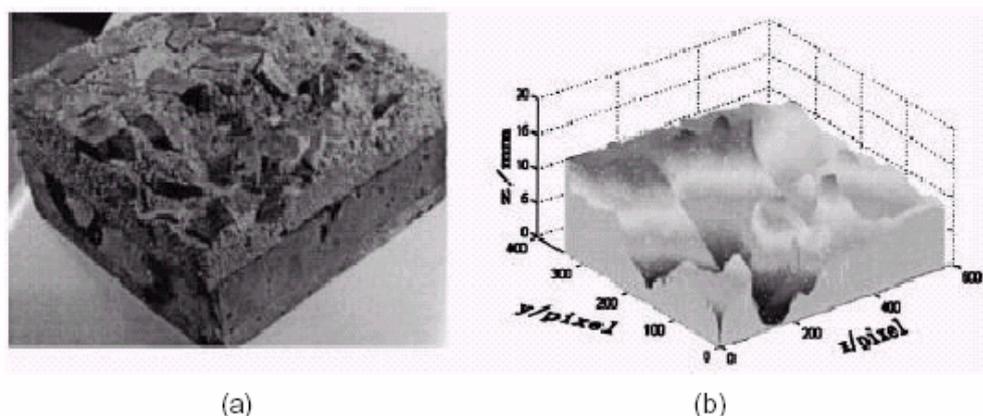


Figura 3.3 – Reconstrução da superfície de fratura do concreto
(a) superfície original e (b) perfil em 3D a superfície da fratura
Fonte: (WU, 2000)

3.1.2.2 Análise da microfissura do concreto em 3 dimensões

Segundo Ringot e Bascoul (2001) a análise de microfissuras em 3D é uma das mais novas técnicas que empregam a microscopia. Pode-se ter acesso a parâmetros 3D em medidas executadas em 2D, usando uma relação estereológica. Por meio de uma série de métodos matemáticos é possível definir os parâmetros 3D com medidas obtidas em 2D nas seções da estrutura.

A maior parte dos métodos para obter dados tridimensionais consiste em recuperar o desenho espacial da fissura a partir de observações feitas em diferentes tipos de planos. Se esses planos são paralelos, então essa técnica se torna similar à tomografia usada em ciências médicas. Infelizmente, essa aproximação requer grande quantidade de dados, e isso não é a realidade da ciência dos materiais. Embora existam alguns trabalhos publicados, são restritos a pequenas quantidades (RINGOT e BASCOUL, 2001).

A simulação 3-D parece ser capaz de fornecer resultados precisos e uma geometria realística do modelo de fissuras em quantidades razoáveis de dados em curto prazo. Entretanto, modelos estatísticos para simular o modelo da fissura podem ser usados para obter resultados importantes, em particular sobre as propriedades de percolação de líquidos e gases nos concretos, atribuídos à conectividade das fissuras (RINGOT e BASCOUL, 2001).

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para realização do experimento, foi considerado que o substrato deveria ter todas as informações de caráter físico e químico, pois, caso houvessem interações com o material de reparo, seria possível sua identificação.

Outro ponto considerado relevante foi que o substrato e o reparo já estivessem com idade superior à formação dos principais compostos hidratados do cimento, ou seja, com os compostos já totalmente formados.

O desenvolvimento de um programa experimental iniciando pela execução do substrato, provavelmente, necessitaria de um período superior a um ano, o que tornaria inviável o atual projeto de pesquisa.

Diante do exposto, as amostras utilizadas no programa experimental foram obtidas em blocos de concreto recuperados em abril de 2000, quando do desenvolvimento e conclusão da pesquisa: “Estudo de Técnicas de Recuperação de Estruturas Danificadas Por Corrosão Das Armaduras” (CHAVES e DA SILVA 2004).

O programa experimental foi realizado em duas etapas distintas:

A primeira etapa tratou da obtenção e preparação das amostras a partir dos blocos. Foi realizada uma descrição detalhada de todos os procedimentos de preparação visando facilitar futuros trabalhos nesta linha de pesquisa.

A segunda refere-se à análise das regiões de estudo e obtenção das micrografias em amostras fraturadas e polidas mediante MEV e MO.

Para efeito de melhor entendimento desse processo experimental são apresentadas a seguir as informações mais importantes da elaboração dos blocos e de sua recuperação.

4.2 DESCRIÇÃO DOS BLOCOS USADOS PARA OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Os blocos recuperados utilizados neste trabalho foram concretados em dezembro de 1999 e permaneceram em câmara úmida todo o mês de janeiro de 2000.

4.2.1 Caracterização do concreto

Foi adotado o cimento Portland composto (CP-II-E-32), por ser um cimento de uso corrente na construção civil (Tabela 4.1). Todos os resultados foram obtidos utilizando-se as normas brasileiras. Os ensaios e as respectivas normas poderão ser identificadas em Chaves e Da Silva (2004).

Tabela 4.1 – Resultado dos ensaios de caracterização química do cimento segundo normas brasileiras.

ANÁLISE	TEORES(%)
Perda ao Fogo	4,57
Dióxido de silício (SiO ₂)	24,73
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	7,77
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,98
Óxido de Cálcio (CaO)	54,02
Óxido de Magnésio (MgO)	2,50
Trióxido de enxofre (SO ₃)	1,74
Equivalente alcalino em Na ₂ O	0,04
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,76
Resíduo Insolúvel	1,60

Fonte: Chaves e Da Silva (2004).

A Tabela 4.2 apresenta resultados dos ensaios de caracterização física do cimento usado na confecção do concreto, ficando comprovada a sua conformidade, segundo os limites estabelecidos pela norma brasileira.

Tabela 4.2 – Resultado dos ensaios de caracterização física do cimento.

ENSAIOS REALIZADOS	RESULTADOS
Área específica (m ² /kg)	340,36
Massa Específica (g/cm ³)	2,956
Módulo de Finura	4,720
Início de Pega (h)	2,71
Fim de Pega (h)	5,01
Água de Consistência da Pasta (%)	29,38

Fonte: Chaves e Da Silva (2004).

Os agregados graúdos utilizados foram basálticos provenientes de rochas do município de Uberlândia. Os agregados miúdos são areias naturais extraídas de rios da região de Uberlândia. A composição granulométrica do agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica 25 mm e módulo de finura 7,57, já a do agregado miúdo 2,4 mm de dimensão máxima característica e módulo de finura 2,19.

A dosagem do concreto foi realizada pelo método da ABCP, com base nas características da areia, brita e cimento para fck de 13,5 MPa, simulando a resistência do concreto em uma estrutura de aproximadamente 30 anos de idade, conforme seqüência abaixo. O traço em massa utilizado foi: 1 : 2,58: 3,54 ; a/c= 0,65 e consumo de cimento de 308 kg /m³

Moldaram-se os blocos e 6 corpos de prova cilíndricos de 150 x 300 mm para verificação da resistência do concreto aos 7 e 28 dias, obtendo-se conforme Tabela 4.3, os seguintes valores:

Tabela 4.3 – Resistência dos corpos de provas aos 7 e 28 dias.

No CP	1	2	3	4	5	6
Idade (dias)	7	7	7	28	28	28
φ médio (cm)	14,87	14,99	15,06	14,89	15,21	15,08
Carga ruptura (kN)	246	244	268	292	294	292
Resistência (MPa)	13,81	13,98	15,04	16,77	16,19	16,34

Fonte: Chaves e Da Silva (2004.)

$f_{c28} = 16,43$ MPa; desvio relativo máximo = 2,07%

A cura do concreto foi realizada com a utilização de câmara úmida durante 28 dias.

4.2.2 Preparo e descrição do substrato e aplicação das argamassas de reparo

Para a recuperação dos blocos de concreto, dos quais foram extraídas as amostras, foram adotados 4 tipos de materiais, aplicados sobre o substrato. A descrição do material de reparo foi extraída do catálogo do fabricante.

4.2.2.1 Preparo do substrato

Os procedimentos empregados no preparo do substrato foram:

- Com auxílio de uma máquina de corte a disco, cortou-se, aproximadamente, 4,0 cm das extremidades superior e lateral dos blocos mais próxima às armaduras, retirando-as.
- Na base que recebeu a argamassa de recuperação foram feitas pequenas escarificações, mantendo-a rugosa, mas nivelada, para melhor aderência entre o concreto do substrato e a argamassa de recuperação, conforme Figura 4.1.



Figura 4.1 – Blocos preparados para a recuperação.

Fonte: Chaves e Da Silva (2004).

- Foram utilizados 8 blocos de concreto, sendo que, para cada 2 blocos, foi utilizado um material diferente para recuperação.

4.2.2.2 TIPO 1 – Argamassa de alta resistência – Blocos 1 e 2.

O Material é um produto pré-dosado bicomponente de base cimentícia modificado com polímeros, tixotrópico, elaborado para permitir a execução de reparos superficiais e recuperação de estruturas de concreto, com espessura de até 70 mm. O produto possui excelente resistência mecânica; baixa permeabilidade; ótima aderência em superfície de concreto velho e/ou argamassas; não apresenta fissuras nem trinca; baixa retração.

Os blocos 1 e 2 foram recuperados da seguinte forma:

- Removeu-se qualquer tipo de impurezas na superfície a reparar, mantendo-na umedecida antes da aplicação da argamassa.
- Com o traço 1: 8, de componente B e A, respectivamente, foram misturados os materiais em um recipiente limpo, adicionando a parte líquida (componente B) na parte sólida (componente A), agitou-se de forma contínua até a homogeneização da mistura, através de um misturador mecânico de baixa velocidade.
- Posteriormente, aplicou-se o material com colher de pedreiro, comprimindo sobre a superfície uma espessura de, no máximo, 3 cm por camada. A ponte de aderência entre camadas foi feita com o próprio componente B, através de aspersão. A cura do corpo de prova foi realizada com a utilização de câmara úmida.

4.2.2.3 TIPO 2 – Argamassa monocomponente para recapear e / ou estucar - Blocos 3 e 6.

O produto é uma argamassa com base cimentícia, monocomponente, de rápida secagem e modificado com polímeros, ideal para nivelar, recapear ou estucar a superfície de concreto deteriorado, para uso interior e exterior. O produto é de fácil aplicação e manejo; excelente trabalhabilidade e acabamento; baixa permeabilidade; desenvolvimento rápido de resistência; pronto para tráfego de pessoal em 6 horas; apropriado para capas finas.

Os blocos 3 e 6 foram recuperados conforme o seguinte procedimento:

- Removeu-se qualquer tipo de impurezas na superfície a reparar e manteve-a umedecida, antes da aplicação da argamassa.

- Com o traço 1: 0, 12, de material em kg e de água em litros, respectivamente, misturou-se os materiais em um recipiente limpo, adicionando a água na argamassa até a homogeneização da mistura, através de um misturador mecânico de baixa velocidade. Posteriormente, aplicou-se o material com colher de pedreiro, comprimindo-o sobre a superfície. A cura foi realizada com a utilização de câmara úmida.

4.2.2.4 TIPO 3 – Argamassa de reparo de concreto em grandes espessuras – Blocos 4 e 5.

O material: é um produto cimentício em pó, modificado com polímero e fibras sintéticas, monocomponente, pronto para o uso. Misturado em água, produz uma argamassa reoplástica e tixotrópica de alta resistência, com retração compensada e sem segregação, recomendada para reparos estruturais em concreto, em camadas de até 4 cm de espessura. O produto produz altas resistências mecânicas; ótima aderência à armadura e ao concreto; grande impermeabilidade mesmo em ambientes agressivos; aplicação manual ou por projeção; longo tempo de trabalhabilidade; não contém cloretos nem partículas metálicas.

Os blocos 4 e 5 foram recuperados da seguinte maneira:

- Removeu-se qualquer tipo de impurezas na superfície a reparar e manteve-a umedecida, antes da aplicação da argamassa.

- Com o traço 1: 0,12, de material em kg e de água em litros, respectivamente, misturou-se os materiais em um recipiente limpo, adicionando a água na argamassa até a homogeneização da mistura, através de um misturador mecânico de baixa velocidade.

- Posteriormente, aplicou-se o material com colher de pedreiro, comprimindo-o sobre a superfície. A cura foi realizada com a utilização de câmara úmida.

4.2.2.5 TIPO 4 – Ponte de aderência com adesivo epóxico e argamassa similar ao concreto do substrato - Blocos 7 e 8.

O reparo TIPO 4 foi realizado com argamassa com o mesmo traço do concreto do bloco e uma ponte de aderência. A ponte de aderência foi um adesivo epóxico de dois componentes, sem solventes e tixotrópico. Este adesivo confere a união entre concreto e chapas metálicas, recomendado como aderente de argamassas de cimento ou epóxica, na reparação de elementos estruturais. O produto possui excelente aderência; resistência à tração sensivelmente superior ao próprio concreto; é impermeável à água e ao óleo.

Os blocos 7 e 8 foram recuperados com argamassa de cimento, areia, pedrisco e ponte de aderência, da seguinte forma:

- Removeu-se qualquer tipo de impurezas na superfície a reparar e aplicou-se uma camada da ponte de aderência, antes da aplicação da argamassa.
- Com o mesmo traço em massa do concreto a ser recuperado (1 : 2,58 : 3,54 a/c = 0,65), porém com a utilização de pedrisco e de aditivo superplastificante na proporção de 1,16% do material cimentício, misturou-se os materiais na betoneira até a sua homogeneização.
- Posteriormente, aplicou-se o material com colher de pedreiro, comprimindo-o sobre a superfície. A cura foi realizada com a utilização de câmara úmida.

4.2.3 Resistência à compressão das argamassas de recuperação

A Tabela 4.4 reflete os valores de resistência à compressão dos corpos de prova ciliíndricos (50 x 100 mm) dos materiais de recuperação.

Tabela 4.4 – Resistência dos corpos de provas das argamassas de reparo.

No Blocos	1 e 2	3 e 6	4 e 5	7 e 8
Material	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4
Idade (dias)	3	3	3	3
φ médio (cm)	5,01	5,00	5,00	4,97
Carga ruptura (kgf)	4800	4200	8760	1200
Resistência (MPa)	24,35	21,39	44,61	6,19

Fonte: Chaves e Da Silva (2004).

4.3 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A partir dos blocos confeccionados e recuperados, conforme descrito anteriormente, foram extraídas as amostras. A Figura 4.2 ilustra o local exato de onde foram extraídas as amostras, ou seja, da interface entre o material de reparo e o substrato.

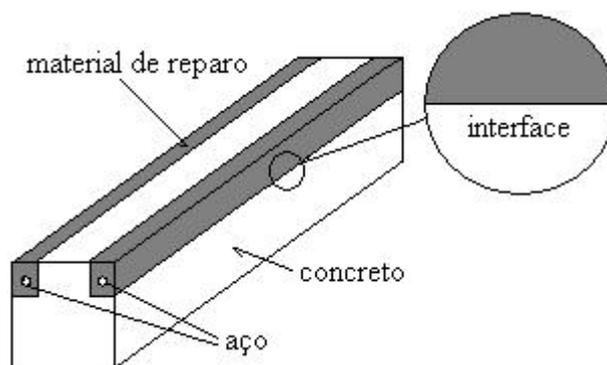


Figura 4.2 – Esquema do bloco recuperado.

Foram feitos vários retalhos ao longo do comprimento dos corpos de prova, visando apenas a região de interface entre os materiais, mediante o auxílio de uma máquina de corte a disco. (Figura 4.3)



Figura 4.3 – Extração das amostras.

Após o processo de corte e picotação, as amostras passam por um processo de redução geométrica refinada, Figura 4.4, a fim de atenderem ao espaço físico do microscópio.



Figura 4.4 – Refinamento geométrico das amostras.

As amostras foram divididas em dois grupos, sendo o primeiro de amostras fraturadas, onde é possível a visualização de características morfológicas e sua heterogeneidade entre o substrato e o reparo, e o segundo, de amostras polidas, onde detalhes topográficos da junção podem ser observados. Detalharemos aqui o processo de obtenção de ambas.

Como o objetivo foi estudar várias regiões da interface nos quatro tipos de reparo, foram extraídas cerca de 65 amostras, tendo sido aproveitadas 24, sendo 3 amostras fraturadas e 3 polidas, para cada tipo de material de reparo.

4.3.1.1 Preparação das amostras fraturadas

Ao final do processo, cerca de 4 a 6 horas por amostra, a característica principal das amostras fraturadas é a conservação do seu aspecto superficial, originado no ato da ruptura. Vide Figura 4.5



Figura 4.5 – Amostra fraturada.

Como o concreto é um material inerte, deve ser feita a sua metalização para que a obtenção de imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura seja possível. Para uma melhor qualidade final da imagem, esse processo de metalização das amostras foi realizado com ouro.

Esse processo é superficial. Torna-se então necessária a aplicação de um filete de tinta metálica (Figura 4.6), para que se feche o circuito entre a superfície dourada e a base metálica que receberá a amostra. É importante ressaltar aqui que, sem tal processo, não é possível a captação da imagem pelo monitor.



Figura 4.6 – Processo de preparação das amostras para sua metalização.

Após o procedimento, as amostras são fixadas na haste e colocadas em uma pré-câmara de vácuo. É nesta câmara que o processo de metalização das amostras é realizado. O alvo de ouro é fixado em sua parte superior, como nos mostra a Figura 4.7, logo acima da base onde se encontram as amostras.

A câmara é então lacrada e inicia-se o processo de obtenção do vácuo. Reduz-se a pressão no interior da câmara para aproximadamente 7 Pa.

Em seguida, é injetado argônio para esterilizar o ambiente, livrando-o assim de qualquer impureza. O processo é lento, por se tratar de um material poroso, e chega a tardar 20 minutos.



Figura 4.7 – Pré-Câmara de vácuo.

A qualidade deste vácuo é de suma importância para o processo de metalização da amostra.

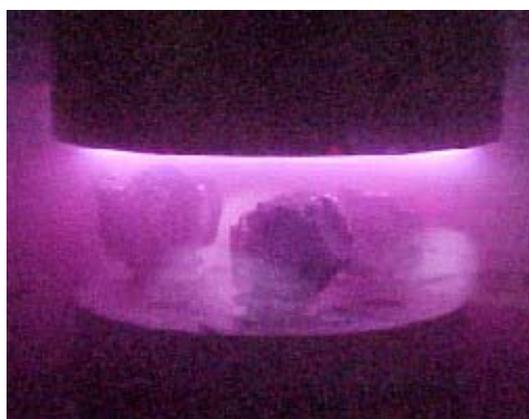
No processo de ionização, deve-se evitar que os elétrons choquem-se com quaisquer partículas de gás, pois isto desviaria o seu foco.

Inicia-se então o processo de metalização, mediante uma corrente de 20 mA (Figura 4.8 a).

Dois físicos alemães, Max Plank e Albert Einstein, sugeriram, no início do século XX, que um feixe de luz não é apenas uma onda eletromagnética com suas características usuais de frequência, amplitude e fase.



(a)



(b)

Figura 4.8 – a) Processo de metalização das amostras, b) Emissão da luz característica do ouro

Einstein propôs que a luz é composta de entidades discretas (isto é, separadas e distintas entre si), com uma energia proporcional à frequência da onda luminosa: os fótons. Essa teoria ficou conhecida como Efeito Fotoelétrico.

Cada elemento emite luz com cores extremamente bem definidas e características. Para o ouro, isto pode ser observado na (Figura 4.8 b). O tempo necessário para realização do processo de metalização das amostras não excede 4 minutos. A Figura 4.9 nos mostra o final deste processo.



Figura 4.9 – Amostras metalizadas e fixadas na haste.

Ao final do processo, cerca de 1 hora por amostra, as amostras estão prontas para serem inseridas no MEV. Na seqüência, elas são colocadas no MEV em uma câmara submetida, agora, a um sistema de vácuo eletrônico. O processo de obtenção do vácuo se repete, mas, agora, de uma maneira mais criteriosa. O tempo necessário aqui é de pelo menos 4 horas, devido ao fato de o concreto ser um material bastante poroso.

O contato manual com as amostras deve ser evitado, a fim de não contaminar as amostras com resíduos indesejáveis. São minuciosamente inseridas na câmara com o auxílio de uma pinça, como mostra a Figura 4.10 a).

Após o processo de metalização, as amostras são fixadas agora na haste da câmara do MEV. Uma vez posicionada sobre a base, não será permitida nenhuma espécie de movimento por parte destas amostras em relação à referida base.

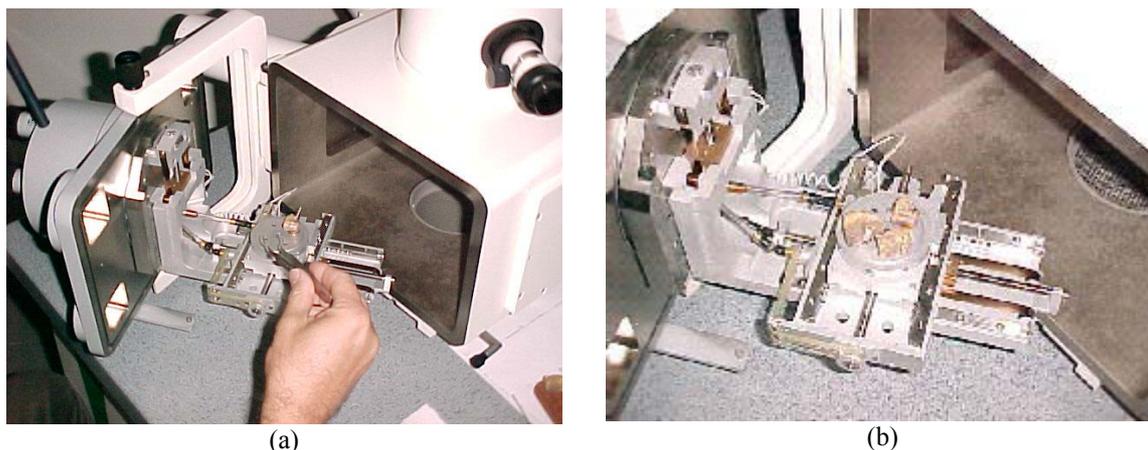


Figura 4.10 – Inserção das amostras na câmara de vácuo do MEV.

Através de ajustes mecânicos possíveis devido a pequenas alavancas visíveis na Figura 4.10 b), é possível direcionar as amostras, que se encontram solidárias à base metálica, dentro da câmara agora lacrada, em todas as 3 dimensões conhecidas.

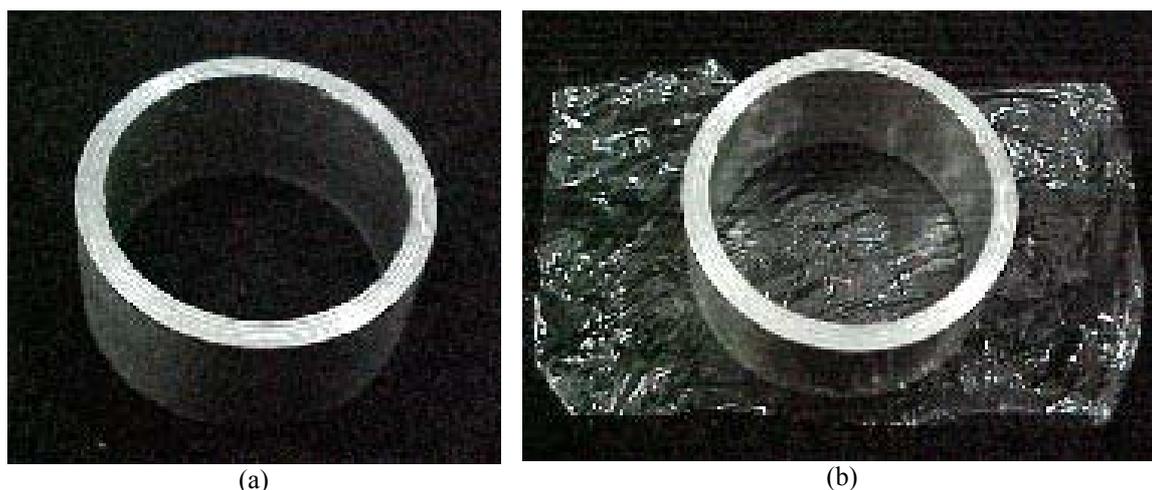
A câmara é então fechada e submetida a uma pressão aproximada de 5 Pa, para obtenção do vácuo necessário. Finalmente, as amostras fraturadas estão aptas à observação mediante MEV.

4.3.1.2 Preparação das amostras polidas

Para que as amostras sejam polidas, é necessário que estejam embutidas em um invólucro metálico (Figura 4.11 a). Esse invólucro atua como proteção física e química para a amostra, além de auxiliar na eficácia do processo de polimento.

A embutidura é a mesma para cada tipo de recuperação realizada. Neste experimento, foi realizada com o auxílio de uma resina polimérica, muito utilizada por profissionais da área médico-odontológica. Trata-se de um material bicomponente de fácil aplicação e manejo, boa trabalhabilidade, desenvolvimento rápido de resistência e ótima aderência.

A amostra é embutida de “cima pra baixo”, ou seja, ao final do processo, a superfície de interesse, onde a interface entre o material e o reparo é visível, se encontrará na parte inferior do anel. Para isso, é necessário que o envoltório metálico esteja colocado sobre uma película plástica (Figura 4.11 b) afim de que essa superfície de interesse ao estudo seja preservada.

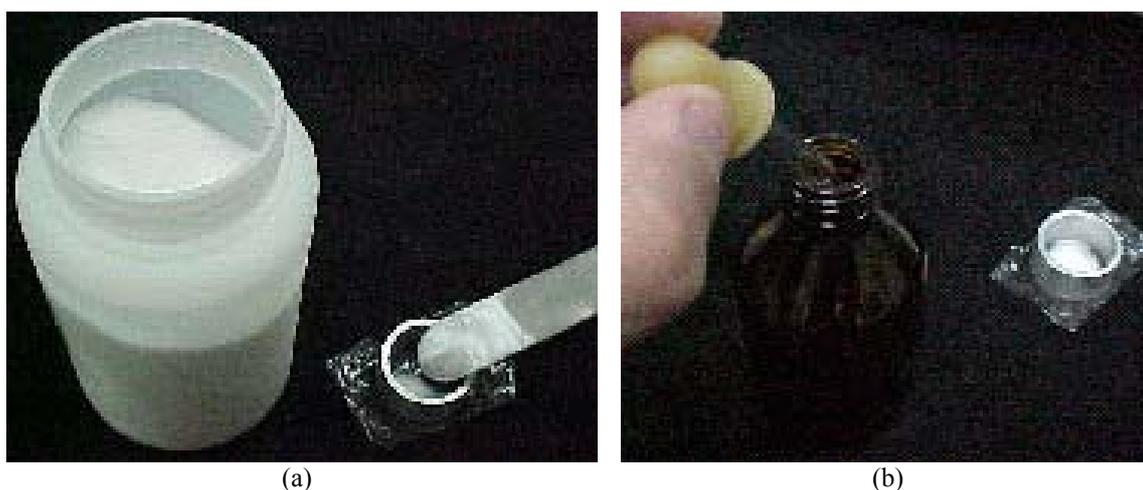


(a) Invólucro metálico b) Proteção à superfície.
Figura 4.11 – a) Invólucro metálico b) Proteção à superfície.

O processo de obtenção da resina envolve a mistura progressiva e contínua de sua porção sólida, pó, e a outra líquida. A reação é rápida e apresenta caráter exotérmico. É aconselhável o uso de máscara, devido ao forte cheiro.

No processo de embutimento, o pó, com o auxílio de uma pequena espátula, é adicionado no interior do invólucro (Figura 4.12 a) até que cubra toda a superfície exposta.

Com o auxílio de um conta-gotas, adicionam-se lentamente algumas gotas da porção líquida sobre o pó. (Figura 4.12 b)



(a) Invólucro metálico b) Proteção à superfície.
Figura 4.12 – Moldagem da resina; a) Invólucro metálico b) Proteção à superfície.

Este procedimento dever ser repetido até que se forme uma fina camada (Figura 4.13 a) responsável pela qualidade da superfície onde se encontrará a interface. É muito comum o aparecimento de pequenas bolhas de ar, oriundas de uma execução incorreta. Essas bolhas podem ser evitadas inserindo uma quantidade do material líquido suficiente pra embeber

todo o pó, e não mais que isto. A mistura entre os materiais deve ser realizada até que se obtenha uma uniformidade no gel. Nem uma só partícula sólida deve existir neste momento. A amostra é então inserida no anel, com sua face, onde se encontra a interface, voltada para baixo (Figura 4.13 b).



Figura 4.13 – Posicionamento da amostra; a) Camada base, b) Inserção da amostra.

Repete-se o processo até que todo o volume do invólucro seja preenchido (Figura 4.14).



Figura 4.14 – Embutimento das amostras.

A planicidade da amostra influi diretamente na qualidade da imagem, pois o microscópio óptico trabalha sob feixe de luz refletida. Para que se garanta uma qualidade satisfatória, a amostra deve ser submetida a um longo processo de lixamento e polimento.

A amostra embutida é submetida a cinco etapas de lixamento (cinco tipos de lixas). O desgaste na superfície deve ser uniforme para que sua planicidade não seja comprometida. Esse processo exige certa habilidade manual (Figura 4.15), já que qualquer falha pode comprometer todo o processo.



Figura 4.15 – Lixamento das amostras.

Ao final do processo, a amostra deve passar por um processo de limpeza já que alguns resíduos, após o lixamento, ficam impregnados em sua superfície. Esses resíduos são indesejáveis já que comprometem a qualidade da imagem.

A amostra é imersa em acetona em um recipiente de vidro que é posto para vibrar dentro de um agitador mecânico (Figura 4.16 a). A acetona é altamente volátil, o que facilita a limpeza da superfície de estudo. É usada em substituição a água, uma vez que o contato desta com o concreto pode provocar alterações em sua estrutura interna.

É adicionada uma porção de água no interior da cuba para que o processo de transmissão das vibrações, que são responsáveis pela eliminação das impurezas, à amostra seja intensificado. Esse processo se repete 3 vezes a cada 2 minutos, sempre se renovando a acetona. Esse intervalo de tempo é suficiente para remoção dos resíduos e para que não haja uma reação indesejada entre a acetona e a resina. Após esse processo, a amostra é seca mediante ar comprimido (Figura 4.16 b).



(a)



(b)

Figura 4.16 – Eliminação dos resíduos; a) Limpeza, b) Secagem.

Para a execução do polimento final, as amostras são presas a uma politriz elétrica, três a três (Figura 4.17).

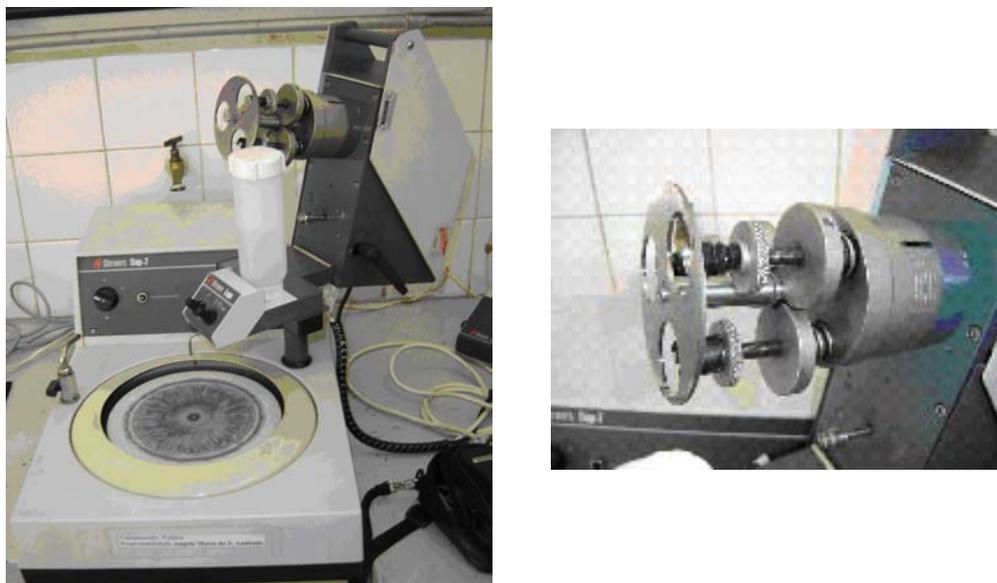


Figura 4.17 – Politriz elétrica.

Um pano de polimento de seda é fixado no disco rígido da máquina para que o polimento seja executado. É aplicada sobre o pano uma pasta de diamante para que se garanta uma qualidade final satisfatória (Figura 4.18).



Figura 4.18 – Polimento das amostras.

Ao final do processo, cerca de 8 a 10 horas por amostra, a superfície encontra-se totalmente polida, (Figura 4.19), sem marcas ou ranhuras, sendo esta a qualidade final necessária para análise.



Figura 4.19 – Amostra polida.

As amostras polidas também foram analisadas no MEV. Para isso passaram pelo mesmo processo de metalização ao qual foram submetidas as amostras fraturadas.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O concreto de cimento Portland possui uma estrutura bastante heterogênea e complexa. Macroscopicamente identificamos dois constituintes principais: a pasta de cimento endurecida e as partículas de agregado. Entretanto, sob o ponto de vista microscópico distinguimos que a pasta de cimento em contato com outro material cimentício – interface - apresenta características diferentes do restante da pasta.

Cada uma das fases é de natureza multifásica. Toda partícula de agregado pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios. Analogamente, tanto a matriz da pasta como a zona de transição contêm geralmente uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, acrescentando-se ainda o fato de estarem sujeitas a modificações com o decorrer do tempo, o que torna o concreto, diferentemente de outros materiais aplicados na engenharia, um material com características intrínsecas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Diversos sinais são emitidos oriundos da incidência do feixe de elétrons sobre a amostra, destacando-se os elétrons secundários (SE), os elétrons retroespalhados (BSE) e os Raios – X.

Imagens tridimensionais obtidas por meio de elétrons secundários evidenciam a morfologia dos compostos formados durante o processo de hidratação e a topografia da superfície da amostra, principalmente nos casos de fratura.

Os elétrons retroespalhados apresentam o contraste entre os elementos, facilitando a identificação de várias fases presentes na amostra, quando polida (HASPARYK, 1999).

Devido a uma limitação técnica do equipamento utilizado (marca Carl Zeiss, modelo Leo 940), todas as amostras foram analisadas mediante elétrons secundários e as amostras polidas também por MO.

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises referentes às micrografias das interfaces entre as argamassas de reparo e os substratos envolvidos no estudo. As amostras foram divididas em dois grupos, fraturadas e polidas, para cada tipo de material. O tempo para a análise de cada amostra foi de, aproximadamente, 23 horas. Serão apresentadas as microimagens obtidas em amostras fraturadas por meio do MEV e nas amostras polidas também por MO. Todas as micrografias foram analisadas via Autocad, no afã de obtermos percentagens relativas ao contato entre os materiais.

5.2 ESTUDO EM AMOSTRAS FRATURADAS

Todas as amostras analisadas via MEV foram submetidas ao processo de metalização – descrito no Capítulo 4 - indispensável para obtenção das imagens, uma vez que o concreto é tido como material inerte. Como possuem superfícies irregulares, não é possível a captação de imagens via MO, uma vez que esse trabalha com feixe de luz refletida.

As micrografias em amostras fraturadas foram realizadas adotando-se o seguinte procedimento:

- procurou-se, inicialmente, obter o menor aumento possível da amostra, afim de identificar a interface entre os materiais. Quanto mais próximo do tamanho real da amostra estiver a imagem, maior é a facilidade para identificação da interface;
- uma vez identificada a interface, faz-se uma varredura ao longo do comprimento da linha que une os materiais, registrando os vários aspectos na ligação, como a presença de aberturas e vazios.

Conforme o procedimento descrito foram obtidas 89 micrografias, realizadas nas amostras distribuídas conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quantidade de micrografias em amostras fraturadas.

TIPO DE REPARO	Nº DE AMOSTRAS	Nº DE MICROGRAFIAS
1	3	22
2	3	21
3	3	25
4	3	21

O tempo para aquisição das micrografias para cada amostra é de, aproximadamente, 8 horas.

A Figura 5.1 apresenta um exemplo da visualização real de uma amostra, olho nu, para cada tipo de material, imediatamente após a metalização. É com esse aspecto que elas são inseridas na câmara de vácuo do MEV.

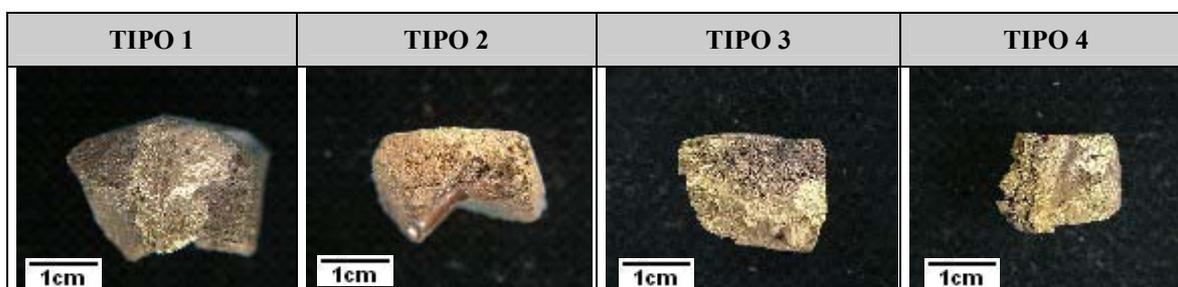


Figura 5.1 – Aspecto visual das amostras fraturadas.

5.2.1 Resultados obtidos via MEV

5.2.1.1 Interface com o material de reparo TIPO 1

Conforme apresentado no Capítulo 4, o material de reparo TIPO 1 é um argamassa de alta resistência, com base cimentícia, modificada com polímeros, elaborado para permitir a execução de reparos superficiais e recuperação de estruturas de concreto.

Uma análise visual da forma de ligação entre este material de reparo e o substrato já apresenta alguma deficiência quanto ao contato, evidenciada por vazios e fissuras na interface. São pequenas falhas distribuídas ao longo de, aproximadamente, 35% do comprimento da linha que une os materiais.

O reparo apresenta um aspecto “farinhoso”, sendo possível a visualização de pequenos poros no material de reparo. A fragilidade da ligação entre os materiais fica evidenciada

pelo seu “esfarelamento” ao menor sinal de atuação de esforço externo, no caso o manuseio.

Nas micrografias apresentadas na Figura 5.2 pode-se identificar a interface entre os dois materiais, sendo o material de reparo à direita e o substrato à esquerda.

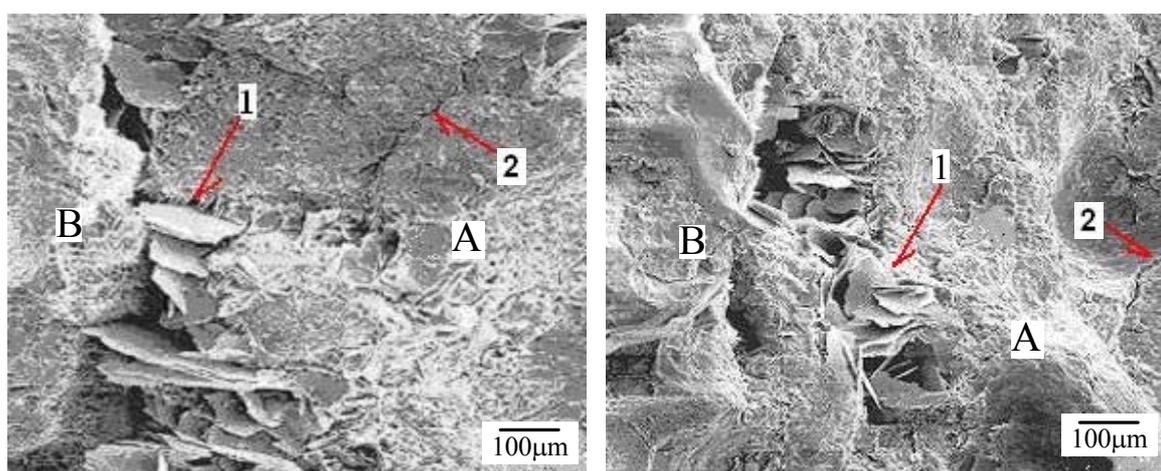


Figura 5.2 – Microfissuras na interface substrato - material de reparo TIPO 1.

Nas micrografias apresentadas na Figura 5.2 pode-se observar um composto semelhante ao monossulfato de cálcio (1), conforme Mehta e Monteiro (1994), na interface entre o material de reparo (A) e o substrato (B). A interface entre os materiais pode ser caracterizada aqui pela presença de fissuras perpendiculares ao seu eixo longitudinal, originando assim planos preferenciais de ruptura.

Algumas microfissuras (2) decorrentes da retração na pasta cimentícia, podem também ser observadas no material de reparo

Pode-se identificar nas micrografias apresentadas na Figura 5.3, através da morfologia, a linha que separa os dois materiais, sendo material de reparo à direita (A) o de e o substrato à esquerda (B).

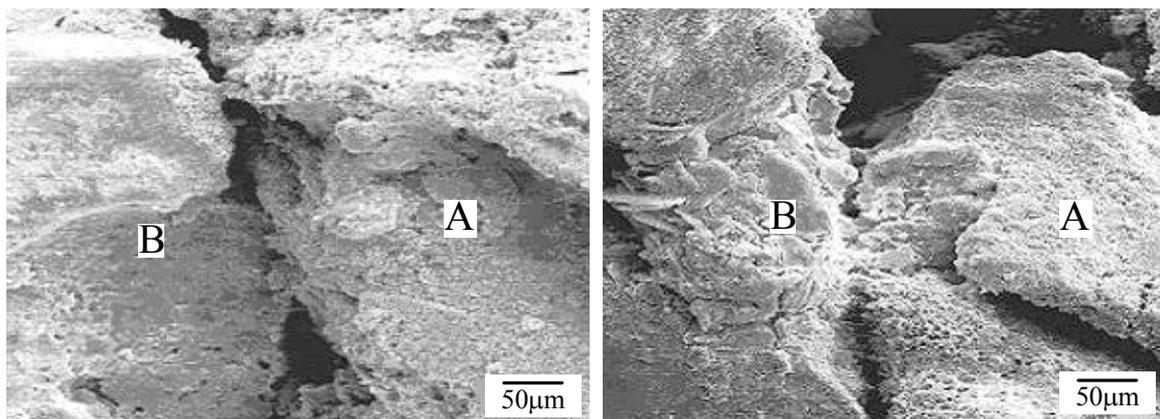


Figura 5.3 – Má qualidade na extensão da aderência na interface substrato - material de reparo TIPO 1.

A interface é caracterizada aqui pela presença acentuada de vazios, o que colabora para a má qualidade de aderência entre os materiais.

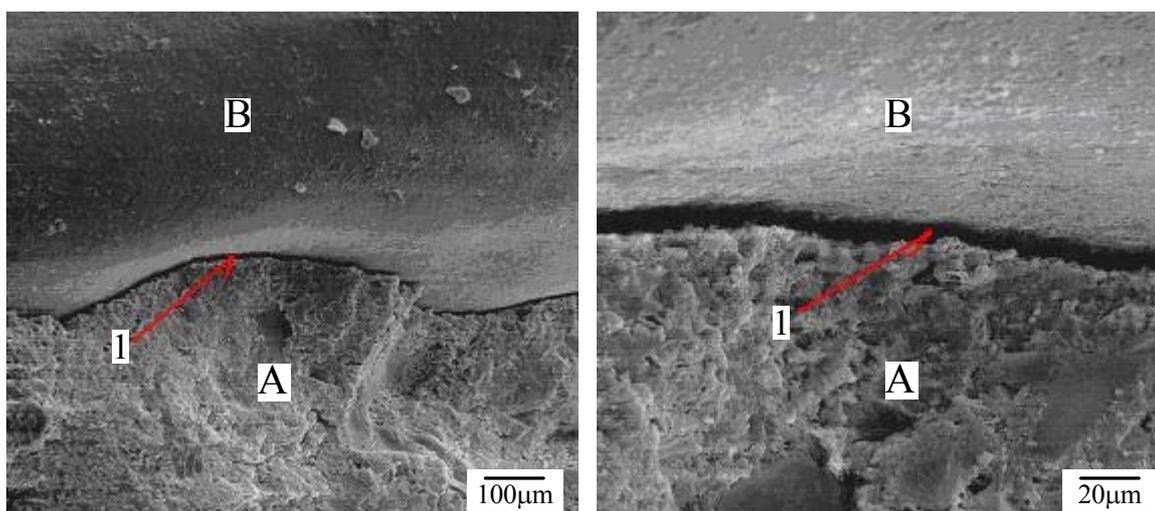


Figura 5.4 – Interface entre o material de reparo e o agregado graúdo.

As micrografias da Figura 5.4 apresentam um detalhe da forma de ligação do material de reparo (A), na parte inferior, com uma brita (B), parte superior. Trata-se de uma junção caracterizada pelo descolamento (1) ao longo de seu comprimento.

5.2.1.2 Interface com o material de reparo TIPO 2

O material de reparo TIPO 2 corresponde a uma argamassa de alta resistência, com base cimentícia, de rápida secagem e modificada com polímeros.

A ligação deste material de reparo ao substrato, mediante a uma análise puramente visual, apresenta uma interface caracterizada pela presença de falhas na ligação. São vazios e pequenas aberturas localizados em cerca de 30% do comprimento total da linha de união entre os materiais.

Trata-se de um material compacto, onde praticamente não é possível a visualização de poros ou qualquer tipo de falhas. Exige alguma habilidade manual por parte do operador no momento da retirada das amostras, pois apresenta certa instabilidade na ligação ao concreto, ratificada pela desunião entre os materiais no momento do contato com o disco de corte.

Pode-se identificar nas micrografias apresentadas na Figura 5.5, através da diferença de tons de cinza e pela morfologia, a linha que separa os dois materiais, sendo o material de reparo o de tonalidade mais escura (A) e o substrato o mais claro (B).

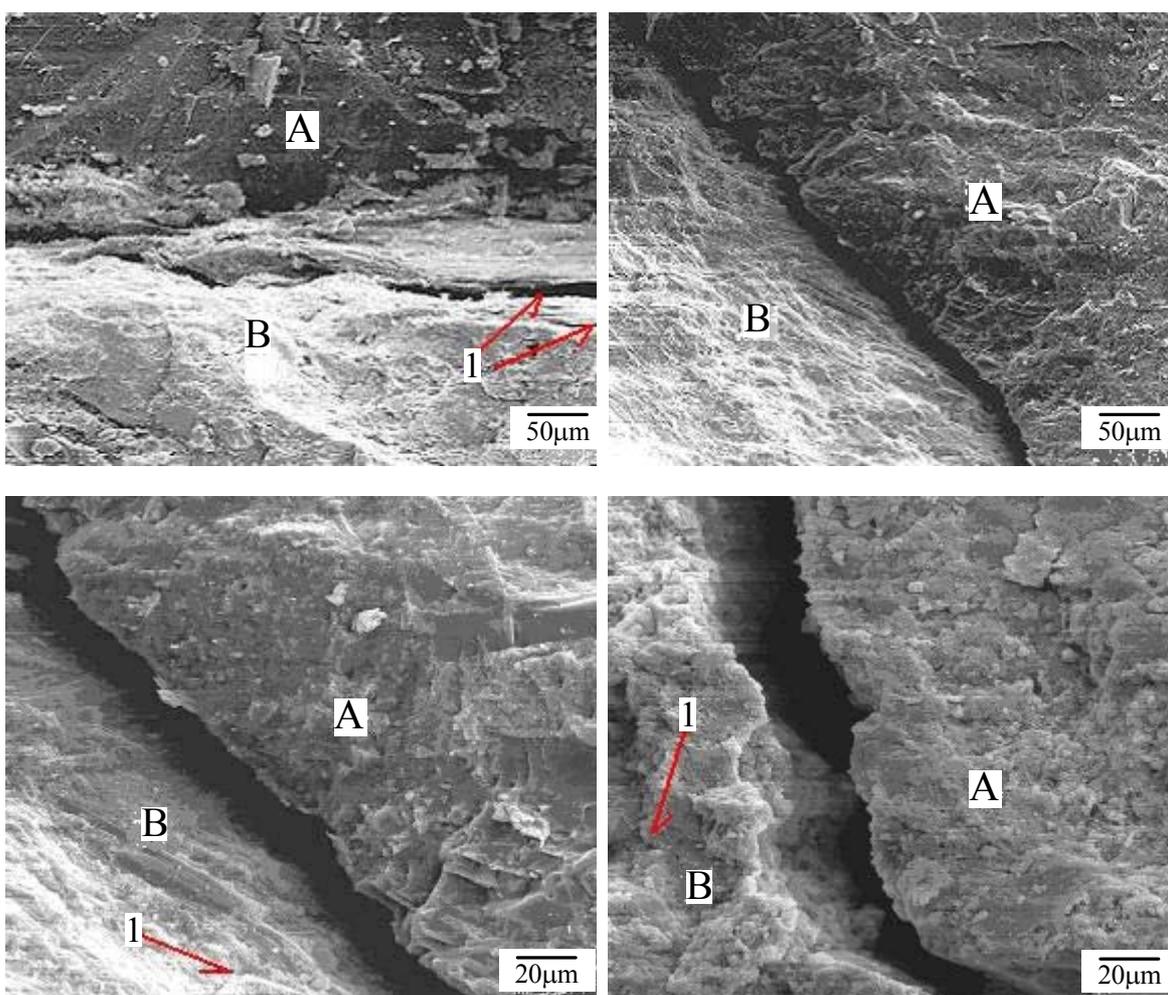


Figura 5.5 – Mau contato na interface substrato - material de reparo TIPO 2.

A Figura 5.5 apresenta a interface entre o material de reparo (A) e o substrato (B) caracterizada pela presença de vazios entre os materiais. Podem-se identificar algumas microfissuras (1) no substrato. O material de reparo apresenta, microscopicamente, um aspecto de compacidade elevada.

Pode-se visualizar a presença de poros, que podem ser decorrentes de uma vibração incorreta do concreto, no substrato. Esses poros podem reduzir, significativamente, a resistência do concreto e aumentar sua permeabilidade.

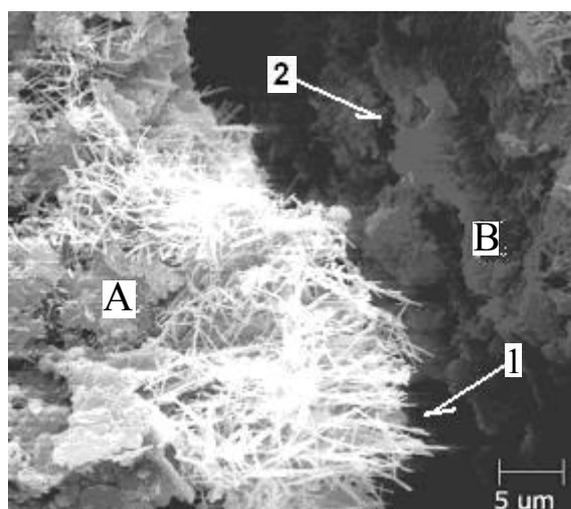


Figura 5.6 – Presença de etringita na interface entre os materiais.

Na Figura 5.6, interface entre o reparo (A) e o substrato (B), verifica-se a presença de etringita (1) ($C_6AS_3H_{32}$) oriunda da hidratação dos aluminatos em presença de sulfato. Observam-se possíveis placas lamelares (hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$) (2) no substrato. A ligação também apresenta vários pontos sem contato.

5.2.1.3 Interface com o material de reparo TIPO 3

O material de reparo TIPO 3 é um produto cimentício, modificado com polímero e fibras sintéticas.

Uma análise macroscópica da junção entre este material de reparo e o substrato apresenta poucas deficiências quanto ao contato, observadas pela presença de vazios e fissuras na interface. São falhas presentes em, pelo menos, 25% do contato entre os materiais.

Trata-se de um material altamente compacto, onde não é possível a visualização de poros ou qualquer tipo de falhas. Não exige qualquer tipo de habilidade manual por parte do operador no manuseio de preparação das amostras. Seu contato ao concreto apresenta-se altamente estável, não necessitando, assim, de maiores cuidados.

Nas micrografias apresentadas na Figura 5.7 pode-se identificar, pela diferença da morfologia dos componentes da pasta de cimento, a linha divisória entre os dois materiais, sendo que o material de reparo (A) se localiza à esquerda e o substrato (B) à direita.

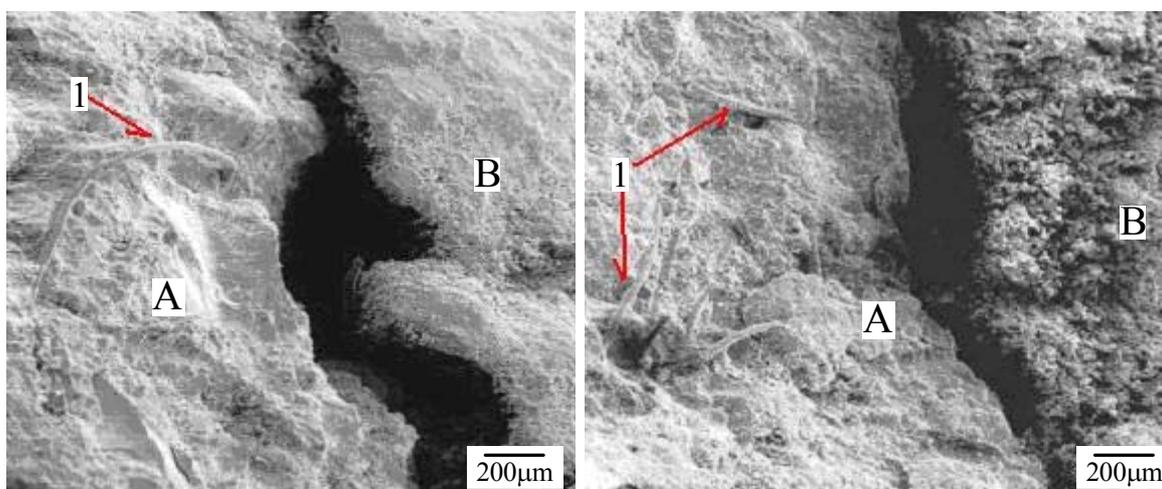


Figura 5.7 – Mau contato entre o substrato e o material de reparo TIPO 3.

A interface entre o material de reparo e o substrato na Figura 5.7 é caracterizada pela elevada quantidade de vazios, que representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da hidratação do cimento, entre os materiais. Esses vazios comprometem a qualidade da ligação entre os mesmos. Pode-se identificar a presença das fibras sintéticas (1) no material de reparo.

Nota-se, também, um grande número de poros presentes no material de reparo que podem afetar na resistência da pasta, uma vez que somente os componentes sólidos resistem aos esforços.

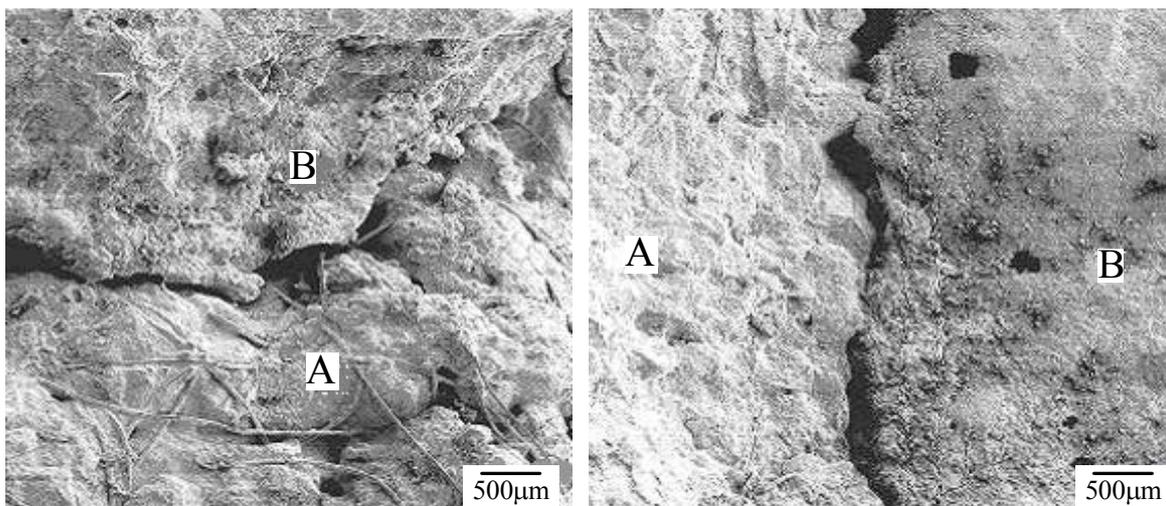


Figura 5.8 – Região da interface substrato – reparo com vazios.

A Figura 5.8 ratifica o descolamento entre os materiais, reparo (A) e substrato (B), caracterizada pela presença de vazios.

5.2.1.4 Interface com o material de reparo TIPO 4

O material de reparo TIPO 4 é um adesivo epóxico, utilizado como ponte de aderência, e uma argamassa com traço similar ao concreto do substrato.

A junção entre os materiais apresenta, a olho nu, deficiências relativas à aderência, evidenciadas pela presença de vazios e aberturas no contato entre ambos. São falhas presentes em, aproximadamente, 30% da linha que representa a interface entre os materiais.

Trata-se de um material bastante denso onde não coube a visualização de qualquer tipo de falha macroscópica. Apresentou uma excelente estabilidade quanto a preparação das amostras, não requerendo qualquer habilidade manual do operador.

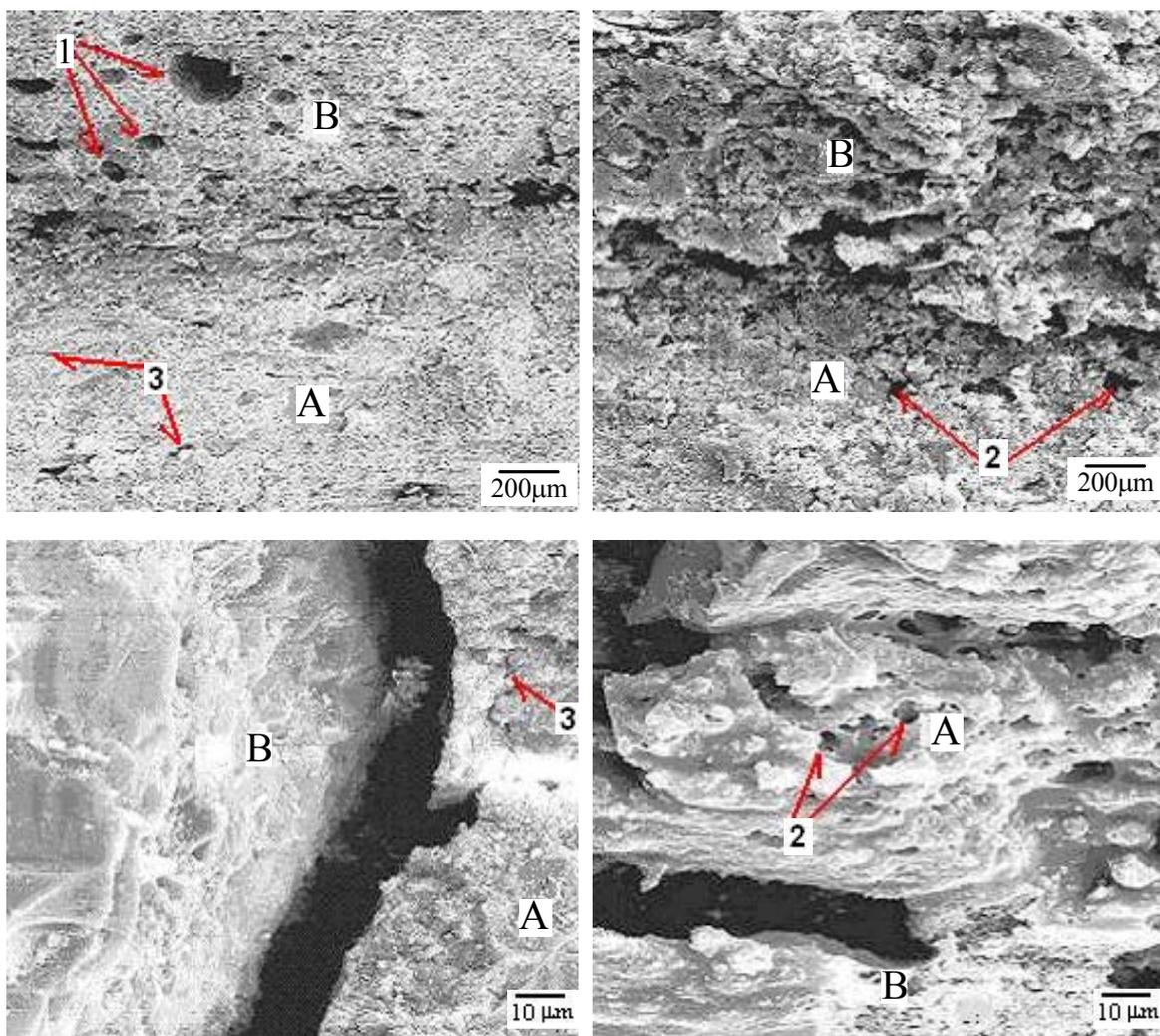


Figura 5.9 – Mau contato entre o substrato e o material epóxico.

As micrografias da Figura 5.9 apresentam má extensão da aderência, caracterizada pela presença de vazios e microfissuras na interface, entre o material epóxico (A) e a argamassa de reparo (B). O reparo apresenta poros de forma esférica (1) com dimensões superiores aos vazios capilares, o que pode comprometer a resistência e a permeabilidade do material. Já o adesivo, apesar de alguns poros (2) e microfissuras localizadas (3) microscopicamente, é um material bastante compacto.

5.3 ESTUDO EM AMOSTRAS POLIDAS

As imagens de amostras polidas podem ser obtidas tanto no MO quanto no MEV. Aspectos morfológicos e topográficos são caracterizados em ambos para efeito de comparação.

As micrografias em amostras polidas foram realizadas adotando-se o seguinte procedimento:

- devido à uma limitação do aparelho no processo de obtenção das imagens, foi necessário a adaptação de uma câmera fotográfica ao microscópio, afim de registrar as micrografias desejadas;
- foram usadas lentes com aumentos de 50, 100, 200 e 400 vezes, mediante campo escuro, que possibilita a visualização de cores que facilitam a identificação da interface e características intrínsecas dos materiais.
- uma vez identificada a interface, faz-se uma varredura ao longo do comprimento da linha de ligação entre materiais, registrando aspectos característicos na ligação, como a presença de microfissuras e vazios.

Conforme o procedimento descrito, foram obtidas 71 micrografias, realizadas nas amostras distribuídas conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Quantidade de micrografias em amostras polidas.

TIPO DE REPARO	Nº DE AMOSTRAS	Nº DE MICROGRAFIAS
1	3	18
2	3	18
3	3	17
4	3	18

O tempo para aquisição das micrografias para cada amostra foi de, aproximadamente, 7 horas.

A Figura 5.10 apresenta um exemplo do aspecto visual de uma amostra polida para cada tipo de material. É com esse aspecto que foram analisadas no MO.

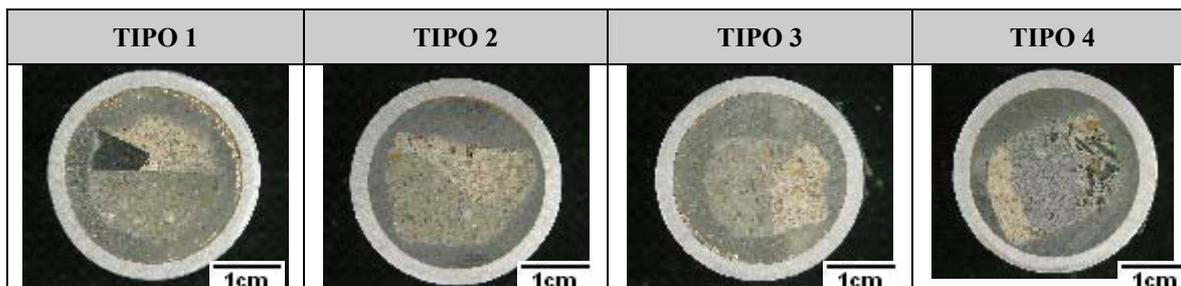


Figura 5.10 – Aspecto visual das amostras polidas.

5.3.1 Resultados obtidos via MO

As micrografias em amostras polidas foram realizadas mediante microscópio ótico (marca Carl Zeiss, modelo Epignost).

A presença da cor nas micrografias apresentadas, no microscópio ótico, assume um fator decisivo para a análise das imagens. A técnica de campo escuro utilizada no microscópio é que permite a obtenção de cores.

5.3.1.1 Interface com o material de reparo TIPO 1

A moldagem da amostra deste material, visualmente poroso, exige certa habilidade manual por parte do operador, devido ao seu aspecto “farinhoso”. Resquícios do material, imersos na resina, são indesejáveis, pois podem comprometer a qualidade da imagem. O “esfarelamento” do material danifica o pano de polimento.

Sob um ponto de vista macroscópico, visual, a junção entre este material de reparo e o substrato apresenta falhas na aderência entre os materiais, evidenciadas pela presença de aberturas e vazios na interface. São percebidas em, aproximadamente, 25% da região de interface entre os materiais.

O aspecto da aderência entre a argamassa de reparo (A) e o concreto (B) é apresentado na Figura 5.11. A interface entre os materiais é caracterizada por uma baixa qualidade no contato entre os materiais, evidenciada pela presença de vazios e fissuras na região de contato. Essas microfissuras comprometem a ligação, pois permitem a formação de grandes cristais de Ca(OH)_2 perpendiculares ao seu eixo, criando assim planos preferenciais de ruptura.

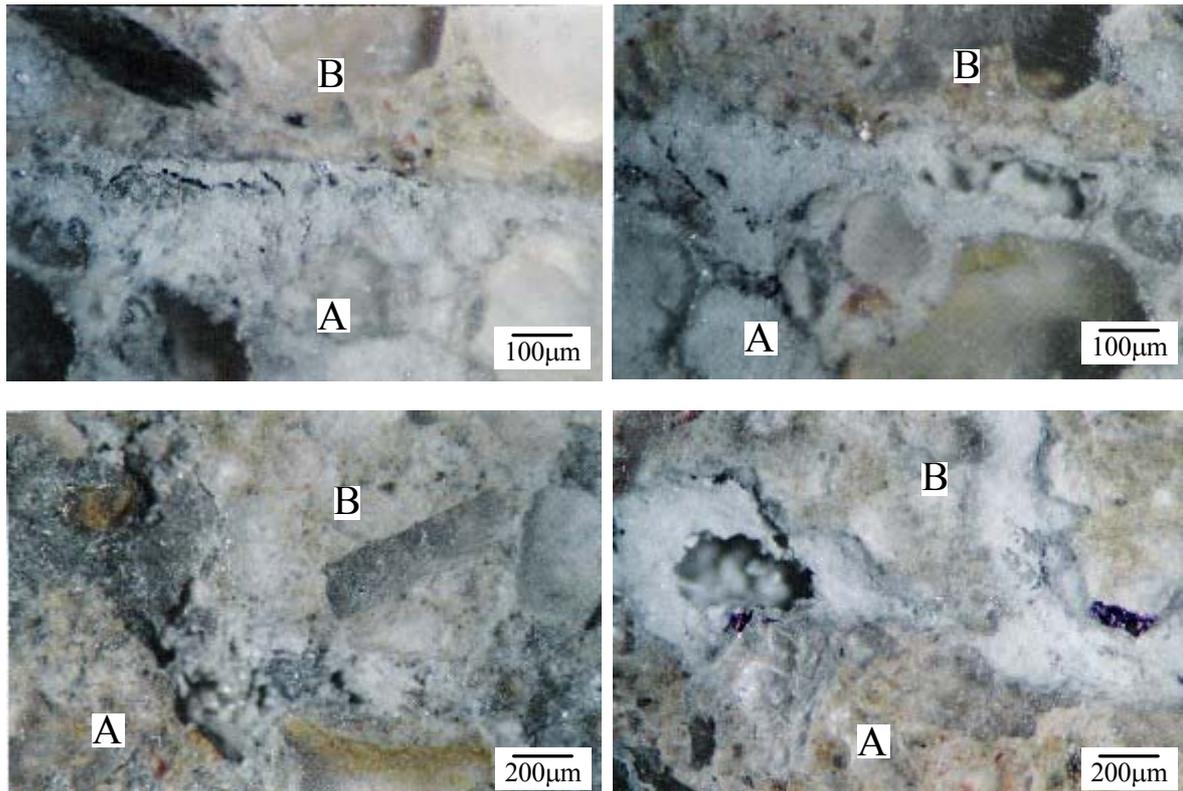


Figura 5.11 – Interface substrato – material de reparo TIPO 1 caracterizada pela presença de vazios.

A Figura 5.12 apresenta um detalhe referente à forma de ligação do reparo (A) ao agregado graúdo (B). A espessura e o aspecto dessa zona de transição variam conforme os componentes do reparo e do agregado.

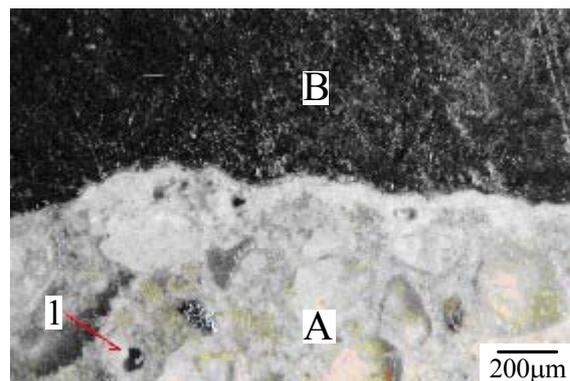


Figura 5.12 – Interface reparo – agregado.

A interface entre o agregado graúdo e o material de reparo é caracterizada por ser uma região porosa, proveniente da elevação da relação a/c na mistura decorrente do filme de água que se forma em torno do agregado graúdo. Podem-se relacionar as falhas na aderência entre o reparo e o agregado ao surgimento de cristais formados, com superfície

específica menor, provocando assim uma redução nas forças de Van der Waals (forças de ligação). Notam-se alguns poros localizados no reparo (1).

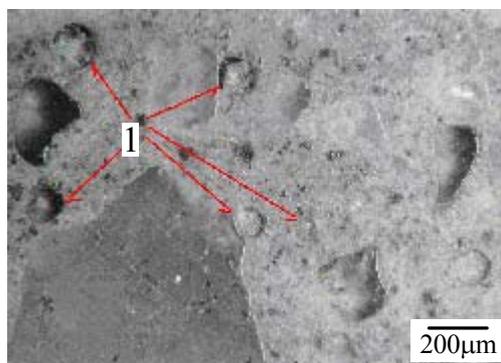


Figura 5.13 – Material de reparo poroso.

A porosidade do material de reparo é ratificada na Figura 5.13. Evidencia-se a presença de poros esféricos (1) com dimensões superiores aos vazios capilares, podendo reduzir bastante a resistência e aumentar a permeabilidade do material.

5.3.1.2 Interface com o material de reparo TIPO 2

Uma análise visual da forma de ligação entre este material de reparo e o substrato já apresenta uma interface caracterizada pela presença de vazios na ligação. São vazios e pequenas aberturas localizados em cerca de 25% do comprimento da linha que une os materiais.

O momento de embutimento das amostras exige alguma habilidade manual por parte do operador, pois apresenta certa instabilidade na ligação ao concreto durante o manuseio, verificada pela desunião entre os materiais e, destes com a resina no momento do contato com as lixas. É um material compacto, onde praticamente não é possível a visualização de poros ou aberturas em sua superfície.

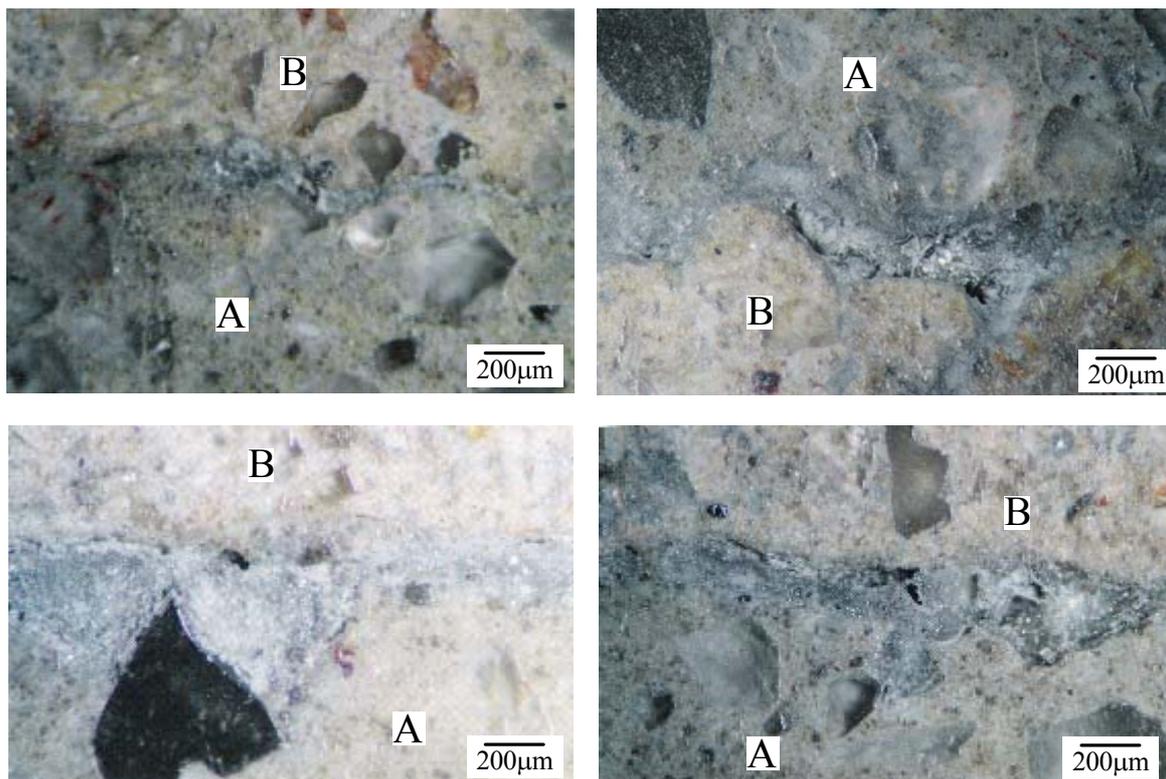


Figura 5.14 – Microfissuras na interface substrato - material de reparo TIPO 2.

A Figura 5.14 apresenta uma interface onde a aderência entre o reparo (A) e o concreto (B) é comprometida por microfissuras ao longo de seu comprimento

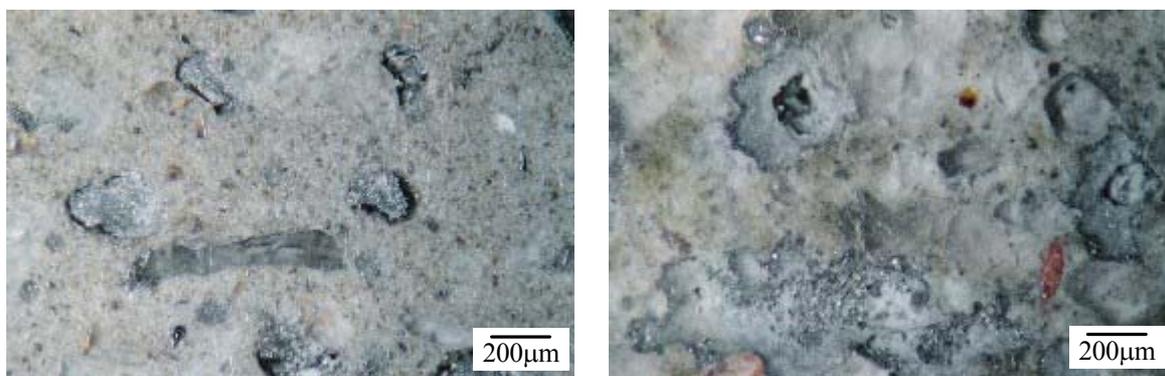


Figura 5.15 – Poros no material de reparo.

As falhas no material são evidenciadas na Figura 5.15 pelo seu elevado índice de porosidade.

5.3.1.3 Interface com o material de reparo TIPO 3

A junção entre este material de reparo e o substrato praticamente não apresenta deficiências quanto à aderência, mediante análise visual. A visualização, a olho nu, de vazios e aberturas na interface não é possível.

O processo de embutimento das amostras não exige qualquer tipo de habilidade manual por parte do operador. A aderência da amostra à resina apresenta-se altamente estável, não comprometendo, assim, o pano de polimento. É um material altamente compacto, onde não é possível a visualização macroscópica de qualquer tipo de falha.

A Figura 5.16 apresenta uma excelente aspecto da junção entre o reparo (A) e o substrato (B). A qualidade da interface é notória, não há presença de microfissuras ou vazios na região do contato.

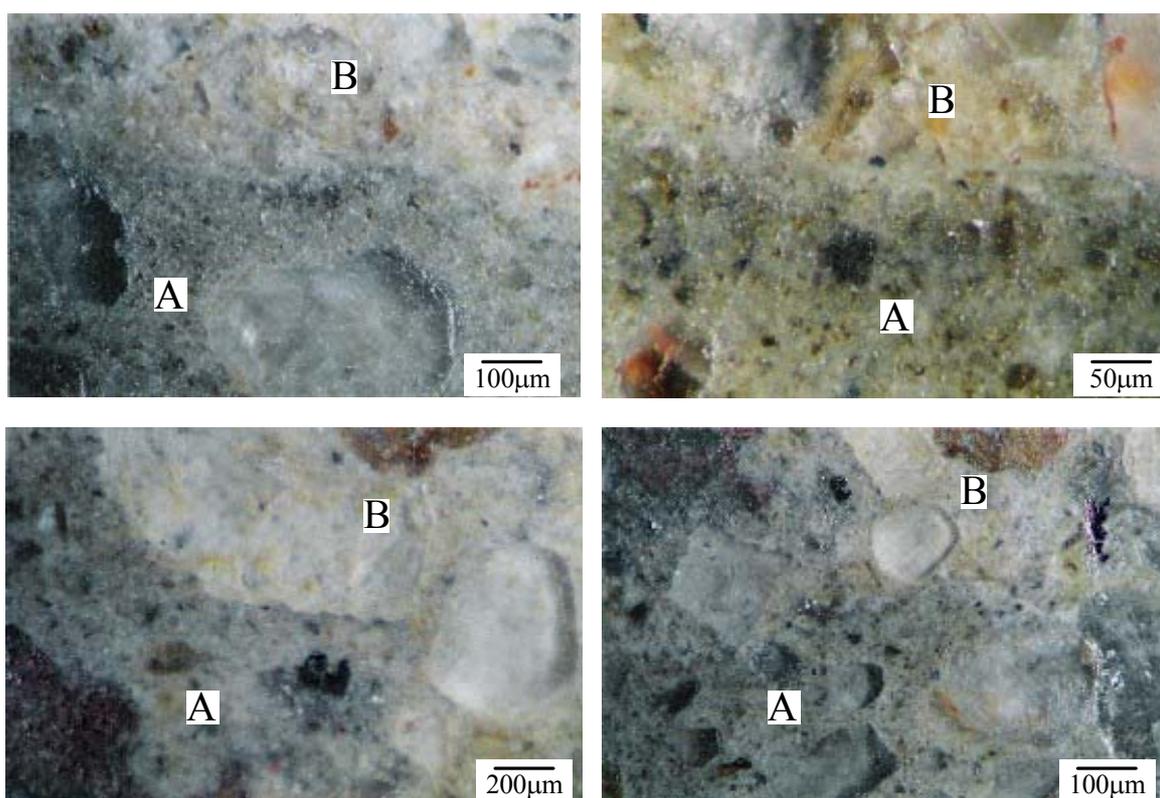


Figura 5.16 – Interface substrato – material de reparo TIPO 3 com boa extensão da aderência.

A compacidade do material de reparo pode ser visualizada na Figura 5.17. Apresenta vazios muito pequenos, prováveis poros de gel, que não influenciam na resistência da pasta.



Figura 5.17 – Microfissura no reparo.

Pode-se observar uma microfissura (1) decorrente da retração do substrato. Como os materiais postos em contato possuem módulos de elasticidade diferentes, o endurecimento do material pode causar microfissuras no concreto posto em contato.

5.3.1.4 Interface com o material de reparo TIPO 4

A análise visual das ligações, a primeira entre o adesivo epóxi com o microconcreto, utilizado como reparo, e a segunda entre o material epóxico e o substrato entre os materiais, não denota deficiências relativas ao contato, evidenciadas pela ausência de vazios e aberturas no contato entre ambos. Pode-se afirmar que não existem falhas visuais na ligação entre os materiais.

Embora o embutimento das amostras não exigisse habilidades manuais específicas e o reparo apresentasse um elevado aspecto de compacidade, o polimento das mesmas não foi possível. Houve uma reação, inesperada e indesejada, entre o material de reparo e a pasta de diamante utilizada para polir as amostras, liberando produtos que danificavam o pano de polimento. Segundo o catálogo do fabricante, o procedimento de lixamento era suficiente para obtenção do sucesso das imagens para este tipo de material.

A Figura 5.18 apresenta uma boa ligação entre o material epóxico (A) e o substrato (B), caracterizada pela inexistência de microfissuras ou vazios ao longo de seu comprimento. Nota-se a presença de pequenos poros no concreto (1).

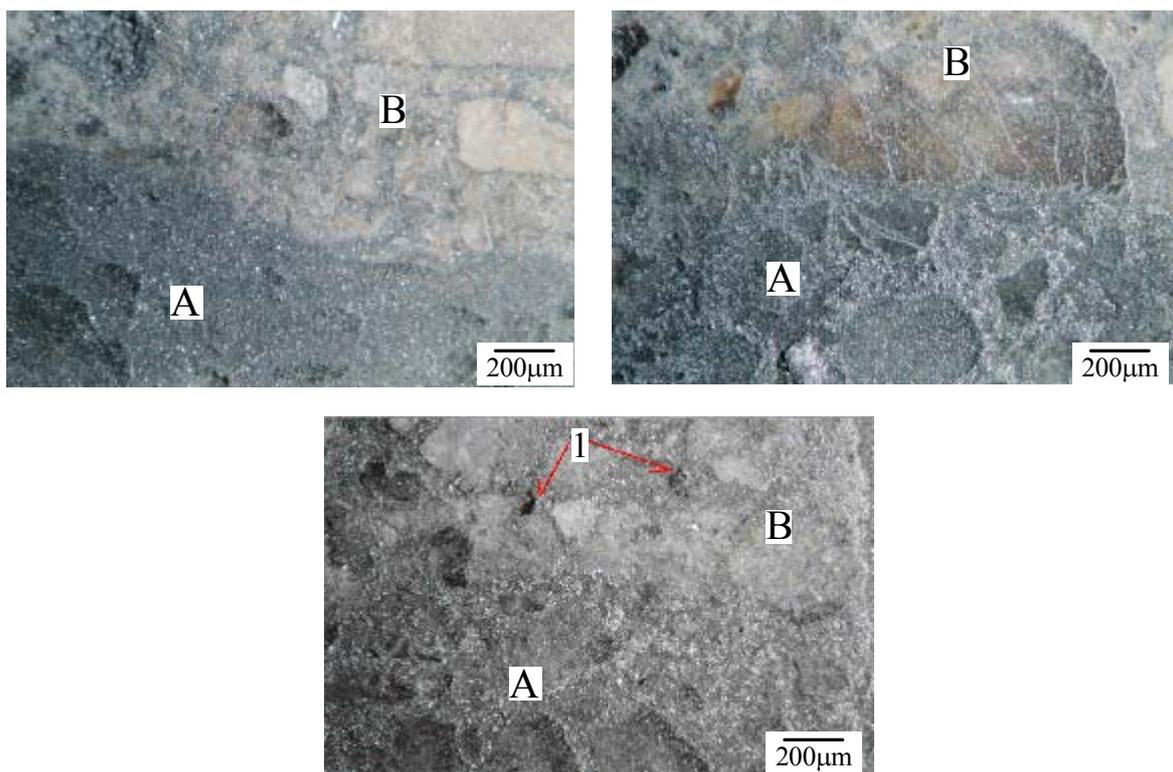


Figura 5.18 – Interface substrato – material de reparo TIPO 4 com boa extensão da aderência.

Apesar do elevado aspecto de compacidade do material, percebe-se na Figura 5.19 alguns poros esféricos (1), decorrentes talvez de uma execução inadequada, que podem comprometer o material quanto a sua resistência e estanqueidade.

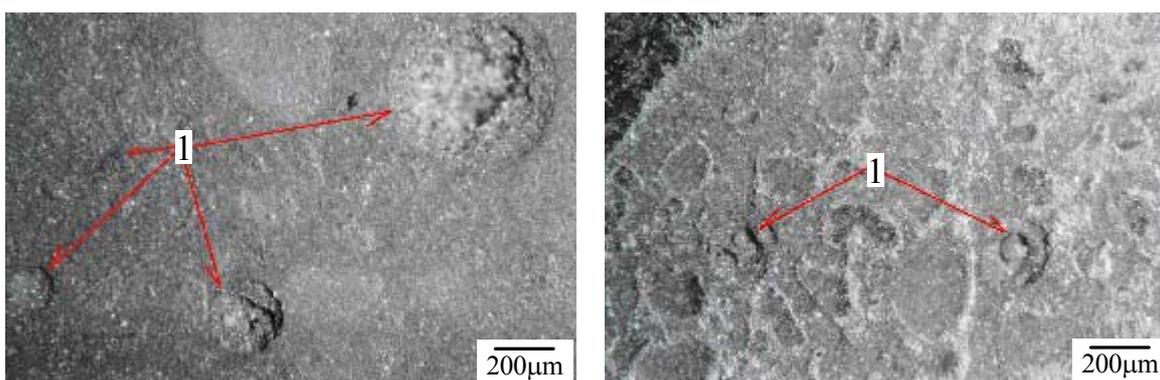


Figura 5.19 – Poros no material de reparo TIPO 4.

5.3.2 Resultados obtidos via MEV

Conforme o procedimento descrito, foram obtidas 87 micrografias, realizadas nas amostras distribuídas conforme Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Quantidade de micrografias em amostras polidas metalizadas.

TIPO DE REPARO	Nº DE AMOSTRAS	Nº DE MICROGRAFIAS
1	3	21
2	3	23
3	3	22
4	3	21

O tempo para aquisição das micrografias para cada amostra foi de, aproximadamente, 12 horas.

A Figura 5.20 apresenta um exemplo do aspecto visual de uma amostra polida metalizada, para cada tipo de material. É com esse aspecto que elas são analisadas no MEV.

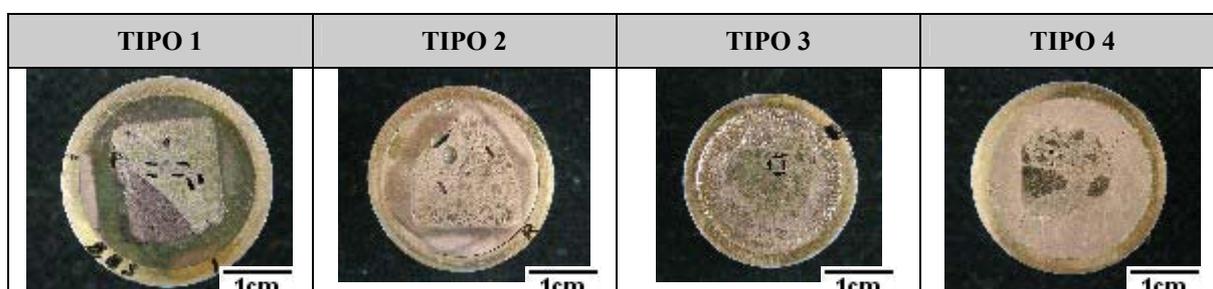


Figura 5.20 – Aspecto visual das amostras polidas metalizadas.

5.3.2.1 Interface com o material de reparo TIPO 1

Para a visualização da interface nas imagens adquiridas pelo microscópio, foi adotado um procedimento (Figura 5.21), pois em algumas situações, os materiais apresentam a mesma tonalidade de cor, o que oculta a presença da interface no processo de obtenção das imagens.

Tal procedimento consiste em um mapeamento linear da interface entre a argamassa de reparo (A) e o concreto (B) através de algumas marcas de tinta que são feitas ao longo de seu comprimento. Dessa maneira, o contraste entre os tons de cinza e a tinta permite uma análise primorosa da imagem.

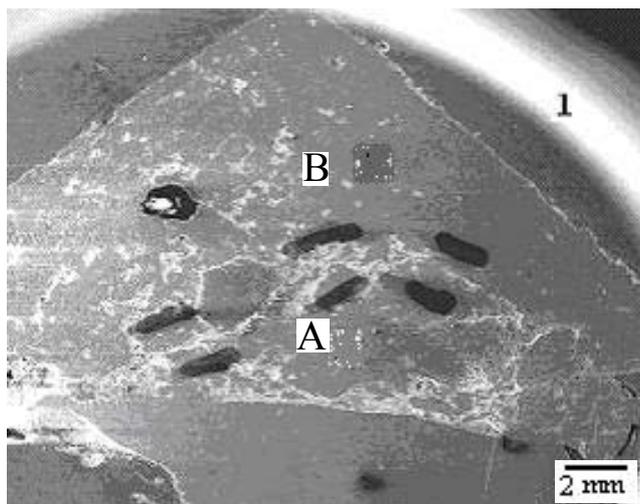


Figura 5.21 – Procedimento para visualização da interface.

Pode-se identificar um grande poro localizado no substrato, decorrente de uma provável falha em seu processo de vibração, e o invólucro metálico (1) ao qual a amostra encontra-se solidária.

Uma análise visual da interface entre o material de reparo e o substrato evidencia falhas na aderência entre os materiais, validadas pela presença de fissuras e vazios na junção entre ambos. São visualmente perceptíveis em cerca de 25% do comprimento da linha que une os materiais.

Não é possível a visualização de prováveis resíduos decorrentes do “esfarelamento” do material imerso na resina. O processo de embutimento deste material é minucioso exigindo, portanto, alguma prática por parte do operador.

As falhas na ligação apresentadas na interface entre o material de reparo (A) e o substrato (B) apresentada na Figura 5.22 é notória e caracteriza-se pelo elevado índice de vazios.

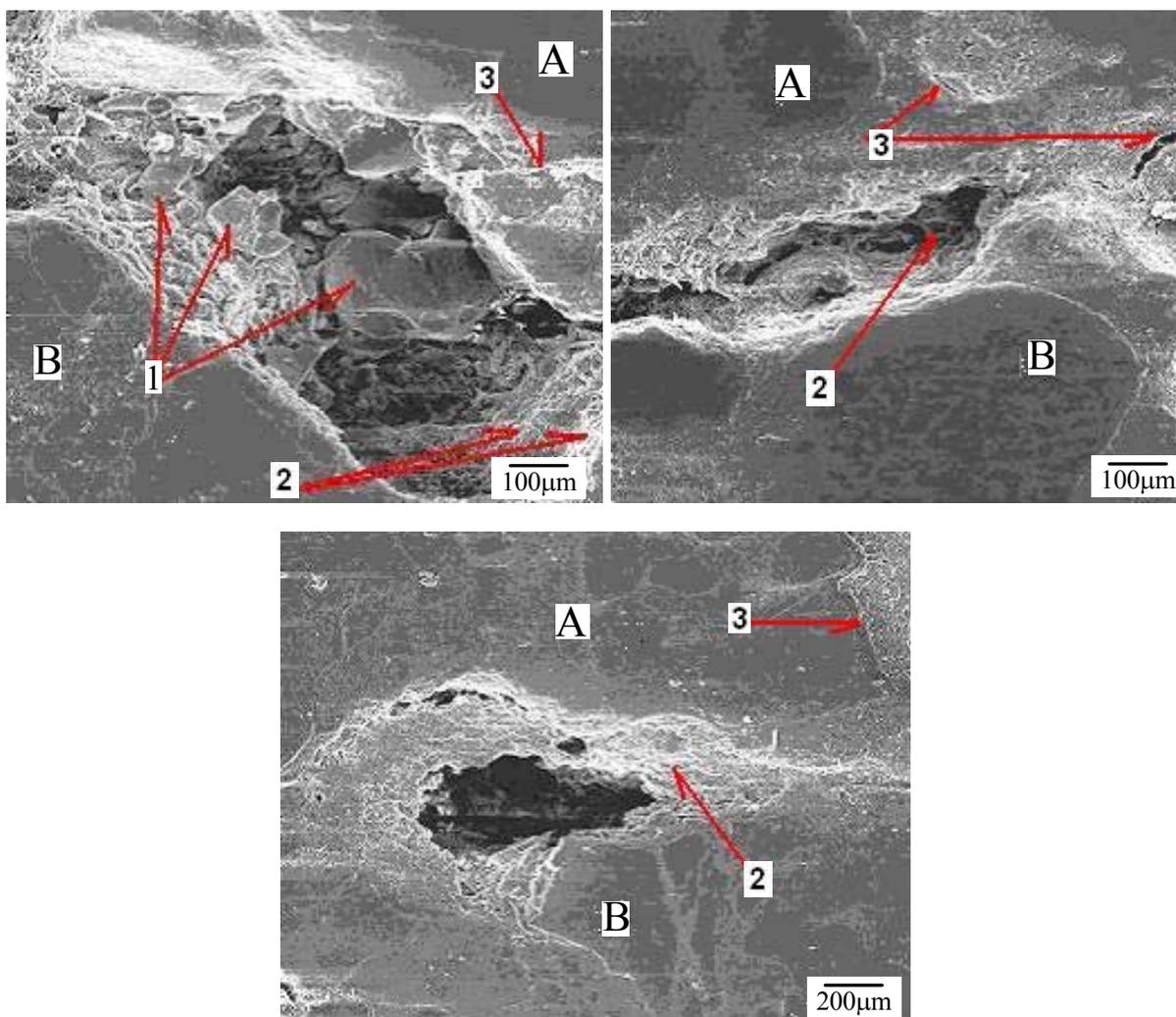


Figura 5.22 – Interface substrato - material de reparo TIPO 1 caracterizada pela presença de vazios

A possível presença do hidróxido de cálcio (CaOH_2) (1) e do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (2) pode ser notada na interface entre os materiais. Como se trata de uma amostra polida, não é possível a visualização de aspectos morfológicos na superfície da mesma. Microfissuras no reparo também são observadas (3).

5.3.2.2 Interface com o material de reparo TIPO 2

A forma de ligação entre este material de reparo e o substrato, mediante análise visual, apresenta falhas na ligação entre os materiais. São vazios e fissuras localizados, aproximadamente, em 25% da região de contato entre os materiais.

O embutimento das amostras evidencia certa instabilidade verificada pela desunião entre os materiais e, destes com a resina, no início do processo de lixamento. A habilidade

manual do operador, nesse caso, é de fundamental importância. Praticamente não é possível a visualização de fissuras ou aberturas no material de reparo.

Nas micrografias apresentadas na Figura 5.23, pode-se identificar, através da diferença de tons de cinza, a linha que separa os dois materiais, sendo o material de reparo o de tonalidade escura e o substrato, a clara.

Na Figura 5.23 verifica-se que a junção do material de reparo (A) e o substrato (B) é caracterizada pela presença de vazios e fissuras. A qualidade do contato entre os materiais fica comprometida pelos prováveis presenças de produtos de hidratação da pasta de cimento que se formam nesses vazios, como cristais de hidróxido de cálcio (1) e silicato de cálcio hidratado (2), contribuindo para a formação de planos de ruptura.

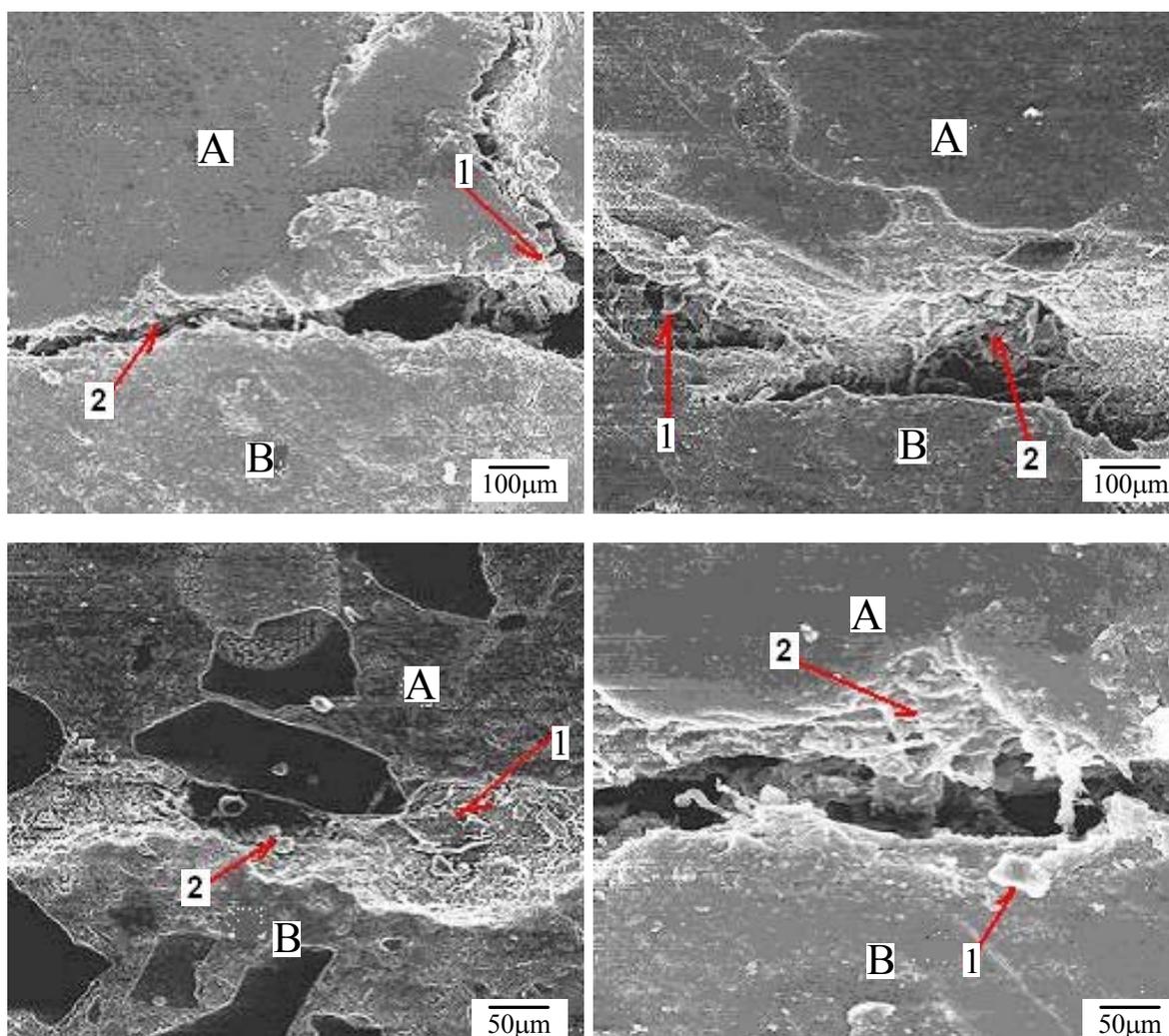


Figura 5.23 – Interface substrato - material de reparo TIPO 2 caracterizada pela presença de vazios.

5.3.2.3 Interface com o material de reparo TIPO 3

Visualmente não há, praticamente, falhas no contato entre o material de reparo e o substrato. Não é possível a percepção visual de vazios ou fissuras ao longo do comprimento da interface entre os materiais.

Há uma grande estabilidade na extensão da aderência entre a amostra e a resina, o que dispensa uma habilidade manual apurada por parte do operador.

A diferença de tons de cinza nas micrografias apresentadas na Figura 5.24 é fator preponderante no processo de identificação da linha que separa os dois materiais, sendo o material de reparo identificado pela tonalidade escura e o substrato, a clara. Em algumas regiões as cores se confundem, o que torna impossível a visualização da interface.

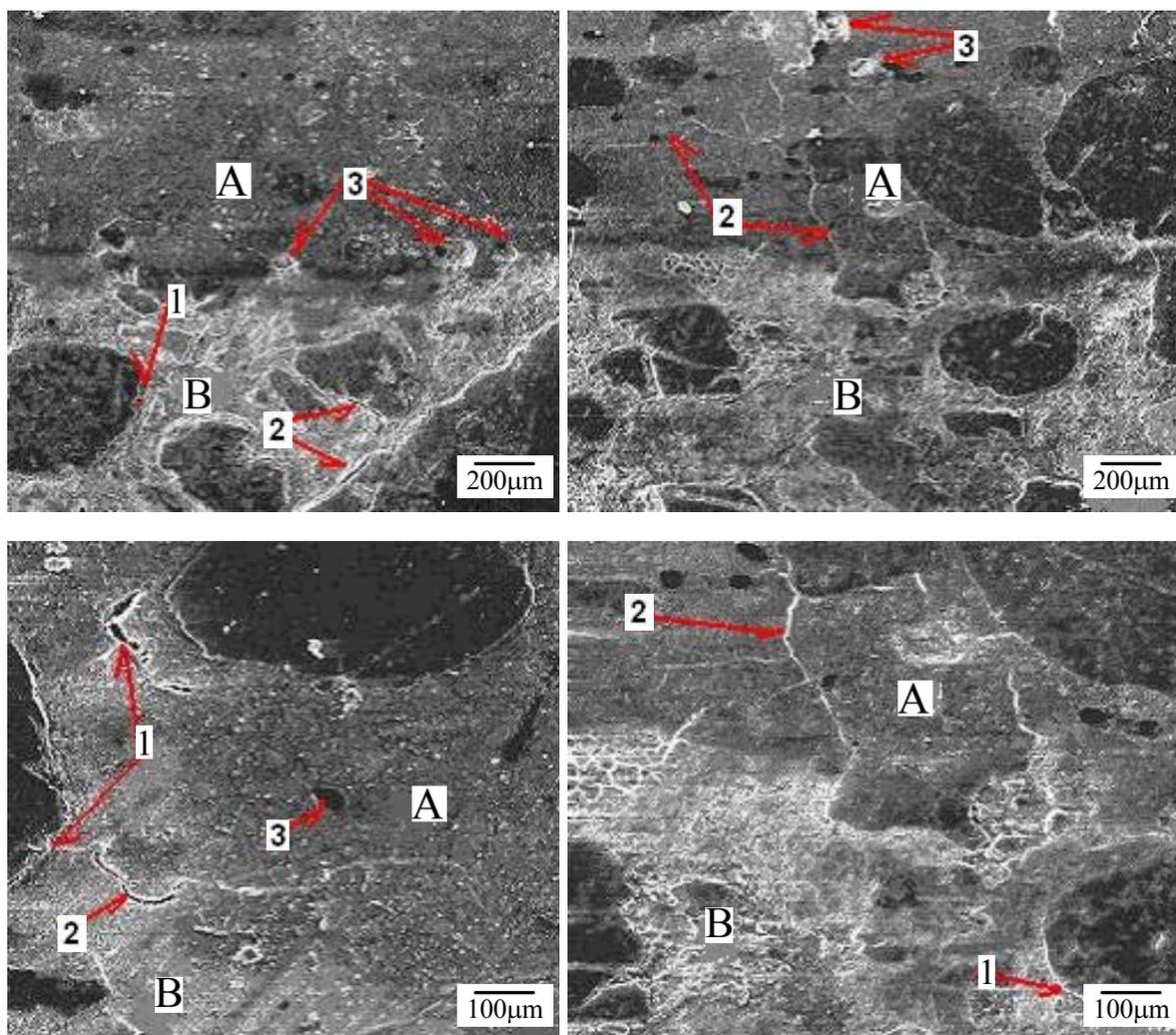


Figura 5.24 – Bom contato entre o substrato e o material de reparo TIPO 3

Pode-se constatar na Figura 5.24 um contato eficiente entre o reparo (A) e o substrato (B). Microfissuras ou vazios não são presenciados na região do contato. Pode-se observar a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado graúdo (1), que apresenta característica diferentes do restante da pasta devido ao filme de água que se forma em torno do agregado.

Nota-se a presença de microfissuras (2) e de pequenos poros (3), tanto no reparo quanto no substrato, decorrentes de microesforços induzidos no processo de retração da pasta.

Verifica-se a compacidade do material de reparo (A). Apresenta pequenos poros, de gel ou entre possíveis camadas de C-S-H, que não influenciam na resistência da pasta. Nota-se a presença de vazios capilares no substrato.

5.3.2.4 Interface com o material de reparo TIPO 4

A Figura 5.25 evidencia, devido a utilização do adesivo como ponte de aderência, a presença de duas interfaces: a primeira entre o adesivo epóxi (A) com o microconcreto (B), utilizado como reparo, e a segunda entre o material epóxico e o substrato (C). Notam-se pequenas marcas de tinta (1), usadas para identificar a interface entre os materiais, e até mesmo os próprios materiais, nas imagens adquiridas pelo MEV.

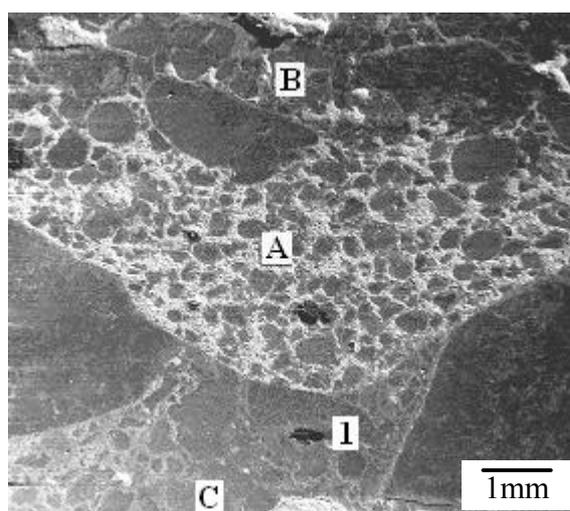


Figura 5.25 – Boa extensão da aderência na interface substrato - material epóxico – reparo.

Mediante uma análise macroscópica, a ausência de vazios e fissuras no contato entre os materiais caracteriza a eficácia da ligação entre ambos. Não existem falhas visuais na ligação entre os materiais.

O pano de polimento foi parcialmente destruído pela reação deletéria entre os compostos do cimento presentes no reparo e a pasta de diamante utilizada para polir as amostras. Apenas o lixamento das amostras é suficiente para obtenção das imagens, uma vez que este tipo de material não “aceita” polimento. É importante a ressalva de que não há relação entre o fato ocorrido e o manuseio do operador, no processo de embutimento das amostras.

A diferença na tonalidade de cinza nas micrografias apresentadas na Figura 5.26 identifica os materiais. O material epóxico é identificado pela tonalidade clara e o substrato pela escura. A linha que separa os materiais é nítida.

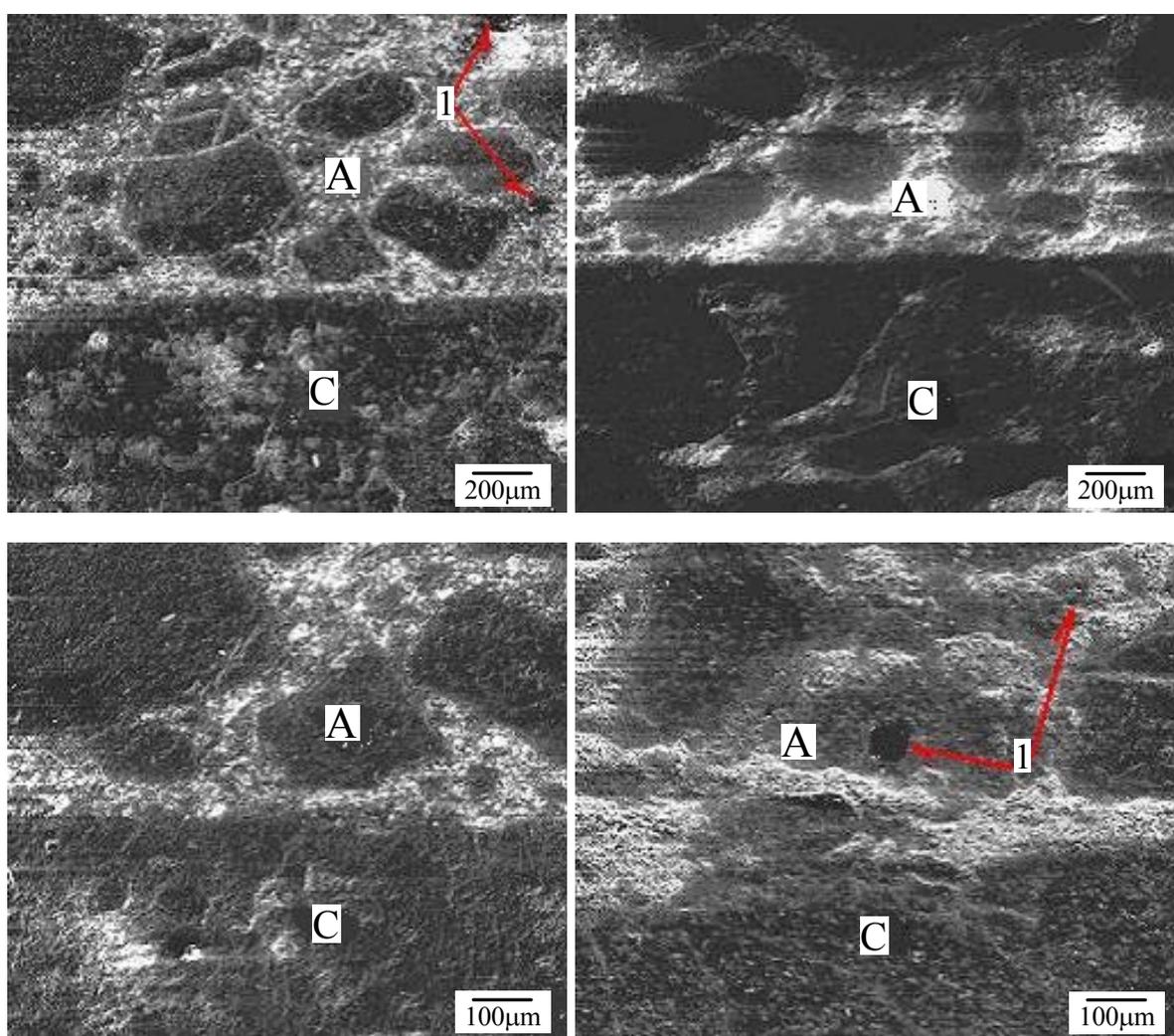


Figura 5.26 – Boa extensão da aderência na interface substrato - material epóxico.

Nota-se na Figura 5.26 uma ligação bastante eficiente entre o material epóxico (A) e o substrato (C). Microfissuras e vazios capilares não são perceptíveis na junção entre os

materiais. Verifica-se um aspecto de compacidade do material epóxico, com a presença de pequenos poros localizados (1).

Na Figura 5.27, mais uma vez os materiais podem ser identificados pelos diferentes tons de cinza, o material epóxico é o de tonalidade clara e o substrato escura. A linha que separa os materiais é novamente bastante nítida.

A Figura 5.27 apresenta a junção eficaz entre o material epóxico (A) e o material de reparo (B). Nota-se a presença microfissuras (1) no reparo e de vazios capilares (2) no epóxi que podem comprometer o material quanto a sua estanqueidade e resistência.

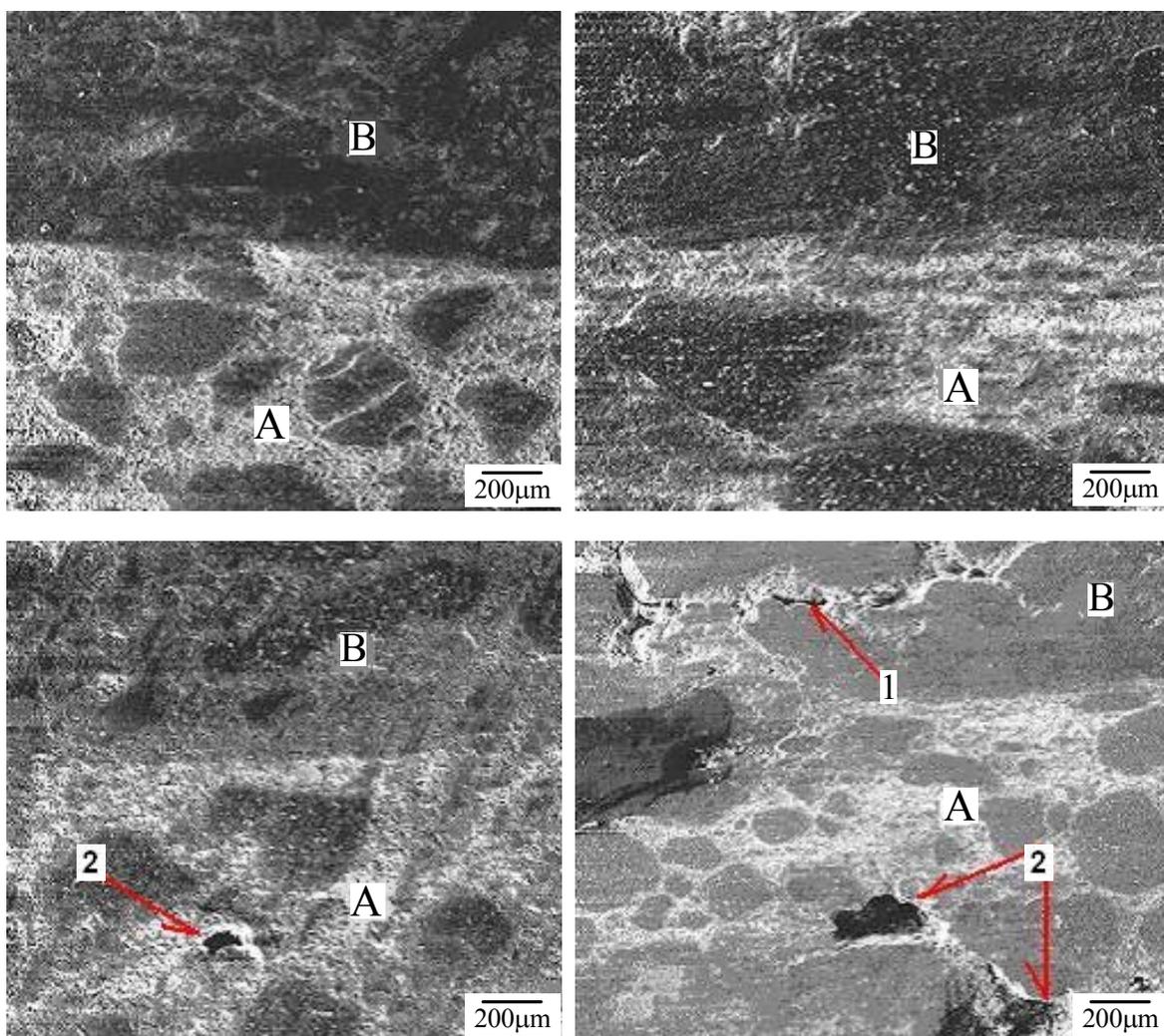


Figura 5.27 – Bom contato entre o material de reparo e o adesivo epóxico.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Procurou-se identificar, através desse trabalho, aspectos morfológicos relacionados à forma de ligação entre os 4 tipos de materiais de reparo e o substrato. Considerando as condições experimentais realizadas, pode-se concluir:

6.1.1 Conclusões gerais

- As amostras fraturadas via MEV não foram conclusivas na avaliação da análise de comportamento da interface entre dois materiais distintos, pois algumas deficiências nesta pesquisa foram constatadas. O processo de obtenção dessas amostras requer a aplicação de uma força externa que visa a ruptura, a fratura do material. Como dois materiais, de módulo de elasticidade diferentes, estão em contato, há uma concentração de tensões na interface entre eles que cria um plano preferencial à ruptura. Então, é possível que na obtenção das imagens da interface, sejam observadas microfissuras oriundas da aplicação do esforço utilizado na obtenção da amostra, e não relacionadas ao material em si, mascarando resultados. Houve uma incompatibilidade entre os resultados obtidos via MEV e os obtidos via MO, pois nenhuma imagem, utilizando amostras fraturadas, apresentou contato satisfatório. Apesar deste fato, pode-se verificar que a seqüência de desempenho de cada reparo, quando comparados entre si, foi a mesma das outras análises, ou seja, o tipo que apresentou o melhor desempenho foi o mesmo para todas as análises, e assim também ocorreu para os demais materiais.

- A utilização do MO em amostras polidas mostrou-se satisfatória para se analisar a interface entre materiais de reparo e o concreto. As imagens obtidas no MEV vieram ratificar o que havia sido observado anteriormente no MO, uma vez que foram utilizados os mesmos aumentos, pois os aumentos maiores oferecidos pelo MEV não formavam imagens perceptíveis. Agindo assim, obtém-se um procedimento de pesquisa mais econômico, já que o procedimento para obtenção de imagens via MEV é altamente oneroso.

- A metodologia adotada, apesar dos infortúnios inerentes ao processo experimental, foi satisfatória para avaliação do mecanismo de aderência dos materiais elegidos como fonte de estudo do concreto. Portanto, pode-se dizer que o objetivo do presente trabalho foi alcançado.

6.1.2 Conclusões específicas

As conclusões específicas em relação à avaliação da qualidade da aderência e da interface, entre os materiais são as seguintes:

- O material de reparo TIPO 3 foi o que apresentou maior compacidade e melhor aspecto de extensão da aderência ao substrato. Sua eficiência, mediante análise das microimagens no Autocad, ficou em torno de 95%. Foi o único que, praticamente, não apresentou fissuras na interface. Alguns pequenos poros, tidos como irrelevantes, pois não comprometem quanto à resistência e à permeabilidade, foram encontrados em sua estrutura interna.

- O adesivo epóxi, material TIPO 4, utilizado como ponte de aderência, apresentou-se como material de baixa retração, contribuindo para a redução das aberturas de fissuras na interface. Apesar do aspecto bastante denso, alguns poros e vazios capilares, que podem comprometer quanto a estanqueidade e a resistência, foram localizados em alguns pontos isolados de sua estrutura. A eficiência do contato entre os dois materiais, substrato e reparo, verificada via Autocad é de, aproximadamente, 90%. Entretanto, a argamassa utilizada tem o tempo de endurecimento similar ao do concreto e atinge resistência adequada depois de 28 dias, constituindo-se em uma desvantagem em relação aos outros 3 tipos de reparo.

- Os materiais TIPO 1 e 2 são porosos e apresentaram extensão da aderência insatisfatória, caracterizada pela abertura de microfissuras nas interfaces. Apresentaram qualidade satisfatória em apenas 60 e 65% das amostras, respectivamente, mediante Autocad.. Formaram-se nessa abertura grandes cristais de hidróxido de cálcio perpendicular ao seu eixo longitudinal, originando assim planos preferenciais de ruptura. Ressalva-se que o material TIPO 2, segundo recomendação do fabricante, pode ser aplicado somente para pequenas espessuras.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para prosseguimento desta linha de pesquisa, visando a solucionar algumas questões observadas, uma vez que a gama de assuntos possíveis de serem abordados em continuidade é extensa, sugere-se o estudo de alguns pontos discriminados em seguida:

- Realizar um programa experimental similar ao atual, porém utilizando diferentes tipos de material de reparo de outros fabricantes, a fim de comparar sua junção ao substrato;
- alterar a metodologia de execução do reparo de forma que as amostras não necessitem de extração por fratura;
- avançar no programa experimental no afã de se obterem resultados quantitativos da aderência entre a argamassa de reparo e o substrato, via mecânica da fratura ou de arrancamento;
- avaliar o comportamento de concentração de fissuras, no processo de destacamento, na interface entre os materiais mediante análise numérica;
- realizar ensaios com reparos em substratos com maior idade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMMOUCHE, A. “A new image technique for quantitative assessment of microcracks in cement-based materials”. *Cement and Concrete Research*, Vol 30, 2000, p. 25-35.

ANDRADE, C. “*Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras*”. Tradução e adaptação de Antônio Carmona e Paulo Helene. 1.ed. São Paulo: Pini, 1992. 104p.

ARANHA, P.; DAL MOLIN, D.C.C. Estruturas de concreto na Amazônia. *Revista IBRACON*, São Paulo, n.12, 1996.

ASH, J. E.; HALL, M. G.; LANGFORD, J. I.; MELLAS, M. “Estimations of Degree of Hydration of Portland Cement Pastes”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, nº 2, p. 399-406, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “*Manutenção de edificações – Procedimento*” - NBR 5674. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS “*Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*”.- NBR 6118. Rio de Janeiro, 2003.

CÁNOVAS, M. F. “*Patologia e Terapia do Concreto Armado*”. São Paulo: Pini, 1988, 522p.

CARASEK, H. “*Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação*”. 1996. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

CARMONA, A.F. *"Metodologia para recuperação, proteção e determinação da vida útil residual de estruturas de concreto em meio fortemente agressivo"*. Tese (Doutorado) - Universidade Mackenzie. São Paulo. 1998. 199p.

CEMM – *"Centro de Microscopia e Microanálises"* – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul-Disponível em <[http://www.portal PUCRS-Centro de Microscopia e Microanálises.htm](http://www.portal.pucrs.br/centro-de-microscopia-e-microanalises.htm)> Acessado em 15 de Setembro de 2004.

CHAN, S.T.; AINSWORTH, P.R.; READ, A.S. *"A Classification and Quality System for Concrete Repair Mortars"*. American Concrete Institute International Conference - Concrete Structures, v.1, p.609-623, Hong Kong, 1991.

CHAVES, M. G.; DA SILVA, T. J. *"Estudo das técnicas de recuperação de Estruturas Danificadas por Corrosão das Armaduras"* Artigo Disponível em <<http://www.propp.ufu.br/revistaeletrônica/index.html>> 3 ed, 2004.

COUTINHO, A.S. *"Fabrico e Propriedades do Betão"* Vol 1 Lisboa, Setembro de 1973 611p.

CLÍMACO, J. C. T. S.; MARTINS, C.O.; GARCIA, S.R.A. *"Eficiência de Argamassas como Agentes Adesivos no Reparo de Estruturas de Concreto"*. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28, 1997, São Carlos, SP. Anais. São Carlos: Ed. Helena M. C. Carmo Antunes, 1997. v. 6. 2552p., p.2373-2389. ISSN 85-85205-10-5 (obra completa).

CLÍMACO, J.C.T.S.; NEPOMUCENO, A.A. *"Parâmetros para uma metodologia de manutenção de estruturas de concreto"*. In: REIBRAC-IBRACON – REPAROS ESTRUTURAIIS - CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 36, Porto Alegre, 1994. Anais.

COSENZA, C. H. *"Estudo Experimental da Resistência e da Deformação de Pilares de Concreto de Alta Resistência, na Flexão Normal Composta, Tendo Sido Recuperado com Concreto da Mesma Natureza"*. Dissertação (Mestrado). – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG, 1998, 241p.

DAL MOLIN, D.C.C. *"Fissuras em estruturas de concreto armado: Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul"*. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1988 220p.

DA SILVA, T. J. *"Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro"*. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Espana, 1998.

DECTER, M.H.; KEELEY, C. Durable concrete repair - importance of compatibility and low shrinkage. *"Construction and Building Materials"*, v.11, n.5-6, p.267-273, 1997.

DIAMOND, S.; HUANG. J. The ITZ in concrete – "A different view based on image analysis and SEM observations" – *Cement and Concrete Composites*, Vol 23, pp. 179-188, 2001.

DUARTE, E.L. *"Estudo de Fases Termotrópicas por Microscopia Ótica, Medidas de Densidade, Entálpicas e Espalhamento de Raios X"*. Dissertação (Mestrado) Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo 2000.88p.

DUARTE, E.L. *"Microscopia Ótica de Luz Polarizada"*. Disponível em <<http://www.páginaDoEvandroLuisDuarte.htm>> Acessado em 10 de Outubro de 2003.

ELSEN, J. "Determination of the w/c relation of hardened cement past and concrete samples on thin sections using automated image analysis techniques". *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, nº 4, pp. 827-834, 1995.

EMMONS, P. H. *"Concrete Repair and Maintenance"*. Kingston, R. S. Means Company, Inc. 1994. 295p.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M.; MCDONALD J. E. *"A Rational Approach to Durable Concrete Repairs"*. *Concrete International*, n.15, p.40-5, Sept.1993.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. “*System concept in desing and construction of durable concrete repairs*”. Construction and Building Materials, Great Britain, v.10, n.1, p. 69-75, 1996.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). “*Products and systems for protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity*”. pr EN 1504 – Partes 2 a 9. 1997.

EVANGELISTA, W. L. “*Estudo da Redistribuição de Tensões em Seções de Pilares Curtos de Concreto Armado com Recuperação Parcial*”. 125 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

FAN, S.; HANSON, J. M. “*Effect of Alkali Sílica Reaction Expansion And Cracking On Structural Behavior Concrete Beams*”. ACI Structural Journal, Farmington Hills, V. 95, n. 5, p. 498-505, Sep-Out. 1998.

FILHO, A. M. “*A natureza da Luz e o Princípio da Superposição*”. Artigo – Centro de Pesquisa da Universidade de São Judas São Paulo Disponível em <http://ecintificocultural.com>> Acessado em 03 de Junho de 2003.

FREITAS, F. A. E. – “*Microfissuração e evolução da hidratação de concretos de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio de análise de imagens*”. Dissertação Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, 2001.

GEHO-CEB (1993) – Grupo Español del Hormigón – Comité Euro-International du Béton. Grupo de trabalho N° 20 do CEB; “*Durabilidad de estructuras de hormigón – Guia de diseño CEB*”. Boletim N° 12, Espanha, 167p.

GANDUR, M. C.”*Comportamento Dinâmico Complexo em Despelamento de Fitas Adesivas*”. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2001. 101p.

GENTIL, V. “*Corrosão*”. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC editora,1996, 345p.

HASPARYK, N. P. "Investigação dos mecanismos da reação álcali – agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa". Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia 1999. 257p.

HELENE, P. R. L.; FIGUEIREDO, E. P. "*Introducción*". Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección. Ed. PINI. São Paulo, 2003.

HELENE, P.R.L. "*Vida útil de estruturas de concreto*". In: CONPAT – CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., v.1, p.1-30, Porto Alegre, 1997. Anais.

HELENE, P.R.L. "*Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*". Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1993. 231p.

HELENE, P.R.L. "*Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de Concreto*". São Paulo: Projeto de divulgação tecnológica - Fosroc/Pini, 1992. 213p.

HELENE, P. R. L. "*Corrosão em Armaduras para Concreto Armado*". São Paulo: Pini, 1986.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. "*Polymer dispersions and redispersible polymer powders for cement modifiers*" - JIS A 6203. Tóquio, 1995.

JOHN, V. M. "*Avaliação da durabilidade de materiais, componentes e edificações: emprego do índice de degradação*". Dissertação (Mestrado) -Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 1987. 117p.

JOISEL, A. "*Fisuras y grietas en morteros y hormigones*": sus causas y remedios. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1981. 174p.

KAY, T.; WYATT, B. European standards for protection and repair. Concrete. set.1997.

KROPP, J.; HILSDORF, H. K.; GRUBE, H; ANDRADE, C. Y.; NILSSON. "*Transports mechanisms and definitions*". RILEM – Tech Committee 116 – PCD – Performance Criteria for Concrete Durability. Rep.12, Ed. J. Kropp Y. K. Hilsdorf, E FNS.1995.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. "Concrete corrosion conference held". In: MIT TECH TALK, News Office at the Massachusetts Institute of Technology, v.42, n.2, Cambridge, 1997.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. "Estudo da carbonatação em concretos e Argamassas". Revista Engenharia Ciência & Tecnologia, Espírito Santo, v. 4, n. 5, p. 3-12, 2001.

MEDEIROS, M.H.F. "Estruturas de concreto com corrosão de armaduras: estudo comparativo da eficiência de proteção de sistemas de reparo localizados". Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo 2002.193p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. "Concreto: estrutura, propriedades e Materiais". São Paulo: Projeto de divulgação tecnológica -CIMINAS/HOLDERCHEM/PINI, 1994. 573p.

MONTEIRO, P. J. M.; PREZZI, M.; WANG, K.; GUIO, V. "Durability, Tomography and Repair of Reinforced Concrete". Department of Civil Engineering University of California. Berkeley, Califórnia, 1995, 274p.

MORENO Jr., R. "Estudo de fatores que afetam a aderência de argamassas de reparo para estruturas de concreto". Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002, 202p.

NEVILLE, A.M. "Propriedades do Concreto". São Paulo: Projeto de divulgação tecnológica – ABCP/PINI, 1997.

NINCE, A.A. "Levantamento de Dados sobre Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste". Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Distrito Federal. 1996 160p.

OLIVEIRA, A.; SOUZA, V. C. M. "Influência do Micro Clima do Rio de Janeiro no Desenvolvimento dos Processos Patológicos do Concreto Armado". Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Porto Rico, n.02, Vol 03, 2003.

PIANCASTELLI, E. M. *“Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado”*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. 160p. Notas de Aula.

POWERS, T. C. “Properties of Cement Past and Concrete”. Symposium held October 2-7, 1960, at the National Bureau of Standards Washington 25, D.C. Vol II

REIS, L. S. N. *“Sobre a Recuperação e Reforço das Estruturas de Concreto Armado”*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte-MG, 2001, 113p.

REPETTE, W. L. “Modelo de Previsão de Vida Útil de Revestimentos de Proteção da Superfície de Concreto em Meios de Elevada Agressividade”. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 1997, 220p.

RIBEIRO, S. GONÇALVEZ, A.; CATARINO, J. *“Reparação de Estruturas de Betão na Normalização Europeia”*. In: REPAR 2000 - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, 1, Lisboa, 2000. Anais.

RINGOT, E.; BASCOUL, A. – “About the analysis of microcracking in concrete” – Cement and Concrete Composites, Vol. 23, 2001, p. 261-266.

SATO, N.M.N. *“Análise da Porosidade e de Propriedades de Transporte de Massa em Concretos”*. 1998. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 163p.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. *“Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto”*. 1 ed. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

TINÔCO, H. F. da F. *“Avaliação do Desempenho de Sistemas de Reparo e Recuperação para Estruturas de Concreto com Corrosão das Armaduras”*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia-GO, 2001, 143p.

TUUTTI, K. “Corrosion of Steel in Concrete” Swedish Cement and Concrete Research Institute 17-64, 1982, Stockholm, nº 04, 469 p.

UNIVERSIDADE DO MINHO - Campus de Gualtar, Braga, Portugal – UMINHO - “*Técnicas de Caracterização de Materiais*” Disponível em < <http://www.uminho.pt/> >Acessado em 15 de Outubro de 2003.

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DORO–UTAD. “*Teoria da Difusão Atômica*” Disponível em <<http://www.alunos.utad.pt/~al12956/Index3.htm>>Acessado em 05 de Setembro de 2003.

VALDUGA, L. – “Agregados Reativos no Estado de São Paulo” – Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, Campinas 2002.

VANDERLEI, E. “*Reparo de Pilares de Concreto Armado com Remoldagem da Seção Transversal*”. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1996, 168p.

WU, K. R. “Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 2000, p. 981-987.

ANEXO A

A.1. INTRODUÇÃO À MICROSCOPIA

Não se sabe exatamente quem inventou o microscópio, porém sabe-se muito bem que após essa invenção, no início do século XVII, nossa percepção do mundo ficou muito diferente. Muitos atribuem a invenção deste instrumento a Galileu, porém foi Leeuwenhoek quem realmente aperfeiçoou o instrumento e o utilizou na observação de seres vivos. Dotados de apenas uma lente de vidro, os primeiros microscópios permitiam aumentos de até 300 vezes com razoável nitidez. E todo um mundo que se encontrava invisível aos nossos olhos se descortinou. Com este instrumento muito simples, Leeuwenhoek estudou os glóbulos vermelhos do sangue e constatou a existência dos espermatozóides. Este cientista também desvendou o extraordinário mundo dos micróbios (ou seja, seres microscópicos), hoje mais conhecidos como microrganismos.

A microscopia conheceu no século XX um desenvolvimento substancial; os limites teóricos atingidos ao fim do século XIX, para luz visível e lentes refratantes, foram superados no microscópio eletrônico de transmissão para atingir a visão dos átomos. O advento do microscópio eletrônico de varredura introduziu uma mudança conceitual em microscopia, que possivelmente caracterizará o seu desenvolvimento no século XX, e indicará o rumo da evolução futura. Os pontos básicos desta evolução são revistos, com ilustrações de seu desenvolvimento até os nossos dias (UMINHO, 2003).

A.2. HISTÓRICO

Já na antiguidade havia tentativas de reforçar a visão com auxílio de dispositivos óticos. Nas escavações de Nínive foram encontrados pedaços de vidro usados como lentes. Aristóteles já se referia ao termo lente e descrevia o uso de globos de vidro para aumentar

imagens. A partir do século XIV lentes começaram a ser usada comumente para corrigir defeitos de visão e como dispositivos de aumento.

Este uso atingiu seu apogeu com Leeuwenhoek, que provavelmente deve ser considerado o primeiro verdadeiro microscopista. Detentor de uma técnica extremamente desenvolvida, levou o uso do microscópio simples (uma lente ou lupa) ao seu nível mais alto. Seus microscópios eram individualmente feitos para cada amostra e alguns de seus "pequenos animais" eram examinados com aumentos de 300 vezes, façanha considerável mesmo em comparação com alguns instrumentos modernos.

Paralelamente ao desenvolvimento do telescópio no século XVII, surgiu o microscópio composto, constituído no mínimo de uma lente objetiva e de uma ocular. A invenção do microscópio composto é controvertida. A maioria dos historiadores situa sua origem na Holanda, por volta de 1600 e mencionam Jansen ou Lippershey como inventores. Convencionemos que a verdadeira história do microscópio começa em 1625, ano em Giovanni Faber cunhou o termo microscópio.

Os cem anos entre 1650 e 1750 podem ser considerados como época do desenvolvimento mecânico do microscópio. Em 1665 surgiu o célebre microscópio de Hooke. Este é talvez o protótipo do microscópio moderno, não só pela sua construção, mas por sua íntima ligação com a micrografia, sem dúvida a mais famosa publicação de microscopia de sua época. Os microscópios de Cuff apresentam um patamar no desenvolvimento do microscópio, que só foi sensivelmente ultrapassado após um século.

Acompanhando o desenvolvimento da mecânica fina em meados de século XVIII, Cuff passa do uso da madeira e couro para o metal, e reúne pela primeira vez em um instrumento focalização por parafuso, platina para amostras, espelho para luz transmitida e refletida, que permitem equivalência com a disposição moderna. E, inevitavelmente, o rococó do século XVIII não poderia ter deixado de influenciar o microscópio. O instrumento construído pelos Adams para o Rei George III, em prata e querubins, apesar de sua sofrível qualidade ótica, merece a atenção da crônica histórica.

A qualidade ótica dos microscópios não acompanhou o seu desenvolvimento mecânico. O elemento fundamental para a formação de uma imagem ampliada é a lente. Seu

entendimento básico é pela chamada ótica geométrica, onde consideramos a luz como constituída de raios, que obedecem às leis da reflexão e da refração. As lentes comuns, baseadas em elementos esféricos, são, no entanto, sujeitas a defeitos que independem da qualidade de sua fabricação, denominados aberrações, principalmente o cromatismo. entre Estas, as mais importantes são a aberração esférica e a aberração cromática.

A aberração esférica determina que raios axiais que atravessam a lente próximos de seu eixo ótico são focalizados em um ponto diferente daquele dos raios que passam pela periferia. Este defeito é inerente a uma lente esférica, e para uma lente isolada só pode ser minimizado através da diminuição de seu diâmetro, ou seja, utilizando apenas raios paraxiais. A aberração cromática refere-se ao comportamento com luz branca, que, como sabemos, é constituída da soma de todas as cores do espectro luminoso. A distância focal de uma lente depende da cor da luz; e, portanto, raios de cores diferentes serão focalizados em pontos diferentes.

O microscópio composto surge então com o objetivo de minimizar esta dificuldade. Pelo aumento sucessivo de duas lentes, obtemos o mesmo aumento atingido por uma só lupa. A qualidade da imagem fornecida pelo conjunto, por exemplo, de 5 X x 10 X será muito melhor do que a obtida por uma lente de 50 X. Estas aberrações podem ser largamente controladas caso utilizemos, em vez de lentes simples, combinações de lentes de diversos perfis e com vidros de diferentes índices de refração. Da mesma maneira que em fotografia, dispomos para microscopia de lentes com complexidade, preço e qualidades crescentes. Os mais importantes avanços foram obtidos no século XIX, com as lentes acromáticas e apocromáticas.

Nos cem anos entre 1800 e 1900 o microscópio finalmente conheceu a maturação ótica correspondente ao seu desenvolvimento mecânico. Em 1747, Euler desenvolveu a teoria da correção cromática. No final do século XVIII, surgiram as primeiras tentativas de lentes acromáticas, mas só em 1830 Amici e J.J.Lister avançaram substancialmente na sua realização.

A primeira pergunta que ouvimos do leigo ao ver um microscópio é: qual é o aumento? Na verdade, o aumento que tanto impressiona o usuário ocasional de microscopia não é o parâmetro mais importante a considerar. Coube a Abbe a contestação de que "aumentos

cada vez maiores só dependeriam da perfeição de fabricação de lentes". Os defeitos se agravam à medida que usamos uma lente mais "forte", ou seja, com maiores aumentos.

Durante o século XIX, procurou-se aumentar o poder de resolução das lentes e dos microscópios pela construção de lentes cada vez mais perfeitas, na suposição de que isto levaria a aumentos crescentes, e supostamente, ilimitados. Em 1880, Abbe demonstrou que havia uma limitação básica para a resolução de um sistema ótico, relacionada ao diâmetro da lente e ao comprimento de onda da luz, que na verdade a resolução de uma lente era limitada por difração, dependendo de sua abertura e do comprimento de onda da luz, segundo a equação A.2.1:

$$d = 0.61 \lambda / n \cdot \text{sen } a \quad \text{A.1}$$

onde:

- λ = é comprimento de onda da luz
- n = índice de refração do meio
- a = ângulo de abertura da lente

Os trabalhos de Abbe resultaram na concepção das lentes apocromáticas em 1887. Estas lentes oferecem padrões de qualidade até então inexistentes, principalmente depois que Abbe, seguindo a sugestão de J.W. Stephenson projetou a primeira lente de grande aumento de imersão a óleo, ou homogênea.

Parece-nos, à primeira vista, que se dispuséssemos de instrumentos perfeitos poderíamos examinar uma amostra com aumentos cada vez maiores, e perceber detalhes cada vez menores, até distinguir os átomos, ou, quem sabe, as partículas que os compõem. Não é isto o que ocorre: existe uma limitação física, relacionada com a radiação utilizada, para a menor distância entre dois pontos que permite distingui-los separadamente. A esta distância chama-se "limite de resolução", e um aumento maior não revelará nenhum detalhe adicional da estrutura.

Existe outro comportamento da luz que não pode ser interpretado pelas leis da ótica geométrica: é a difração, que exige que consideremos a luz como constituída de ondas transversais que se propagam no espaço.

Para que haja formação de uma imagem, precisamos também de "contraste". Denominamos de contraste a capacidade de distinguir traços característicos da estrutura sobre o plano de fundo. Citando Veríssimo, não podemos ver com clareza um "gato branco em campo de neve". Além da simples absorção ou reflexão de energia pela amostra, existem vários outros mecanismos de geração de contraste em microscopia.

É claro que tudo o que vimos até agora resulta da interação entre a luz, objetos e lentes, e, portanto, com a matéria. No entanto, costuma-se estudar esta interação de maneira mais geral, analisando o efeito de todo o espectro eletromagnético sobre a matéria; e por razões que se tornarão aparentes mais adiante, incluímos nesta análise o efeito de um feixe de elétrons.

A qualidade ótica final atingiu, assim, o seu mais alto grau no início do século XX. A excelente correção das lentes apocromáticas foi estendida por Boegehold a partir de 1938 às lentes planoapocromáticas, cujo grande campo de visão corrigida as tornam especialmente importantes para a microfotografia e metalografia. Mencionando ainda a introdução das camadas anti-refletoras, para controle da luz difusa, vemos que, em meados do século XX, o microscópio atingiu praticamente os aumentos máximos previstos pela teoria, não sendo esperados grandes desenvolvimentos nesta direção. Evoluções importantes ocorreram, no entanto, no projeto dos microscópios.

De um modo geral, uma excitação incidente desencadeará na matéria uma resposta, dita um sinal, que podemos adquirir por um sensor adequado. No caso especial de ocorrer a excitação por um feixe de elétrons acelerados, verifica-se a ocorrência de múltiplos sinais. Dois exemplos são bem conhecidos de todos: a imagem luminosa de um tubo de televisão, e a radiação emanante de um tubo de raios-X (UMINHO, 2003).

A.3. MICROSCOPIA ÓTICA

Segundo Filho (2003), o microscópio simples de Leeuwenhoek foi aprimorado por Hooke, ganhando mais uma lente. Deste modo, foram obtidos aumentos ainda maiores. Os microscópios óticos modernos são descendentes sofisticados do microscópio composto de Hooke e muito mais poderosos do que os pequenos instrumentos usados pelos cientistas no início do século XVII. Eles são dotados de dois sistemas de lentes de cristal (*oculares* e

objetivas) que produzem ampliações de imagem que vão em geral de 100 a 1000 vezes, deste modo revelando detalhes, até então invisíveis para nossa visão.

No microscópio ótico, a luz que chega aos nossos olhos para formar a imagem atravessa primeiro o objeto em estudo. Por isto, o material a ser observado não pode ser opaco. No caso do concreto, tido como material inerte, a amostra é geralmente submetida a um ataque químico, permitindo assim uma maior visualização de sua morfologia e características (Figura A.1).

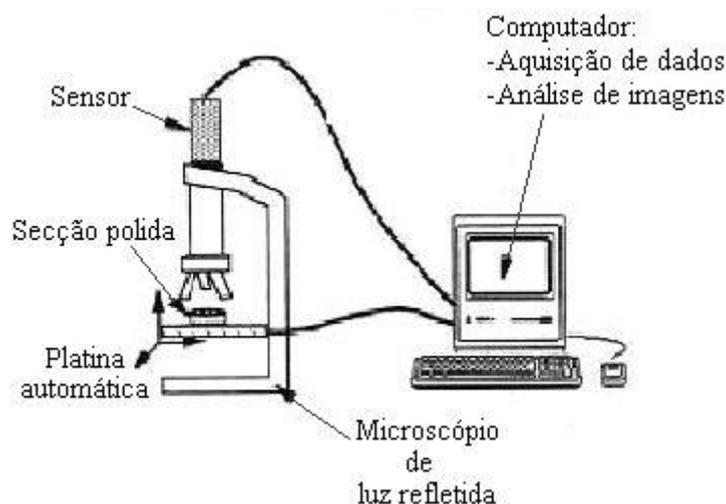


Figura A.1 – Sistema de aquisição de imagens por microscopia ótica.

Fonte: CEMM – PUCRS.

O uso de microscópios óticos de luz polarizada é corriqueiro nos estudos da estrutura de cristais. Este equipamento é dotado de alguns acessórios especiais entre os quais se destacam um par de polarizadores com ângulo relativo ajustável entre os eixos óticos. O primeiro deles, próximo à fonte de luz é dito polarizador, filtrando a luz e permitindo que sobre a amostra incida luz polarizada. Após passar por esta, e eventualmente pela amostra (que se encontra sobre uma platina giratória), a luz atravessa o segundo polarizador, dito analisador, alcançando, finalmente, a ocular.

Em sua passagem pela amostra, a luz pode vir a sofrer modificação de seu plano de polarização em virtude da anisotropia ótica do material, revelando uma série de imagens que na área de cristais líquidos são conhecidas como texturas.

A microscopia de luz polarizada é um método bastante usado para a identificação das diferentes mesofases líquido-cristalinas e também das temperaturas de transição de fase em cristais líquidos através da variação destas texturas (DUARTE, 2000).

A.3.1 Natureza da luz

Se a menor fração do que chamamos luz fosse um corpúsculo rígido e indivisível, jamais poderíamos explicar determinados fenômenos ópticos observados pela primeira vez por Newton como, por exemplo, a interferência. Se por outro lado a luz fosse um fenômeno ondulatório, representado pela propagação de vibrações de corpúsculos materiais situados num meio hipotético chamado éter, a difração e a interferência seriam explicadas. É verdade que nem tudo era explicado pela teoria ondulatória; mas alguns "acertos" aqui, algumas abstrações ali, algumas equações acolá, e pronto: a teoria estava perfeita.

Quando ninguém mais se propunha a ignorar o éter, Michelson e Morley, numa experiência muito bem conduzida, constatam o inesperado: a propagação da luz através do éter não era tão simples quanto fora supostamente aceita. Ou talvez fosse mais simples do que o esperado, mas ninguém ousou "regredir" à teoria corpuscular de Newton; aliás, não havia como explicar determinados fenômenos ópticos através desta teoria; a menos que tais corpúsculos não fossem tão rígidos ou tão indivisíveis, mas parece que ninguém se aventurou a adentrar por este terreno. Todas as teorias surgidas para explicar a aberração encontrada apoiaram-se fortemente na teoria ondulatória da luz. E novamente a teoria, ainda que modificada, estava perfeita. A luz não mais era a propagação da vibração de corpúsculos etéreos; o éter não mais existia, pois não mais era necessário. Luz não era matéria e sim energia em propagação; era um tipo de energia que não necessitava de um meio material: a energia eletromagnética (FILHO, 2003).

A.3.1.1 A luz corpuscular

Até o início do século XIX, a grande maioria dos físicos aceitou uma natureza corpuscular para a luz, e a teoria mais em voga era a de Newton. Luz corpuscular é quase sinônimo de luz material e esbarra na aceitação ou não da idéia de que os corpos materiais macroscópicos e a luz seriam conversíveis entre si através de emissão e absorção de luz por eles. Numa primeira aproximação poderíamos pensar num corpúsculo esférico a se

propagar pelo espaço numa direção definida (Figura A.2). O formato esférico não é em si obrigatório, mas facilita a esquematização.



Figura A.2 – Primeira idéia de um corpúsculo de luz propagando-se pelo espaço.

Fonte: Filho (2003).

É fundamental, para o estudo da luz corpuscular, a caracterização de uma ação e reação a distância entre os corpos materiais macroscópicos e os corpúsculos de luz. Assim é que Newton refere-se com muita frequência a uma inflexão dos raios de luz, termo esse que foi relegado a um segundo plano pela óptica ondulatória. Graças a essa ação à distância, mediada por *alguma coisa de natureza imaterial*, os corpúsculos, em sua interação com outros corpos materiais, iriam gradativamente modificando a direção de propagação, ou seja, essas variações de direção seriam gradativas, e não bruscas, a retratarem uma ação contínua entre o objeto que as provoca e o raio de luz a sofrer a inflexão considerada (Figura A.2).

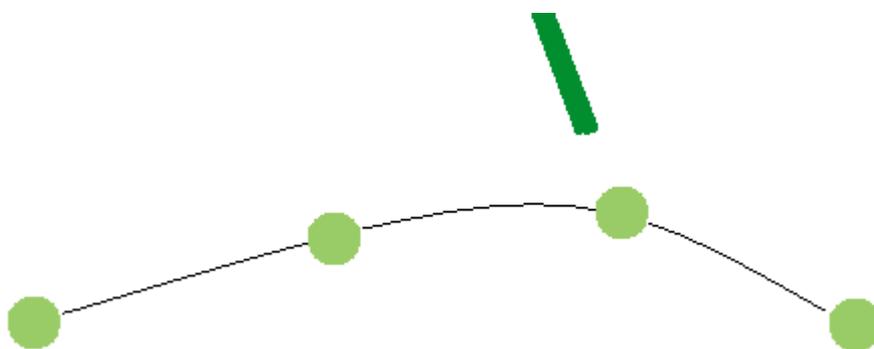


Figura A.3 – Inflexão de um raio de luz elementar dirigindo-se da esquerda para a direita.

Fonte: Filho (2003).

Essa *alguma coisa de natureza imaterial* não chega a ser muito bem definida por Newton. Em alguns trechos de sua obra ele chega a caracterizá-la como uma possível *vibração emitida pelos corpos materiais* e a se propagar por um *éter*. Seria como se alguma coisa de natureza ondulatória respondesse pela inflexão de uma luz corpuscular. Em outros trechos ele chega a negar esse *éter* de tipo huygheniano, deixando-nos a impressão de que essa *alguma coisa* seria aquilo que em alguns de seus textos é caracterizado como o *espírito da*

matéria, algo de natureza imaterial, mas a se propagar pelo espaço de maneira idêntica à matéria. Ou seja, não seria um éter no sentido clássico, como o termo é comumente empregado, mas seria como que um éter emitido pela matéria, e não em repouso em seu espaço absoluto.

Nesse caso aquela idéia de "vibração" se desfaz. Essa *alguma coisa imaterial* ou esse *espírito da matéria*, ou, ainda, esse éter fluido emitido pela matéria, assemelha-se muito à idéia que Newton fazia a respeito da gênese da gravitação e das demais interações entre os corpos materiais, a se resumirem nas três leis de seu modelo mecânico macroscópico. É por isso que costumo dizer que a óptica e a mecânica de Newton fazem parte de uma teoria única e indissociável. Nos dias atuais, a negação de uma implica quase que necessariamente a negação da outra, assim como a negação da teoria corpuscular da luz no século XIX implicou, por motivos vários, a negação de quase toda a física newtoniana no século XX.

Todo raio de luz tem, portanto, dois lados opostos, originalmente dotados de uma propriedade da qual a refração incomum depende, e os outros dois lados opostos não dotados daquela propriedade.

Com essas palavras, Newton conclui sua interpretação sobre a dupla refração observada pela primeira vez por Erasmus Bartholine no cristal da Islândia, fenômeno conhecido hoje como polarização por dupla refração ou birrefringência.

Como poderíamos interpretar esses lados dos raios de luz? A Figura A.4 retrata uma modificação ligeira efetuada na Figura A.2, e, como veremos, a imagem assim obtida cai como uma luva na interpretação dada por Newton ao que hoje chamamos polarização da luz. Sob essa visão, o corpúsculo de luz gira sobre si mesmo e propaga-se segundo uma perpendicular ao eixo do giro (FILHO, 2003).



Figura A.4 – Corpúsculo de luz girando sobre si mesmo e propagando-se segundo uma perpendicular ao eixo do giro.

Fonte: Filho (2003).

Na Figura A.5 (a) vemos um corpúsculo de luz propagando-se no plano da tela semelhante àquele mostrado na A Figura A.4, e outro propagando-se num plano perpendicular ao plano da Figura A.5 (b), como se estivesse fugindo do observador (mostrando, pois, o seu dorso). Nota-se na figura que os quatro lados referidos por Newton, e opostos dois a dois, seriam, respectivamente: esquerdo, direito, em cima e embaixo (Figura A.5 b). Os lados esquerdo e direito mostrariam como propriedade comum o aspecto de um giro equatorial, e os lados em cima e embaixo teriam em comum o aspecto de giro polar.

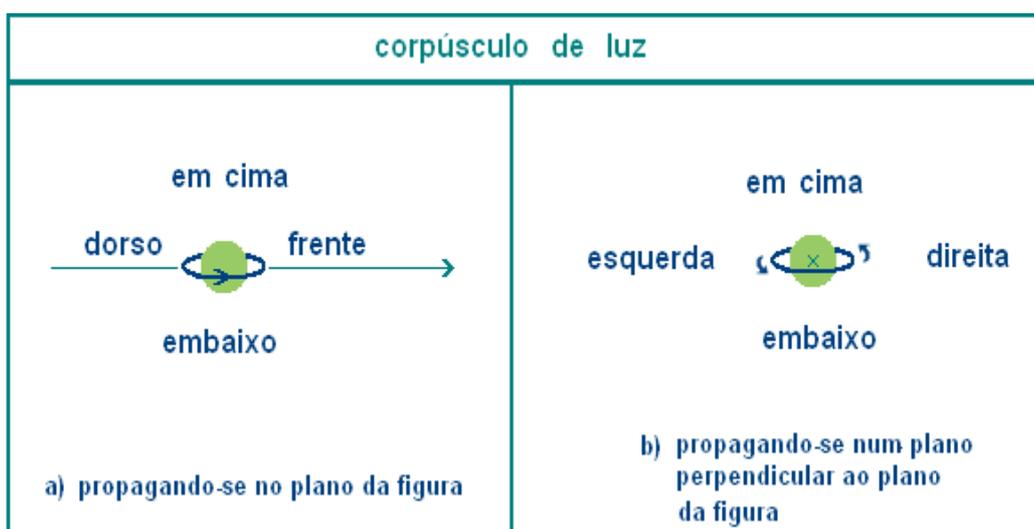


Figura A.5 – Os lados do corpúsculo e do raio de luz.

Fonte: Filho (2003).

A.3.1.2 A Luz ondulatória

A idéia de luz ondulatória tem muito a ver com a noção intuitiva de onda mecânica e, em especial, com a propagação de vibrações em meios fluidos como o ar ou a água. Christian Huyghens (1629-1695), ao conceber a luz ondulatória, não se fez de rogado e, ao dar conta da propagação da luz no vácuo, assumiu a existência de um éter a permear o universo.

É importante perceber que a idéia de luz ondulatória surgiu num contexto bem diferente do atual. Com efeito, e a despeito dos trabalhos de Boyle de 1658 e Bernouilli de 1738, a noção de matéria constituída por partículas elementares a se instalarem no vazio (ou no vácuo de Torricelli, 1644), somente começou a ser levada a sério a partir dos trabalhos de Clausius em 1857, Maxwell em 1875 e Boltzmann em 1860, *a fornecerem as bases para as teorias atômicas da física atual.* (FILHO, 2003).

Até a segunda metade do século XIX, os meios assumidos como sede dos fenômenos ondulatórios, quais sejam, o ar a propagar o som e a água a transportar momento (ou movimento), eram, via de regra, assumidos como fluidos contínuos. Até mesmo a analogia macroscópica, devida a Huyghens (Figura A.6), conquanto corpuscular em essência, assume uma continuidade absoluta e inerente a esse meio de propagação de impulso (esferas enfileiradas e em contato íntimo).

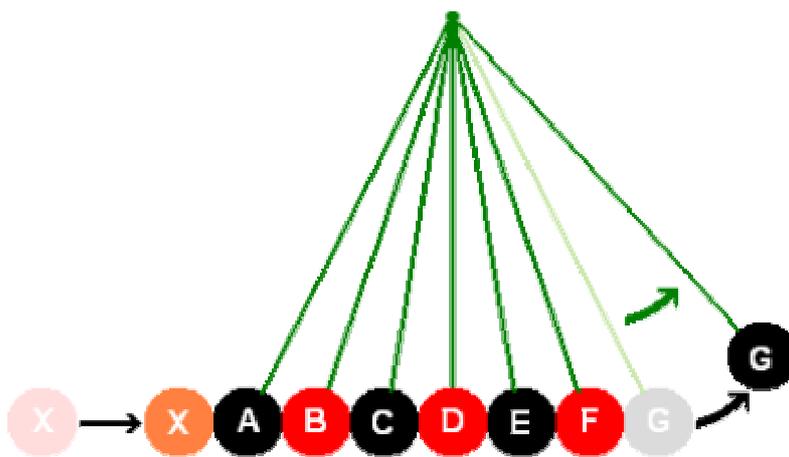


Figura A.6 – A transmissão de uma perturbação através de um meio intermediário.

Fonte: Adaptado de ilustração do *Traité d'Optique* de Huyghens Apud Filho. (2003)

Hoje sabemos que as moléculas não dão trombadas, na acepção macroscópica do termo. Os choques entre partículas elementares, átomos e moléculas, dão-se a distância, por menor que seja essa distância. Até mesmo os fenômenos ondulatórios bem conhecidos exigem que *alguma coisa* passe de um corpúsculo para outro a distância. E o que seria essa *alguma coisa* senão o *espírito da matéria* invocado por Newton.

Ou seja, a onda mecânica clássica (por exemplo, a onda sonora ou a onda aquática) existe se, mas somente se, as partículas que vibram emitirem *alguma coisa* capaz de sensibilizar as partículas vizinhas, bem como sofrerem uma retroação. Logo, a dualidade é inerente às ondas mecânicas clássicas, havendo, pois, um fenômeno ondulatório, observável macroscopicamente, acoplado a uma emissão de uma entidade pertencente ao microcosmo, provavelmente imaterial em essência e do mesmo tipo daquela que responde pela gênese dos campos gravitacional, elétrico e magnético. Mas e no caso da luz?

Uma das experiências marcantes a dar o veredicto do século XIX à luz ondulatória foi aquela realizada por Foucault em 1850, ao constatar que, em meios opticamente densos, a luz propaga-se em velocidades menores que no vácuo. Os físicos dessa época aceitavam a lógica de Descartes de 1637, segundo a qual a curvatura da trajetória de um corpúsculo de luz ao passar do ar para o vidro seria devida a uma força perpendicular à superfície CE, conforme a Figura A.7 e Figura A.8, e dirigida para o segundo meio (vidro no caso) (FILHO, 2003).

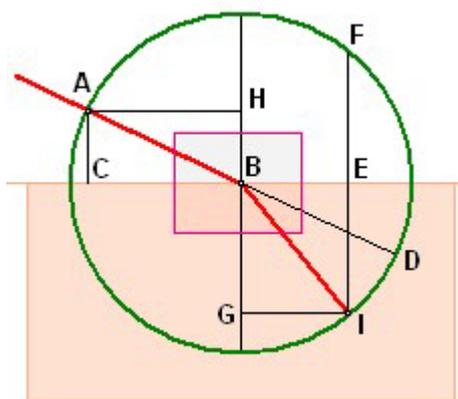


Figura A.7 – A refração corpuscular de Descartes.

Fonte: Filho (2003).

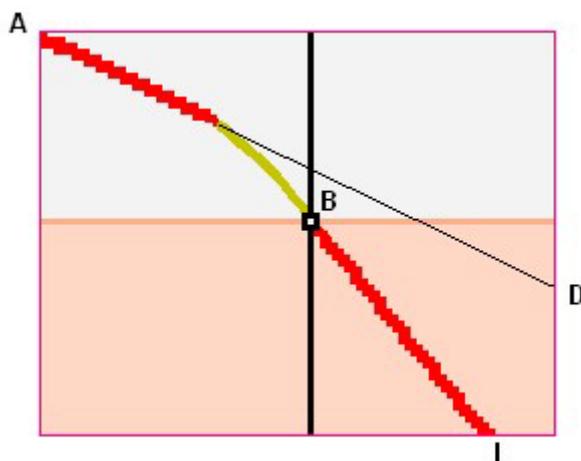


Figura A.8 – A refração corpuscular de Newton.

Fonte: Filho (2003).

Esta mudança de direção (de AB para BI na Figura A.7 e Figura A.8) não deveria ser instantânea ou brusca e ocorrer exatamente no ponto B. Provavelmente seria gradativa, como descrito por Newton. A Figura A.8, ampliação idealizada (mas não em escala) do pequeno retângulo central da Figura A.7, exprime essa idéia. Essa figura estaria em acordo

com um ganho em velocidade dos corpúsculos, pois a curvatura dar-se-ia, sem dúvida, através de uma força de atração exercida pelo vidro. Mas a experiência de Foucault demonstrou exatamente o contrário: a menor velocidade da luz no segundo meio em relação à velocidade da luz no primeiro meio. Seria a luz realmente ondulatória? E, neste caso, a mudança de direção seria brusca, como proposto pela teoria ondulatória? Haveria, nas vizinhanças do ponto B (Figura A.8), uma inflexão brusca, ou melhor, uma quebra da "frente de onda", como mostrado na Figura A.9 e como defendem os adeptos da teoria ondulatória? (FILHO, 2003).

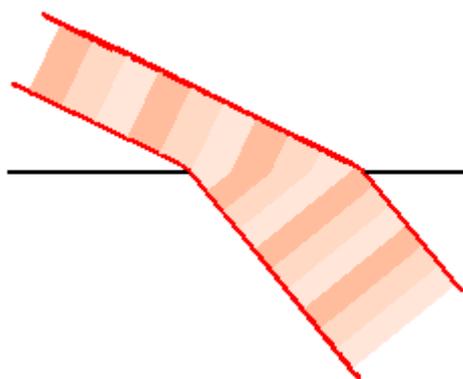


Figura A.9 – Refração ondulatória.

Fonte: Filho (2003).

Sabe-se hoje que essa história está mal contada. Entre um átomo e outro, de um meio opticamente denso, a luz propaga-se na mesma *velocidade v com que entrou nesse meio*, nem mais, nem menos. Acontece que durante a passagem pelo meio opticamente denso, a luz vai sendo alternadamente absorvida e reemitida, tendo-se como resultado final uma redução da velocidade medida v_m da luz.

Esta seria, portanto, uma velocidade média v_m a contrastar com a velocidade real v . Existiriam então quatro velocidades em jogo: a) duas relacionadas a cada um dos meios 1 e 2, as velocidades médias v_{1m} e v_{2m} , correspondendo às velocidades medidas e a levarem em conta o tempo em que a luz permanece absorvida pelas partículas do meio; e b) duas velocidades reais, v_1 e v_2 , a corresponderem às velocidades com que a luz percorre o trajeto entre uma partícula e a seguinte da trajetória do raio de luz. Se o primeiro meio for o vácuo, teremos $v_{1m} = v_1 = c$. Do contrário, e *sob um ponto de vista estritamente clássico*, deveríamos ter sempre $v_{1m} \neq v_1 \neq c$.

Suponhamos então que o meio 1 seja o vácuo. Neste caso, é interessante observar que as velocidades real e média (ou velocidade medida) do meio 2 relacionam-se entre si através do quadrado do índice de refração do meio 2 (Obtém-se a terceira equação mostrada na tabela abaixo multiplicando-se as duas primeiras membro a membro).

Tabela A.1 - Relação entre velocidades.

“Esperança de Descartes”	Lei de Snell – Descartes (após Foucault – 1850)	Relação entre Velocidade Real e Velocidade Média
$\frac{v_2}{c} = n$	$\frac{c}{v_{m2}} = n$	$\frac{v_2}{v_{m2}} = n^2$

Fonte: Filho (2003).

A.3.2 POLARIZAÇÃO DA LUZ

A polarização representa sempre um tema de importância crucial para todos aqueles que sonham decifrar segredos relacionados à natureza da luz. Para Newton, a polarização foi um dado importante a convencê-lo de que luz seria um fenômeno corpuscular. Para Fresnel, a polarização constituiu-se num impecilho, a complicar terrivelmente suas tentativas em caracterizar a luz como um fenômeno exclusivamente mecânico-ondulatório. Para Faraday, o relacionamento entre a polarização da luz e o campo magnético representou um trunfo, a demonstrar-nos ter sido tanto mais importante quanto mais nos lembrarmos de que foi esse o fenômeno a convencer Maxwell de que a luz era um fenômeno ondulatório eletromagnético. Hoje a polarização da luz constitui-se no mais importante alicerce a sustentar *o mais fundamental dentre todos os princípios da mecânica quântica*: o princípio da superposição de estados. (DUARTE, 2003).

A luz pode ser representada como uma onda composta de campos elétrico e magnético oscilantes e mutuamente perpendiculares entre si. A Figura A.10 mostra o vetor campo elétrico E no plano xy, o vetor campo magnético B no plano xz e a propagação da onda na direção x.

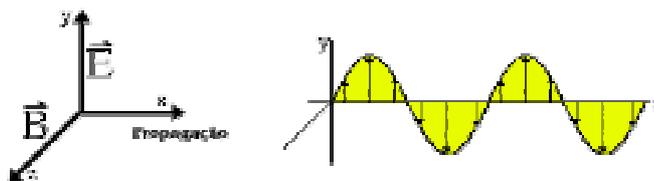


Figura A.10 – Composição vetorial da luz.

Fonte: Duarte (2000).

A Figura A.11 mostra a propagação de E. Somente E é considerado, pois o vetor B é essencialmente o mesmo, sendo perpendicular a E. O campo E variando senoidalmente pode ser comparado com o movimento de uma corda segurada por duas crianças em lados opostos. As crianças deslocam as extremidades da corda de tal forma que a onda se move em um plano, para cima e para baixo ou para a esquerda e para a direita, ou qualquer ângulo intermediário.

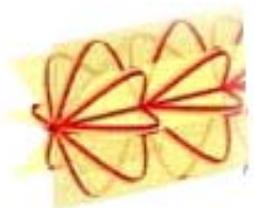


Figura A.11 – Propagação da luz.

Fonte: Duarte (2000).

A luz natural (luz do Sol, por exemplo) é feita de ondas que oscilam em todos os ângulos possíveis no plano perpendicular ao movimento. A luz é considerada como sendo linearmente polarizada quando esta contém ondas que oscilam em um único plano específico. Voltando ao exemplo da corda oscilando é como se a onda fosse obrigada a oscilar para cima e para baixo, e o movimento nas outras direções é barrado.

Um polarizador de luz é um material que permite a passagem de luz somente em um ângulo de vibração específico. A direção de oscilação de E que passa através do polarizador é chamado de eixo óptico. Se dois polarizadores são colocados em série, tal que seus eixos ópticos são paralelos, a luz passa através de ambos como mostra a figura abaixo. Entretanto, se os eixos estiverem perpendiculares, a luz polarizada que sai do primeiro polarizador é extinta pela segunda, como mostra a Figura A.12.



Figura A.12 – Polarização da luz.

Fonte: Duarte (2000).

Quando o ângulo muda continuamente de 0° a 90° , a quantidade de luz que é transmitida decresce. Em geral, na microscopia óptica de luz polarizada os polarizadores são cruzados, e entre eles é colocado um material anisotrópico que tem a propriedade (como um polarizador) de girar o plano de polarização da luz (DUARTE, 2003).

A.4. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Durante a década de 30, ocorreram dois eventos que teriam profunda influência sobre o desenvolvimento da microscopia no século XX: o advento da televisão e do radar. Em ambos os casos, o conceito básico é o da varredura, e a conseqüente modificação da relação entre o objeto e sua imagem, de uma função geométrica para a de uma função temporal. (UMINHO, 2003).

Os pioneiros conceituais da microscopia eletrônica de varredura foram Ardenne, na Alemanha em 1938 e Zworykin nos EUA em 1943. A realização prática de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) só veio muitos anos depois, através do trabalho do grupo de Oatley em Cambridge em 1964.

O microscópio de força atômica, MET, é um microscópio que "varre" a superfície da amostra utilizando um micro-sensor que permite uma observação com grande ampliação em forma tridimensional. Possibilita a obtenção de dois tipos principais de informações: morfológicas, e, no caso de amostras cristalinas, cristalográficas. Sua operação é baseada em leis elementares da Física e conta com a moderna tecnologia de semicondutores.

Para a realização de uma microscopia de varredura, podemos utilizar, em tese, qualquer interação entre um estímulo e a matéria, que resulte em uma resposta que podemos captar por um sensor. Exemplifiquemos pela descrição do MEV: Um feixe de elétrons com cerca de 20 keV, gerado em um canhão similar ao do MET, é convergido por um conjunto de

lentes eletromagnéticas que agem como condensadores. Este feixe é focalizado sobre a amostra, e, mediante bobinas defletoras, percorre uma varredura sobre pequena região sua.

Como consequência, uma série de sinais é emitida, das quais destacamos inicialmente elétrons secundários com cerca de 50 eV. Estes elétrons são captados por um detector cuja resposta modula o brilho de um tubo de raios catódicos, e que é varrido em sincronismo com o feixe eletrônico. Portanto, a cada ponto da amostra corresponde um ponto da tela, e nele é mapeada a resposta do objeto ao feixe de excitação. O aumento é obtido pela relação entre a área varrida sobre a amostra e a área da tela do tubo.

A resolução depende do sinal utilizado. De todos, os mais comuns são os elétrons secundários, que oferecem melhor resolução espacial, e também melhor visão da topografia da amostra. Os elétrons retrorefletidos, de energia praticamente igual à do feixe incidente, oferecem alguma informação sobre o número atômico do elemento considerado.

A possibilidade de utilização é muito maior do que a simples aquisição e exibição destes sinais. As grandes oportunidades introduzidas pela microscopia de varredura (em todas as suas formas) são a disponibilidade de um sinal e de uma imagem eletrônica, nas quais podem ser aplicados todos os recursos modernamente disponíveis para processamento de sinais e de imagens. Assim, destacamos os principais, como amplificação diferencial e alteração da intensidade de fundo; possibilidade de melhorar a relação sinal/ruído, sabidamente de fundamental importância na qualidade de imagens, através da amostragem múltipla e aumento do tempo de aquisição (UMINHO, 2003).

O primeiro MEV utilizado para observações de amostras espessas foi descrito em 1942, com resolução da ordem de 1 μm , resolução pior que a utilizada por microscopia ótica. O microscópio ótico consta de duas lentes convergentes, onde a primeira está próxima ao objeto, denominada lente objetiva (grande distância focal), e a segunda lente é uma lupa denominada ocular (pequena distância focal).

Os microscópios óticos ficam, então, limitados a um aumento máximo de 2.000x, pois acima deste valor os detalhes menores que o comprimento de onda da luz empregada (4.000 - 7.000 Å) são imperceptíveis. Deste modo, para aumentar a resolução, a fim de se

obter a imagem desejada, seria necessário trabalhar com comprimento de onda menor, o que acontece com o microscópio eletrônico (UMINHO, 2003).

A.4.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS DO MEV

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento sofisticado, que possui grande profundidade de foco, capaz de produzir imagens com alta resolução. Elétrons são emitidos, como fonte de energia, por um filamento de tungstênio através de uma determinada corrente. Devido a uma diferença de potencial, esses elétrons são acelerados produzindo um feixe que percorre uma coluna contendo lentes eletromagnéticas capazes de colimar o feixe. Bobinas impõem a varredura sobre a superfície da amostra. A incidência do feixe de elétrons sobre a amostra dá origem a diversos sinais, destacando-se os elétrons secundários (SE), os elétrons retroespalhados (BSE) e os Raios – X (HASPARYK, 1999).

Segundo o CEMM (2004), o MEV consiste basicamente em:

- a) Coluna ótica;
- b) Câmara de amostra;
- c) Sistema à vácuo (bomba difusora e mecânica);
- d) Controle eletrônico;
- e) Sistema de imagem.

Na Figura A.13, podemos verificar os componentes básicos de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

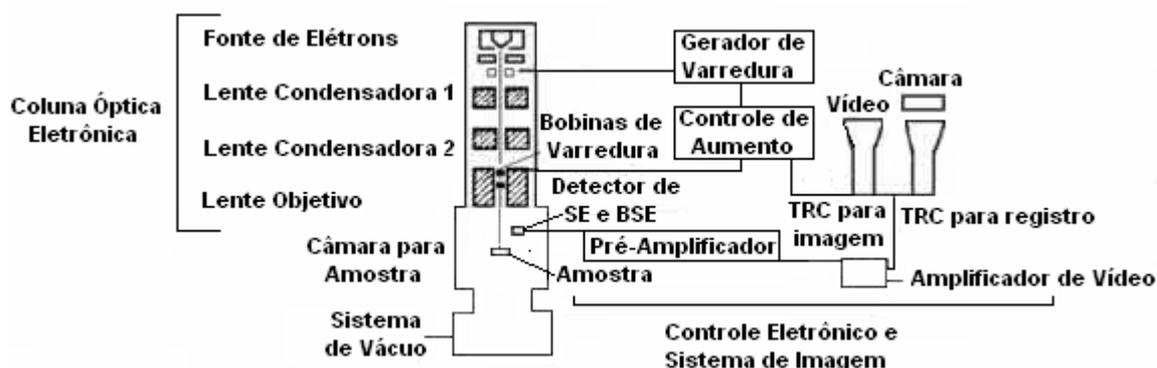


Figura A.13 – Componentes básicos de um MEV.

Fonte: CEMM - PUCRS.

A.4.1.1 Fonte de elétrons

É necessário um filamento que sirva como fonte de iluminação do MEV, geralmente de tungstênio (W); o qual, quando aquecido, emite feixe de elétrons, que opera em uma faixa de tensões de aceleração de 0,5 a 30kV. O feixe de elétrons passa através de um orifício e, depois, através de duas lentes eletromagnéticas, que vão focar o feixe na amostra. O filamento é mantido à alta tensão de aceleração em relação ao ânodo localizado abaixo da fonte de emissão.

A qualidade do vácuo é necessária para que este feixe passe livremente pela coluna do MEV, impedindo, desta forma, que os elétrons se choquem com as moléculas de gás. A pressão na câmara é de aproximadamente $1,33 \times 10^{-4}$ Pa ou menor, e, na pré-câmara, em torno de $1,33 \times 10^{-1}$ Pa. (CEMM, 2003). O canhão é composto por 3 diferentes componentes básicos:

- 1) Filamento de W;
- 2) Cilindro de Wehnelt (cátodo);
- 3) Ânodo

Estes 3 elementos, como pode ser visto na Figura A.14, são mantidos em diferentes potenciais elétricos.

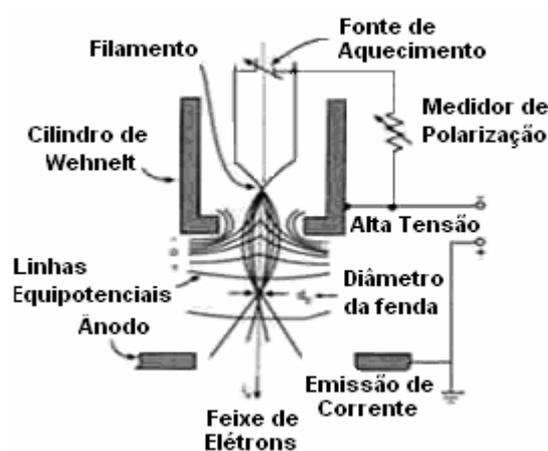


Figura A.14 – Esquema de um canhão de elétrons tradicional

Fonte: CEMM - PUCRS.

A.4.1.2 Coluna ótica eletrônica

O objetivo das lentes eletromagnéticas no MEV é o de formar o menor diâmetro de feixe. Normalmente, o sistema de lentes é composto de duas lentes condensadoras e uma objetiva, onde geralmente a lente condensadora apresenta distância focal automática, e a lente objetiva é ajustável para focalizar o feixe sobre a superfície da amostra.

Dentro da lente objetiva existem dois pares de bobinas varredoras, com a função de varrer o feixe sobre uma área na superfície da amostra, utilizando-se de um sistema de deflexão duplo, produzido pelo campo magnético dos pares da bobina. (CEMM, 2003).

A distância de trabalho (DT), ou work distance (WD), é a distância da superfície da amostra à parte inferior da lente, quando esta distância varia, a corrente da objetiva deve ser ajustada para continuar a focalizar o feixe sobre a superfície da amostra. Isto pode ser verificado na Figura A.15.

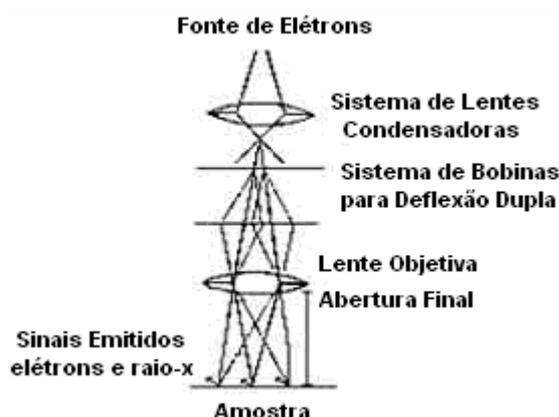


Figura A.15 – Sistema óptico eletrônico do MEV.

Fonte: CEMM - PUCRS.

A.4.1.3 Sistema imagem

Um feixe de elétrons de alta energia é focalizado em um ponto da amostra, causando emissão de elétrons com grande espalhamento de energia. Estes elétrons, por sua vez, são coletados por um detector e amplificados para fornecer um sinal elétrico, este sinal é usado para modular a intensidade do feixe de elétrons.

A Figura A.16 esquematiza uma varredura linear sobre uma superfície irregular, com as possíveis trajetórias dos elétrons utilizados para formar a imagem e a relação de aumento.

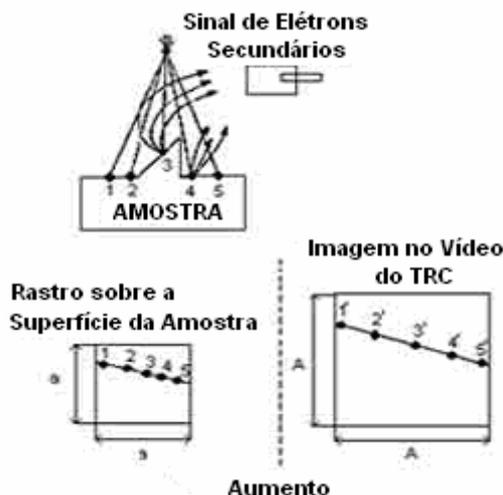


Figura A.16 - Formação da imagem através da detecção de elétrons secundários e relação de aumento no MEV.

Fonte: CEMM – PUCRS.

A.4.1.4 Detector

A formação da imagem em um MEV utiliza um detector adequado para converter a radiação de interesse em um sinal elétrico, o qual deve passar para a cadeia de ampliação, indo então prover a modulação da intensidade nos anteparos de visualização e registro. Neste terminal são registradas diferentes informações para cada tipo de imagem eletrônica, podendo o MEV apresentar tantos detectores quantos forem necessários adicionar, podemos citar alguns: (CEMM, 2003).

a) Detector de elétrons secundários: os elétrons secundários são atraídos para o detector devido à voltagem positiva da grade localizada na frente do detector de 200V. Dentro do detector, os elétrons são acelerados com energia de até 10kV para uma guia de luz de quartzo coberto com material cintilador. Esta aceleração resulta na produção de um fóton que percorre a guia de luz até um fotomultiplicador que produzirá uma corrente de elétrons. Os elétrons secundários são detectados por um cintilador que transforma a energia dos elétrons em fótons, estes, por sua vez, são conduzidos até um fotomultiplicador, sendo este pulso amplificado gerando um ponto na tela. Vide Figura A.17.

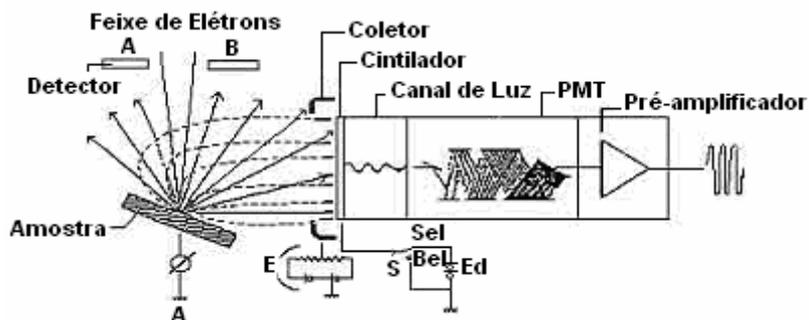


Figura A.17 - Detector de elétrons secundários.

Fonte: CEMM – PUCRS.

b) Detector de elétrons retroespalhados: Estes detectores são superiores aos de elétrons secundários para exibir contrastes, além de serem menos sensíveis a efeitos de carga. A imagem de elétrons retroespalhados contém dois tipos de informações: uma sobre a composição da amostra (COMPO), e a outra sobre a topografia da amostra (TOPO). Para separar esses dois tipos de informação, o detector de elétrons retroespalhados é provido de um par de semicondutores dispostos simetricamente com o eixo ótico, conforme Figura A.18.

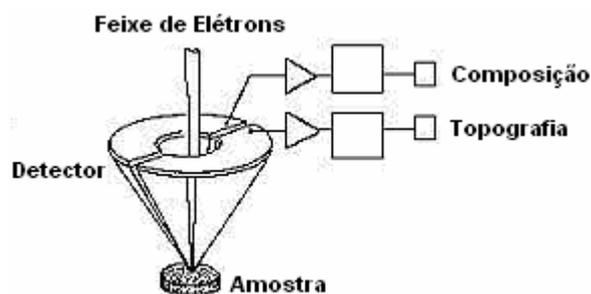


Figura A.18 - Detector de elétrons espalhados.

Fonte: CEMM – PUCRS.

ANEXO B

B.1. TEORIA DA DIFUSÃO

A teoria da difusão é responsável não só pelo entendimento do processo de adesão, que ocorre na interface entre a argamassa de reparo e a superfície de concreto, mas também pelo processo de carbonatação do concreto, que consiste na reação do dióxido de carbono (CO_2) presente no ambiente com os componentes alcalinos da pasta de cimento hidratada, na presença de umidade, formando, basicamente, carbonatos e água. (UTAD, 2003)

B.1.1 DIFUSÃO ATÔMICA

A difusão atômica consiste em um misturar progressivo de átomos de natureza diferente, provenientes de diferentes materiais postos em contato um com o outro, no caso, o reparo e o concreto. Esta mistura efetua-se por deslocamento aleatório dos átomos pelos defeitos cristalinos. Em particular, a difusão atômica no seio de um material sólido pode ser produzida da seguinte forma:

(1) por salto de átomos ou íons de lacuna em lacuna, (Figura B.1 a). É freqüente para os átomos espessos e ânions;

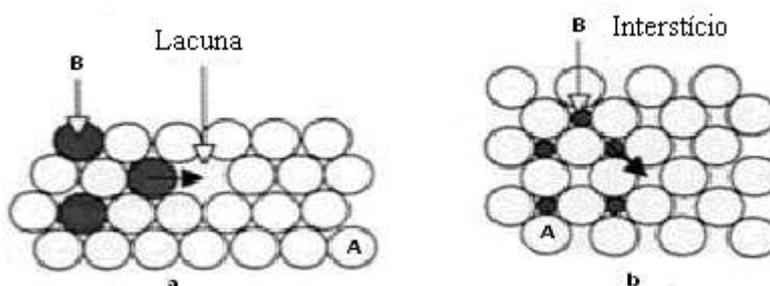


Figura B.1 – Difusão atômica; a) lacunas; b) interstícios.

Fonte: UTAD (2003).

- (2) por salto de átomos ou íons de interstício em interstício Figura B.1 (b);
 (3) através de deslocamento ao longo de articulações de grão;
 (4) através de deslocamento ao longo de superfícies livre do material.

O deslocamento de um átomo de um local para outro requer energia para separar os dois mais próximos vizinhos e pular para dentro do local interstício seguinte, como também é ilustrado à figura B.1 (b) para interstícios. Esta energia é chamada energia de ativação de ΔG^* . Quando não há gradiente de energia livre da solução sobre o sítio 2, tem-se a frequência de salto de um átomo da solução de um local em outro local :

$$\Gamma = \nu_0 \exp - \frac{\Delta G^*}{\kappa T} \quad \text{B.1}$$

onde:

ν_0 = é a frequência de vibração natural de um átomo em qualquer local

κ = constante de Boltzmann ($k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K).

ΔG^* = energia de ativação medida para meia distância entre as posições 1 e 2

T = unidade de tempo

Quando um gradiente de energia livre existe sobre o sítio 3, a frequência de salto de um átomo da posição 1 para a posição 2 é:

$$\Gamma_{1 \rightarrow 2} = \nu_0 \exp - \frac{\Delta G_{1 \rightarrow 2}}{\kappa T} \quad \text{B.2}$$

onde:

$\Delta G_{1 \rightarrow 2}$ = energia liberada para o salto de um átomo da posição 1 para 2

$$\Delta G_{1 \rightarrow 2} = \Delta G^* - \frac{\delta g}{2} \quad \text{B.3}$$

onde:

δg = diferença em energia livre de um átomo entre posições 1 e 2, devido ao gradiente de energia livre:

Então:

$$\Gamma_{1 \rightarrow 2} = \nu_0 \exp - \frac{\Delta G^* - \frac{\delta g}{2}}{\kappa T} \quad \text{B.4}$$

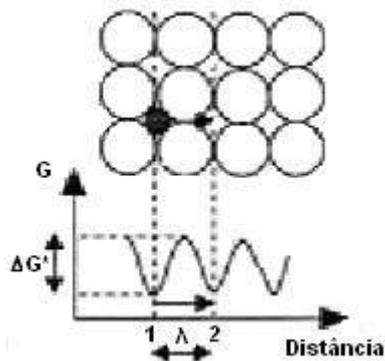


Figura B.2 – Energia de ativação.

Fonte: UTAD (2003)

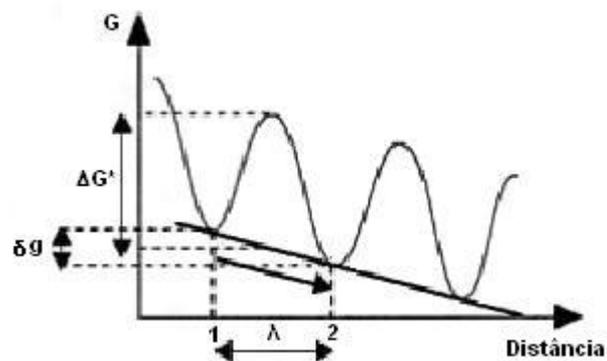


Figura B.3 – Difusão atômica num gradiente de energia livre.

Fonte: UTAD (2003)

De maneira análoga, a frequência de salto de um átomo da posição 2 para a posição 1 é dada por:

$$\Gamma_{2 \rightarrow 1} = \nu_0 \exp - \frac{\Delta G^* + \frac{\delta g}{2}}{\kappa T} \quad \text{B.5}$$

O equilíbrio dos saltos eficientes da posição 1 à 2 é definido como:

$$\Gamma_{eq} = \Gamma_{1 \rightarrow 2} - \Gamma_{2 \rightarrow 1} = \nu_0 \exp - \frac{\Delta G^*}{\kappa T} \left(\exp \frac{\delta g}{2\kappa T} + \exp - \frac{\delta g}{2\kappa T} \right) \quad \text{B.6}$$

Então:

$$\exp \frac{\delta g}{2\kappa T} + \exp - \frac{\delta g}{2\kappa T} \approx 1 + \frac{\delta g}{2\kappa T} - \left(1 - \frac{\delta g}{2\kappa T} \right) = \frac{\delta g}{\kappa T} \quad \text{B.7}$$

Logo:

$$\Gamma_{eq} = \nu_0 \frac{\delta g}{\kappa T} \exp - \frac{\Delta G^*}{\kappa T} \quad \text{B.8}$$

Na difusão propriamente dita, a diferença de energia atômica livre δg deduz-se da diferença de potencial químico molar $\delta \mu$ da solução, na solução forte por onde distribui:

$$\delta g = \frac{\delta \mu}{N_A} \quad \text{B.9}$$

Onde N_A é o número de Avogadro. A diferença do potencial químico molar pode ser agora calculada através do gradiente de potencial e o λ distância entre planos atômicos.

$$\delta \mu = - \frac{\partial \mu}{\partial x} dx = - \frac{\partial \mu}{\partial x} \lambda \quad \text{B.10}$$

O sinal negativo é devido ao fato de δg e $\delta \mu$ serem usados a partir dos números positivos nas equações prévias, considerando que o gradiente do potencial químico molar do soluto é negativo. Finalmente:

$$\Gamma = - \frac{\lambda \nu_0}{N_A \kappa T} \frac{\partial \mu}{\partial x} \exp - \frac{\Delta G^*}{\kappa T} \quad \text{B.11}$$

Para uma solução denominada regular, a relação entre o potencial químico molar e a concentração de molar da solução [S] é:

$$\mu = \mu_0 + N_A \kappa T \ln [S] \quad \text{B.12}$$

Na qual μ_0 é o potencial químico molar do solvente puro. Então:

$$\frac{\partial \mu}{\partial x} = \frac{N_A \kappa T}{[S]} \frac{\partial [S]}{\partial x} \quad \text{B.13}$$

O número de moles da solução por unidade de superfície de um plano atômico é o número de átomos contido num volume ($\lambda x 1 \text{m}^2$), qualquer $\lambda[S]$. O fluxo total de moles da solução, em (moles/m² seg) é:

$$\Phi_{eq} = \lambda[S] \Gamma_{eq} = -\lambda^2 v_0 \left(\exp - \frac{\Delta G^*}{\kappa T} \right) \frac{\partial [S]}{\partial x} \quad \text{B.14}$$

O que equivale a:

$$\Phi_{eq} = -D \frac{\partial [S]}{\partial x} \quad \text{B.15}$$

Na qual D define o coeficiente de difusão:

$$D = \lambda^2 v_0 \left(\exp - \frac{\Delta G}{\kappa T} \right) \quad \text{B.16}$$

B.1.2 LEIS DE FICK

A primeira Lei de Fick expressa o fluxo de difusão (“velocidade” de difusão) em função da diferença de concentração.

Para uma melhor compreensão, suponhamos, por exemplo, que uma quantidade de Boro é depositada numa tira de silício (figura B.4). Pouco a pouco, os átomos de boro misturam-se com os de silício para obtermos um perfil de concentração que ficaria constante depois de um tempo infinito (figura B.4 c). Para um determinado momento t pouco depois do começo da difusão, o perfil de concentração dos átomos de boro podem ser observados na figura B.4 b. Para toda a abscissa x, conta-se o lugar onde foi introduzido inicialmente o boro. Então, pode-se definir o gradiente de concentração do boro:

$$\frac{\partial [B]}{\partial x}$$

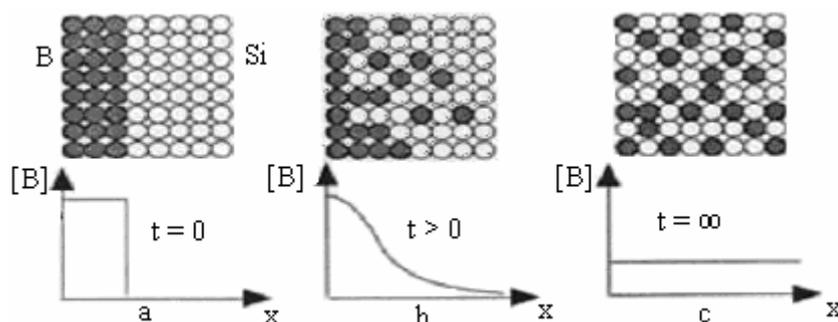


Figura B.4 – Evolução do perfil de concentração dos átomos de boro no silício, em função do tempo: (a) tempo $t = 0$; (b) tempo t qualquer; tempo $t = \infty$.

Fonte: UTAD (2003).

Do fluxo Φ de átomos de boro segundo a equação B.15, define-se a *Primeira Lei de Fick*.

$$\Phi = -D \frac{\partial[B]}{\partial x} \quad \text{B.17}$$

onde:

D = coeficiente de difusão [cm^2/s] (“velocidade de difusão”)

$\frac{\partial[B]}{\partial x}$ = gradiente de concentração em função da distância [átomos/ m^3]

Obs: Note que esta relação é independente do tempo!

O sinal (–) provém de que um gradiente de concentração negativo corresponde a um fluxo positivo (O fluxo de difusão ocorre da concentração mais alta para a concentração mais baixa).

A Segunda Lei de Fick exprime simplesmente que há conservação de massa. Em condições de estado não-estacionário, o fluxo de difusão e o gradiente de concentração variam com o tempo.

A equação da conservação da massa expressa um cálculo para a adição e remoção da massa de uma região definida de fluido. Considere um volume de fluido fixo, não deformável, \forall , chamado de volume controle (vc), que possui um contorno de superfície definido, chamado de superfície controle (sc). A conservação da massa exige que a taxa temporal de variação de massa dentro do volume controle seja igual à taxa na qual a massa adentra no volume controle mais a taxa na qual a massa é obtida ou perdida dentro do volume controle em virtude das fontes e consumo. Uma expressão matemática dessa lei está descrita abaixo. Dentro do volume controle existe a distribuição de algumas espécies

definidas pelo campo de concentração, $C(x, y, z)$. A massa total dentro do volume controle é:

$$M = \int_{cv} C dV \quad B.18$$

M pode mudar durante o tempo em virtude de fontes e consumo localizados dentro do volume, ou em virtude de fluxos de massa através dos contornos do volume controle. Em um sistema de fluido existem duas formas de fluxo de massa: advecção e difusão.

O fluxo líquido da massa para fora do volume controle em virtude da advecção é descrito pela integral

$$\int_{cv} \mathbf{C} \cdot \mathbf{n} dA \quad B.19$$

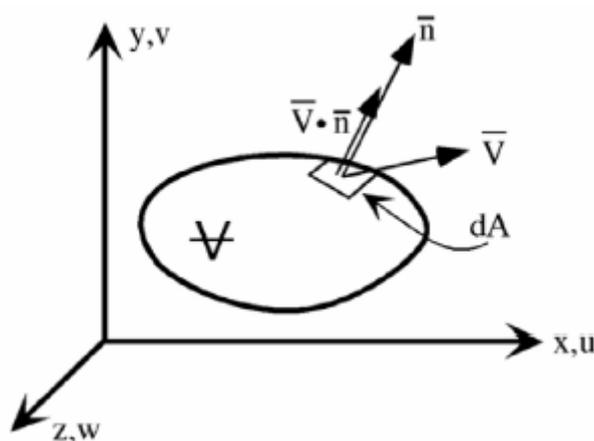


Figura B.5 – Representação gráfica da equação B.19.

Fonte: UTAD (2003)

Aqui, $\mathbf{V} = (u,x,w)$ é o vetor de velocidade e \vec{n} não é a normal de direção externa para o segmento de superfície dA . $\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$ representa o componente de velocidade perpendicular ao segmento de área dA . A definição de \vec{n} como a normal de direção externa torna (2) o fluxo líquido para fora de ∇ . Isso é, o fluxo para fora de ∇ (mesma direção de \vec{n}) contribui de forma positiva para a integral, e o fluxo para ∇ (em oposição a \vec{n}) contribui de forma negativa. O fluxo líquido do volume controle em virtude da difusão é definido através da Lei de Fick.

$$-\int_{cs} D_n (\partial C / \partial n) dA \quad \text{B.20}$$

onde:

D_n = coeficientes de difusão ao longo do eixo \vec{n} permitem a anisotropia em D

Observe que os gradientes de concentração são definidos ao longo do eixo \vec{n} , em todos os locais perpendiculares à superfície e posição em direção externa aos coeficientes de difusão. No caso de difusão molecular e/ou turbulência isotrópica, D não é uma função de direção e o subscrito pode ser cancelado. A expressão matemática final para a conservação da massa combina B.18, B.19 e B.20.

Conservação da Massa em Forma Integral (Volume Controle):

$$(\partial / \partial t) \int_{cv} C dV = -\int_{cs} CV \cdot n dA + \int_{cs} D_n (\partial C / \partial n) dA \pm S \quad \text{B.21}$$

onde:

$$\begin{aligned} (\partial / \partial t) \int_{cv} C dV &= \text{taxa de tempo de variação de massa dentro do vc} \\ -\int_{cs} CV \cdot n dA &= \text{fluxo advectivo para dentro de um volume de controle} \\ \int_{cs} D_n (\partial C / \partial n) dA &= \text{fluxo difuso para dentro de um volume de controle} \\ \pm S &= \text{fonte consumidora} \end{aligned}$$

Tomemos como exemplo o crescimento do número de átomos de boro entre as abscissas x e $x+dx$. Mede-se esse crescimento de duas formas, figura B.6.

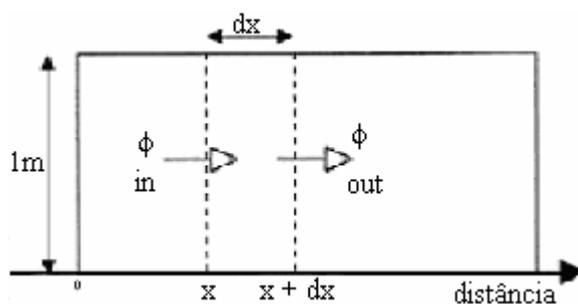


Figura B.6 – Representação Segunda Lei de Fick.

Fonte: UTAD (2003)

crescimento de átomos $B = \frac{\partial [B]}{\partial x} dx$

$$B = \Phi_{in} - \Phi_{out} = \Phi_{in} - \left(\Phi_{in} + \frac{\partial \Phi_{in}}{\partial x} dx \right) = -\frac{\partial \Phi_{in}}{\partial x} dx \quad \text{B.22}$$

onde:

Φ_{in} e Φ_{out} = fluxo de átomos que entram em x e saem em $x + dx$

Se D (difusividade) for independente de “ x ”, ficamos com a seguinte igualdade:

$$\frac{\partial [B]}{\partial t} = D \frac{\partial^2 [B]}{\partial x^2} \quad \text{B.23}$$

Condições de Contorno:

A equação diferencial de segunda ordem só pode ser resolvida se forem fornecidas as condições de contorno:

- * Antes da difusão, todos os átomos do soluto em difusão estão uniformemente distribuídos, mantendo uma concentração “ C_0 ”;
- * O valor de “ x ” na superfície é zero e aumenta à medida que se avança em profundidade no sólido;
- * O coeficiente de difusão permanece constante (não muda com a concentração);
- * $t = 0$ imediatamente antes do início da difusão.

Para uma concentração dada em átomos de boro em superfície, então $[B]_s$ é uma concentração inicial $[B]_0 = 0$, a solução para as duas leis de Fick é:

$$[B]_{x,t} = [B]_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad \text{B.24}$$

$$\text{Onde } \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = \frac{2^{x/2}}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{Dt}} e^{-\lambda^2} d\lambda$$

A função erf é denominada função erro de Gauss, ela é tal que:

$$\operatorname{erf}(\infty) = 1, \operatorname{erf}(-x) = -\operatorname{erf}(x), \text{ e } \operatorname{erf}(0) = 0$$