



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental
-MESTRADO-

**PATOLOGIA PREMATURA DE BLOCOS DE FUNDAÇÃO DE
EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM
AMBIENTE URBANO**

por

Ivana Raquel Lima Arnaud

*Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau
de Mestre*

João Pessoa - Paraíba

Março – 2010

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental
-MESTRADO-**

**PATOLOGIA PREMATURA DE BLOCOS DE FUNDAÇÃO DE
EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM
AMBIENTE URBANO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre.

Ivana Raquel Lima Arnaud

ORIENTADOR: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

João Pessoa - Paraíba

Março – 2010

A744p Arnaud, Ivana Raquel Lima.

Patologia prematura de blocos de fundação de edificação residencial de múltiplos pavimentos em ambiente urbano / Ivana Raquel Lima Arnaud. -- João Pessoa: [s.n.], 2010.

88 f. : il.

Orientador: Normando Perazzo Barbosa.

Co-orientador: Sandro Marden Torres.

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT.

1. Engenharia Urbana. 2. Concreto Armado. 3. Microestruturas. 4. Reação Álcali-agregado.

UFPB/BC

CDU: 62:711043)

**PATOLOGIA PREMATURA DE BLOCOS DE FUNDAÇÃO DE
EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM
AMBIENTE URBANO**

Por

IVANA RAQUEL LIMA ARNAUD

Dissertação aprovada em _____ de 2010
Período Letivo: 2009.2

BANCA EXAMINADORA:

Professor Dr. Normando Perazzo Barbosa - UFPB
Orientador

Professor Dr. Sandro Marden Torres - UFPB
Co-orientador

Professor Dr. Givanildo Alves de Azeredo - UFPB
Examinador Interno

Professor Dr. Ulisses Targino Bezerra - IFPB
Examinador Externo

**João Pessoa – PB
2010**

Ao meu marido Reinaldo Junior, pelo seu imenso amor, compreensão e confiança, e, por me proporcionar a oportunidade de realizar esta conquista em minha vida, através da sua generosidade e incentivo.

A minha família, em especial à minha Mãe Noemi e à minha avó Olimpia (in memoriam), pela infinita dedicação e paciência, e, por me ensinarem, com muito amor, valorizar a educação e lutar sempre pelos meus ideais.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por me abastecer de ânimo, paciência e sabedoria para atingir este objetivo.

Ao Professor Dr. **Normando Perazzo Barbosa** pelo extremo incentivo, confiança e amizade, além dos valiosos ensinamentos transmitidos durante a orientação deste trabalho.

Ao Professor Dr. **Sandro Marden Torres**, pela colaboração e paciência em repassar seus conhecimentos em química, como co-orientador deste trabalho.

Ao Professor Dr. **Gibson Rocha Meira**, por disponibilizar, no **IFPB**, o uso de equipamentos necessários à realização desta pesquisa.

A todos os funcionários e demais professores que fazem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental.

Aos profissionais do LABEME (Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas), onde foi realizado grande parte desta pesquisa, nas pessoas de **Delby, Cláudio, Sebastião, Ricardo, Carlos e Zito**, os quais contribuíram significativamente para a realização prática deste trabalho.

A **Elizabeth (Beth)**, sempre colaborando na limpeza do Labeme.

Aos colegas do mestrado e doutorado, em especial **Sandra, Soênia, Andressa, Marília, Kelly, Elisângela, Philippe e Sóstenes** pelo incentivo e auxílio durante o curso.

Aos colegas de trabalho **Dr. Rogaciano Souto e Ricardo Moisés** pelos conselhos, incentivo e apoio durante o curso.

À minha sogra **Socorro**, minha cunhada **Rachel** e meu cunhado **Ítalo** pelo inestimável apoio e incentivo que sempre deram.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização e conclusão deste trabalho.

RESUMO

O crescimento dos casos de patologias precoces em estruturas de concreto armado, inseridas no ambiente urbano, tem gerado grande interesse porque estão reduzindo a vida útil das estruturas, causando muitos transtornos e prejuízos financeiros para os seus usuários e construtores. As patologias do concreto armado podem ter diversas origens e o seu diagnóstico ser bastante complexo, inclusive podendo ocorrer simultaneamente, dificultando a aplicação da terapia adequada a cada caso. Neste trabalho apresenta-se um estudo de caso em que patologias estão se manifestando em blocos de fundação de um prédio, malgrado tenham sido obedecidos os critérios da ABNT- NBR 6118/2004, quanto à questão da durabilidade. Os blocos apresentam fissuração generalizada, cujo aspecto é semelhante ao do fenômeno da reação álcali-agregado. Este fenômeno é considerado um mecanismo de deterioração cuja causa é originada por ações químicas. Face ao exposto, objetivo deste trabalho é verificar se estava ocorrendo ou não a reação álcali-agregado no concreto dos blocos de fundação de um edifício residencial em construção na cidade de João Pessoa, apresentando, analisando, e discutindo o problema patológico neles ocorrido. Para isto, foram realizadas análises microestruturais do concreto, através da utilização de algumas técnicas analíticas de caracterização dos materiais, como análise mineralógica por difração de raios x (DRX), análise microscópica por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise térmica por termogravimetria. Apesar da semelhança com a RAA, os resultados da análise microestrutural do concreto estudados, indicou que não houve a presença da reação álcali-agregado, nem de formação de etringita retardada, pois não houve formação de material de diferente composição (contraste de cinza) dentro de nenhuma fissura, nem no contorno dos agregados, típica de reação química. Os resultados sugerem que as fissuras nestes blocos não aparentam terem sido geradas por mecanismos expansivos de origem química. Isto porque não foi detectada a presença de nenhum mineral responsável por patologias expansivas tais como gel de álcali-sílica, etringita, nem gypsum (sulfato de cálcio). As fissuras se propagam através da matriz de cimento e contornam o agregado, são possivelmente induzidas por tensões de origem térmica.

Palavras-chave: concreto armado, microestrutura, durabilidade, reação álcali-agregado.

ABSTRACT

The amount of pathologies in young reinforced concrete structures inserted in the urban surroundings have been of some relevance because they are reducing the structures' life, causing great troubles and financial losses for users and builders. Concrete pathologies may have different origins and its diagnosis may be quite complex, with the possibility of a simultaneous occurrence, leading difficult the adequate therapy in each case. This research presents a study of a case in which the pathologies have appeared in a building's foundation blocks, despite the criteria of ABNT- NBR 6118/2004 being followed in relation to durability. The blocks have shown generalized cracking whose aspect is similar to the alkali-aggregate reaction (RAA) phenomenon. This phenomenon is considered to be a deterioration mechanism caused by chemical actions. Taking this into consideration, the main goal of the present research is to verify if the alkali-aggregate reaction was occurring in the concrete foundation blocks of an building in the city of João Pessoa, presenting, analyzing and discussing the pathological problem. For this, concrete micro-structural tests were carried out through the use of some material characterization analytical techniques such as mineralogical analysis by x-ray diffractions (DRX), microscopic analysis by optical microscopy and by sweeping electronic microscopy (MEV) and thermal analysis by thermogravimetry. Despite the similarity with the RAA, the results of the micro-structural analysis indicated that there was not the presence of the alkali-aggregate reaction nor the one of delayed ettringite as there was no formation of material of a different composition (contrast of gray) inside any cracks nor in the contour of the aggregate, which is typical of a chemical reaction. The outcomes suggest that the cracks in these blocks do not seem to have been generated by expansive mechanisms of a chemical origin. This is due to the fact that no mineral responsible for expansive pathologies such as alkali-silica, ettringite or gypsum has been found (Calcium Sulfate). The cracks that propagate through the cement matrix and contour the aggregate are possibly induced by tensions of a thermal origin.

Key-words: reinforced concrete, micro-structure, durability, alkali-aggregate reaction.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1 APRESENTAÇÃO.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 CONCRETO.....	19
2.1.1 CONTEXTO URBANO.....	19
2.1.2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL	20
2.1.3 REDUÇÃO DA DURABILIDADE DE ESTRUTURAS EM CONCRETO	21
2.2 MICROESTRUTURA DO CONCRETO.....	22
2.3 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO.....	25
2.4 CAUSAS DE DETERIORAÇÃO MECÂNICAS E FÍSICAS	26
2.5 CAUSAS DE DETERIORAÇÃO QUÍMICA.....	27
2.5.1 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA).....	28
2.5.2 FORMAÇÃO DE ETRINGITA RETARDADA (FER)	31
2.6 COMO DETECTAR PROBLEMAS DE DURABILIDADE	33
2.7 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	33

2.7.1	ANÁLISE MINERALÓGICA	34
2.7.1.1	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	34
2.7.2	ANÁLISE MICROSCÓPICA	35
2.7.2.1	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	35
2.7.2.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	36
2.7.3	ANÁLISE TÉRMICA	37
2.7.3.1	TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)	38
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA		39
3.1	METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO DAS PATOLOGIAS	39
3.1.1	ETAPA 1: INSPEÇÃO E COLETA DE AMOSTRAS DO CONCRETO.....	39
3.1.2	ETAPA 2: COLETA DE DADOS DO CONCRETO E DE SEUS MATERIAIS CONSTITUINTES	45
3.1.3	ETAPA 3: ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS AMOSTRAS DO CONCRETO	46
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		47
4.1	ESTUDO DE CASO – FISSURAÇÃO EXCESSIVA DO CONCRETO DE BLOCOS DE COROAMENTO DE FUNDAÇÃO DE EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS	47
4.1.1	APRESENTAÇÃO	47
4.1.2	INSPEÇÃO DOS BLOCOS	48
4.1.3	DADOS COLETADOS DO CONCRETO E DE SEUS MATERIAIS CONSTITUINTES	61
4.1.3.1	CONCRETO DA ÉPOCA (2005).....	61
4.1.3.2	CONCRETO EM 2008.....	62
4.1.3.3	CIMENTO	62

4.1.3.4	ÁGUA	64
4.1.3.5	AGREGADOS	65
4.1.4	ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS AMOSTRAS DO CONCRETO	65
4.1.4.1	ANÁLISE MINERALÓGICA	65
4.1.4.2	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓPTICA	66
4.1.4.3	ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	68
4.1.4.4	ANÁLISE TERMOGRAVIMETRICA (TG)	78
4.1.4.5	ANÁLISE PETROGRÁFICA DO CONCRETO E DO AGREGADO	79
4.1.5	DISCUSSÃO SOBRE POSSÍVEL ORIGEM DA FISSURAÇÃO	81
4.1.5.1	DOSAGEM DO CONCRETO E EXECUÇÃO DA ESTRUTURA	81
4.1.5.2	RETRAÇÃO TÉRMICA OU POR SECAGEM DO CONCRETO	82
4.1.5.3	REAÇÕES QUÍMICAS EXPANSIVAS DE FONTES INTERNAS	83
4.1.5.4	REAÇÕES EXPANSIVAS ORIUNDAS DE FONTES EXTERNAS	83
4.1.5.5	DETALHAMENTO ESTRUTURAL	84
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO		85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais maciços de hidróxido de cálcio e de cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado. Fonte: ABCP	23
Figura 2.2 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais aciculares de etringita e de cristais hexagonais de monossulfato. Fonte: Mehta e Monteiro, 2008	24
Figura 2.3 – Causas físicas de deterioração do concreto. Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.	27
Figura 2.4 – Causas químicas de deterioração do concreto. Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.....	28
Figura 2.5 – (a) Topo de pilar de vertedouro de barragem, (b) bloco de fundação de edifício de 23 pavimentos, (c) Gel formado em volta do agregado; disponível em http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/imprime59011.asp , acessado em 05/03/2010.	29
Figura 2.6 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura, do gel formado pela reação álcali-agregado no interior do concreto e da formação de etringita dentro das fissuras internas ao concreto.	29
Figura 2.7 – Imagem de uma amostra de concreto polida, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostrando a etringita preenchendo a fissura em volta do grão de agregado. Fonte: M. Thomas et al. / Cement and Concrete Research 38 (2008) 841–847	32
Figura 2.8 – Imagem de uma amostra de concreto polida, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostrando fissuras em torno e através da partícula de agregado preenchidas parcialmente pelo gel álcali-sílica e outras preenchidas por etringita. Fonte: M. Thomas et al. / Cement and Concrete Research 38 (2008) 841–847	33
Figura 2.9 – Difratorômetro de raios X	34
Figura 2.10 - difração de Raios-X do resíduo cerâmico moído: (Q) Quartzo; (C) Calcita; (E) Hematita; (K) Caulinita; (F) Feldspato; (A) Albita; (M) Microline. (VIEIRA, 2005).....	35
Figura 2.11 – (a) Microscópio Óptico (b) Micrografia obtida através do Microscópio Óptico.	36
Figura 2.12 – (a) Microscópio Eletrônico de varredura (MEV); (b) Imagem obtida no MEV	37
Figura 2.13 – Curva termogravimétrica de duas amostra de concreto. Fonte: disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132002000300004	38
Figura 3.1 – Perfuratriz extraindo um testemunho	39
Figura 3.2 – Furação do Testemunho no Bloco 7.....	40
Figura 3.3 – Testemunho fraturado do Bloco 7 protegido por filme PVC	41
Figura 3.4 – Testemunho do bloco 1 protegido por filme PVC	41
Figura 3.5 – Serra usada para o corte dos Testemunhos.....	42
Figura 3.6 – 1ª Fatia do testemunho do bloco 1	43
Figura 3.7 – Amostra de região fissurada no bloco 7	44
Figura 3.8 – Amostra de região não fissurada no bloco 7.....	45
Figura 4.1 – Obra interrompida no 13ª Pav.....	47
Figura 4.2 – Fissuras do bloco 7 preenchidas com epóxi	47
Figura 4.3– Fissuras do bloco 8 preenchidas com epóxi	47

Figura 4.4 – Fissuras tratadas com epóxi na superfície do bloco, ativas, e, com aspecto de mapa	48
Figura 4.5 – Face lateral do bloco 7, fissurada horizontalmente.....	49
Figura 4.6 – Fissura horizontal na face lateral do bloco 7.....	50
Figura 4.7 – Fissura horizontal em outra face lateral do bloco 7.....	50
Figura 4.8 – Arestas do bloco 7.....	51
Figura 4.9 – Detalhe da trinca em uma das arestas do bloco 7.	51
Figura 4.10 – Fissuras superficiais no canto do bloco 1.....	52
Figura 4.11 – Testemunho do bloco 1.....	52
Figura 4.12 – Fissura aparentemente superficial, se propagando até o aço.	53
Figura 4.13 – Fissuras superficiais no bloco 6.....	53
Figura 4.14 – Fissuras em forma de mapa no bloco 6.....	54
Figura 4.15 – Fissura de grande abertura no bloco 6.	54
Figura 4.16 – Perfuração no bloco 6 para extrair testemunho.....	55
Figura 4.17 – Detalhe das fissuras contornando o aço.....	55
Figura 4.18 – Testemunho fraturado do bloco 6.....	56
Figura 4.19 – Fissuras ativas na superfície do bloco 8 após preenchimento com epóxi.	56
Figura 4.20 – Fissura no bloco 9.....	57
Figura 4.21 – Fissuração intensa na superfície do bloco 10.....	57
Figura 4.22 – Fissuração ativa em todo o bloco 7.	58
Figura 4.23 – Fissuras mapeadas no bloco 7.....	58
Figura 4.24 - Perfuração para extração de testemunho no bloco 9.....	59
Figura 4.25 - Testemunho do bloco 9.	59
Figura 4.26 - Fissura discreta na superfície bloco 9.....	60
Figura 4.27 - Fissura penetra ao longo do testemunho do concreto do bloco 9.	60
Figura 4.28 – Difratograma de raios x das amostras dos blocos B1, B6, B7 e B9.....	65
Figura 4.29 – Imagem da região fissurada da amostra obtida no microscópio óptico. ...	67
Figura 4.30 – Imagem da região não fissurada da amostra obtida no microscópio óptico.	67
Figura 4.31 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1,7Kx0,568	
Figura 4.32– Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1Kx10....	69
Figura 4.33 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1KxSPOT252B12	69
Figura 4.34 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1KxSPOT252B13	70
Figura 4.35 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1KxSPOT252B11	70
Figura 4.36 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_73KxSPOT252B14	71
Figura 4.37 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_107x06 ..	71
Figura 4.38 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_182x07 ..	72
Figura 4.39–Micrografia obtida no MEV–Amostra não fissurada P9-2-pol_198KxSPOT252BSEI16	72
Figura 4.40 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_500x09 ..	73
Figura 4.41 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_700x08.	73
Figura 4.42 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_763KxSPOT252B15.....	74
Figura 4.43 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_500x98.....	74
Figura 4.44 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_1Kx99.....	75
Figura 4.45 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_2Kx00.....	75

Figura 4.46 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_100x04.....	76
Figura 4.47 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_200x01.....	76
Figura 4.48 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_500x02.....	77
Figura 4.49 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_2Kx203.....	77
Figura 4.50 – Curva de TG.....	78
Figura 4.51 – Microfissura na interface argamassa-agregado, propagando-se para a argamaassa. Imagem obtida ao microscópio de luz transmitida. Ampliação 40x. Fonte: Relatório de ensaio nº 53528, ABCP	80
Figura 4.52 – Poro (P) preenchido por etringita. Imagem obtida ao microscópio de luz transmitida. Ampliação 40x. Fonte: Relatório de ensaio nº 53528, ABCP.....	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 4. 1 – Data das concretagens dos blocos (Fornecida pela Construtora)	61
TABELA 4. 2 – Propriedades químicas relevantes do cimento (%) em 2005.....	63
TABELA 4. 3 – Classificação dos graus de severidade de ataque dos concretos expostos aos sulfatos.....	64

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Apresentação

Ultimamente, o crescimento dos casos de patologias precoces em estruturas de concreto armado, inseridas no ambiente urbano, tem gerado grande interesse porque estão reduzindo a vida útil das estruturas, causando muitos transtornos e prejuízos financeiros para os seus usuários e construtores.

Embora a qualidade das construções tenha avançado bastante nas últimas décadas, com o advento da implantação dos Sistemas de Gestão de Qualidade – ISO 9001 nas Construtoras, ainda não se consegue evitar o aparecimento de patologias nas construções. Isto ocorre porque as patologias podem estar relacionadas a falhas que podem ser de projeto, de materiais ou de execução, ou ainda, dos três casos concomitantemente.

As patologias do concreto armado podem ter diversas origens e o seu diagnóstico ser bastante complexo, pois existem diversas causas para a redução da durabilidade dos materiais e a sua deterioração pode ser oriunda de fatores internos ou externos. De acordo com Neville (1997), a deterioração do concreto e das peças estruturais pode ocorrer devido a ações mecânicas, físicas, ou químicas. Entretanto, é válido salientar que, freqüentemente, as causas se superpõem, podendo ocorrer simultaneamente, dificultando a aplicação da terapia adequada a cada caso.

Um dos maiores agentes causadores de deterioração do concreto é a água, pois o concreto é um material que apresenta certa permeabilidade, e freqüentemente está exposto a ambientes úmidos ou propícios ao contato com água de diversas origens. Outro é a fissuração das peças estruturais que pode facilitar o ingresso da água e também de outros agentes agressivos.

O texto atual da norma ABNT - NBR 6118/2004, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento preocupa-se com o tema da durabilidade das estruturas de concreto. Ela leva em conta o meio em que a estrutura estiver inserida, classificando quatro classes de agressividade ambiental (CAA). Para cada uma delas são estabelecidos valores mínimos para o cobrimento dos ferros, a relação água/cimento e a resistência característica do concreto, mas isto ainda não é o suficiente.

Este trabalho apresenta um estudo de caso em que patologias estão se manifestando em blocos de fundação de um prédio, malgrado tenham sido obedecidos os critérios da ABNT- NBR 6118/2004, quanto à questão da durabilidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O Objetivo geral deste trabalho é verificar se estava ocorrendo ou não a reação álcali-agregado no concreto dos blocos de fundação de um edifício residencial em construção na cidade de João Pessoa, apresentando, analisando, e discutindo o problema patológico neles ocorrido.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a. Apresentar um caso de patologia grave em blocos de fundação de um edifício residencial, em construção;
- b. Fazer análise microestrutural das amostras do concreto dos blocos;
- c. Estabelecer se houve ou não a presença da reação álcali-agregado (RAA).

1.3 Justificativa

Até meados de 1970, a maioria dos edifícios possuía grande rigidez com paredes robustas, geralmente de tijolos maciços, bastante resistentes. Como consequência, eles praticamente não apresentavam deformações significativas. Os problemas de desempenho e de durabilidade não eram tão evocados quanto hoje. Atualmente, o avanço das tecnologias construtivas e dos materiais levou ao aumento de resistência dos concretos. Isto permitiu ousados projetos arquitetônicos, criando peças cada vez mais esbeltas e edificações cada vez mais altas, em parte devido à crescente especulação do espaço urbano. As construções em

concreto armado começaram, então, a apresentar, muito precocemente, diversos tipos de patologias nas suas estruturas. As patologias mais graves que têm ocorrido estão relacionadas à degradação dos próprios materiais constituintes, ou seja, do concreto e/ou do aço. Torna-se imprescindível a necessidade de se projetar e construir obras duráveis, pois sua degradação prematura gera uma série de impactos ambientais e sócio-econômicos para a população.

No que se refere aos impactos ambientais, quando se inicia a recuperação de uma construção, seja ela uma estrutura de uma edificação em concreto, uma estrada, ou uma barragem, é indispensável novamente se fazer uso de recursos naturais. Insumos como areia, brita e água estão se tornando escassos na natureza. Já o cimento Portland, um dos produtos industrializados mais consumidos no mundo, cujo processo de fabricação demanda um alto consumo de energia e apresenta elevados níveis de emissão de gases poluentes, deve ter minimizado seu consumo, pensando-se nos problemas de aquecimento do planeta e da poluição ambiental.

Em relação aos impactos econômicos, os custos das intervenções para recuperação de uma construção em concreto armado são altíssimos. Segundo Sitter (1984) apud Helene (1992), os custos ao se tomar uma medida, crescem exponencialmente com um fator 5 em cada etapa. Assim, descoberto um problema, se a sua correção fosse feita na etapa de projeto e custasse R\$ 1,00; se corrigido na etapa de execução, custaria R\$ 5,00; se na etapa de manutenção preventiva: R\$ 25,00; e na etapa de manutenção corretiva: R\$ 125,00.

A durabilidade é uma das propriedades mais importantes ao se projetar uma estrutura de concreto, pois através dela é possível preservar os recursos naturais e reduzir os danos ambientais e econômicos, causados pelo processo de recuperação das construções.

O caso de patologia estrutural apresentado e estudado mais profundamente neste trabalho pode ajudar ao meio técnico em geral a compreender o que se passou e como evitar esse tipo de patologia, cuja correção é de custo elevadíssimo.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos.

O Capítulo 1 trata da introdução. Nele são apresentados a problemática acerca do tema, os objetivos e a justificativa, juntamente com a estruturação da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica dos assuntos relacionados ao tema durabilidade das estruturas de concreto armado. São abordadas as definições de durabilidade e vida útil das estruturas em concreto, bem como os principais mecanismos de deterioração do concreto e a importância do estudo da sua microestrutura.

No Capítulo 3 descreve-se a metodologia adotada para realização do trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões sobre o estudo realizado. Finalmente, no Capítulo 5 têm-se as conclusões.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 Concreto

2.1.1 Contexto Urbano

O concreto de cimento Portland é um dos principais materiais de construção utilizado pelo homem. A crescente urbanização mundial gerou a necessidade de ampliação e construção de novos sistemas de infra-estrutura, essenciais à população, tais como casas, edifícios, sistemas viários, sistemas de tratamento e abastecimento de água, sistemas de drenagem e de esgotamento sanitário, onde de alguma forma, o concreto sempre está presente.

O concreto armado, por exemplo, é um material de construção largamente utilizado porque oferece muitas vantagens quando comparado a outros materiais de construção, como o aço e a madeira. As suas principais vantagens são a excelente resistência à água; a facilidade em moldar elementos estruturais de diversas formas e tamanhos; baixo custo e fácil disponibilidade. Entretanto, algumas limitações existem, como, a tendência à fissuração, que pode ser causada por diferentes fenômenos, como retração por secagem e retração térmica, entre outros.

Há poucos anos, acreditava-se que para obter uma estrutura de concreto com longa vida útil bastava executarem-se as etapas do processo de produção do concreto corretamente. Entretanto, atualmente, sabe-se que além da qualidade de execução, diversos outros fatores também devem ser considerados, desde a fase de projeto até a de manutenção preventiva. Esta última geralmente não é estabelecida em projeto e nem sequer lembrada pelos usuários das construções. Isto acaba criando uma fase obrigatória: a de manutenção corretiva.

A entrega de um manual de utilização, inspeção e manutenção por parte das construtoras aos usuários seria uma forma simples de introduzir a cultura de manutenção preventiva das obras de concreto armado.

2.1.2 Durabilidade e Vida útil

O conceito de durabilidade de estruturas de concreto, freqüentemente, é confundido com o de vida útil, e geralmente são considerados sinônimos. Mas na realidade, como a durabilidade não pode ser mensurada quantitativamente, então é expressa em termos de vida útil.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a “durabilidade é definida como expectativa de vida de um material sob determinadas condições ambientais.”

Para Neville (1997), a “durabilidade do concreto não significa vida indefinida, nem tão pouco suportar qualquer tipo de ação.”

Para a ABNT - NBR 6118/2004, a “durabilidade consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.”

Também se usa definir durabilidade de um material ou de um elemento de construção como sendo sua resistência à degradação. Entende-se como degradação um processo que define a perda progressiva das propriedades para prestar o serviço a que foi destinado.

Mais uma definição poderia ser: durabilidade é a capacidade de um produto manter suas propriedades e desempenho em condições normais de uso. Aqui, o desempenho se refere ao comportamento adequado do produto.

Andrade (1992) define a vida útil das estruturas como o “período durante o qual a estrutura conserva todas as características mínimas de funcionalidade, resistência e aspectos externos exigíveis”.

Segundo Souza e Ripper (1998) “por vida útil de um material entende-se o período durante o qual as suas propriedades permanecem acima dos limites mínimos especificados.”

E, de acordo com a ABNT - NBR 6118/2004, “entende-se por vida útil de projeto, o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, conforme item 7.8 (Inspeção e manutenção preventiva) e item 25.4 (Manual de utilização, inspeção e manutenção), bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.”

2.1.3 Redução da Durabilidade de Estruturas em Concreto

A durabilidade de uma estrutura em concreto pode ser reduzida devido a diversos fatores, inclusive de forma simultânea, tornando bastante complexo o diagnóstico da causa de sua degradação, e também bastante onerosa a sua recuperação.

Alguns dos principais fatores podem ser destacados como sendo:

- i. Deficiência dos projetos arquitetônico, estrutural e complementares;
- ii. Materiais não conformes utilizados na produção do concreto;
- iii. Deficiências do processo construtivo;
- iv. Ambiente no qual está inserida a estrutura;
- v. Condições de uso;
- vi. Inexistência de manutenção preventiva.

Segundo a ABNT - NBR 6118/2004, a solução estrutural adotada em projeto deve atender, durante todo seu ciclo de vida, a três requisitos mínimos de qualidade, classificados em três grupos distintos:

- i. Capacidade resistente, que consiste basicamente na segurança à ruptura;
- ii. Desempenho em serviço, que consiste na capacidade da estrutura manter-se em plenas condições de utilização, não devendo apresentar danos como fissuração, deformação e vibração, que comprometam parcialmente ou totalmente o uso para que foram projetadas ou deixem dúvidas com relação à sua segurança;
- iii. Durabilidade, que consiste na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas.

Para esses requisitos de qualidade serem atendidos, a estrutura deve ser projetada e executada conforme as normas pertinentes e terem os materiais constituintes controlados tecnologicamente.

A forma simplista da abordagem da durabilidade pela norma ABNT - NBR 6118/2004 dificulta o seu controle. Como a durabilidade é um termo relativo e não só uma qualidade inerente ao material, torna-se indispensável quantificá-la objetivamente, escolhendo uma ou

mais propriedades mensuráveis, e estabelecer o comportamento do material ao longo do tempo, como acontece com a resistência, por exemplo. Também se pode definir um valor limite aceitável para os indicadores de durabilidade, além do qual o material ou componente construtivo não atende às exigências mínimas de desempenho.

Através do avanço dos estudos sobre a durabilidade do concreto é possível contribuir para aumentar a vida útil das estruturas e reduzir os seus custos ao longo do tempo. Uma construção durável contribui para a preservação dos recursos naturais e redução da poluição ambiental. Portanto, é essencial projetar e construir, não só para atender à resistência, mas também para a durabilidade.

Para se obter estruturas de concreto duráveis é imprescindível o conhecimento da microestrutura do material e dos mecanismos que provocam sua degradação.

2.2 Microestrutura do Concreto

Fases são as partes diferenciadas que constituem um material. Segundo Mehta e Monteiro (2008), “o tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua *microestrutura*”.

Quando um material possui mais de uma fase, ele é chamado de material compósito. O concreto é um material compósito que possui uma microestrutura heterogênea, dinâmica e bastante complexa. Macroscopicamente, considera-se o concreto um material bifásico, composto por partículas de agregado dispersas em uma matriz de pasta de cimento.

Microscopicamente, ele é composto por três fases distintas: agregado, pasta de cimento hidratada e zona de transição.

A fase agregado é considerada a mais resistente nos concretos comuns, entretanto não influencia diretamente na resistência do concreto, exceto em casos de agregados extremamente porosos. Suas características físicas, como volume, tamanho, forma, textura e porosidade, determinam a sua densidade e a sua resistência, as quais afetam o módulo de elasticidade, a massa unitária e a estabilidade dimensional do concreto.

A estrutura da pasta de cimento hidratada, por sua vez, é composta por quatro fases sólidas principais, além de diversos tipos de vazios, com e sem água. As quatro fases sólidas mais importantes, vistas nas Figuras 2.1 e 2.2 são: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o

mais estável e resistente, composto por cristais bem pequenos, resistentes e estáveis com relação à água, e possui aspecto esponjoso. É responsável pelas propriedades da pasta, pois compõe 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento totalmente hidratada, sendo então, a fase mais importante; o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), composto por cristais grandes, em forma de placas, pouco resistentes e solúveis na água. Ocupa 20 a 25% do volume de sólidos na pasta; os sulfoaluminatos de cálcio, que constituem 15 a 20% do volume de sólidos na pasta. Durante o período inicial da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina da solução induz à formação da etringita ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), ou trissulfato de cálcio hidratado, o qual produz cristais prismáticos de forma acicular (em forma de agulhas). Caso a pasta seja de cimento puro, o trissulfato hidratado pode se transformar em monossulfato de cálcio hidratado ($\text{C}_4\text{ASH}_{18}$), formando cristais de placas hexagonais, com aparência de pétalas. Ambos são frágeis e podem reagir quimicamente com sulfatos. Também pode haver grãos de clínquer não hidratado na microestrutura das pastas de cimento hidratadas (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

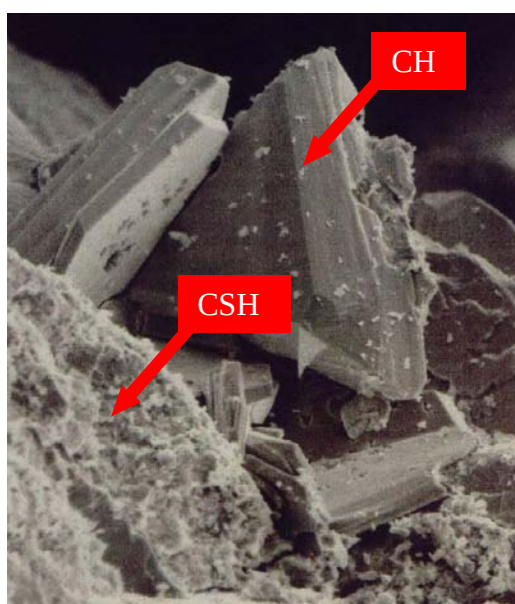


Figura 2.1 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais maciços de hidróxido de cálcio e de cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado. Fonte: ABCP



Figura 2.2 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais aciculares de etringita e de cristais hexagonais de monossulfato. Fonte\: Mehta e Monteiro, 2008 .

A fase zona de transição, como cada uma das outras fases, tem caráter multifásico que podem se modificar em função do tempo, umidade e temperatura. Localiza-se na interface entre a pasta de cimento e o agregado gráudo, e consiste em uma camada muito delgada formada em volta do agregado, que embora seja formada pelos mesmos componentes da pasta, tem uma estrutura diferente e geralmente é mais fraca que o agregado e a matriz pasta de cimento hidratada. Por isso pode influenciar bastante o comportamento mecânico do concreto.

O conhecimento das três fases do concreto é essencial para o entendimento das relações microestrutura-propriedades.

Através do estudo da microestrutura, é possível investigar alguns mecanismos de ataque ao concreto, além de propiciar interferir na terapia de algumas patologias e melhorar o desempenho de estruturas de concreto armado em processo de degradação.

2.3 Mecanismos de Deterioração do Concreto

As causas que iniciam a deterioração do concreto, segundo Neville (1997), podem ser originadas devido a ações Mecânicas, Físicas ou Químicas.

Para Mehta e Monteiro (2008), as causas de deterioração classificam-se apenas em físicas e químicas, subdividindo-se as causas físicas em duas categorias e as causas químicas em três.

A NBR 6118/2004 orienta que os mecanismos de envelhecimento e deterioração podem ser relativos somente ao concreto; apenas à armadura; e também à estrutura como um todo.

Com relação ao concreto, ela destaca como preponderantes os seguintes mecanismos de deterioração:

- i. Lixiviação por ação de águas puras, carbônicas agressivas ou ácidas que dissolvem e carreiam os compostos hidratados da pasta de cimento;
- ii. Expansão da pasta endurecida, por ação de águas e solos que contenham ou estejam contaminados com sulfatos;
- iii. Expansão por ação das reações entre os álcalis presentes no cimento e certos agregados reativos;
- iv. Reações deletérias superficiais de certos agregados decorrentes de transformações de produtos ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica.

Entende-se por Lixiviação, a dissolução e transporte de componentes de um meio poroso por um fluido que o atravessa. No caso do concreto, o produto lixiviado, geralmente pela água, é o hidróxido de cálcio.

Em relação à armadura são:

- i. Despassivação por carbonatação, ou seja, por ação do gás carbônico da atmosfera;
- ii. Despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto).

E quanto à estrutura propriamente dita:

- i. Todos os relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação.

2.4 Causas de Deterioração Mecânicas e Físicas

As causas de deterioração por ações mecânicas e físicas, segundo Neville (1997) se subdividem em:

- i. Mecânicas, que podem ser provenientes dos fenômenos de erosão, cavitação, abrasão ou impacto;
- ii. Físicas, que compreendem as diferenças de coeficiente de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratada, a ação gelo-degelo associada à ação dos sais descongelantes, e os efeitos de altas temperaturas;

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as causas físicas subdividem-se em duas categorias:

- i. Por desgaste superficial, ou perda de massa devido à abrasão, erosão e cavitação;
- ii. Por fissuração, devido a gradientes normais de temperatura e umidade, cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a temperaturas extremas, como congelamento ou fogo.

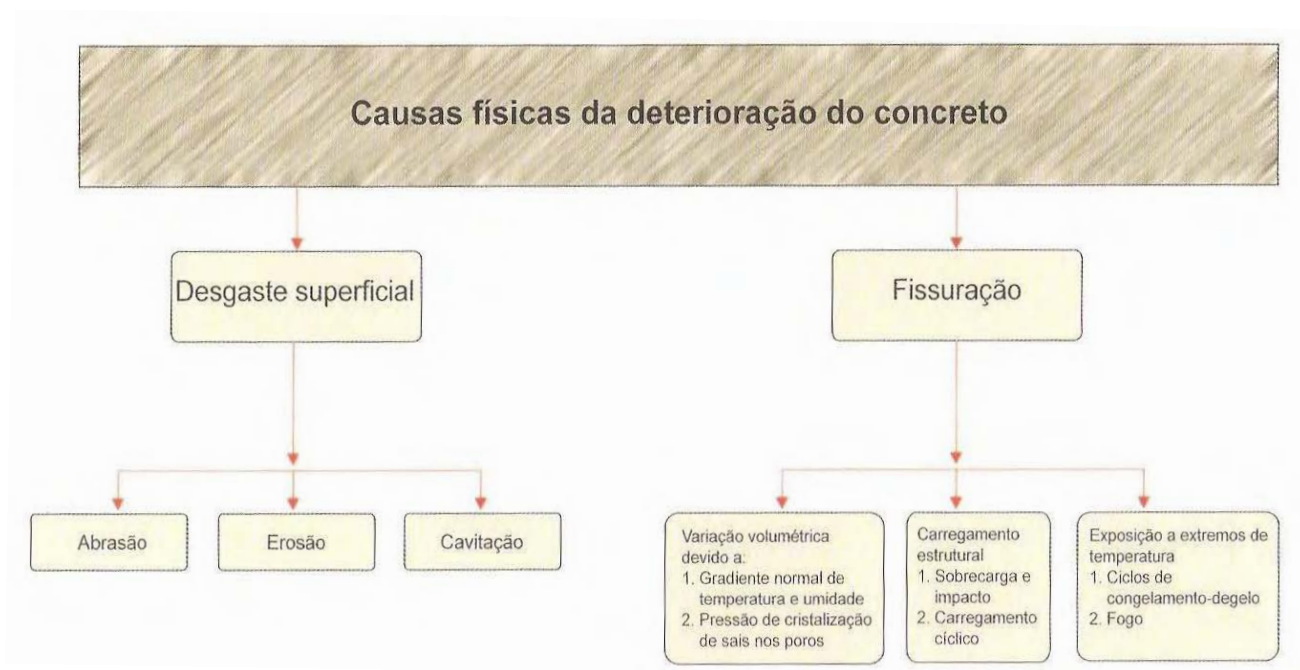


Figura 2.3 – Causas físicas de deterioração do concreto. Fonte\': Mehta e Monteiro, 2008.

2.5 Causas de Deterioração Química

As causas de deterioração por ações químicas, para Neville (1997) são subdivididas em:

- i. Reações álcali-agregado;
- ii. Ataque por íons agressivos, como cloretos, sulfatos, e dióxido de carbono;
- iii. Ataque por alguns tipos de líquidos e gases.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as causas de deterioração por ações químicas, subdividem-se em:

- i. Hidrólise dos componentes da pasta por água mole;
- ii. Reações de troca catiônica entre fluidos agressivos e a pasta de cimento;
- iii. Reações químicas levando à formação de produtos expansivos, como no ataque por sulfato, reação álcali-agregado, e corrosão da armadura no concreto.

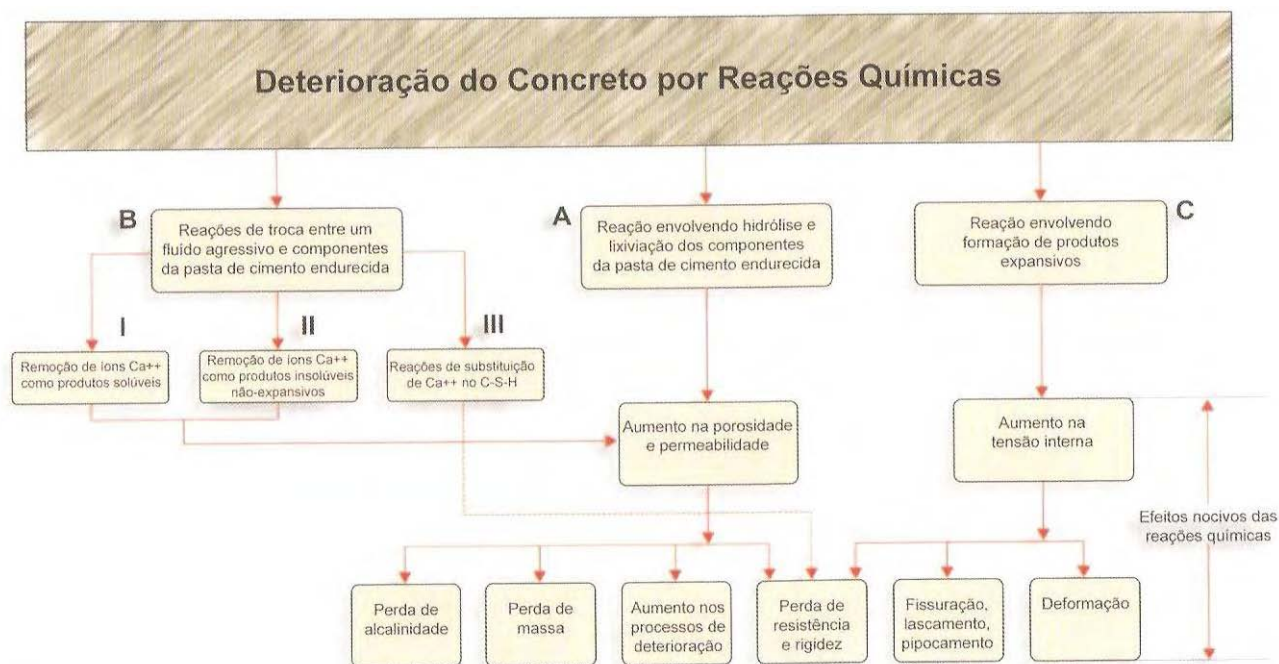


Figura 5-14 Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto. A: ataque de água mole no hidróxido de cálcio e C-S-H presentes nos cimentos Portland hidratados; B (I) solução ácida formando componentes solúveis de cálcio, como cloreto de cálcio, sulfato de cálcio, acetato de cálcio ou bicarbonato de cálcio; B (II): soluções de ácido oxálico e seus sais, formando oxalato de cálcio; B (III): ataque de longa duração de água do mar enfraquecendo o C-S-H pela substituição de Ca^{2+} por Mg^{2+} ; C: ataque por sulfato formando etringita e gesso, reação álcali-agregado, corrosão da armadura no concreto, hidratação de MgO e CaO cristalinos (Mehta, P.K.; Gerwick, Jr., B.C., *Concr. Int.*, v. 4, pp. 45-51, 1982).

Figura 2.4 – Causas químicas de deterioração do concreto. Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

2.5.1 Reação Álcali-agregado (RAA)

A reação álcali-agregado é uma reação química que ocorre entre os álcalis contidos no cimento e alguns tipos de agregados reativos, na presença de água.

Qualquer cimento possui óxidos de sódio e de potássio em sua composição, e quando em contato com a água dos poros do concreto, estes óxidos produzem a formação de bases muito fortes, como os hidróxidos de sódio e de potássio. Então, agregados que possuem na sua constituição sílica amorfa (ocorre quando o esfriamento do magma que gerou a pedreira da qual se extraiu a brita, aconteceu rapidamente, não dando tempo de ocorrer a cristalização completa da sílica) apresentam potencial de reação química com as bases citadas, formando um gel no contato pasta-agregado, que quando em contato com a água, expande-se fraturando o concreto. A superfície do concreto fraturado apresenta uma rede de finas fissuras com algumas grandes, em forma de mapa, tornando-se um aspecto característico de concretos deteriorados pela ação da reação álcali-agregado (Taylor, 1990). O gel produzido pela reação

preenche os poros do concreto e apresenta um aspecto viscoso e de cor esbranquiçada. Na Figura 2.5 (a) e (b) pode-se notar as fissuras em forma de mapa, e em (c) o gel da RAA.

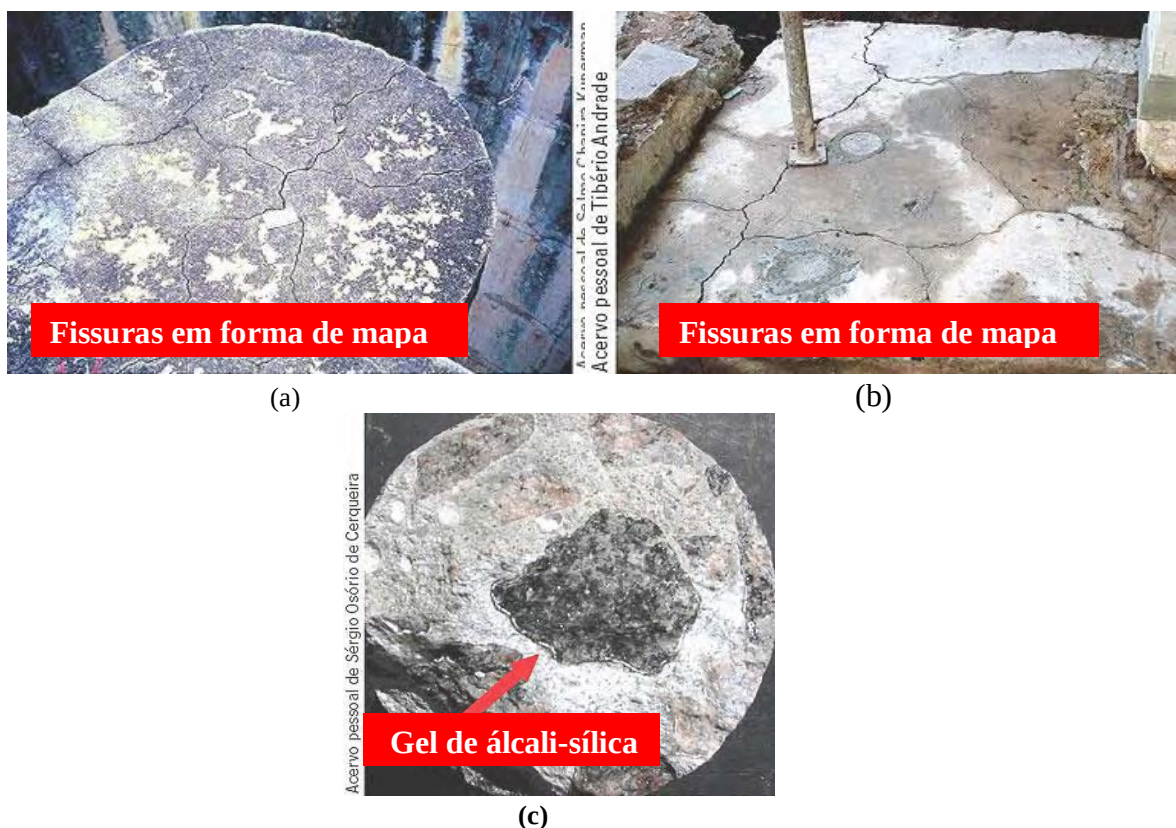


Figura 2.5 – (a) Topo de pilar de vertedouro de barragem, (b) bloco de fundação de edifício de 23 pavimentos, (c) Gel formado em volta do agregado; disponível em <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/imprime59011.asp>, acessado em 05/03/2010.

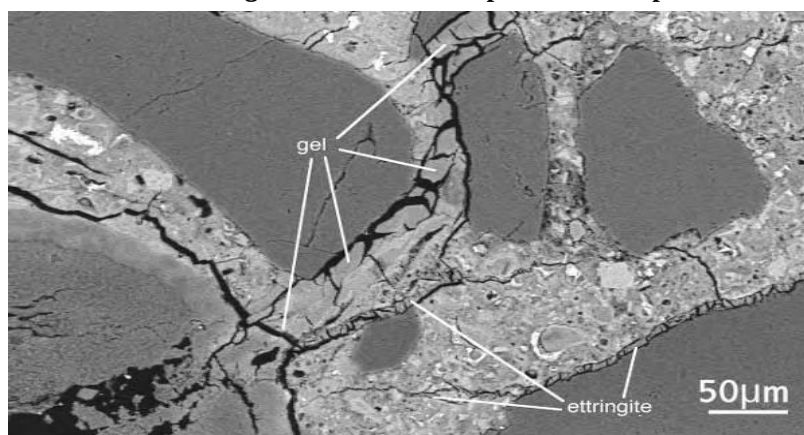


Figura 2.6 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura, do gel formado pela reação álcali-agregado no interior do concreto e da formação de etringita dentro das fissuras internas ao concreto. Fonte: disponível em www.understanding-cement.com/alkali-silica.html, acessado em 12/11/2008.

Existem dois tipos de reação álcali-agregado. A reação álcali-sílica (RAS), quando os agregados reativos são a base de sílica (SiO_2) na forma amorfa, não cristalina; e, a reação álcali-carbonato (RAC), quando os agregados reativos são a base de carbonatos. Esta última reação raramente é encontrada e não produz o gel característico da RAA.

Também existe uma variação da reação álcali-sílica (RAS), a reação álcali-silicato, que se desenvolve mais lentamente, quando os agregados reativos são silicatos existentes nas rochas sedimentares, metamórficas e ígneas, e, principalmente, no quartzo tensionado e minerais expansivos (FIGUEIRÔA E ANDRADE, 2007). Esta reação é a mais encontrada no Brasil, principalmente em barragens e pontes.

Para desencadear a reação álcali-sílica é necessário que haja, além dos agregados reativos e dos álcalis, do cimento ou de outras fontes, a presença de água nos poros do concreto. Esta água pode ser oriunda de fontes externas, como o meio ambiente, ou internas, como o excesso de água de amassamento. A presença dessa água residual no interior do concreto pode alimentar o processo por muito tempo.

A elevação da temperatura é um fator que pode acelerar o processo da RAS, uma vez que aumenta a reatividade química.

É válido ressaltar que para Figueirôa e Andrade (2007), se a umidade relativa interna for menor que 80%, a reação não se processa.

Estudos demonstram que para se confirmar o diagnóstico de ocorrência da RAS devem-se identificar em campo, alguns sintomas que possibilitem a presença desta patologia. Os mais evidentes são:

- i. Fissuras com formas mapeadas, geralmente encontradas em pavimentos de rodovias e de aeroportos, muros e superfícies de elementos estruturais com pouca ou sem armação;
- ii. Fissuras em faces de elementos estruturais, predominando na direção perpendicular à maior expansão, principalmente nas regiões sem armação, como no caso de blocos de fundação;
- iii. Fissuras na direção longitudinal, quando é impedida a expansão longitudinal, como no caso de pilares;
- iv. Exsudação de gel, principalmente em zonas de refluxo de maré, onde a água penetra nos poros trazendo o gel para a superfície;
- v. Deslocamento relativo de partes de um mesmo elemento estrutural;

- vi. Pipocamento em pontos localizados da superfície;
- vii. Borda de reação em torno das partículas do agregado;
- viii. Presença do gel preenchendo os vazios dos poros ou no interior do agregado;
- ix. Desalinhamento de placas de pavimentação.

Em seguida, devem-se examinar amostras através de ensaios em laboratório.

Um dos principais exames para se detectar a presença de material reativo é a análise petrográfica. Ela caracteriza o agregado, possibilitando identificar sua origem mineralógica, textura, estrutura e composição química. Esta análise é feita inicialmente observando-se macroscopicamente o concreto, com o objetivo de visualizar a presença de gel dentro das fissuras ou nos poros do concreto, bordas de reação em volta dos agregados e perda de aderência na interface pasta-agregado. Posteriormente, procede-se aos ensaios utilizando-se os microscópios estereoscópico, óptico de luz transmitida e o eletrônico de varredura.

2.5.2 Formação de Etringita Retardada (FER)

A formação de etringita retardada é uma forma de ataque químico por sulfatos. Ocorre quando a origem dos íons sulfatos é interna ao concreto. Esse mecanismo de expansão é tema de muitas controvérsias entre os pesquisadores.

Segundo Taylor et al., (2001), a temperatura é um fator crítico para a formação da etringita retardada. A formação da etringita após tratamento térmico não causa necessariamente expansão, pois se a temperatura interna do concreto ou argamassa não exceder 70°, não ocorrerá expansões.

A expansão na pasta de cimento, decorrente da formação de etringita retardada, causa fissuras na pasta e na interface pasta-agregado. Em seguida, a etringita se recristaliza nos vazios e fissuras a partir de minúsculos cristais dispersos ao longo da pasta.

A literatura reporta que o fenômeno da formação da etringita retardada ocorre quando a etringita primária se decompõe quando o concreto é submetido à cura térmica com vapor a elevadas temperaturas e em seguida os íons sulfatos são adsorvidos pelo CSH e depois liberados, voltando a formar a etringita secundária no interior dos produtos da hidratação do cimento.

A formação da etringita retardada pode ocorrer tanto quando o concreto é submetido à cura térmica com vapor a elevadas temperaturas como quando em grandes volumes, pois a temperatura é aumentada pelo calor de hidratação.

Segundo Diamond S.(1996), a formação de etringita retardada pode ser proveniente dos modernos cimentos com altos níveis de sulfato.

Este pesquisador acredita também que a associação de FER com prévia fissuração induzida pela RAS, por congelamento, ou mesmo por retração não é acidental, mas pode ser fundamental para os processos de FER.

A associação comum entre RAS e FER pode refletir fatores químicos, além do efeito de indução de fissuras pela RAS.

As conseqüências práticas da FER são mais diferentes e mais complexas que a expansão simples.

Segundo M. Thomas et al., (2008), na America do Norte há consideráveis controvérsias acerca de danos causados pela respectiva contribuição da RAS e FER. Ao investigar algumas colunas de pontes no sul dos EUA, construída no fim dos anos 80, que apresentaram fissuras em 10 anos de serviço, concluiu-se através de análises microestruturais em amostras do concreto e testes em laboratório que algumas colunas apresentaram como causa das fissuras, apenas a FER e outras a FER e a RAS simultaneamente. Nas Figuras 2.7 e 2.8 vêem-se imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura, onde se podem identificar ambos os processos.

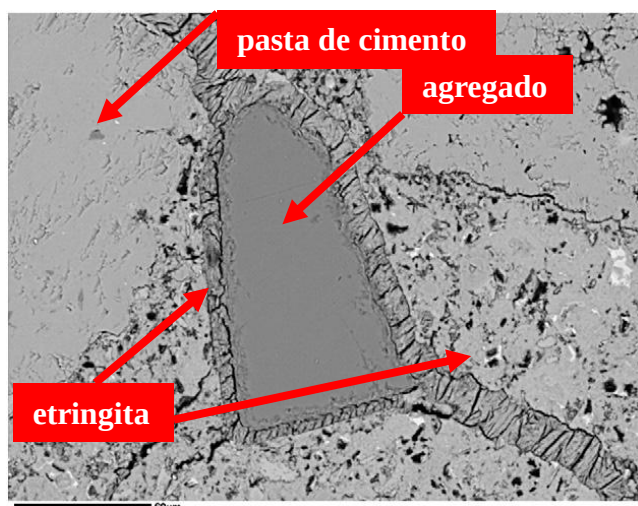


Figura 2.7 – Imagem de uma amostra de concreto polida, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostrando a etringita preenchendo a fissura em volta do grão de agregado. Fonte: M. Thomas et al. / Cement and Concrete Research 38 (2008) 841–847

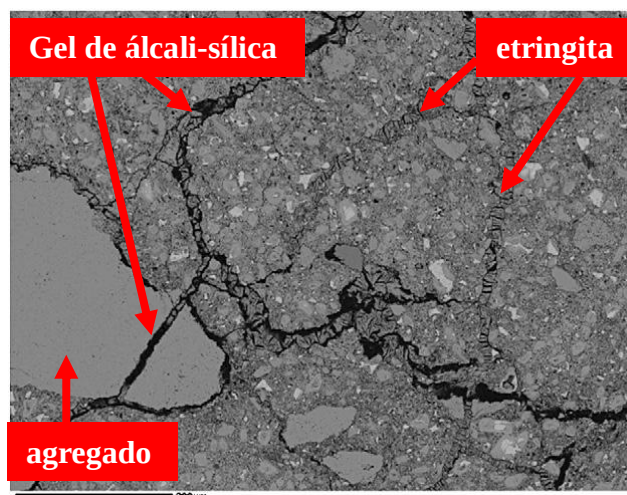


Figura 2.8 – Imagem de uma amostra de concreto polida, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostrando fissuras em torno e através da partícula de agregado preenchidas parcialmente pelo gel álcali-sílica e outras preenchidas por etringita. Fonte: M. Thomas et al. / Cement and Concrete Research 38 (2008) 841–847

2.6 Como Detectar Problemas de Durabilidade

Os problemas de durabilidade são investigados a partir da análise microestrutural do concreto. Esta análise se dá através do uso de técnicas analíticas de caracterização dos materiais, as quais podem identificar alguns dos problemas relativos à propriedade da durabilidade. Entretanto, essas análises são um pouco complexas, e é necessário dispor de alguns equipamentos importantes como, por exemplo, um microscópio eletrônico de varredura, difratômetro de raios X, entre outras que serão discutidas adiante.

2.7 Análise Microestrutural

Para o conhecimento da microestrutura é preciso fazer-se vários tipos de análises. Algumas das principais são: análise mineralógica, microscópica e térmica. Os ensaios necessários são os de:

- i. Difração de Raios X;
- ii. Microscopia óptica;
- iii. Microscopia Eletrônica de Varredura;
- iv. Termogravimetria.

2.7.1 Análise Mineralógica

2.7.1.1 Difratometria de Raios X

O fenômeno de difração de raios X possibilita o estudo da estrutura dos materiais, a nível atômico. Recomenda-se a técnica de difração de raios x para identificação e quantificação das fases cristalinas de um material, devido aos átomos da maioria dos sólidos apresentarem-se ordenados em planos cristalinos e estarem separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios x. (CALLISTER,2008)

O ensaio de difratometria de raios X (DRX) consiste em se originar o fenômeno da difração através da incidência de um feixe de raios x em um cristal, que interage com os átomos presentes nele, proporcionando a identificação das fases e o grau de cristalinidade do material, através da comparação de um perfil desconhecido com o conjunto de difração padrão, coletado e mantido pelo Joint Committee on Powder Diffraction Standards – JCPDS (PICCOLI, 2010).



Figura 2.9 – Difratometro de raios X

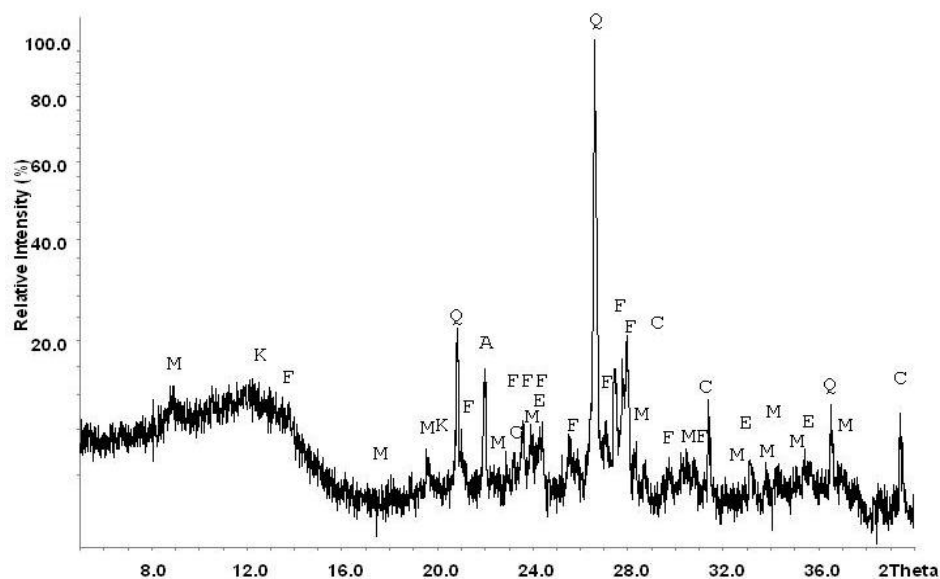


Figura 2.10 - difração de Raios-X do resíduo cerâmico moído: (Q) Quartzo; (C) Calcita; (E) Hematita; (K) Caulinita; (F) Feldspato; (A) Albita; (M) Microline. (VIEIRA, 2005).

Na Figura 2.10 cada pico gerado corresponde a um mineral ou composto cristalino encontrado em amostras em forma de pó.

2.7.2 Análise Microscópica

2.7.2.1 Microscopia Óptica

A técnica de microscopia óptica permite analisar o material por meio da reflexão de uma luz incidente na superfície da amostra. Esta técnica utiliza um microscópio óptico que funciona a partir da emissão de luz por uma fonte luminosa localizada na base do aparelho (luz transmitida) e outra no braço do mesmo (luz refletida). Sua capacidade máxima de ampliação gira em torno de 2000 X. Nesta técnica busca-se observar as fraturas, grãos de agregados e suas interfaces, uma vez que estes detalhes apresentam índices de reflexão diferentes, fornecendo um contraste que permite a avaliação das patologias.

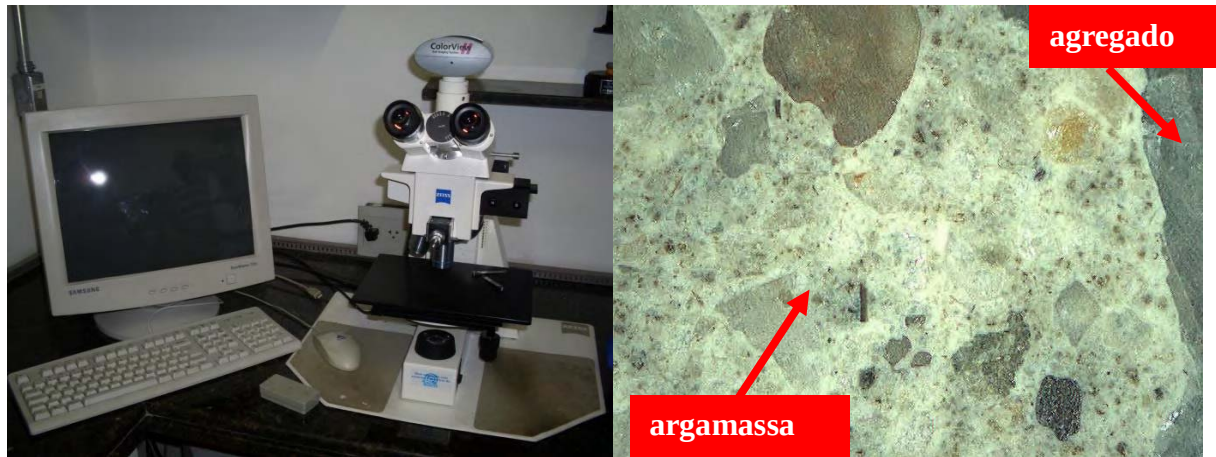


Figura 2.11 – (a) Microscópio Óptico

(b) Micrografia obtida através do Microscópio Óptico.

2.7.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura permite analisar, mais detalhadamente, as características microestruturais de um sólido. Nesta técnica existem duas abordagens que podem ser complementares:

- i. A análise da morfologia das superfícies, fornecidas pelo contraste da emissão de elétrons secundários que são arrancados de um filme condutor (filme do carbono), com emissão de fótons cuja incidência no detector fornece os detalhes morfológicos tais como a identificação de agulhas, placas e detalhes da superfície analisada, tais como a rugosidade e a existência de ranhuras, etc.;
- ii. Análise química pelo contraste gerado pelos fótons produzidos em camadas mais profundas do material, cujo contraste é gerado de maneira que a tonalidade escurece quanto menor for o número atômico médio da amostra. Como as matrizes de cimento Portland no concreto têm diferentes teores de cálcio, silício e alumínio, as tonalidades são indicativas da ocorrência de fases

da hidratação. No caso da durabilidade, pode-se observar a ocorrência de camadas em torno de grãos e fissuras, indicativos de precipitação e expansão para alguns mecanismos como, por exemplo, a reação álcali-agregado cuja ocorrência é típica nessas áreas descritas (MALISKA, 2004).

O MEV é um dos equipamentos mais utilizados nas análises de caracterização de materiais devido à sua alta profundidade de foco e à sua capacidade normal de ampliação ser de 10.000 vezes, dependendo do material, pode chegar até 900.000 vezes.

É válido ressaltar que as imagens obtidas no MEV são virtuais e representam a transcodificação da energia emitida pelos elétrons.

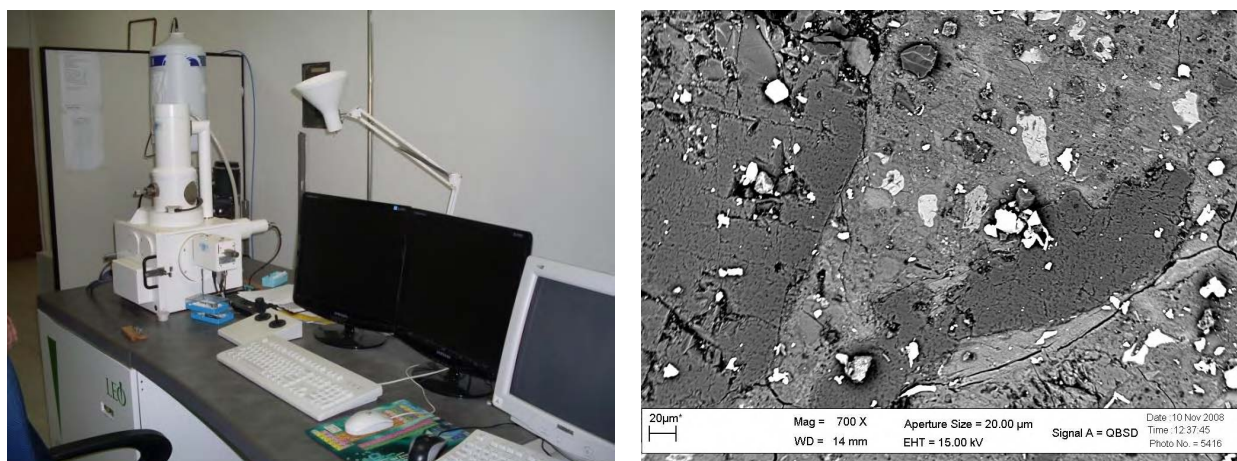


Figura 2.12 – (a) Microscópio Eletrônico de varredura (MEV); (b) Imagem obtida no MEV.

2.7.3 Análise Térmica

A análise térmica engloba uma série de técnicas, nas quais uma propriedade física de uma substância é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a um programa controlado de temperatura (GIOLITO e IONASHIRO, 1988).

2.7.3.1 Termogravimétrica (TG)

Nesta técnica, mede-se a massa de uma substância em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de temperatura. O registro é feito através de uma curva termogravimétrica, onde o peso é representado no eixo das ordenadas, com valores decrescentes de cima para baixo e a temperatura ou o tempo é representado no eixo das abscissas, com valores crescentes da esquerda para a direita (IONASHIRO e GIOLITO, 1980).

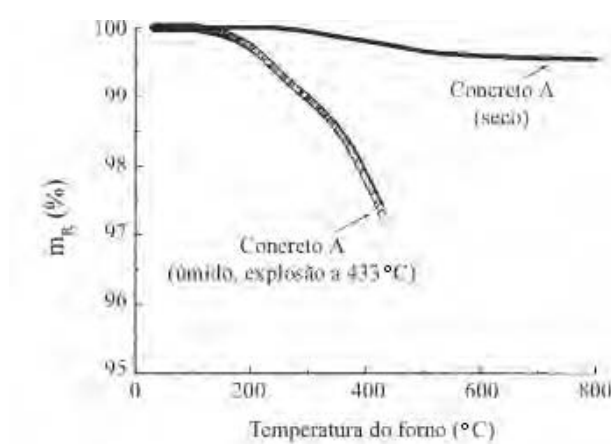


Figura 3: Massa retida (m_R) em função da temperatura do forno para o concreto A úmido e seco ensaiado com uma taxa de 25 °C/min.

Figura 2.13 – Curva termogravimétrica de duas amostra de concreto. Fonte: disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132002000300004

O objetivo desta técnica é fornecer subsídios para se avaliar a estabilidade e a decomposição térmica da amostra, em função da perda de massa ao ser exposta a uma variação de temperatura, podendo ultrapassar 1000° C.

Capítulo 3 – Metodologia

3.1 Metodologia da Investigação das Patologias

A metodologia adotada para se entender o que está causando as fissuras nos blocos, constou de três etapas:

3.1.1 Etapa 1: Inspeção e Coleta de Amostras do Concreto

i. Extração dos Testemunhos do Concreto dos Blocos

Através de uma perfuratriz, refrigerada a água, e com broca diamantada, foram extraídos quatro testemunhos do concreto dos blocos, escolhidos aleatoriamente, com diâmetro de 10 cm e comprimento variável. Alguns testemunhos fraturaram-se durante a extração devido à dificuldade em serrar as espessas barras de aço no interior do concreto. Na Figura 3.1 vê-se a operação da perfuratriz, extraíndo-se um testemunho.

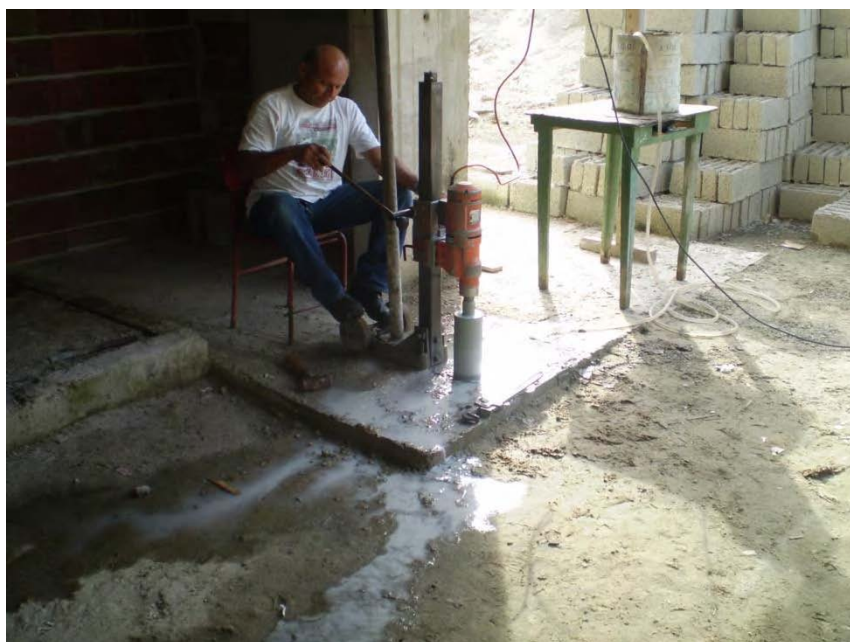


Figura 3.1 – Perfuratriz extraíndo um testemunho

Na Figura 3.2, é possível visualizar as barras de aço de armação do bloco 7, onde o testemunho do concreto fraturou, durante sua extração.

É válido ressaltar que a água acumulada no local é decorrente da refrigeração da perfuratriz durante o processo de extração do concreto.



Figura 3.2 – Furação do Testemunho no Bloco 7

ii. Acondicionamento dos Testemunhos

Assim que foram extraídos, os testemunhos do concreto dos blocos foram envolvidos em filme PVC para evitar possíveis contaminações no concreto, como se vê nas Figuras 3.3 e 3.4.



Figura 3.3 – Testemunho fraturado do Bloco 7 protegido por filme PVC



Figura 3.4 – Testemunho do bloco 1 protegido por filme PVC

Em seguida, os testemunhos foram levados ao laboratório para preparação das amostras utilizadas nos ensaios de caracterização do concreto.

iii. Preparação das Amostras para os Ensaios de Caracterização.

1º Passo: Corte

Os testemunhos foram fatiados utilizando-se uma serra de disco diamantado. Os cortes partiam de sua superfície superior, com espessura aproximada de 8mm., e prolongavam-se até a outra extremidade, sendo que cada fatia foi dividida em 4 partes iguais e em seguida protegidas por filme PVC, para depois serem acondicionadas em caixas plásticas fechadas. Na Figura 3.5 pode-se ver o equipamento utilizado para o corte, e na Figura 3.6 vê-se as fatias cortadas, identificadas e protegidas.



Figura 3.5 – Serra usada para o corte dos Testemunhos

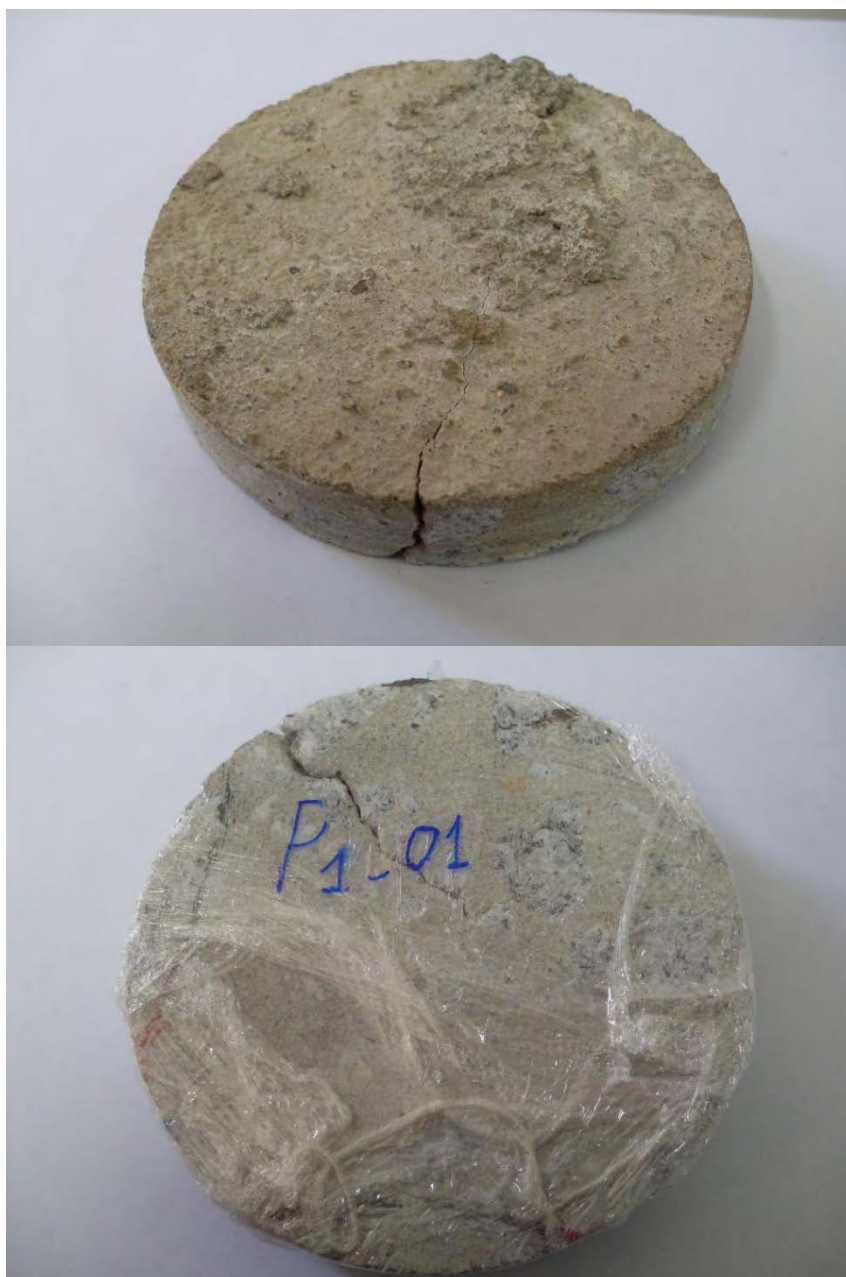


Figura 3.6 – 1ª Fatia do testemunho do bloco 1

2º Passo: Refinamento

Cada 1/4 das fatias foi separado para preparar amostras para as análises microestruturais. Estas análises foram realizadas através dos ensaios de difratometria de raios X; microscopia óptica; microscopia eletrônica de varredura e termogravimetria.

Algumas amostras foram separadas para refinamento e outras para polimento, pois os ensaios mineralógicos e térmicos necessitam de amostras em forma de pó, e os ensaios microscópicos necessitam de amostras polidas metalograficamente.

Para o refinamento de algumas amostras, foram utilizados um pilão de alumina e um almofariz de ágata, onde cada uma foi destorroada, tentando-se separar o agregado graúdo, de forma que apenas os componentes da pasta do concreto passassem na peneira 325 mm., obtendo então um pó muito fino. Estas amostras foram separadas, identificadas e acondicionadas em sacos plásticos para realização dos ensaios de difratometria de raios X, e termogravimetria.

Foram preparadas amostras, em forma de pó, dos testemunhos extraídos dos blocos B1, B6, B7 e B9, em região fissurada e não fissurada. As figuras 3.7 e 3.8 retratam amostras do bloco B7.



Figura 3.7 – Amostra de região fissurada no bloco 7



Figura 3.8 – Amostra de região não fissurada no bloco 7

3º Passo: Polimento

Algumas amostras do concreto passaram por um banho ultrassônico de acetona, e em seguida foram secas por um secador de cabelo, para só então receberem um polimento metalográfico na face da região fissurada e outros na face da região não fissurada. Estas amostras foram levadas ao microscópio óptico e ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

3.1.2 Etapa 2: Coleta de Dados do Concreto e de seus Materiais Constituintes

Foram coletadas, junto à empresa construtora, informações sobre o concreto, como origem, data de concretagens, resistência característica, consumo, tipo e composição do cimento, finura Blaine e sobre o aditivo.

3.1.3 Etapa 3: Análise Microestrutural das Amostras do Concreto

Foi feita através de:

- i. **Análise Mineralógica:** realizada através do ensaio de difratometria de raios X (DRX), utilizando-se as amostras em forma de pó, preparadas inicialmente;
- ii. **Análise Microscópica:** realizada através de um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura (MEV), utilizando-se as amostras polidas;
- iii. **Análise Térmica:** realizada através do ensaio de termogravimetria (TG), utilizando-se as amostras em forma de pó;

As amostras utilizadas para os ensaios citados foram extraídas da região íntegra dos testemunhos de concreto dos blocos, e da região fissurada dos mesmos.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

4.1 Estudo de Caso – Fissuração Excessiva do Concreto de Blocos de Coroamento de Fundação de Edifício de Múltiplos Pavimentos

4.1.1 Apresentação

Este caso trata da investigação das possíveis causas de uma intensa fissuração dos blocos de fundação de um Edifício residencial, localizado a cerca de 500 m. do mar, na cidade de João Pessoa, previsto para 26 pavimentos e que se encontrava em fase de construção (Figura 1).



Figura 4.1 – Obra interrompida no 13ª Pav.



Figura 4.2 – Fissuras do bloco 7 preenchidas com epóxi



Figura 4.3– Fissuras do bloco 8 preenchidas com epóxi

Ao fazer uma limpeza no semi-subsolo, o construtor notou que estavam aparecendo fissuras na superfície superior de alguns blocos. Sem se aprofundar no caso, as fissuras foram preenchidas superficialmente com adesivo epóxi, conforme indicado nas Figuras 4.2 e 4.3.

Aproximadamente três anos e meio após a concretagem dos blocos, notou-se que o “tratamento” dado às fissuras não tinha sido eficaz, pois elas reapareceram e intensificaram-se (Figura 4.4), tanto nos blocos que receberam tratamento quanto naqueles que não tinham apresentado fissuras na época da aplicação daquele produto.

Como o excesso de fissuras estava atingindo muitos blocos da fundação, a obra foi interrompida quando se encontrava no décimo terceiro pavimento. O Construtor resolveu então buscar uma consultoria especializada, através da Universidade Federal da Paraíba.



Figura 4.4 – Fissuras tratadas com epóxi na superfície do bloco, ativas, e, com aspecto de mapa.

4.1.2 Inspeção dos Blocos

A inspeção mostrou que a maioria dos blocos apresentava fissuras na face superior. Como os blocos foram assentados abaixo do nível de água do lençol freático, houve bastante dificuldade em se inspecionar todas as superfícies laterais dos mesmos. Entretanto, onde se conseguiu rebaixar o nível da água, identificaram-se fissuras horizontais nas laterais de alguns blocos, como por exemplo, no bloco 7 mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Face lateral do bloco 7, fissurada horizontalmente.

Nele, constatou-se que todas as suas superfícies laterais apresentavam extensas fissuras.

Nas Figuras 4.6 a 4.8 pode-se ver que os cantos do bloco se achavam bastante fraturados.

Quanto às fissuras localizadas nas superfícies superiores dos blocos, estas se apresentavam em diversas formas, mas na sua maioria, apresentavam-se em forma mapeada (Figura 4.9), que é um aspecto característico de estruturas atacadas pelo fenômeno da reação álcali-agregado. Entretanto, para diagnosticar se realmente esse tipo de patologia estava ocorrendo, foi necessário uma análise microestrutural, através de técnicas de caracterização dos materiais constituintes do concreto deteriorado.



Figura 4.6 – Fissura horizontal na face lateral do bloco 7.



Figura 4.7 – Fissura horizontal em outra face lateral do bloco 7.



Figura 4.8 – Arestas do bloco 7.



Figura 4.9 – Detalhe da trinca em uma das arestas do bloco 7.

A investigação das causas das fissuras nos blocos foi realizada utilizando-se amostras dos blocos 1, 6, 7 e 9. A Figura 4.10 indica as fissuras no bloco 1. Observa-se que elas aparentemente são discretas, de pequena abertura e localizam-se no canto superior do bloco. Entretanto, ao extrair um testemunho do concreto deste bloco, constatou-se que as fissuras se propagavam com grande abertura para o interior do concreto até atingir a armadura, como se pode ver nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

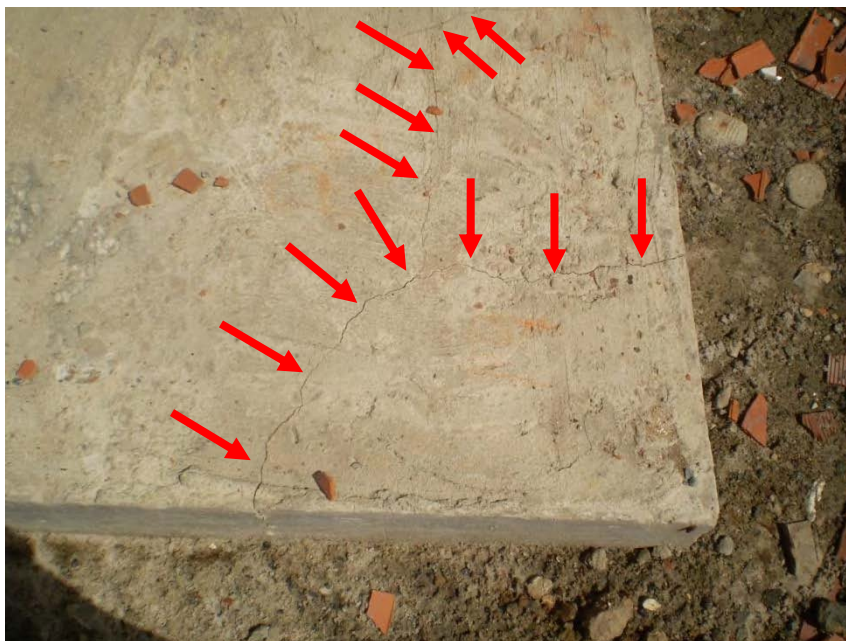


Figura 4.10 – Fissuras superficiais no canto do bloco 1.

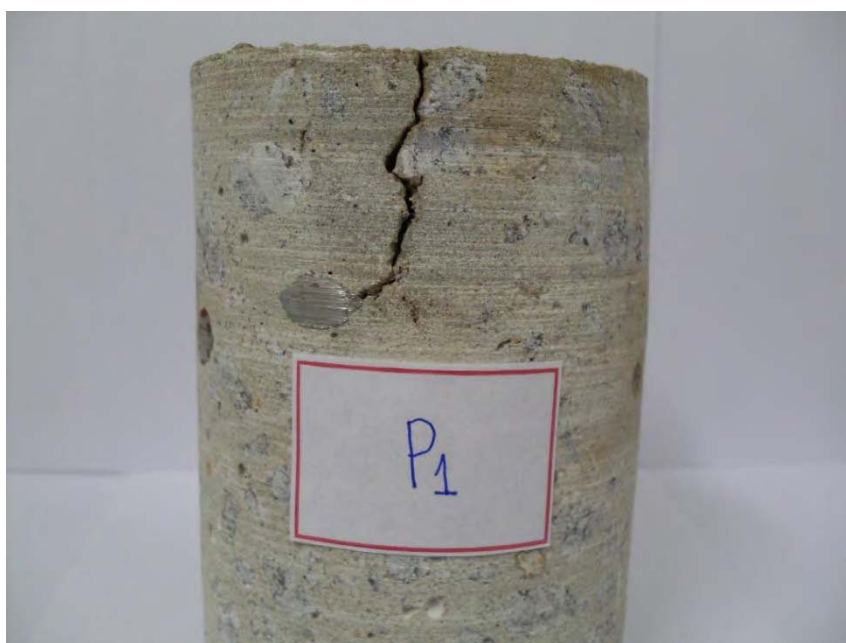


Figura 4.11 – Testemunho do bloco 1.



Figura 4.12 – Fissura aparentemente superficial, se propagando até o aço.

As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16, apresentadas abaixo, indicam fissuras no bloco 6. Observa-se na figura 4.13 e 4.14 que o bloco apresenta fissuração intensa, aparentemente superficial e com aspecto mapeado, mas algumas são de grande abertura, como se pode ver na Figura 4.15.



Figura 4.13 – Fissuras superficiais no bloco 6.



Figura 4.14 – Fissuras em forma de mapa no bloco 6.

As fissuras localizam-se em toda a sua superfície superior e algumas se propagam pelas faces laterais dos blocos, como indica a Figura 4.15.



Figura 4.15 – Fissura de grande abertura no bloco 6.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 pode-se notar que algumas fissuras não se interrompem quando se encontram com a armadura, pelo contrário, elas contornam o aço e continuam se propagando.

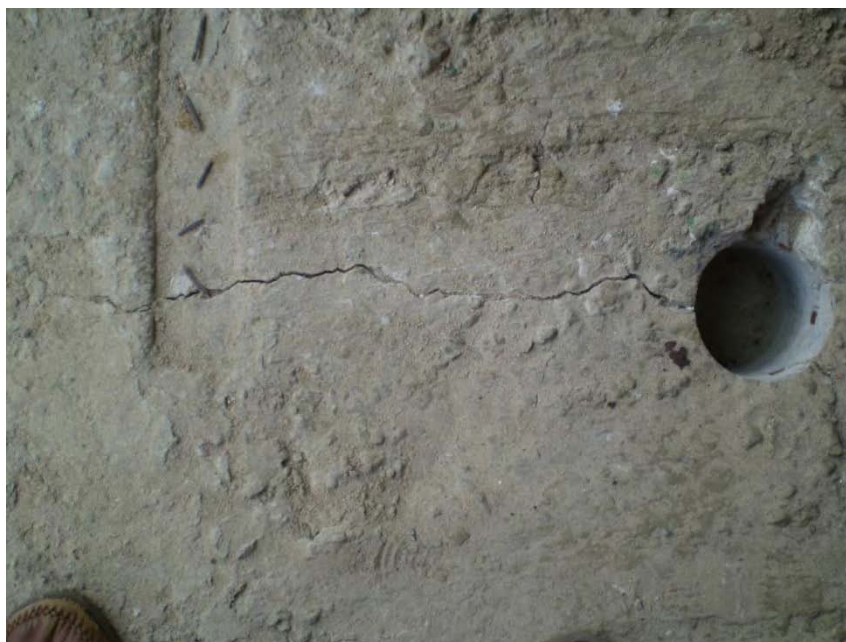


Figura 4.16 – Perfuração no bloco 6 para extrair testemunho.

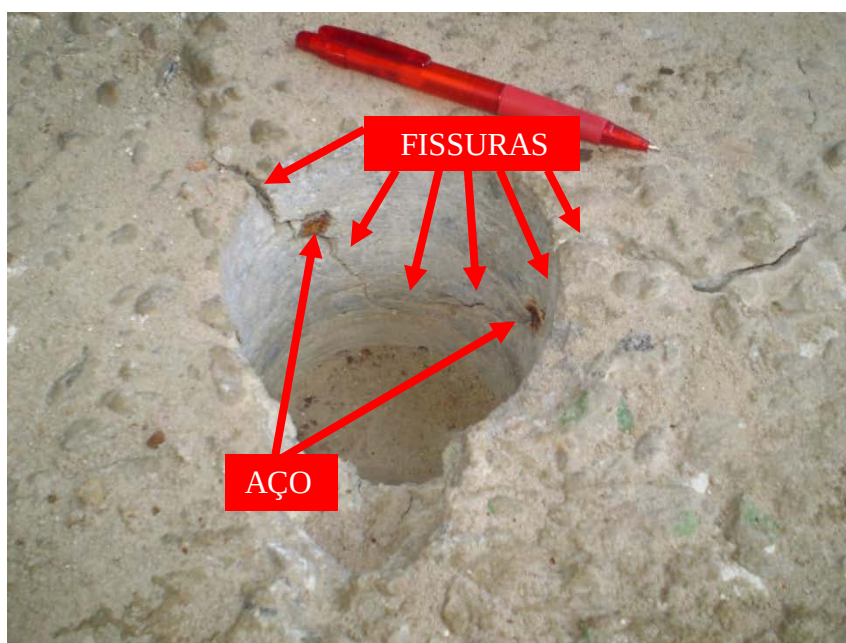


Figura 4.17 – Detalhe das fissuras contornando o aço.

Na Figura 4.18 observa-se o testemunho fraturado quando da sua extração.



Figura 4.18 – Testemunho fraturado do bloco 6

Nas Figuras 4.19, até a 4.27 é possível visualizar outros exemplos de blocos fissurados.



Figura 4.19 – Fissuras ativas na superfície do bloco 8 após preenchimento com epóxi.



Figura 4.20 – Fissura no bloco 9.



Figura 4.21 – Fissuração intensa na superfície do bloco 10.



Figura 4.22 – Fissuração ativa em todo o bloco 7.



Figura 4.23 – Fissuras mapeadas no bloco 7.



Figura 4.24 - Perfuração para extração de testemunho no bloco 9.

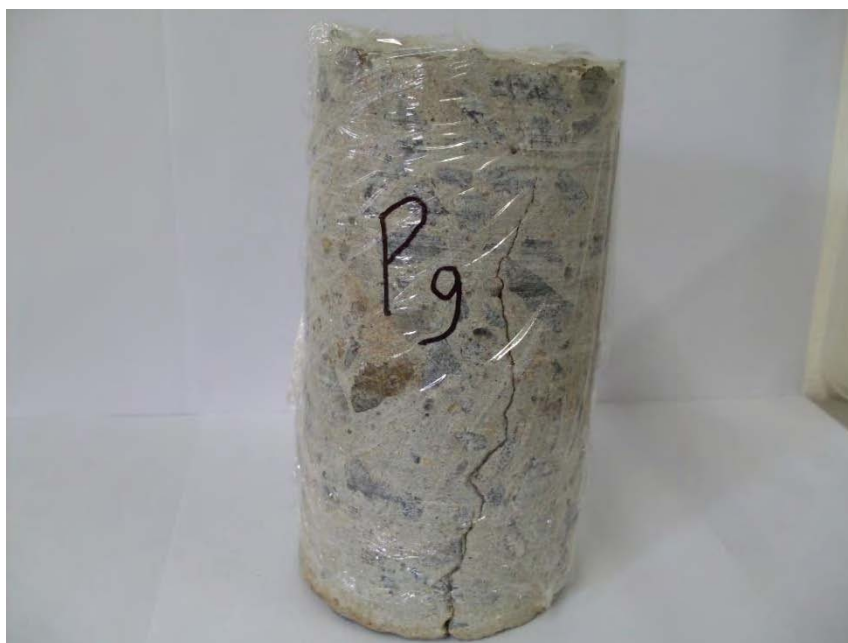


Figura 4.25 - Testemunho do bloco 9.



Figura 4.26 - Fissura discreta na superfície bloco 9.



Figura 4.27 - Fissura penetra ao longo do testemunho do concreto do bloco 9.

4.1.3 Dados Coletados do Concreto e de seus Materiais Constituintes

Com o auxílio da Construtora, foram coletadas as seguintes informações:

4.1.3.1 Concreto da Época (2005)

Todo o concreto utilizado para execução dos blocos da fundação foi fornecido por uma Central de concreto usinado da cidade, durante o período de Abril a Outubro de 2005, conforme Tabela 4.1, fornecida pela Construtora.

TABELA 4. 1 – Data das concretagens dos blocos (Fornecida pela Construtora)

DATA	QUANTIDADE	Nº	NOTA
21/04/2005	8	73648	
21/04/2005	3,5	73650	BLOCO 7
21/04/2005	1	73652	
23/07/2005	8	75132	
23/07/2005	10	75130	BLOCO 3 / 10
23/07/2005	4	75129	
24/08/2005	2,5	75392	
14/09/2005	10	75753	
14/09/2005	9	75754	BLOCO 4
14/09/2005	11	75755	
14/09/2005	10	75756	
22/09/2005	10	75865	BLOCO 5 PARTE 1
22/09/2005	7	75867	
23/09/2005	9	75879	BLOCO 5 PARTE 2
23/09/2005	8	75880	
10/09/2005	10	75711	
10/09/2005	8	75712	BLOCO 8
10/09/2005	10	75713	
10/09/2005	4	75714	
07/10/2005	7	76030	BLOCO 1
07/10/2005	7	76031	
11/10/2005	8	76055	
11/10/2005	3,5	76056	BLOCO 6
11/10/2005	1,5	76059	
13/10/2005	8	76088	BLOCO 2

Foi utilizado um consumo de cimento de cerca de 460 kg./m³, e um aditivo polifuncional. O teor de cimento relativamente elevado torna o concreto quimicamente mais reativo, liberando mais calor de hidratação.

A classe de resistência à compressão indicada no projeto estrutural dos blocos foi de 40 MPa.

4.1.3.2 Concreto em 2008

A resistência à compressão em agosto de 2008, obtida através de ensaios esclerométricos, não destrutivos, em 8 áreas dos blocos B6, B8, B9 e B10, indicou valores variando entre 37,7 e 40,7 MPa. Seria necessário um número maior de áreas, inclusive nas superfícies laterais dos blocos, para uma maior precisão, porém elas se encontravam enterradas ou com difícil acesso.

O concreto examinado, através do teste de fenolftaleína, praticamente não apresentou carbonatação.

A superfície do concreto em contato com o solo e a água não apresentava sinais de desagregação devido a ataques externos de agentes agressivos.

4.1.3.3 Cimento

Expansões na massa de concreto podem ser geradas por diversas fontes. Uma delas é a hidratação dos óxidos de cálcio e de magnésio que não se combinaram durante o processo de calcinação do clínquer. Também um alto teor de enxofre, apresentado nos ensaios em forma de SO₃, pode, ao longo do tempo, gerar etringita, causando variação volumétrica do concreto. Já a reação álcali-agregado pode ser influenciada pelo teor de sódio e de potássio presentes. Daí ser conveniente examinar-se a composição química do cimento da época.

Segundo informações obtidas com a Fábrica, o tipo de cimento empregado para as concretagens naquela época foi o cimento composto com pó calcário, CII-F, da classe de resistência 32 MPa

As principais propriedades químicas do cimento, extraídas do relatório de controle do fabricante em 2005, estão apresentadas resumidamente na tabela 4.2.

TABELA 4. 2 - Propriedades químicas relevantes do cimento (%) em 2005

Componente	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio	Limite normativo
CaO livre	0,98	3,85	2,26	-
MgO	3,95	6,34	5,48	6,5
SO ₃	2,60	3,42	3,03	4,0
Na ₂ O	0,17	0,98	0,28	-
K ₂ O	0,5	1,10	0,90	-

Constatou-se que a percentagem máxima de cal livre beira quase 4%. O óxido de magnésio pode chegar a valores muito próximos do limite normativo, e, o teor de enxofre apresentou-se abaixo do limite máximo indicado na norma de cimento ABNT - NBR 11578/1991, Cimento Portland composto - especificação.

O equivalente alcalino pode ser encontrado substituindo-se as percentagens médias, na equação:

$$Na_{eq} = Na_2O + 0,658 K_2O$$

$$Na_{eq} = 0,87\%$$

Segundo Mehta e Monteiro (2008), valores de equivalente alcalino inferiores a 0,6% dificilmente conduzem à reação álcali-agregado. No entanto, não há um consenso sobre esse valor. No caso do cimento utilizado, o teor de álcalis estaria ligeiramente acima daquele limite.

Nas demais propriedades do cimento não se notaram nenhuma anomalia. Apenas se percebeu que a finura Blaine ficou em torno de aproximadamente 400 m²/kg, enquanto que o valor mínimo indicado pela norma ABNT-NBR 11578/1991 é de 260 m²/kg.

A resistência média obtida há 1 dia é de 18,9 MPa., ao passo que a norma ABNT-NBR 11578/1991 exige 10 MPa. aos 3 dias. Logo, trata-se de um cimento bem reativo, capaz de gerar um alto calor de hidratação, principalmente em elementos estruturais maciços, como é o caso dos blocos.

4.1.3.4 Água

Não existem dados das características da água de amassamento nem da água do lençol freático durante os momentos das concretagens. Então foram realizadas duas análises da água do lençol, apesar de os resultados encontrados poderem ser diferentes dos daquela água de quase quatro anos atrás.

Examinou-se o pH, o teor de sulfatos e o teor de cloretos da água do lençol freático, onde os blocos se encontram parcialmente submersos. O pH, da ordem de 8, mostrou-se alcalino, incapaz de danificar o concreto. Já o teor de cloretos variou de cerca de 350 a 430 mg/l, valor bem inferior ao da água do mar cujo teor de sais está próximo de 3000 mg/l. O teor de sulfatos ficou em torno de 640 mg/l, o qual pode ser considerado de risco de deterioração moderado. De acordo com o *ACI Building Code* 318, a exposição ao sulfato é classificada em quatro graus de severidade, conforme tabela 4.3.

TABELA 4.3 - Classificação dos graus de severidade de ataque dos concretos expostos aos sulfatos

Grau de Severidade	Teor de sulfato		Tipo de cimento	Relação água/cimento
	No solo	Ou na água		
Ataque Negligenciável	< 0,1 %	< 150 ppm (mg/l)	Sem restrição	Sem restrição
Ataque Moderado	0,1% - 0,2%	150 ppm – 1500 ppm	Cimento Portland ASTM Tipo II ou Cimento Portland pozolânico ou Cimento Portland com escória	< 0,50 (para concreto de peso normal)
Ataque severo	0,2% - 2,0%	1500 ppm– 10.000 ppm	Cimento Portland ASTM Tipo V	< 0,45
Ataque muito Severo	> 2%	> 10.000 ppm	Cimento ASTM Tipo V com adição pozolânica	< 0,45

Fonte: Adaptado de METHA e MONTEIRO, 2008, p. 170

4.1.3.5 Agregados

A concreteira não tinha informações das características dos agregados utilizados naquela época. As informações sobre os agregados foram obtidas quando da análise petrográfica de uma amostra do testemunho de concreto do bloco 9. Nesta análise, o agregado gráudo foi classificado como um granito cataclasado, considerado potencialmente reativo.

4.1.4 Análise Microestrutural das Amostras do Concreto

4.1.4.1 Análise Mineralógica

Utilizando-se as amostras em forma de pó, preparadas inicialmente, realizou-se o ensaio de difração de raios X para gerar difratogramas, onde se apresentaram os minerais encontrados em diversas amostras do concreto, tanto em regiões fissuradas como em não fissuradas.

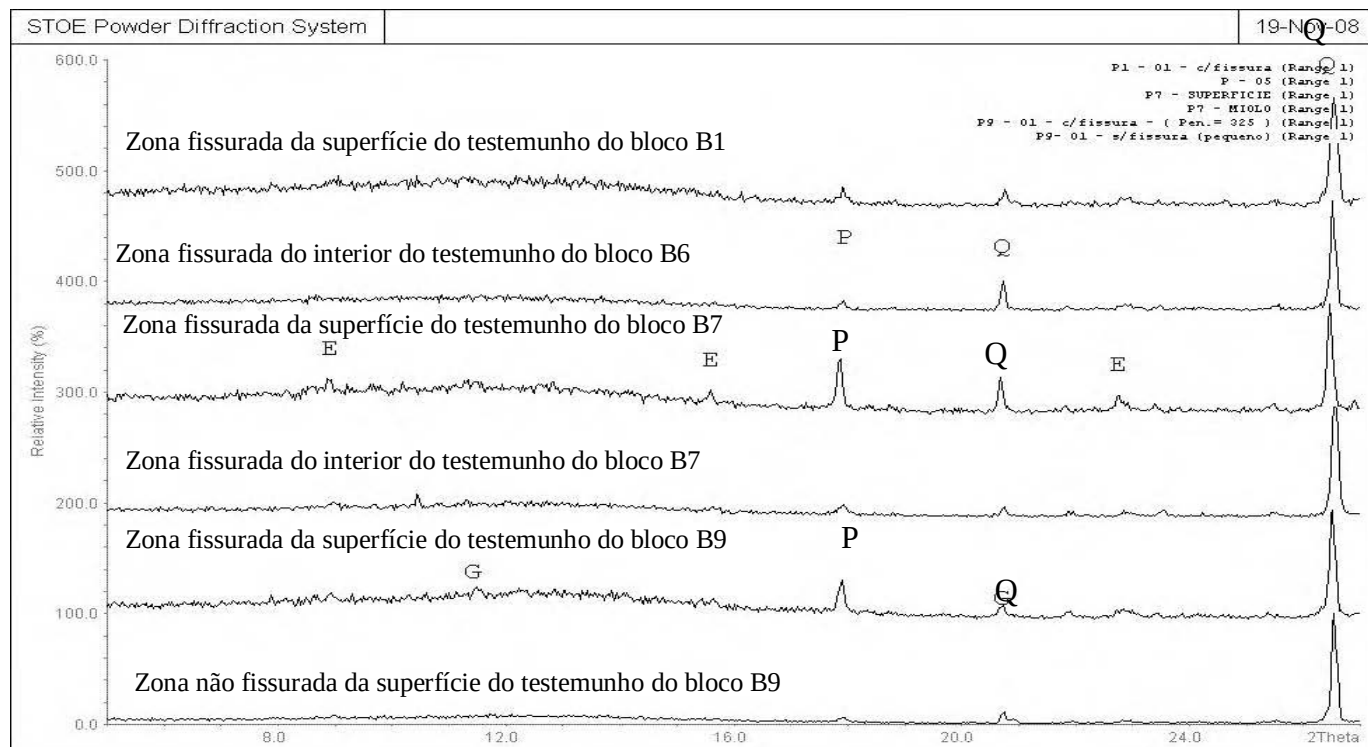


Figura 4.28 – Difratoograma de raios x das amostras dos blocos B1, B6, B7 e B9.

Onde: P = Portlandita

Q = Quartzo

G = Gesso

E = Etringita

Nota-se que o aspecto de todos eles é típico de um concreto em que o cimento é bem hidratado, apresentando a fase portlandita, originária da hidratação dos silicatos (compostos amorfos correspondentes ao silicato de cálcio hidratado (CSH)), o quartzo, proveniente da areia. A etringita apareceu apenas em um difratograma, mesmo assim, com picos de pequena intensidade. Também foi constatada a presença de sulfato de cálcio (gesso) em algumas amostras, sendo sempre com picos pouco intensos. Ele vem da própria fabricação do cimento, quando é adicionado para controlar a velocidade da reação dos aluminatos.

Não se identifica a presença de outros minerais que possam ser responsáveis por patologias expansivas.

Sendo o CSH um composto amorfo, sua presença não é tão evidente em amostras de concreto tais como as estudadas no difratograma.

A reação álcali-agregado, que resulta na formação de um óxido de silício e potássio ou sódio, também tem estrutura amorfa. Sendo mais evidente em análises microscópicas.

No entanto, se as fases amorfas de reação álcali-agregado fossem intensas (tiverem concentrações elevadas), a difração de raios x apresentaria um halo difuso. Portanto, do ponto de vista de cristalinidade (baixo nível de ruído de fundo), as amostras não apresentam ter:

- i. Reação álcali-agregado;
- ii. Reação por formação de etringita retardada;
- iii. Reação por sulfatos;
- iv. Reação por cristalização de sais de cloro

4.1.4.2 Análise por Microscopia Óptica

Através de um microscópio óptico, foram analisadas as amostras de regiões fissuradas e não fissuradas, conforme Figuras 4.29 e 4.30.

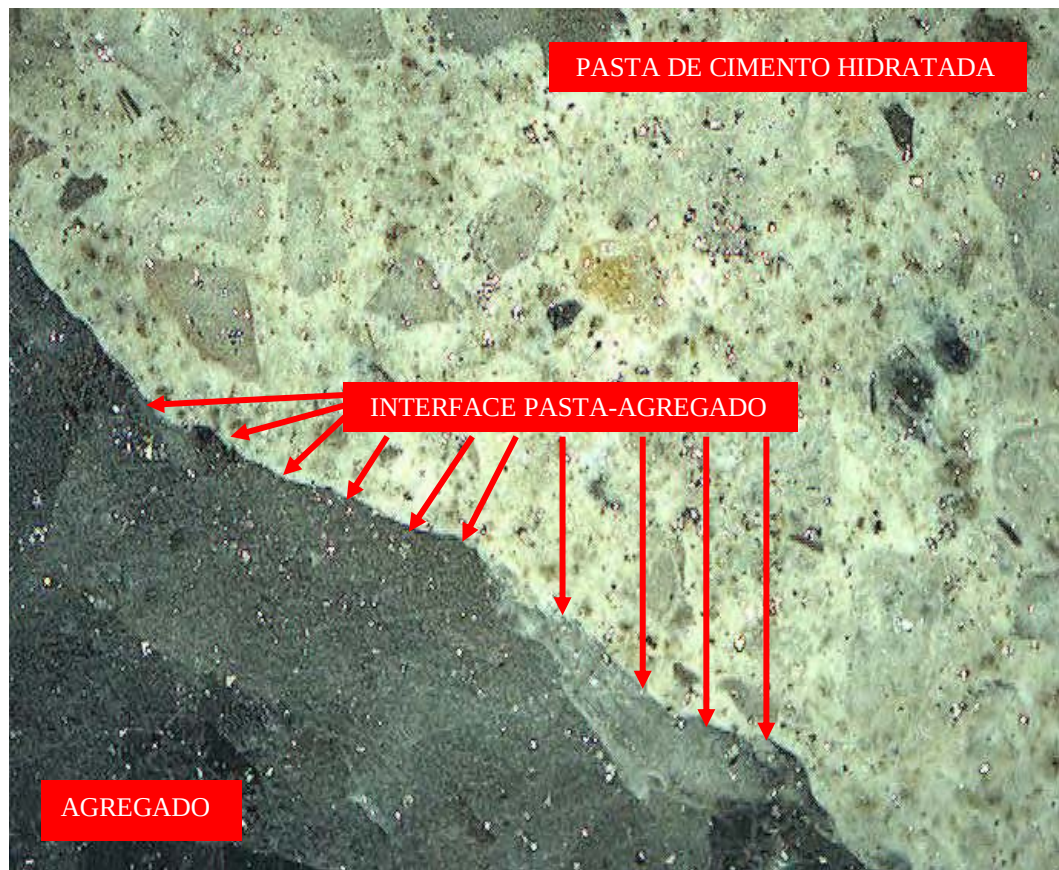


Figura 4.29 – Imagem da região fissurada da amostra obtida no microscópio óptico.

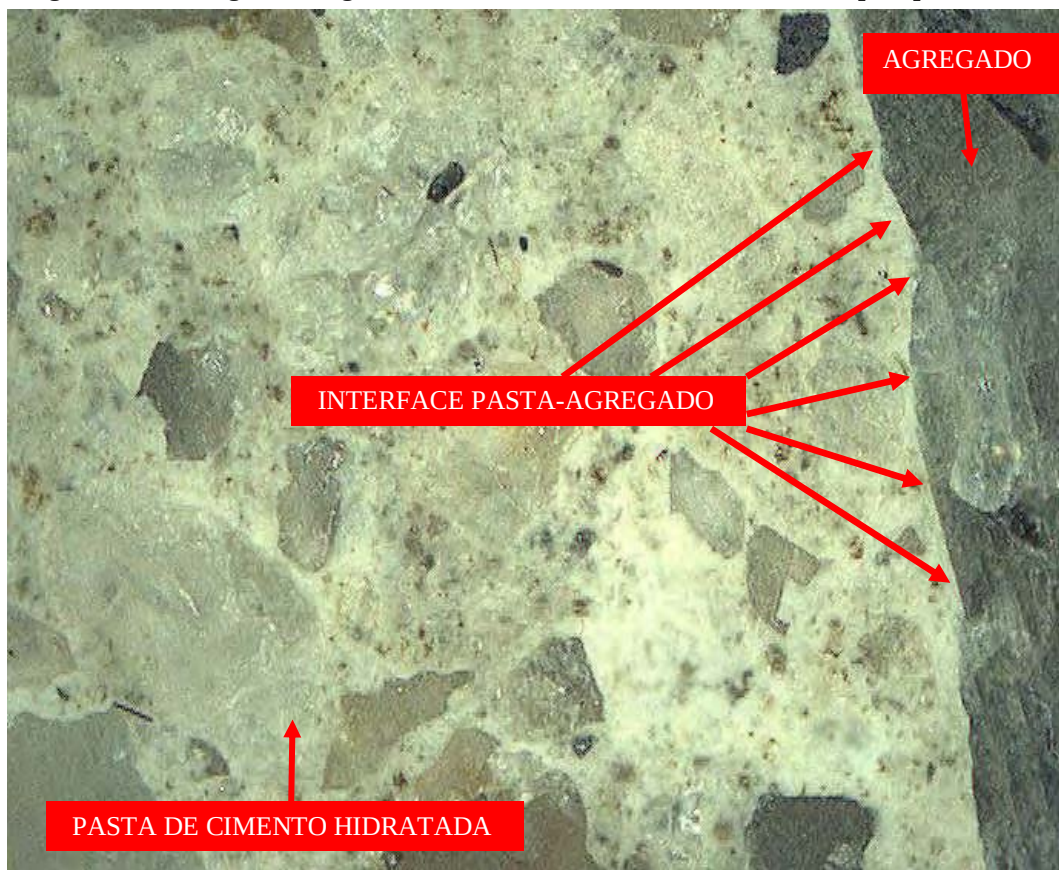


Figura 4.30 – Imagem da região não fissurada da amostra obtida no microscópio óptico.

Comparando-se as imagens das amostras das regiões fissuradas e não fissuradas, verificou-se que, tanto na presença como na ausência de fissuras, o agregado apresentava-se íntegro e bem ligado à pasta, não havendo sinais visíveis ao microscópio óptico de formação de gel na interface pasta-agregado, ou de qualquer outro tipo de fenômeno deletério.

4.1.4.3 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foram analisadas no Microscópio eletrônico de varredura (MEV), amostras da região fissurada e não fissurada do testemunho de concreto do bloco 9. As imagens obtidas da região **não fissurada** estão representadas por **P9-2**, ou seja, é a 2ª fatia de 8mm., aproximadamente, a partir da superfície do testemunho; **e**, **P9-4** representa a região **fissurada**, sendo a 4ª fatia ao longo da profundidade do testemunho.

Através do MEV foi possível visualizar melhor a interface pasta-agregado. Nas Figuras 4.31 a 4.49, micrografias apresentadas abaixo, observou-se que tanto na região fissurada, como não fissurada, as imagens retratam microfissuras internas em geral, que se propagam através da matriz cimentícia e contornam o agregado, mas, estas se apresentam vazias, não aparentando conter, no seu interior, o gel formado pela reação álcali-agregado, ou a formação de etringita retardada, ou ainda qualquer outro produto de reação deletéria expansiva. Provavelmente, estas microfissuras sejam provenientes de tensões térmicas. As ranhuras observadas no agregado são consequência do processo de polimento durante a preparação das amostras e não de presença de produtos expansivos.

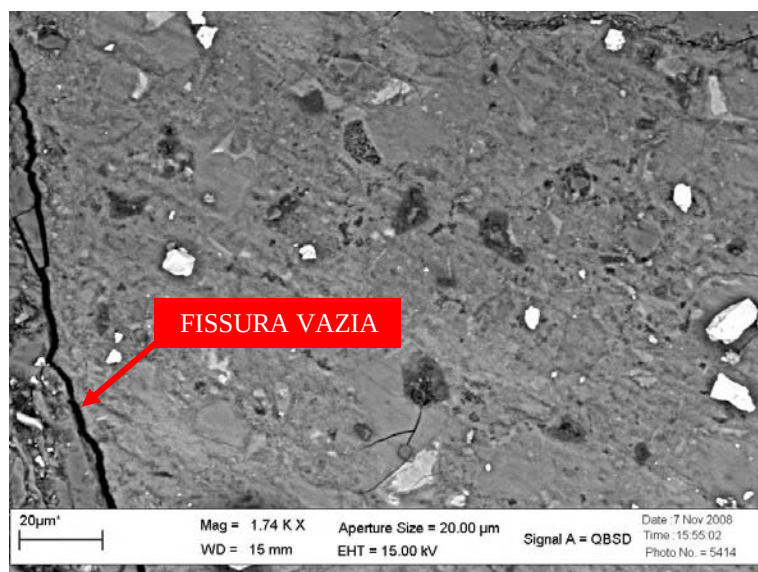


Figura 4.31 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1,7Kx0,5

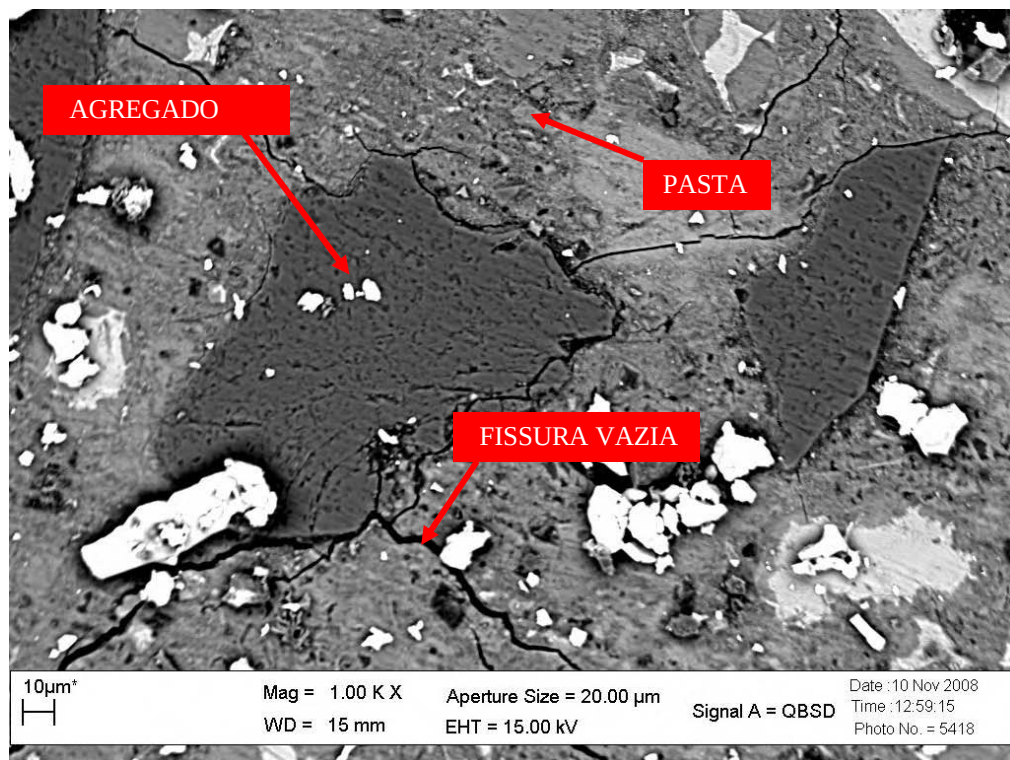


Figura 4.32– Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1Kx10

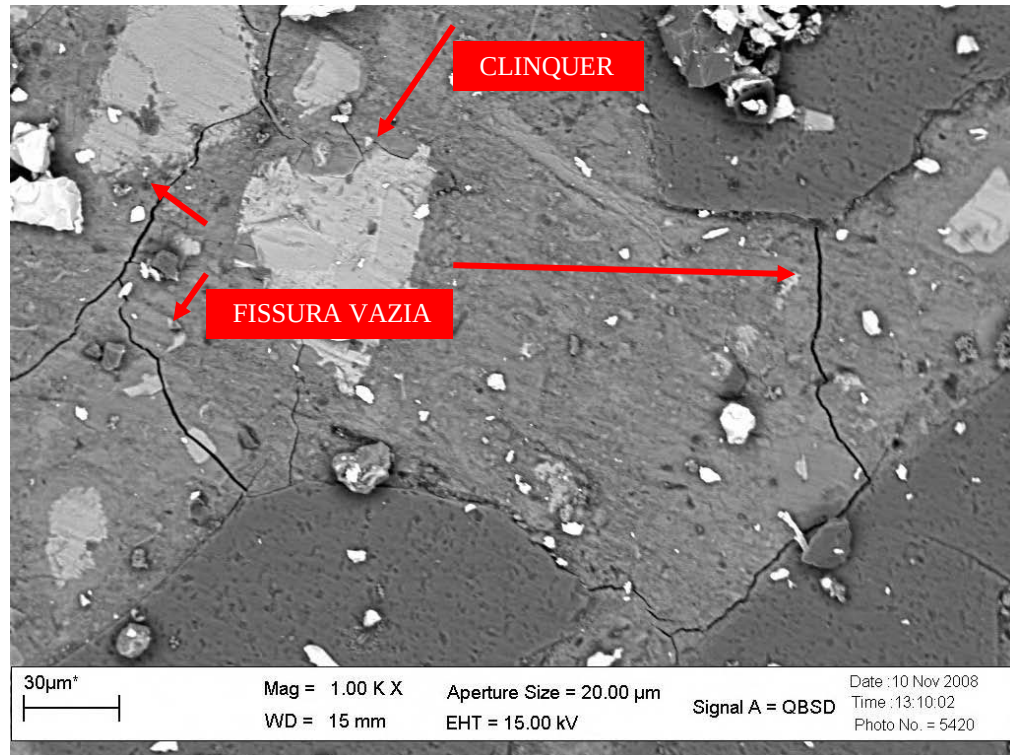


Figura 4.33 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1KxSPOT252B12

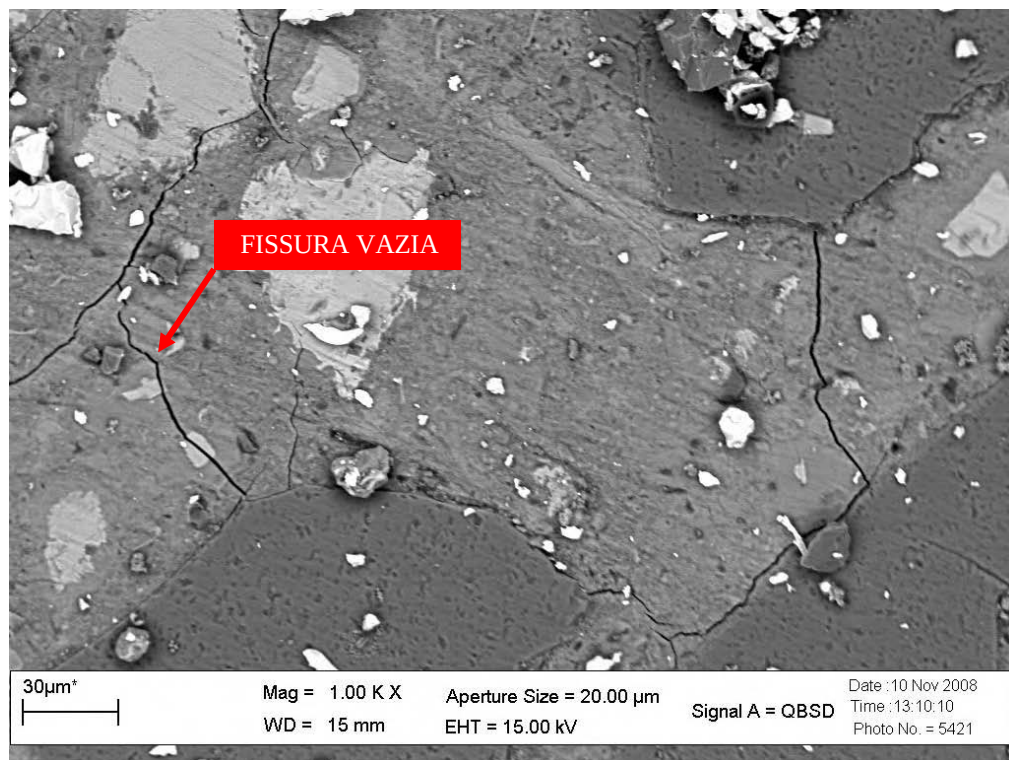


Figura 4.34 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1KxSPOT252B13

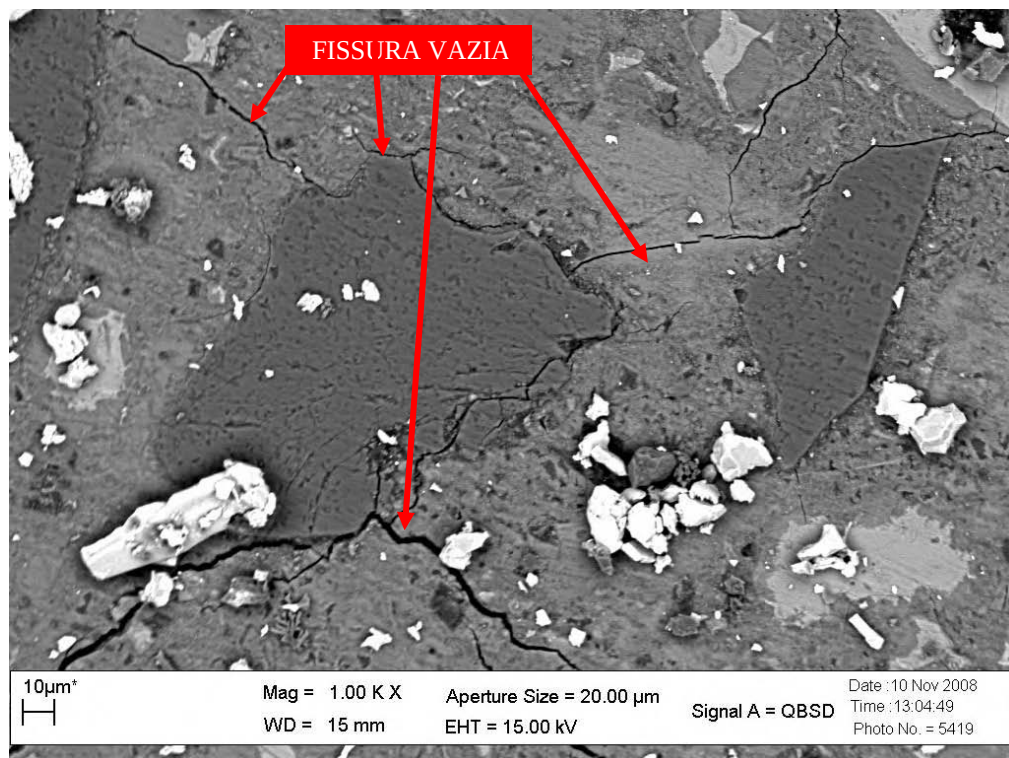


Figura 4.35 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_1KxSPOT252B11

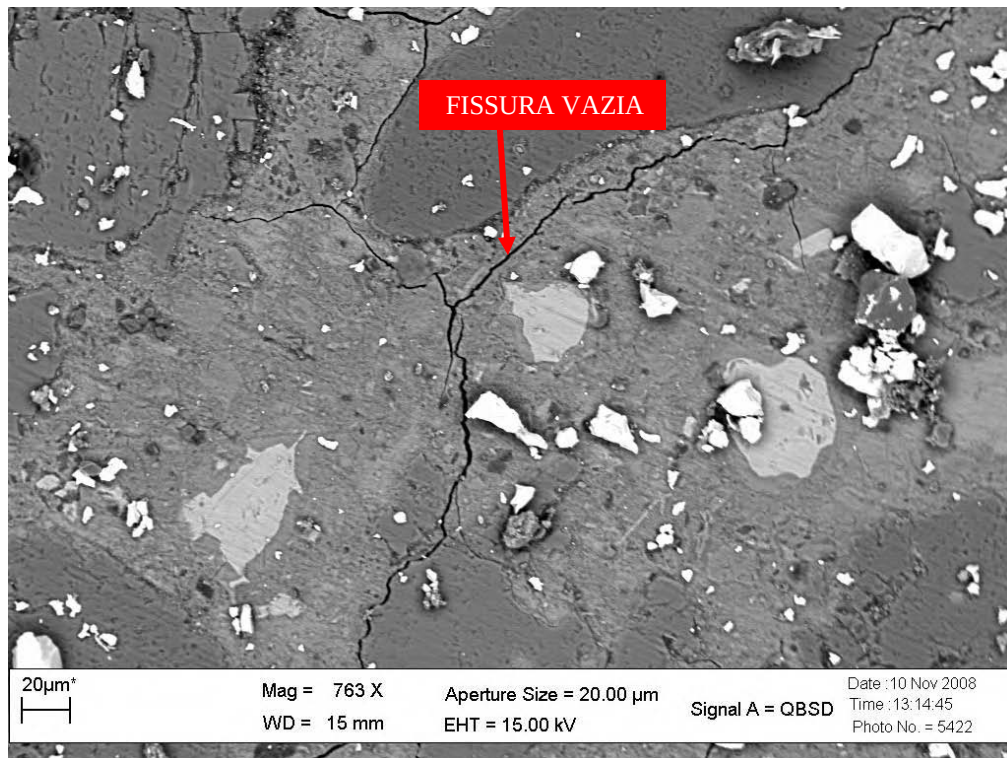


Figura 4.36 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_73KxSPOT252B14

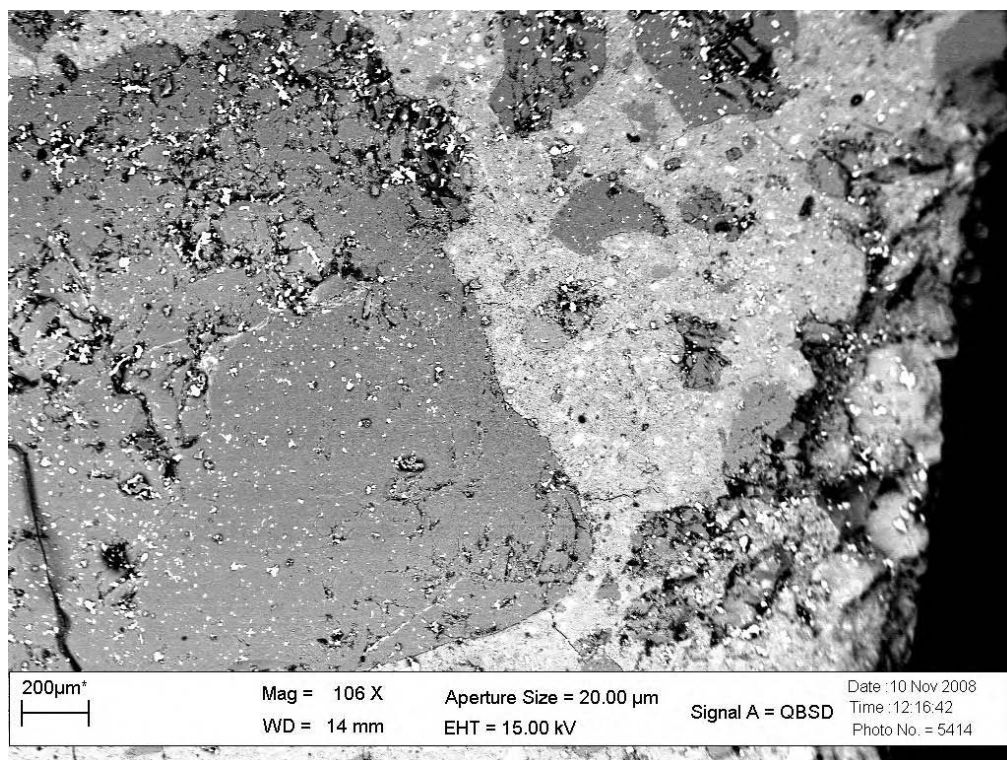


Figura 4.37 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_107x06

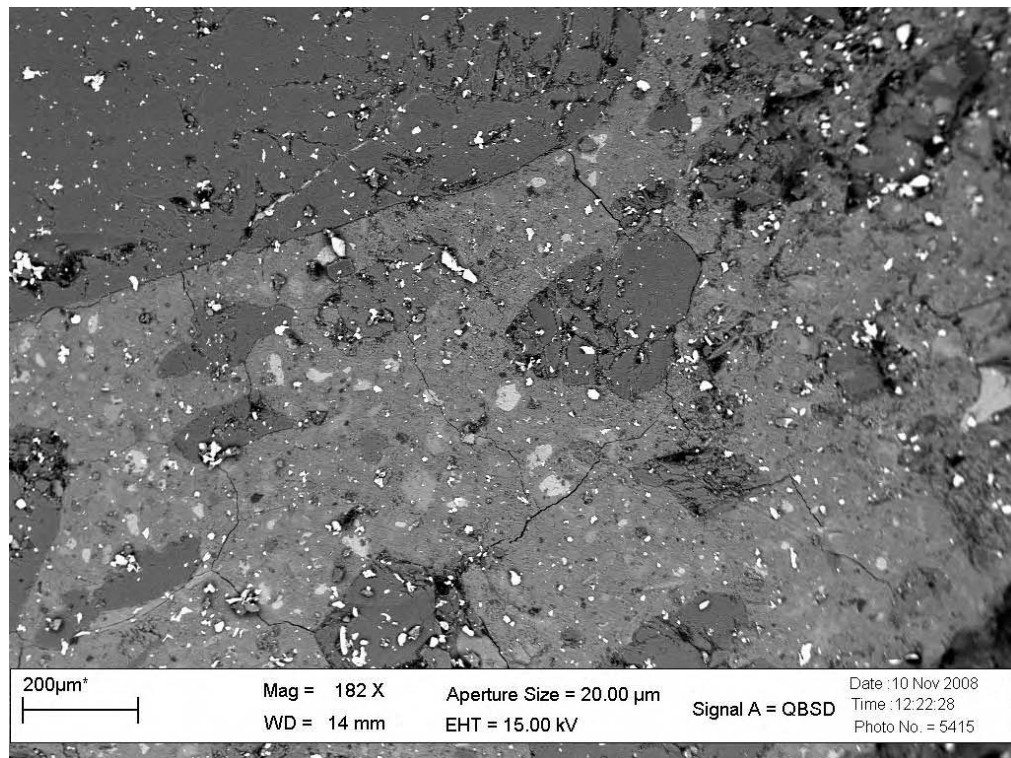


Figura 4.38 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_182x07

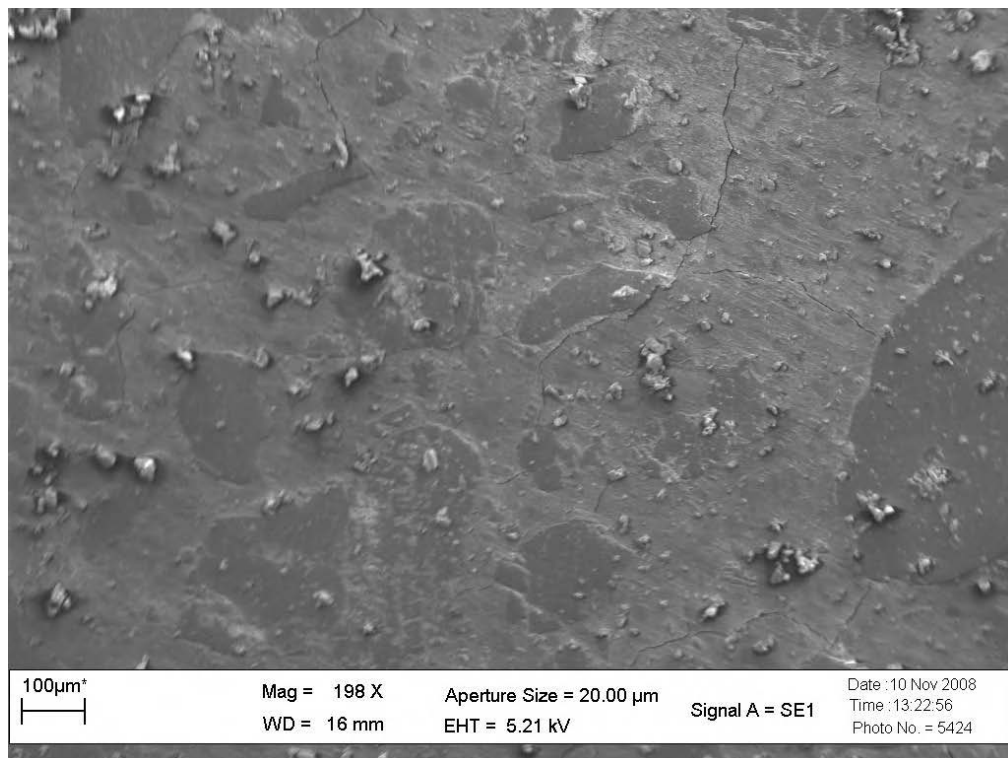


Figura 4.39–Micrografia obtida no MEV–Amostra não fissurada P9-2-pol_198KxSPOT252BSEI16

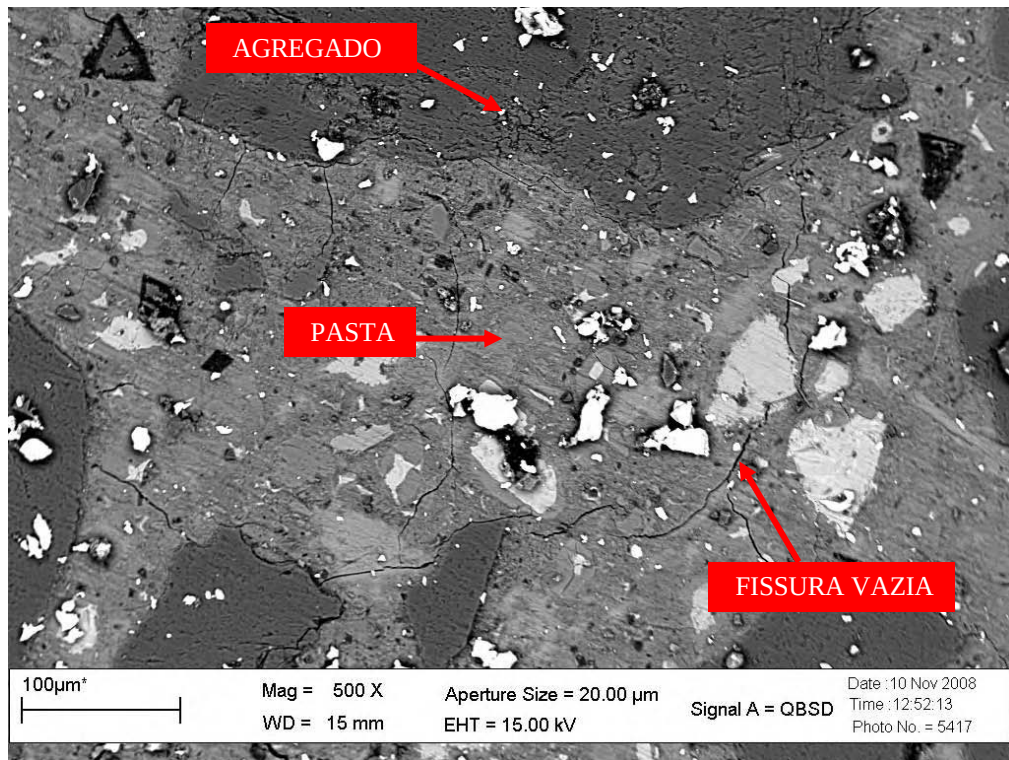


Figura 4.40 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_500x09

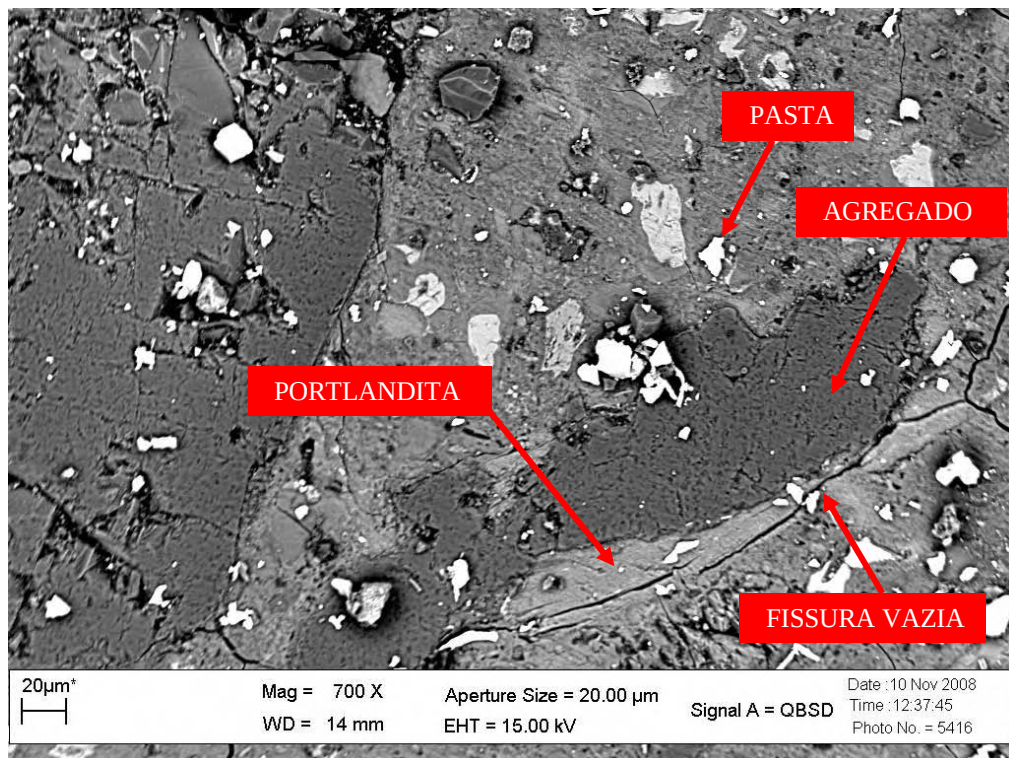


Figura 4.41 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_700x08

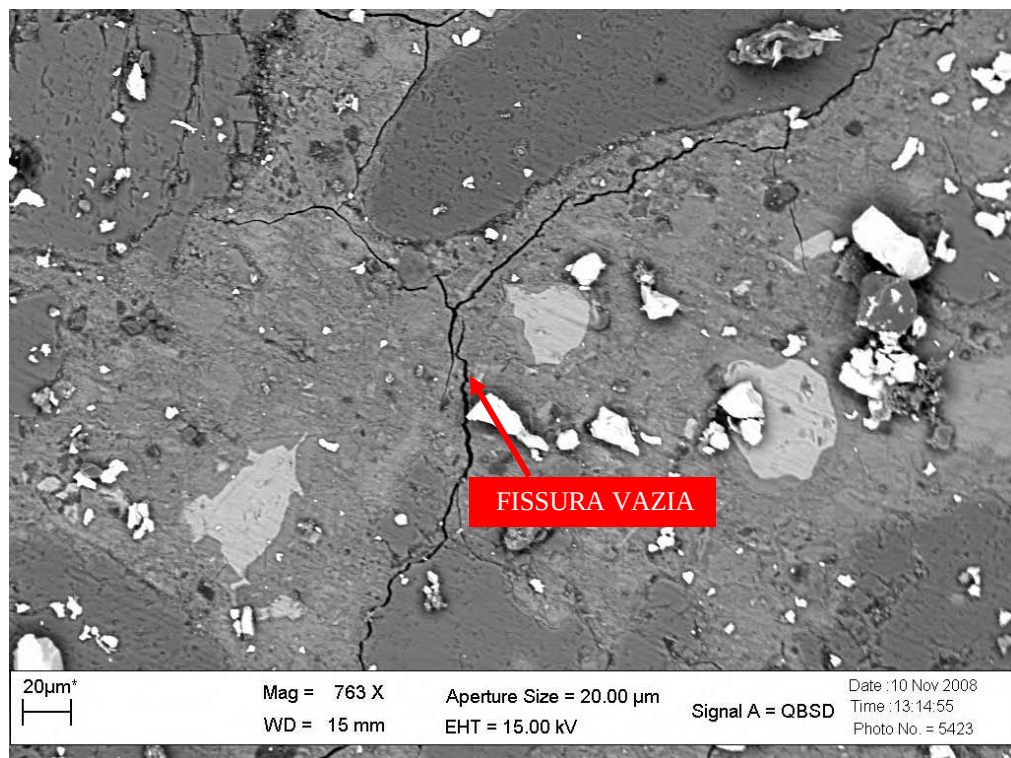


Figura 4.42 – Micrografia obtida no MEV – Amostra não fissurada P9-2-pol_763KxSPOT252B15

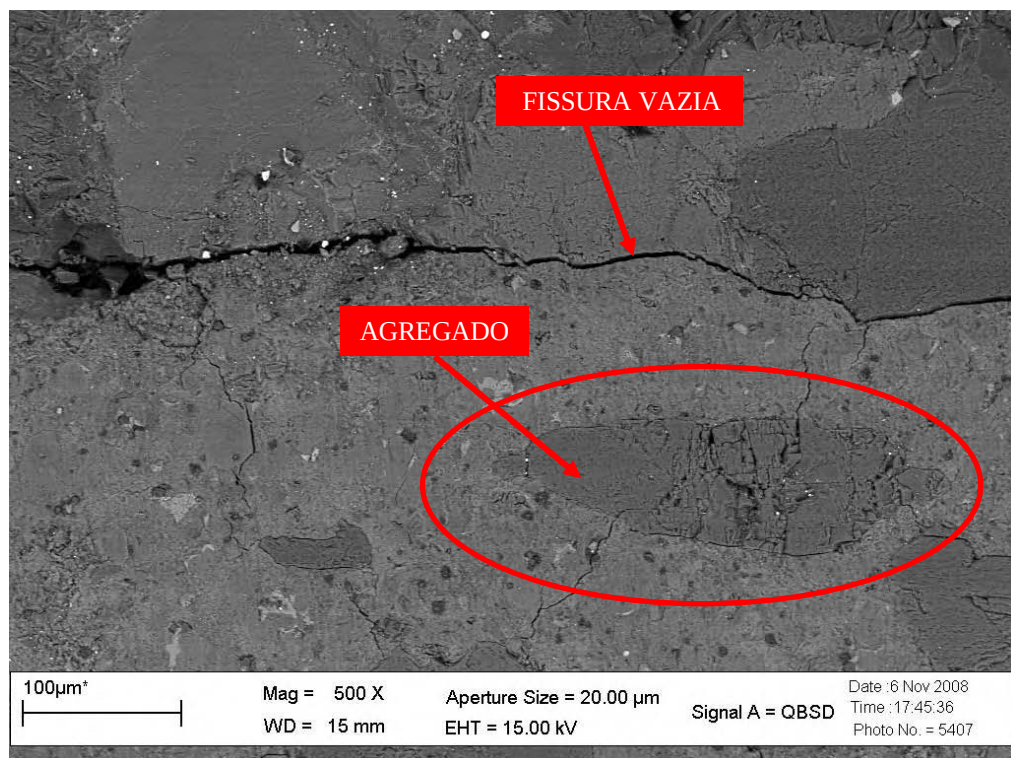


Figura 4.43 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_500x98

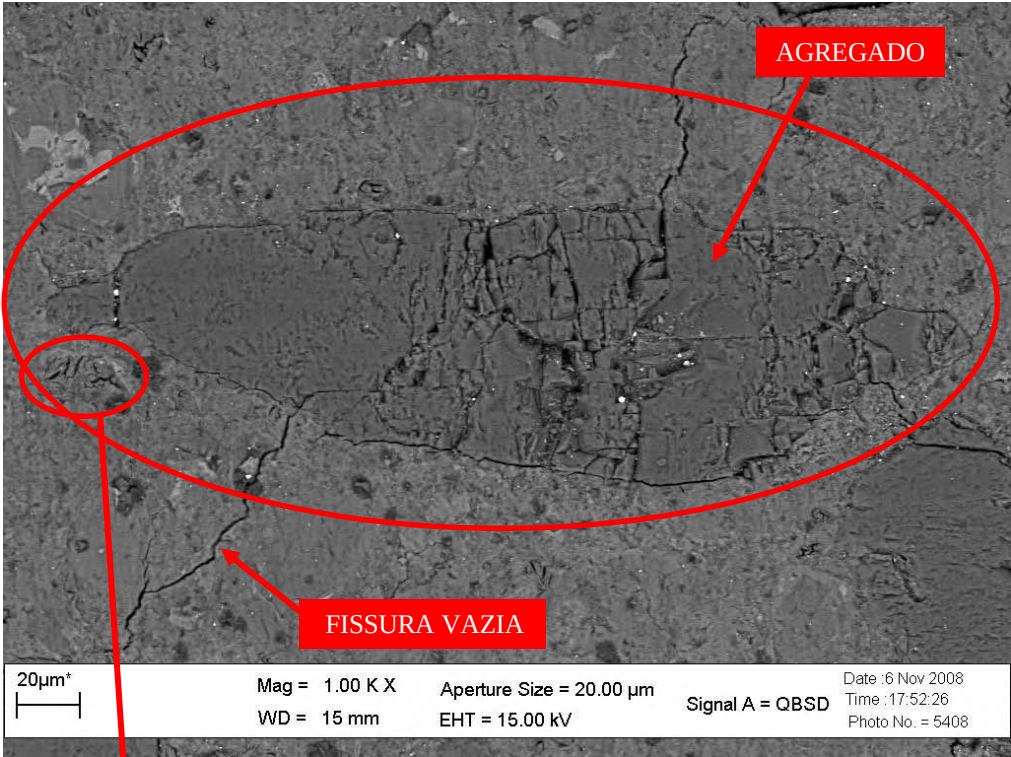


Figura 4.44 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_1Kx99

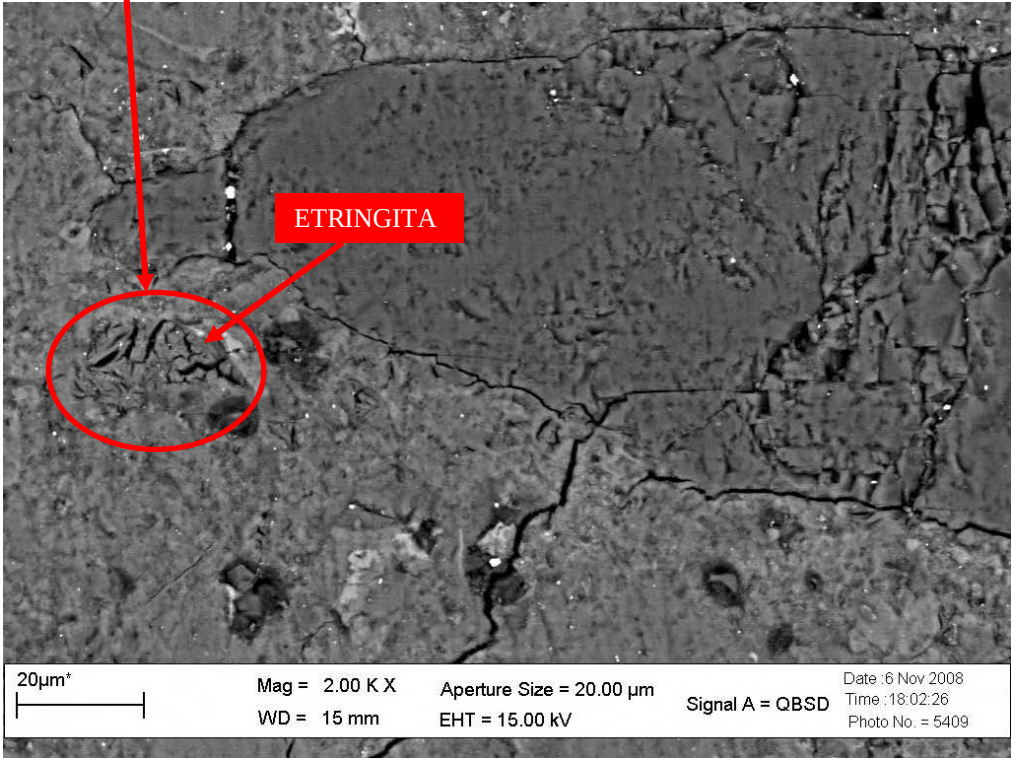


Figura 4.45 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_2Kx00

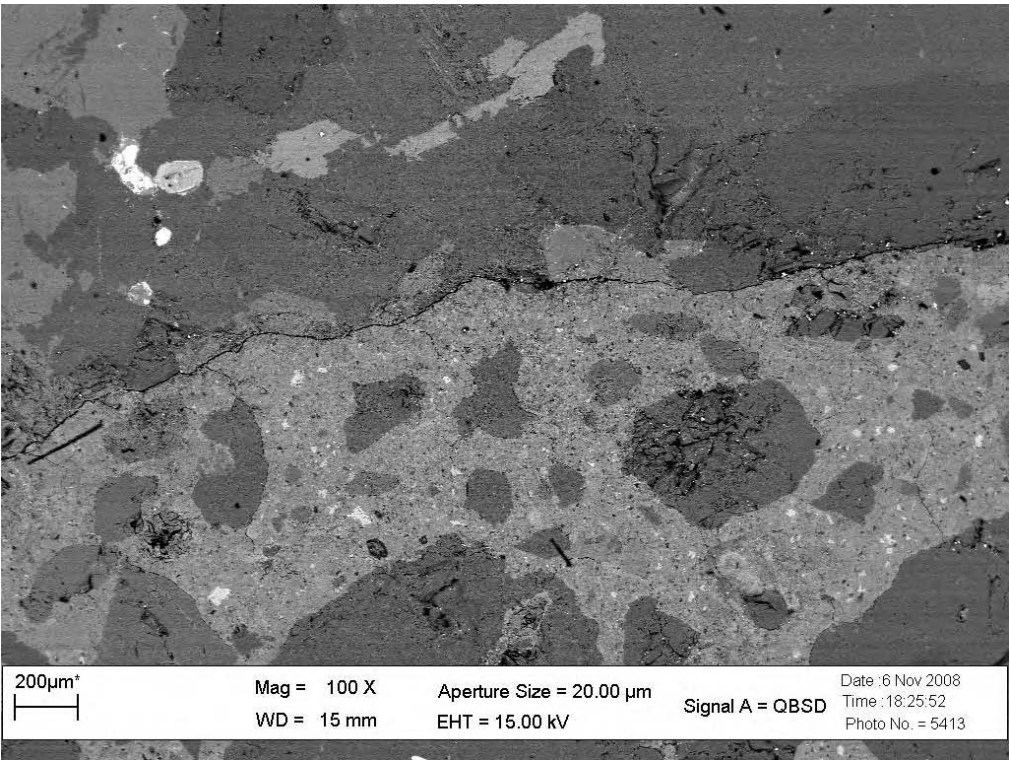


Figura 4.46 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_100x04

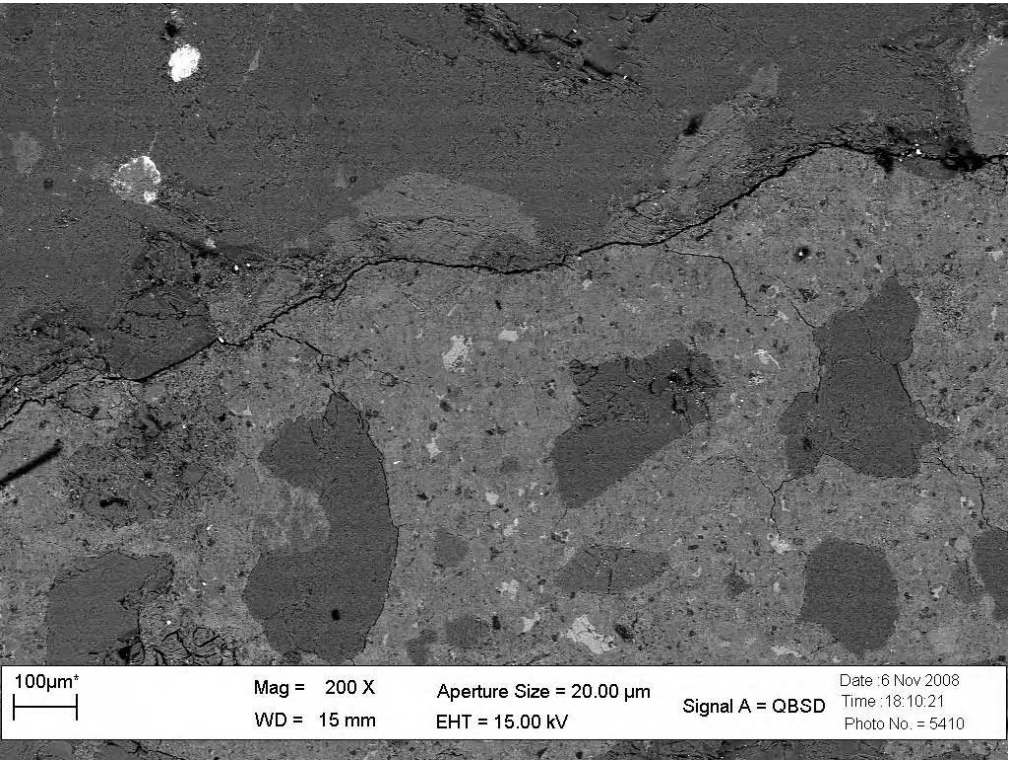


Figura 4.47 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_200x01

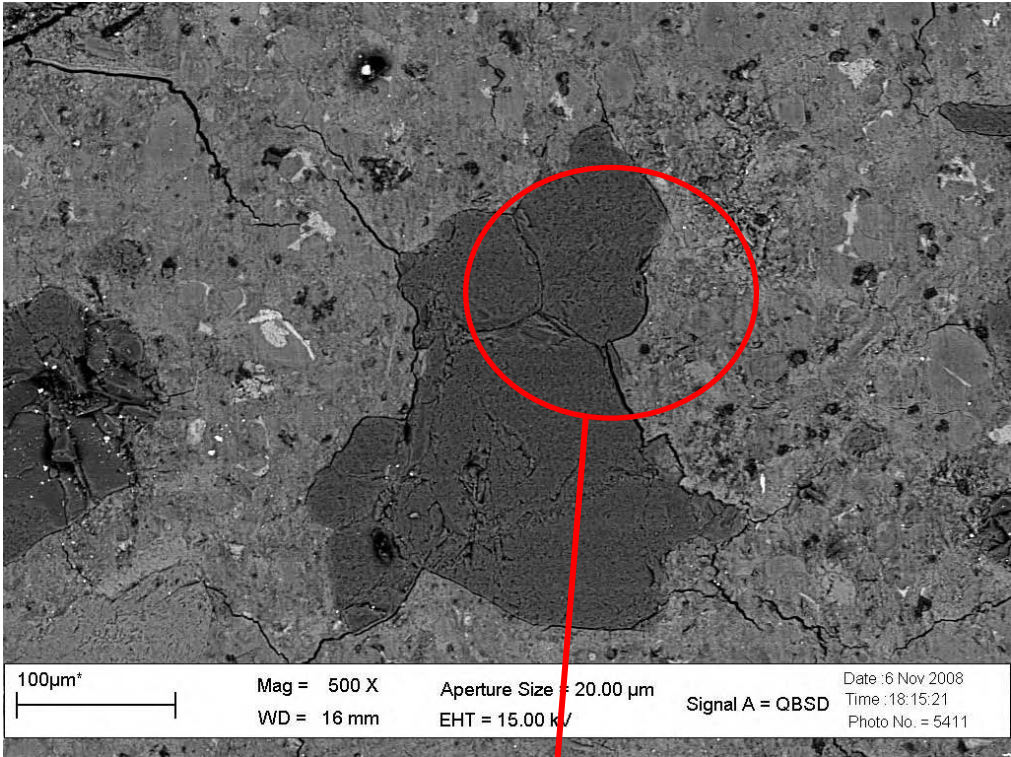


Figura 4.48 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_500x02

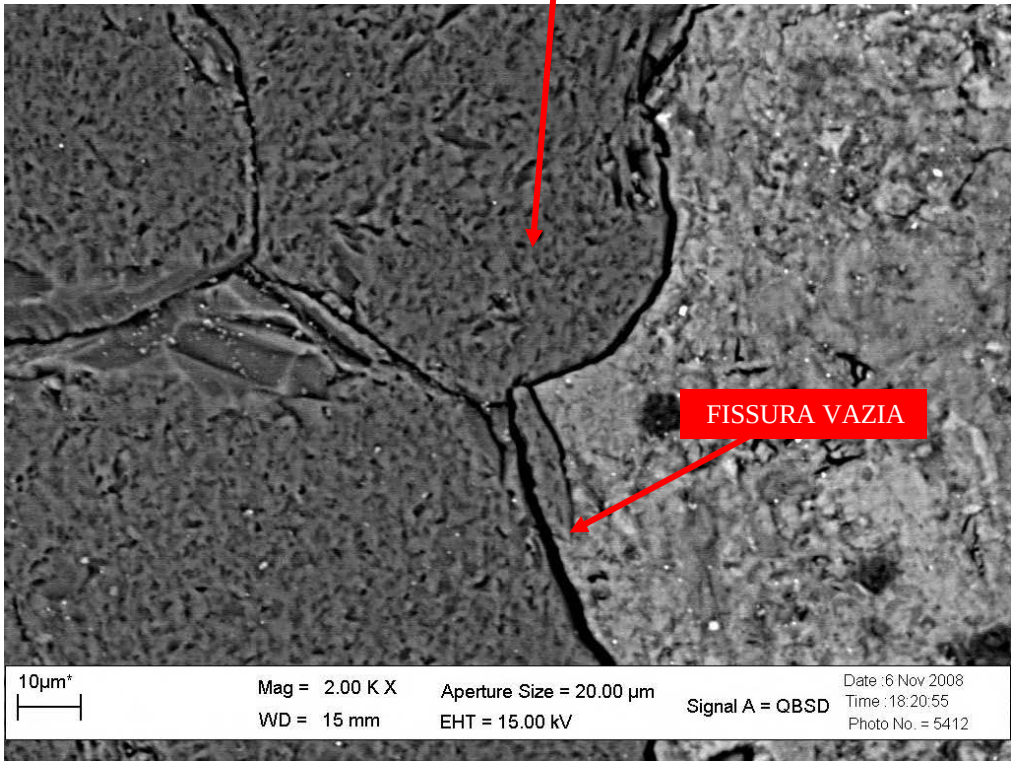


Figura 4.49 – Micrografia obtida no MEV – Amostra fissurada P9-4-pol_2Kx203

4.1.4.4 Análise Termogravimetrica (TG)

A análise térmica foi realizada através do ensaio de termogravimetria (TG), utilizando-se as amostras em forma de pó.

As amostras utilizadas para os ensaios citados foram extraídas da região íntegra dos testemunhos de concreto dos blocos, e da região fissurada dos mesmos.

Foram realizados ensaios e examinadas amostras dos testemunhos do concreto dos blocos B1 (P1-1 c/ fissura), B6 (P6-5), B7 (P7-superfície), B7 (P7-miolo) e B7 (P7-interior), B9 (P9-1 c/ fissura e P9-1 s/ fissura), e então gerada a curva de TG de cada amostra.

A Figura 4.50 indica a curva de TG da amostra do B9 (P9-01 com fissura).

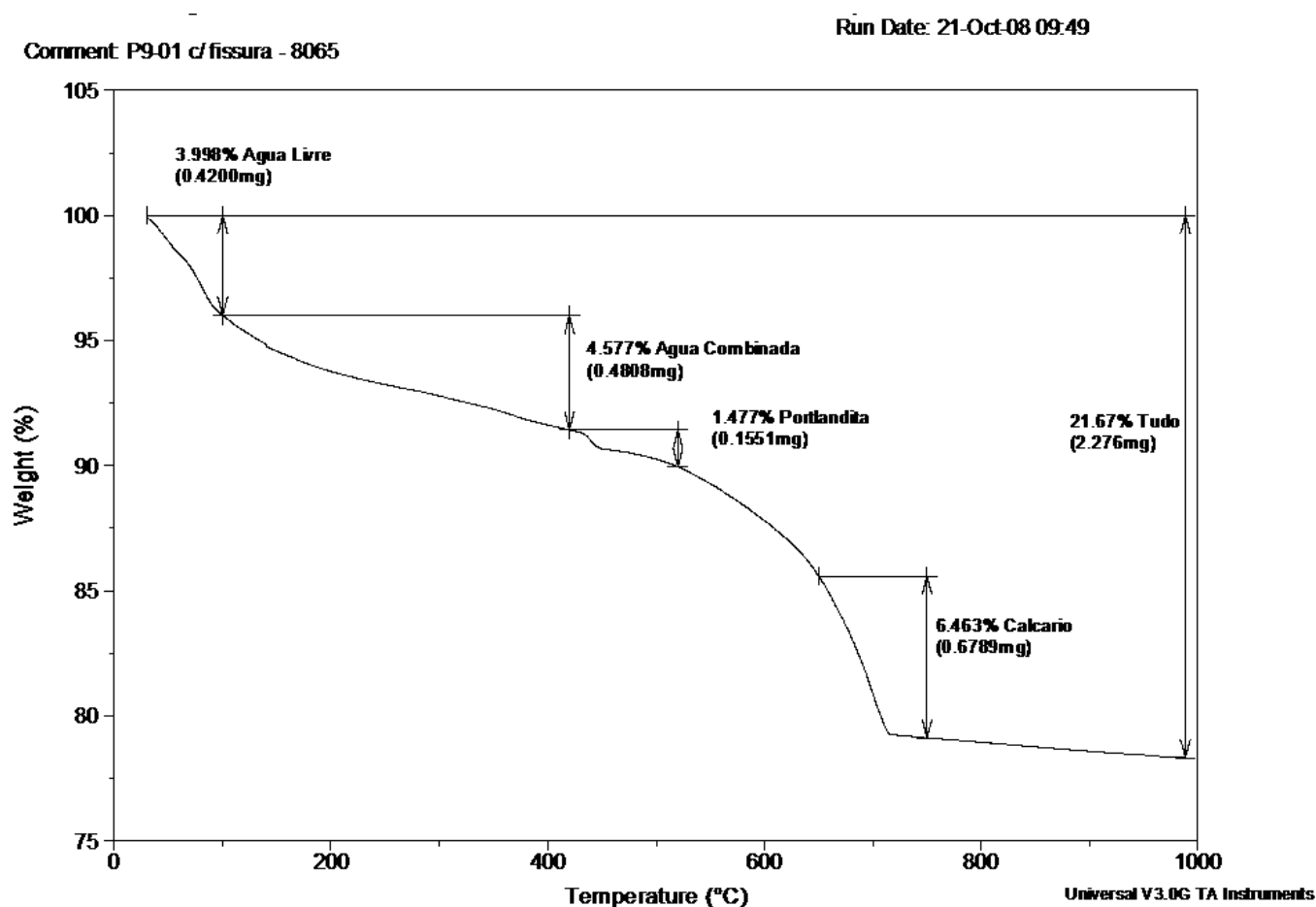


Figura 4.50 – Curva de TG

Com base nestes dados, estima-se que:

- i. O concreto apresenta um grau de hidratação de 96%
- ii. 6,5% de Portlandita (Ca(OH)_2)
- iii. 10,5% de Carbonato de Cálcio (CaCO_3)
- iv. Considerando que todo o carbonato é de origem da carbonatação, o teor de hidróxido de cálcio inicial seria aproximadamente 17,38%, bastante típico de cimentos Portland convencionais.
- v. A ausência de uma perda significativa na região entre 100 e 400°C indica também a pouca ou nenhuma incidência de produtos expansivos, com alto grau de hidratação. Por exemplo, a etringita tem 32 moles de água por mol.

4.1.4.5 Análise Petrográfica do Concreto e do Agregado

Para confirmação se houve ou não a existência da reação álcali-agregado no concreto em estudo, foi enviada uma amostra para a ABCP realizar uma análise petrográfica.

Esta análise foi realizada em duas etapas, empregando-se os métodos da ASTM C 856/02 – Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete; NBR 7389/92 - Avaliação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado para concreto; NBR 15577-3/08 - Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto; NBR 15577-4/08 - Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

Na primeira etapa, uma amostra do concreto foi examinada macroscopicamente ao olho nu e ao microscópio estereoscópico.

Nesta etapa, em relação aos aspectos estruturais e texturais do concreto, as características macroscópicas do concreto permitiu inferir processos de dosagem e adensamento normais. Pois apresentou um adensamento adequado devido à ausência de vazios de exsudação, e, uma boa homogeneização da mistura em virtude da distribuição regular dos agregados graúdos na argamassa.

A argamassa possuía uma coloração cinza.

O agregado graúdo utilizado foi classificado como granito cataclasado, composto predominantemente por fragmentos angulosos cujas dimensões variam entre 2,5 a 0,4 cm. ou eventualmente lamelares.

O concreto apresentou porosidade média, cujos poros foram predominantemente milimétricos.

Não se encontrou nenhuma evidência da presença de reação álcali-agregado. Entende-se como evidências:

- i. Presença de bordas de reação ao redor dos agregados graúdos
- ii. Presença de material esbranquiçado no contato entre agregado e argamassa
- iii. Presença de fissuração do concreto e do agregado

Na segunda etapa, uma delgada lâmina de concreto foi examinada ao microscópio óptico de luz transmitida.

Analisando-se a amostra de concreto microscopicamente, constatou-se a presença de microfissuras na argamassa e no agregado (Figura 4.51) e poros disseminados na amostra, alguns com material sub-microscópico depositado, além de preenchido, possivelmente, por etringita (Figura 4.52). Também não se visualizaram bordas de reação na interface argamassa-agregado, apenas raras microfissuras (Figura 4.51). Portanto, não houve evidências de qualquer tipo de fenômeno químico de deterioração do concreto nas duas etapas.



Figura 4.51 – Microfissura na interface argamassa-agregado, propagando-se para a argamassa. Imagem obtida ao microscópio de luz transmitida. Ampliação 40x. Fonte: Relatório de ensaio nº 53528, ABCP



Figura 4.52 – Poro (P) preenchido por etringita. Imagem obtida ao microscópio de luz transmitida. Ampliação 40x. Fonte: Relatório de ensaio nº 53528, ABCP

Quanto à análise dos agregados constituintes do concreto examinado, em relação ao ponto de vista físico-mecânico, considerou-se que os agregados eram de boa qualidade, devido à sua alta tenacidade e incipiente alteração.

Em relação ao ponto de vista mineralógico, a presença do quartzo deformado e microcristalino podem induzir reações expansivas do tipo álcali-silicato. Considerou-se o agregado graúdo (granito cataclasado) potencialmente reativo, devido à presença de quartzo microcristalino e feldspatos alterados, além do quartzo com extinção ondulante. (Relatório Nº 53528, ABCP)

4.1.5 Discussão sobre Possível Origem da Fissuração

4.1.5.1 Dosagem do Concreto e Execução da Estrutura

Tanto a dosagem como a execução têm efeito direto na qualidade da peça estrutural.

A dosagem do concreto foi realizada em uma central de produção de concretos, que forneceu o concreto usinado para lançamento nos blocos, cuja resistência característica de projeto foi 40MPa. Segundo informações da própria usina, foi utilizado o cimento tipo CII-F32, cujo consumo foi de 460 kg/m³ e a finura Blaine de 400 m²/kg.

No entanto, para uma dosagem adequada, é primordial que se observem outros fatores além do consumo, tais como: finura e composição química do cimento, granulometria, forma e composição mineralógica dos agregados, qualidade da água de amassamento e da região da fundação, que podem afetar, significativamente, o desempenho do concreto, tanto em relação à resistência quanto à durabilidade.

Outros fatores, de ordem construtiva também podem ter alterado o desempenho previsto para os blocos, tais como, posicionamento, espaçamento e bitola das armaduras, bombeamento, lançamento, adensamento e cura. Porém, nada se pode afirmar, devido à falta de dados sobre isto.

4.1.5.2 Retração Térmica ou por Secagem do Concreto

Diversos fatores influenciam o comportamento térmico do concreto, tais como, as condições climáticas durante a concretagem, as condições de exposição após a concretagem, a temperatura de lançamento do concreto, o tipo e as quantidades dos materiais constituintes do concreto, o tipo e o tempo de cura e de desforma, o volume do elemento estrutural, o consumo de cimento, entre outros. Sem dúvida que o consumo de cimento, em particular o teor de aluminato tricálcico (C3A), são fatores que exercem maior influência na temperatura que o concreto atingirá durante as primeiras horas. Isto ocorre, em virtude de o calor gerado durante as reações de hidratação das fases do cimento, em especial do C3A. E quanto maior o consumo de cimento, maior será a liberação de calor, e a temperatura do concreto. Não foi possível identificar o teor de C3A do cimento de origem, porém este tem valores típicos limitados a 8% (MEHTA E MONTEIRO, 2008). O volume dos blocos também contribui para o aumento da temperatura.

No caso do concreto utilizado nos blocos, pode-se considerar que há um alto consumo de cimento, este parece ser bem reativo, pois a resistência há um dia indicada pela fábrica já é de 18,9 MPa e a finura Blaine é 400 m²/kg. Assim aliando-se ao consumo e ao volume do bloco, surge a possibilidade de que parte da fissuração excessiva tenha origem térmica.

Também é muito provável que algumas fissuras superficiais tenham origem na retração por secagem, pois, freqüentemente, ela e a retração térmica ocorrem simultaneamente, devido às alterações de umidade e temperatura ambiente.

A literatura sugere que quanto maior a finura do cimento, maior será a retração por secagem, além disso, durante as reações de hidratação do cimento ocorre a perda de água fisicamente adsorvida do C-S-H, que induz à retração. Também se sabe que devido à velocidade dos cronogramas das obras, estes podem impor condições de cura na superfície superior dos blocos que, na prática, podem ser precárias, provocando o aparecimento de fissuras oriundas de retração por secagem.

No entanto, mesmo considerando a possibilidade de fissuração de origem térmica e de retração por secagem, esses dois fenômenos não explicam o fato de as fissuras permanecerem ativas depois que foi feito o primeiro tratamento nos blocos. As fissuras de grande abertura parecem ter outra origem.

4.1.5.3 Reações Químicas Expansivas de Fontes Internas

Outras reações endógenas ao concreto estão associadas à interação entre o cimento e os agregados. A aparência das fissuras em forma de mapa sugere a possibilidade de que há ocorrência de deterioração causada pela reação álcali-agregado. Outra possibilidade plausível é a formação de etringita retardada, originada, comumente, devido à submissão de estruturas a calor excessivo nas suas primeiras horas de cura. Outra característica dos fenômenos endógenos é que eles acontecem, geralmente, de forma generalizada na peça estrutural, sem limitação para a profundidade das fissuras. No caso, em nenhuma amostra constatou-se o gel oriundo da reação álcalis-agregado. Tão pouco não foi constatada a etrtiginta retardada.

4.1.5.4 Reações Expansivas Oriundas de Fontes Externas

Deteriorações devido a fatores externos ao concreto estão diretamente ligadas à permeabilidade do mesmo, pois a permeabilidade é o fator determinante da difusão dos íons quimicamente ativos no ambiente interno do concreto como, por exemplo, os sulfatos, os cloretos, e dos cátions de magnésio. Como os blocos estão parcialmente submersos em águas do lençol freático, existe a possibilidade destas águas serem salinas, e, dependendo do teor

dos sais, podem penetrar no concreto e gerar reações deletérias, muitas vezes expansivas como a formação de sais de sulfato de cálcio e etringita secundária, entre outros fenômenos.

É válido ressaltar que o solo também deve ser analisado, uma vez que, por estar saturado pelo lençol freático, também pode conter agentes agressivos ao concreto. Porém não se notou em nenhuma superfície dos blocos sinais de deterioração do concreto em si.

No tocante ao perfil das fissuras, estes fenômenos externos ocorrem de forma progressiva do exterior para o interior, limitando assim suas profundidades às camadas afetadas.

4.1.5.5 Detalhamento Estrutural

Uma outra possibilidade da fissuração excessiva poderia ser oriunda do projeto estrutural. Ele poderia até explicar as fissuras horizontais nas faces laterais, mas não explicaria todas as fissuras aqui apresentadas.

A concepção estrutural, neste caso, utilizou grandes vãos e poucos pilares. Os blocos estão assentados sobre estacas de concreto, cuja distribuição em alguns blocos não é bem uniforme. Também não se usou vigas baldrame interligando a base dos pilares, exceto na caixa da escada. O detalhamento das armaduras de alguns blocos, dado por programa de cálculo estrutural, não contempla a armadura positiva subindo nas laterais além das bielas de compressão. As fissuras, neste caso, estariam localizadas nas regiões onde as concentrações de tensões de tração não estivessem servidas de armaduras ancoradas.

No entanto, não é objetivo deste trabalho a análise estrutural.

Capítulo 5 – Conclusão

A análise microestrutural, realizada nas amostras do concreto dos blocos estudados, indicou que não houve a presença da reação álcali-agregado, nem de formação de etringita retardada, pois não houve formação de material de diferente composição (contraste de cinza) dentro de nenhuma fissura, nem no contorno dos agregados, típica de reação química.

Os resultados sugerem que as fissuras nestes blocos não aparentam terem sido geradas por mecanismos expansivos de origem química. Isto porque não foi detectada a presença de nenhum mineral responsável por patologias expansivas tais como gel de álcali-sílica, etringita, nem gypsum.

As fissuras se propagam através da matriz de cimento e contornam o agregado, são possivelmente induzidas por tensões de origem térmica.

As trincas horizontais podem ter origem estrutural, mas não parecem explicar todas as outras, ainda mais que o prédio estava ainda com menos de 60% do carregamento previsto.

Segundo a análise petrográfica realizada pela ABCP, o concreto não apresentou feições típicas da instauração da reação álcali-agregado, apenas alguns poros preenchidos por material branco durante análise macroscópica, que provavelmente são os poros, que pela análise microscópica, observou-se a deposição de material submicroscópicos e por etringita. Ainda no relatório da ABCP é dito que as características e aspectos estruturais e texturais encontrados são próprios de concretos submetidos a processos normais de preparação e dosagem, com adensamento e homogeneização adequados. O agregado graúdo é um granito cataclasado e possui características texturais que permitem caracterizá-lo como potencialmente reativo frente aos álcalis do concreto.

Apesar de o agregado ser potencialmente reativo, a petrografia feita pela ABCP não identificou a reação álcali-agregado, o que confirmou as análises feitas na UFPB.

Referências Bibliográficas

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - **ASTM C-856**. Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. 2002.
2. ANDRADE, P. M. Del C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992. 103p.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 170p.
4. _____. **NBR 7389: Avaliação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado para concreto**. Rio de Janeiro, ABNT, 1992.
5. _____. **NBR 11578: Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, ABNT, 1991. 5p.
6. _____. **NBR 14931: Execução de estruturas de concreto: Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003. 40p.
7. _____. **NBR 15577-3: Agregados: Reatividade álcali-agregado**. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
8. _____. **NBR 15577-4: Agregados: Reatividade álcali-agregado**. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
9. CALLISTER, JR.; WILLIAM, D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. Tradução: Sergio M. S. soares. Rio de Janeiro: LTC. 2008.
10. DIAMOND, S. Delayed ettringite formation – Processes and problems. **Cement and Concrete Composites** **18**, 1996. p. 205-215.
11. FIGUEIRÔA, J. P.; ANDRADE, T. **O ataque da Reação Álcali-Agregado sobre as estruturas de concreto: A descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife**. Recife: editora universitária da UFPE, 2007. 228p.

12. GIOLITO, I.; IONASHIRO, M. **A nomenclatura em análise térmica - Parte II. Cerâmica**, São Paulo, v.34, n.225, p.163-164, 1988. Disponível em: <http://abratec1.tempsite.ws/abratec/download/nomenclatura_anal_termica_parteII.pdf>. Acesso em: 04/03/2010, às 10:05 hs.

13. HELENE, Paulo R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ª ed - São Paulo: PINI, 1992.

14. IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. **Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica, Cerâmica**, São Paulo, v.26, n.121, p.17-24, 1980. Disponível em: <http://abratec1.tempsite.ws/abratec/download/nomenclatura_anal_termica.pdf>. Acesso em: 04/03/2010, às 10:05 hs

15. MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Florianópolis: LCMAI Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens, UFSC, Santa Catarina, [s.d.]. 97p.

16. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Revisores e Coordenadores: Nicole P. Hasparyk, Paulo Helene e Vladimir A. Paulon. São Paulo: IBRACON. 2008. 674p.

17. NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

18. PICCOLI, R.; MEXIAS, A.; FIGUEIRA, R.; MONTEDO, O.; BERTAN, F. **Características das principais técnicas analíticas aplicadas à caracterização de materiais**, 17º CBECImat, Foz do Iguaçu, nov., 2006. Disponível em <<http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-102-028.pdf>>. Acesso em 04 mar. 2010.

19. SCRIVENER, K. L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. **Cement & Concrete Composites** 26, 2004. p. 935-945.

20. SOUZA, V. C. M., RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255p.

21. TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**, Londres: Academic Press Limited, 1990. 455p.

22. TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research** **31**, 2001. p. 683-693.
23. THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN T. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. **Cement and Concrete Research** **38**, 2008. p. 841-847.
24. **VIEIRA, A. A. P.** Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concreto. **João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2005. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. 107p.**