

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

**Análise da influência de superfícies protetoras na
durabilidade do concreto para uso em meio agressivo:
uma abordagem topográfica e da estrutura do material**

Autora: Prof^ª Joana Darc da Silva Pinto
Orientadora: Prof^ª Cristina Durães de Godoy
Co-Orientadora: Prof^ª Carmen Couto Ribeiro

Dezembro/2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Joana Darc da Silva Pinto

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE SUPERFÍCIES PROTETORAS NA
DURABILIDADE DO CONCRETO PARA USO EM MEIO AGRESSIVO:
UMA ABORDAGEM TOPOGRÁFICA E DA ESTRUTURA DO MATERIAL**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de
Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Ciências e Engenharia de Materiais
Orientadora: Prof^a Cristina Durães de Godoy
Co-Orientadora: Prof^a Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2006

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

A autora agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em especial:

À Prof^a Carmen Couto Ribeiro, por ter contribuído de forma tão significativa no aprimoramento de minha autoconfiança e análise crítica, fundamentais no processo da produção do conhecimento.

À Prof^a Cristina Godoy, pela oportunidade de fazer o doutorado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e por ter acreditado no desenvolvimento de uma metodologia para o estudo da durabilidade do concreto, tendo a abertura intelectual para lidar com este desafio.

À Prof^a Heloísa Machado, pela amizade e por suas importantes considerações neste trabalho.

Ao Arquiteto Tadeu Starling, pela contribuição ao meu trabalho de pesquisa desde o tempo de iniciação científica.

À colega Janaína Kizzi de Moraes, pelo apoio nos testes de perfilometria.

Ao Bruno Romão, do Laboratório de Tribologia, pelo apoio nos testes de perfilometria.

À Patrícia Azevedo, pela realização de imagens de MEV no Laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica.

Ao Eng. Sérgio Carneiro dos Reis, do CDTN, pelo suporte técnico e realização das análises de absorção de nitrogênio e de conectividade dos poros.

À Prof^a Ana Lúcia Cordeiro Penna, coordenadora dos laboratórios do curso de Engenharia Civil da PUC Minas.

Aos técnicos do laboratório de Materiais de Construção da PUC Minas, Roberto Mauro Lara e Misael Fernandes Barbosa, pelo apoio e presteza na produção do concreto e nos testes de resistência e absorção d'água.

À Daniele Silvério Brandão, técnica do laboratório de Físico-Química da PUC Minas, pela presteza no fornecimento da solução de ácido sulfúrico para os ataques no concreto.

Ao Valdo Andrade, da Vedacit Impermeabilizantes/Otto Baumgart, pelo incentivo e fornecimento das tintas utilizadas como proteções do concreto.

À Pro-Reitoria de Pós Graduação da PUC Minas, pelo apoio fundamental, através do Plano Permanente de Capacitação Docente.

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG.

À Fapemig, pelo apoio financeiro para aquisição do perfilômetro.

SUMÁRIO

RESUMO	XIX
ABSTRACT	XX
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS	2
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 O concreto e suas propriedades.....	3
3.2 Materiais constituintes do concreto.....	4
3.3 Resistência à compressão.....	10
3.4 Durabilidade do concreto.....	13
3.4.1 Abordagem da durabilidade pela normalização brasileira	15
3.4.2 Permeabilidade do concreto.....	17
3.4.3 O papel da cura na durabilidade do concreto.....	19
3.4.4 Problemas que comprometem a durabilidade das obras.....	20
3.4.5 Durabilidade das estruturas sob o ponto de vista econômico.....	21
3.5 Dosagem de concreto	22
3.6 Principais mecanismos de ataque ao concreto.....	26
3.7 Mecanismos de proteção do concreto a ataques externos	29
3.8 Perfilometria	32
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA.....	33
4.1 Composição de métodos de dosagem	33
4.2 Produção do concreto	33
4.3 Análise do concreto no estado fresco.....	34
4.4 Análise do concreto no estado endurecido	34

4.4.1	Moldagem dos corpos de prova	34
4.4.2	Resistência à compressão	35
4.5	A influência da cura na resistência à compressão do concreto.....	36
4.6	Absorção d'água do concreto	36
4.7	Avaliação das camadas protetoras.....	36
4.8	Simulação do ataque do concreto	37
4.9	Perda de massa	38
4.10	Permeabilidade do concreto	38
4.11	Caracterização topográfica superficial do concreto através do perfilômetro	39
4.12	Análise estrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	45
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO		46
5.1	Método de dosagem do concreto	46
5.2	Seleção do concreto a partir do estudo de dosagem	47
5.3	Resistência à compressão	47
5.3.1	Resistência à compressão e cura do concreto	49
5.4	Ensaio de absorção d'água, índices de vazios e massas específicas.....	50
5.5	Análise topográfica da textura superficial do concreto	52
5.5.1	Imagens topográficas sem filtragem das texturas superficiais dos concretos..	53
5.5.2	Análise dos parâmetros de amplitude - S_a , S_q , S_p , S_v e S_z	57
5.5.3	Histogramas gerados a partir das imagens 3D.....	63
5.5.4	Histogramas gerados a partir das imagens 3D invertidas sem filtro	67
5.6	Perda de massa	72
5.7	Difração de raios-X do concreto sem proteção	73
5.8	Análise estrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	74
5.9	Permeabilidade do concreto	102

5.10 Conectividade dos poros	105
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	106
CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
BIBLIOGRAFIA	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Comportamento tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto (Mehta, 1994).	11
Figura 3.2 - Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial (Mehta, 1994).	12
Figura 3.3 - Influência das condições de cura sobre a resistência (Mehta, 1994).	20
Figura 4.1 - Ensaio do abatimento do tronco de cone - "Slump"	34
Figura 4.2 - Ruptura de corpos de prova à compressão	35
Figura 4.3 - Corpos de prova de 5x10cm de concreto protegido com borracha clorada, tinta acrílica e concreto sem proteção.	37
Figura 4.4 - Perfilômetro do Laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.	39
Figura 4.5 - Unidades básicas de um perfilômetro (Mummery, 1992).....	40
Figura 4.6 - Detalhe da varredura no perfilômetro (Mummery, 1992)	40
Figura 4.7 - Modificação dos perfis de rugosidade e ondulação, de acordo com o filtro utilizado (Mummery, 1992).	41
Figura 4.8 - Esquema para obtenção do parâmetro R_a (Mummery, 1992).....	42
Figura 4.9 - Perfis diferentes, com mesmo valor de R_a (parâmetro bidimensional), correspondente a S_a (parâmetro tridimensional).	42
Figura 4.10 - Desvio padrão da curva de distribuição de amplitudes (Mummery, 1992). ...	43
Figura 4.11 - Determinação do parâmetro W_t (Mummery, 1992).	44
Figura 5.1 - Resistência à compressão x idade de ruptura	48
Figura 5.2 - Evolução da resistência à compressão para cura ao ar e em câmara úmida	49
Figura 5.3 - Área varrida dos corpos de prova.....	52
Figura 5.4 - Imagem 3D sem filtragem do concreto sem proteção, antes do ataque químico de H_2SO_4	53
Figura 5.5 - Perfil sem filtragem do concreto sem proteção, após ataque químico de H_2SO_4	53
Figura 5.6 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico de H_2SO_4	54
Figura 5.7 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção acrílica, após ataque químico de H_2SO_4	54

Figura 5.8 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico de H_2SO_4	55
Figura 5.9 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção selador/acrílica, após ataque químico de H_2SO_4	55
Figura 5.10 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção de borracha clorada, antes do ataque químico de H_2SO_4	56
Figura 5.11 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção de borracha clorada, após ataque químico de H_2SO_4	56
Figura 5.12 - Delta dos parâmetros de amplitude do perfil sem filtragem, antes e após ataque químico de H_2SO_4	58
Figura 5.13 - Delta dos parâmetros de amplitude do perfil de rugosidade, antes e após ataque químico de H_2SO_4	59
Figura 5.14 - Delta dos parâmetros de amplitude do perfil de ondulação, antes e após ataque químico de H_2SO_4	60
Figura 5.15 - Corpos de prova com proteção de borracha clorada, tinta acrílica e sem proteção, respectivamente da esquerda para a direita, antes do ataque químico de H_2SO_4	61
Figura 5.16 - Corpos de prova com proteção com tinta acrílica, selador/acrílica e borracha clorada, respectivamente da esquerda para a direita, após ataque químico de H_2SO_4	62
Figura 5.17 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto sem proteção, antes do ataque químico.....	63
Figura 5.18 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto sem proteção, após ataque químico	63
Figura 5.19 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico.....	64
Figura 5.20 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção acrílica, após ataque químico.....	64
Figura 5.21 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico	65
Figura 5.22 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção selador/acrílica, após ataque químico	65

Figura 5.23 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção borracha clorada, antes do ataque químico.....	66
Figura 5.24 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção borracha clorada, após ataque químico	66
Figura 5.25 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto sem proteção, antes do ataque químico.....	67
Figura 5.26 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto sem proteção, após ataque químico	67
Figura 5.27 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico.....	67
Figura 5.28 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção acrílica, após o ataque químico.....	67
Figura 5.29 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico	68
Figura 5.30 - Imagem 3D original invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção selador/acrílica, após o ataque químico	68
Figura 5.31- Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção de borracha clorada, antes do ataque químico.....	68
Figura 5.32 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção de borracha clorada, após o ataque químico	68
Figura 5.33 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto sem proteção, antes do ataque químico	69
Figura 5.34 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto sem proteção, após ataque químico	69
Figura 5.35 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico	69
Figura 5.36 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção acrílica, após ataque químico	69
Figura 5.37 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico	70
Figura 5.38 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção selador/acrílica, após ataque químico	70

Figura 5.39 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção borracha clorada, antes do ataque químico.....	71
Figura 5.40 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção borracha clorada, após ataque químico.....	71
Figura 5.41 - Difrátograma de raios-X do concreto sem proteção e sem ataque químico.	73
Figura 5.42 - Imagem de elétrons secundários, obtida em microscópio eletrônico (ME), da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, ampliada 100x.	75
Figura 5.43 - Espectro EDS do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 1, da figura 5.42 com predominância de Ca, elemento presente na portlandita	76
Figura 5.44 - Imagem ampliada 1000x da região 1, figura 5.42, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, mostrando cristais de portlandita – $\text{Ca}(\text{OH})_2$	77
Figura 5.45 - Imagem ampliada 5000x da região 1, figura 5.42, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, mostrando detalhe dos cristais de portlandita – $\text{Ca}(\text{OH})_2$	77
Figura 5.46 - Imagem ampliada 1000x da região 2, figura 5.42, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, áreas analisadas A e B	78
Figura 5.47- Imagem ampliada 5000x da região 2, figura 5.42, área A, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque.	78
Figura 5.48 - Espectro EDS do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área A, presença de Ca, Si e C.....	79
Figura 5.49 - Imagem ampliada 5000x da região 2, figura 5.42, área B, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico	80
Figura 5.50 - Espectro EDS do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área B, predominância de Ca e Si, presentes nas partículas de C-S-H.....	81
Figura 5.51 - Imagem obtida da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico, ampliada 100x	82
Figura 5.52 - Imagem ampliada 1000x da região 1, figura 5.51, da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico.....	82
Figura 5.53 - Espectro EDS do concreto sem proteção e após ataque químico, região 1	83
Figura 5.54 - Imagem ampliada 1000x da região 2, figura 5.51, da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico.....	84
Figura 5.55 - Espectro EDS do concreto sem proteção, após ataque químico, região 2 ..	85

Figura 5.56 - Imagem ampliada 1000x da região 3, figura 5.51, da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico.....	86
Figura 5.57 - Espectro EDS do concreto sem proteção, após ataque químico, região 3 ..	86
Figura 5.58 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico, ampliada 100x. Superfície mais homogênea do que o concreto sem proteção.....	88
Figura 5.59 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico	88
Figura 5.60 - Espectro EDS do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico	89
Figura 5.61 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção acrílica e após ataque químico, ampliada 100x.....	90
Figura 5.62 - Espectro de EDS do concreto com proteção acrílica e após ataque químico	90
Figura 5.63 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção selador/acrílico e sem ataque químico, aumento de 100x. Superfície extremamente homogênea, sem falhas no recobrimento	92
Figura 5.64 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção selador/acrílico e sem ataque químico	92
Figura 5.65 - Espectro EDS do concreto com proteção selador/acrílico e sem ataque.....	93
Figura 5.66 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção selador/acrílico e após ataque químico, ampliada 100x. Superfície com névoa esbranquiçada, caracterizando o ataque.....	94
Figura 5.67 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção selador/acrílico e após ataque químico	94
Figura 5.68 - Espectro EDS do concreto com proteção selador/acrílico e após ataque químico	95
Figura 5.69 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e sem ataque químico, ampliada 100x.....	96
Figura 5.70 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e sem ataque químico	96
Figura 5.71 - Espectro EDS do concreto com proteção borracha clorada e sem ataque químico	97

Figura 5.72 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e após ataque químico, ampliada 100x.....	98
Figura 5.73 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e após ataque químico	98
Figura 5.74 - Espectro EDS do concreto com proteção borracha clorada e após ataque químico	99
Figura 5.75 - Resumo dos espectros EDS	100
Figura 5.76 - Isotermas (adsorção/dessorção) para concreto sem proteção e sem ataque	103
Figura 5.77 - Isotermas (adsorção/dessorção) para concreto sem proteção atacado.....	103
Figura 5.78 - Isotermas (adsorção/dessorção) para concreto com proteção selador/acrílica atacado	104
Figura 5.79 - Conectividade por volume em função do número de coordenação relativo. Estudo do concreto sem proteção, sem ataque e atacado e concreto protegido com selador/acrílica e atacado	105

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Principais compostos químicos do clínquer	5
Tabela III.2 - Tipos de cimento Portland em função das adições	6
Tabela III.3 - Classes de resistências do concreto	10
Tabela III.4 - Classes de agressividade ambiental	16
Tabela III.5 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e fator água/cimento (a/c)	16
Tabela III.6 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal	17
Tabela III.7 - Agentes agressivos ao concreto	26
Tabela V.1 - Dosagem do concreto	47
Tabela V.2 - Estudo comparativo de dosagem	47
Tabela V.3 - Absorção d'água, índices de vazios e massa específica do concreto	50
Tabela V.4 - Parâmetros de amplitude obtidos a partir do perfil sem filtragem	58
Tabela V.5 - Parâmetros de amplitude obtidos a partir do perfil de rugosidade e filtro 2,5mm	59
Tabela V.6 - Parâmetros de amplitude obtidos a partir do perfil de ondulação e filtro 2,5mm	60
Tabela V.7 - Perdas de massa antes e após ataque e parâmetros obtidos na perfilometria	72
Tabela V.8 - Composição química do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 1	76
Tabela V.9 - Composição química do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área A	79
Tabela V.10 - Composição química do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área B	81
Tabela V.11 - Composição química do concreto sem proteção e após ataque químico, região 1	83
Tabela V.12 - Composição química do concreto sem proteção, após ataque químico, região 2	85
Tabela V.13 - Composição química do concreto sem proteção, após ataque químico, região 3	87

Tabela V.14 - Composição química do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico	89
Tabela V.15 - Composição química do concreto com proteção acrílica e após ataque químico	91
Tabela V.16 - Composição química do concreto com proteção selador/acrílico e sem ataque químico	93
Tabela V.17 - Composição química do concreto com proteção selador/acrílico e após ataque químico	95
Tabela V.18 - Composição química do concreto com proteção borracha clorada e sem ataque químico	97
Tabela V.19 - Composição química do concreto com proteção borracha clorada e após ataque químico	99
Tabela V.20 - Ensaio de adsorção de nitrogênio	102

LISTA DE NOTAÇÕES

λ_c	Filtro ou cut-off
ρ_v	Densidade específica
a/c	água/cimento
ABPC	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	American Concrete Institute
C	Cal livre
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferro aluminato tetracálcico
C_{abs}	Volume absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa
C_{ap}	Volume aparente do cimento por unidade de concreto
CP	Cimento Portland
C_v	Conectividade de poros/unidade de volume
EDS	Espectrometria de Dispersão de Energia
f_{cj}	Resistência do concreto à compressão prevista para a idade de j dias
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão especificada no projeto estrutural
$f_{ck, est}$	Resistência característica do concreto à compressão estimada
H	Volume de água por unidade de concreto
INT	Instituto Nacional de Tecnologia

IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
k_1 , k_2 e k_3	Constantes que dependem da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura
K_1	Média ponderada do número de vizinhos de cada nó
M	Volume absoluto do agregado miúdo por unidade de volume de argamassa
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	Módulo de Finura
S_a	Rugosidade média de uma superfície
S_d	Controle da obra
S_g	Superfície específica do concreto
S_p	Altura máxima dos picos de uma superfície
S_q	Desvio padrão do perfil em relação a curva de distribuição de amplitudes
S_t	Altura total de uma superfície
S_v	Profundidade máxima dos vales de uma superfície
S_z	Média das alturas entre os cinco picos mais altos e cinco vales mais profundos
V_g	Volume específico de poros

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais usados no mundo e vem sendo objeto de muitos trabalhos, que têm propiciado grande desenvolvimento na utilização deste material. A constatação que problemas relativos à durabilidade têm comprometido inúmeros elementos estruturais na construção civil, vem sinalizando a premência de se implementar novas pesquisas visando abordar os efeitos da corrosão superficial do concreto.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos na caracterização da textura superficial do concreto, a partir de uma abordagem topográfica 3D, propondo uma nova metodologia na avaliação da influência de superfícies protetoras na durabilidade do concreto. Foram feitos estudos de dosagens, que permitiram selecionar um concreto que se caracteriza por um baixo fator água/cimento, elevada resistência à compressão e alta impermeabilidade, requisitos imprescindíveis para garantir a durabilidade do concreto. O concreto selecionado foi então protegido por diferentes camadas protetoras (acrílica, selador/acrílica e borracha clorada) e submetido a um meio agressivo ácido (H_2SO_4 a 2,5%) por imersão. O concreto foi avaliado através da resistência à compressão, de ensaios de impermeabilidade, MEV/ EDS e da técnica da perfilometria. O desempenho das proteções foi avaliado através da técnica da perfilometria que produz imagens topográficas em 3D e dados estatísticos (parâmetros de amplitude), permitindo comparar as texturas superficiais do concreto, com e sem proteção, antes e após ataque químico assim como avaliar a eficácia das proteções propostas. Esta pesquisa demonstra que a perfilometria é uma técnica precisa e eficiente para estudos da superfície do concreto e pode ser largamente empregada em pesquisas sobre a durabilidade do concreto, ampliando a interface entre a Engenharia de Materiais e a Engenharia Civil.

ABSTRACT

The concrete is one of the most used materials in the world and it has been object of many works, which have been providing a large development of its use. The deterioration of concrete has been responsible for many damages on structural elements in civil construction, owned to durability problems, pointing out the urgency of developing new researches about the effects of superficial corrosion of concrete.

This work studies the influence of surface coating in the durability of concrete under aggressive environment, through 3D topographic approach, proposing a new methodology to evaluate the performance of different kinds of protections in concrete durability. Concrete mix designs were produced, in order to select a concrete with a low water/cement ratio, high resistance and high impermeability, which are requests for durability. The concrete selected was then protected with surface coating (acrylic, sealer/acrylic and chlorinated rubber) and exposed to an acid aggressive environment (H_2SO_4 a 2.5%) by immersion. The concrete was evaluated through compressive strength, impermeability test, MEV/EDS and profilemetry technique. The performance of the protections was evaluated through surface profilemetry, which produced topographic images and statistical data (surface parameters). This technique supplies 3D topographical images, allowing the comparison of the superficial textures of the concrete, with and without protection, before and after chemical attack. Through this procedure it was possible to evaluate the effectiveness of surface coatings applied to concrete submitted to chemical attack and, also, to determinate which of the analyzed surface coatings offers more protection. This research demonstrates that profilemetry is an accurate and efficient technique in the studies of concrete surface and can be very useful in researches on concrete durability, still enlarging the interchange between Materials Engineering and Civil Engineering.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O concreto e seus materiais constituintes vêm sendo sistematicamente enfocados em muitos países, devendo-se destacar os estudos feitos sobre o cimento hidráulico, já no século XIX, por Vicat, na França. Os trabalhos contemporâneos vêm demonstrando que o comprometimento de inúmeras estruturas se deve a problemas decorrentes da falta de uma abordagem mais aprofundada do papel da durabilidade. Um dos problemas recorrentes da degradação superficial é a falta de durabilidade do concreto, abordada neste trabalho a partir da proposição da avaliação de camadas protetoras.

Dentre as camadas protetoras mais utilizadas, as tintas têm um papel de destaque, por aderirem à superfície do concreto formando um filme contínuo de baixa permeabilidade. Os avanços ocorridos na química nos últimos anos vêm propiciando um grande desenvolvimento de inúmeros tipos de proteções, que, aliadas à inovação das metodologias de aplicação destes produtos, têm permitido garantir a durabilidade do concreto, através da redução da absorção de água e da penetração de sais e de gases agressivos.

Neste trabalho, a avaliação destas camadas protetoras foi feita a partir da caracterização da textura superficial do concreto, através da perfilometria, técnica que vem sendo largamente empregada no aprimoramento de materiais metalúrgicos.

A partir de imagens e parâmetros de amplitude gerados pelo perfilômetro, foram analisadas as texturas superficiais, visando avaliar a degradação superficial do concreto submetido a um meio agressivo ácido, com e sem camadas protetoras, para se ter uma maior compreensão deste processo e garantir uma maior durabilidade do concreto, através de uma interface entre a Engenharia de Materiais e a Engenharia Civil.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

Esta tese tem como objetivo a caracterização da textura superficial do concreto por meio da técnica da perfilometria em 3D, a fim de propor uma nova metodologia na avaliação da influência de superfícies protetoras na durabilidade do concreto submetido a meio agressivo, a partir das seguintes etapas:

- Produção de concretos com baixas relações água/cimento e altas resistências, visando analisar suas propriedades mecânicas e selecionar um concreto que atenda aos principais requisitos de durabilidade;
- Verificação da influência da porosidade e da conectividade entre poros na vulnerabilidade do material ao ingresso de agentes agressivos, através de ensaios de absorção d'água por imersão, adsorção de nitrogênio e picnometria a hélio;
- Avaliação comparativa de três tipos diferentes de camadas protetoras (tinta acrílica, borracha clorada e uma composição de selador com tinta acrílica) aplicadas sobre o concreto selecionado e submetido a ataque químico, a fim de definir a mais adequada à proteção superficial do concreto;
- Análise da microestrutura do concreto e dos efeitos das proteções superficiais através da microscopia eletrônica de varredura - MEV/EDS.

CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão aborda estudos que vêm sendo realizados, nas últimas décadas, sobre o concreto, seus materiais constituintes e sua estrutura, analisando suas principais propriedades: resistência, trabalhabilidade, impermeabilidade e durabilidade.

3.1 O concreto e suas propriedades

O concreto é um material de larga aplicação na Construção Civil obtido pela composição de cimento Portland, agregados e água, podendo conter aditivo que influencia o seu desempenho. A proporção de seus componentes, conhecida como dosagem do concreto, deve atender às condições requeridas de resistência, trabalhabilidade, impermeabilidade e durabilidade, que são as propriedades mais importantes do concreto. A resistência fornece normalmente uma indicação geral de sua qualidade por estar diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento endurecida (Mehta, 1994; Neville, 1997).

O concreto fresco deve ter uma trabalhabilidade adequada às condições de utilização definidas pelo transporte, lançamento, adensamento. O concreto endurecido deve ter suas características definidas pela resistência aos esforços mecânicos a que será submetido e pelas questões relativas à durabilidade (Ribeiro et al., 2006).

Os concretos de alta resistência mais utilizados no momento são obtidos através da adição de sílica ativa e superplastificantes, sendo conhecidos como concretos de alto desempenho, tendo como principal característica permitir aliar alta resistência e durabilidade. Os concretos de alta resistência podem ser obtidos, também, com cimento comum e plastificante, com cimento e polímeros ou com cimento e certos tipos de pozolana (Aitcin, 2003; Amaral, 1992). É preciso assinalar que qualquer composição só atingirá altas resistências se tiver uma baixa relação água/cimento.

Segundo Hervé (2003), a Europa e Estados Unidos contabilizaram seus custos de manutenção em estruturas de concreto em um passado recente e concluíram pela adoção de novos procedimentos tecnológicos centrados na durabilidade, que conduziram à redução da relação água/cimento. Estudos realizados, concluíram pela necessidade de redução da água total nos traços do concreto, como forma de reduzir a fissuração e a deformabilidade, apontadas como responsáveis pela baixa durabilidade e pelas patologias do concreto (Hervé, 2003).

Os grandes avanços obtidos com a evolução tecnológica exigiram uma maior atenção à durabilidade do material, que passou, então, a ser abordado de uma forma mais efetiva pela Normalização Brasileira. A norma NB-1: Projeto de estruturas de concreto, em sua nova versão, passa, então, a considerar que todos os elementos estruturais de uma edificação, como lajes, vigas e pilares, terão de apresentar, independentemente do projeto, uma espessura mínima de cobrimento, visando garantir uma maior durabilidade e, conseqüentemente, uma maior vida útil das edificações (NB-1, 2003).

3.2 Materiais constituintes do concreto

Os materiais constituintes do concreto têm influência direta na sua qualidade, implicando em maior ou menor durabilidade.

Cimento Portland

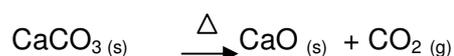
O aglomerante, conhecido mundialmente como cimento Portland, é um pó fino acinzentado constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, com inúmeras propriedades e características, dentre as quais, ser moldável, quando misturado com água, e ser capaz de desenvolver elevada resistência mecânica ao longo do tempo. A denominação do cimento Portland é decorrente da semelhança do cimento fabricado industrialmente com a pedra de Portland, calcário extraído em Dorset, na Inglaterra (Neville, 1997).

A fabricação do cimento Portland é resultante da moagem de um produto denominado clínquer, obtido pela calcinação de uma mistura crua de calcário e argila, dosados e homogeneizados convenientemente. Após a queima, é feita uma adição de gesso, a fim de impedir que as reações de hidratação entre o cimento e a água, quando da utilização do cimento, se processem instantaneamente. O clínquer é um produto que sai do forno em forma de nódulos escurecidos e que, depois de resfriado e moído, recebe a adição de gesso (CaSO_4 – sulfato de cálcio) (Neville, 1997).

Esquema básico da fabricação do cimento:

Calcário + Argila → material cru → forno → clínquer + gesso → moagem → cimento

O calcário é a principal matéria prima para a fabricação do cimento. Quando submetido a uma temperatura acima de 800°C, o CaCO_3 (carbonato de cálcio) que o constitui, passa para a forma de CaO (cal) e CO_2 .



O CaO reage com o Al_2O_3 (alumina), Fe_2O_3 (óxido de ferro) e SiO_2 (sílica), provenientes da argila e outras matérias-primas, formando no interior do forno, em ambiente de até 1450°C, os compostos constituintes do clínquer (Ribeiro et al, 2006).

Os principais compostos químicos do clínquer e as propriedades deles decorrentes são mostrados na tabela III.1.

Tabela III.1 - Principais compostos químicos do clínquer

Compostos	Fórmula química	Abrev.	Propriedades específicas decorrentes dos compostos do clínquer
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 50 – 65%	C_3S	Endurecimento rápido, alto calor de hidratação, alta resistência inicial.
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 15 – 25%	C_2S	Endurecimento lento, baixo calor de hidratação, baixa resistência inicial.
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 6 – 10%	C_3A	Pega muito rápida controlada com adição de gesso, suscetível ao ataque de sulfatos, alto calor de hidratação, alta retração, baixa resistência final.
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Fe_2O_3 3 – 8%	C_4AF	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não tem contribuição para resistência, cor escura.
Cal livre	CaO 0,5 – 1,5%	C	Aceitável somente em pequenas quantidades; em maiores quantidades, causa aumento de volume e fissuras.

Fonte: Ribeiro et al, 2006.

Os principais tipos de cimento Portland, tabela III.2:

- . Cimento Portland Comum – CP I (NBR-5732, 1991);
- . Cimento Portland Composto – CP II (com adições de escória de alto-forno, pozolana e filer) (NBR-11578, 1991);
- . Cimento Portland de Alto-Forno – CP III (com adição de escória de alto-forno, apresentando baixo calor de hidratação) (NBR-5735, 1991);
- . Cimento Portland Pozolânico – CP IV (com adição de pozolana, apresentando baixo calor de hidratação) (NBR-5736, 1991);
- . Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CP V (com maiores proporções de silicato tricálcico – C_3S , que lhe confere alta resistência inicial e alto calor de hidratação) (NBR-5733, 1991).

Tabela III.2 - Tipos de cimento Portland em função das adições

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Composição (% de massa)			
		Clínquer	Escória	Pozolana	Materiais carbonáticos
Comum	CP I	100		0	0
Comum (com adição)	CP I - S	95 - 99	0	1	5
Composto com escória	CP II - E	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10
Composto com pozolana	CP II - Z	76 - 94	-	6 - 14	0 - 10
Composto com filer	CP II - F	90 - 94	-	-	6 - 10
Alto-Forno	CP III	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5
Pozolânico	CP IV	50 - 85	-	15 - 50	0 - 5
Alta Resistência Inicial	CP V ARI	95 - 100	0	0	0 - 5

Fonte: NBR-5732; NBR-5733; NBR-5735; NBR-5736; NBR-11578.

Pozolana

É um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, possui pouco ou nenhum valor aglomerante, porém, quando finamente dividido e em presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio à temperatura normal, formando compostos com propriedades aglomerantes. Podem-se citar alguns exemplos, tais como, escória de alto-forno, microssílica, carvão ativado e resíduo de carvão pulverizado ou granulado (Neville, 1997).

Escória de alto-forno

É um material obtido nas siderúrgicas no processo de redução do minério de ferro. A escória fundida, ao sair do alto-forno, à temperatura de 1400 °C, é resfriada com água, ou água e ar. A evaporação repentina da água provoca uma agitação violenta, com pressões muito elevadas no interior da escória, obrigando-a a se expandir. A expansão é acompanhada pelo resfriamento rápido e os dois fenômenos conferem ao material uma estrutura esponjosa com aspecto semelhante ao do pomes natural.

A quantidade de água utilizada no processo deve ser controlada e aplicada de forma que o vapor fique retido na massa. Em caso contrário, se o resfriamento for obtido com grandes quantidades de água, o material produzido será escória granulada friável, podendo ser utilizada como agregado miúdo ou na indústria cimenteira. No caso da escória ser resfriada ao ar ou com pouca água, obtém-se uma escória em blocos denominada bruta, que, depois de britada, pode ser utilizada como agregado graúdo para concreto (Pinto et al., 1995; Ribeiro et al, 1986,1999).

Agregados

Agregado é a denominação genérica dada aos materiais que são acrescentados ao cimento e água para se obterem as argamassas e concretos. Os agregados apresentam-se em forma de grãos, tais como as areias e britas, sendo que devem ser inertes, ou seja, não devem provocar reações indesejáveis. Os agregados constituem da ordem de 70% do volume total, desempenhando, em consequência, um importante papel do ponto de vista econômico. Além disso, propiciam uma menor retração das pastas formadas por cimento e água e aumentam a resistência ao desgaste superficial das argamassas e concreto (Ribeiro et al., 2006; Bauer, 1994; Petrucci, 1980).

Os agregados podem ser classificados, quanto à dimensão dos seus grãos, em miúdos e graúdos. Os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm. Podem ser exemplificados pelas areias de uma maneira geral. Os agregados graúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira ABNT 76 mm e ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm. Como exemplo, podem ser citadas as britas (Ribeiro et al., 2006).

Os agregados podem ainda ser classificados quanto à sua composição granulométrica, que é a expressão das proporções dos grãos de diferentes tamanhos. Esta composição é obtida através de ensaio laboratorial, no qual a amostra do agregado é submetida a uma separação dos grãos por faixas granulométricas, de acordo com a série de peneiras da ABNT, para, então, serem definidos a dimensão máxima característica e o módulo de finura. Esses parâmetros são fundamentais para especificar o emprego dos agregados em argamassas e concretos. Cabe ressaltar que a composição granulométrica tem influência direta sobre a qualidade desses produtos, principalmente nos aspectos relativos à trabalhabilidade, compactidade e resistência aos esforços mecânicos (Ribeiro et al., 2006).

A dimensão máxima característica é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura de malha quadrada, em mm, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. A NB-1 prevê que a dimensão máxima característica do agregado não ultrapasse certos limites dimensionais, de maneira a não prejudicar a concretagem de estruturas armadas (Ribeiro et al., 2006; NB-1, 2003).

O Módulo de Finura (MF), que indica a utilização mais adequada para o agregado miúdo, é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Os agregados miúdos podem ser classificados, em função do módulo de finura, em areias grossas ($MF > 3,3$), médias ($2,4 < MF < 3,3$) e finas ($MF < 2,4$) (Ribeiro et al., 2006; NBR-7211, 2005).

Os agregados graúdos, particularmente as britas empregadas correntemente, podem ser classificadas, segundo faixas determinadas na série de peneiras normalizadas, em britas zero, 1, 2, 3 e 4 (NBR-7211, 2005).

A qualidade dos agregados pode ser avaliada através de ensaios laboratoriais, visando comparar os resultados a índices definidos pela Normalização. É importante avaliar a resistência aos esforços mecânicos, a presença de substâncias nocivas, a resistência ao desgaste e a reatividade potencial.

As substâncias nocivas, que os agregados miúdos e graúdos podem ocasionalmente conter, devem ter os seus teores limitados de maneira a não prejudicar a qualidade das argamassas e concretos. Essas substâncias podem se apresentar sob a forma de torrões de argila, materiais pulverulentos ou impurezas orgânicas (Bauer, 1994).

Reatividade potencial é o ensaio que verifica a ocorrência de reações álcalis-agregados, reações prejudiciais entre os agregados e a pasta de cimento que os envolve. O tipo mais comum é a reação entre os álcalis originados dos óxidos (Na_2O e K_2O) do cimento e alguns minerais silicosos do agregado, tais como opala, calcedônia e tridimita, provocando expansões, fissurações e outras manifestações prejudiciais às estruturas de concreto (Neville, 1997).

Deve-se ter um cuidado especial com o teor de umidade da areia na composição do concreto, uma vez que esse teor pode alterar a quantidade de água e o volume de areia calculado para a confecção desses produtos. A água conduzida pela umidade do agregado miúdo provoca um aumento do seu volume aparente, devido ao afastamento de seus grãos. Esse fenômeno é conhecido como inchamento e deve ser levado em consideração, para que não haja deficiência de areia no concreto. É importante observar que, na estocagem, os agregados miúdos devem ser protegidos das águas de chuva, para que não haja dispersão dos mesmos e nem aumento excessivo do seu teor de umidade (Ribeiro et al, 2006).

3.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma propriedade fundamental para avaliar a qualidade do concreto. Normalmente, considera-se que a resistência do concreto, a uma idade determinada, curado a uma temperatura estabelecida, depende fundamentalmente de dois fatores: a relação água-cimento e o grau de adensamento. Admite-se que a resistência é inversamente proporcional à relação água-cimento, desde que o concreto seja plenamente adensado, ou seja, com menor número de vazios. Além destes fatores, pode-se dizer que a resistência do agregado graúdo e da argamassa, assim como a aderência entre estes materiais, influenciam a resistência do concreto, ou seja, a capacidade de resistir às tensões que lhes são aplicadas (Mehta, 1994; Neville, 1997).

O concreto é classificado por grupos de resistência, tabela III.3, sendo dividido em 2 grupos (NBR-8953, 1992), em função do f_{ck} , resistência característica à compressão especificada no projeto estrutural.

Tabela III.3 - Classes de resistências do concreto

Grupo	Classe	Resistência característica à compressão - f_{ck} (MPa)
Grupo I	C10	10
	C15	15
	C20	20
	C25	25
	C30	30
	C35	35
	C40	40
	C45	45
	C50	50
	C55	55
Grupo II	C60	60
	C70	70

Fonte: NBR-8953, 1992.

Comportamento do concreto quando submetido a uma tensão de compressão

O comportamento do concreto, quanto às deformações, pode ser analisado através do estudo do diagrama tensão-deformação de corpos de prova cilíndricos submetidos à compressão (Mehta, 1994).

A partir de curvas típicas tensão-deformação para agregado, pasta endurecida e concreto, carregados em compressão uniaxial, figura 3.1, torna-se imediatamente aparente que, em relação ao agregado e à pasta de cimento, o concreto não é realmente um material elástico. Nem a deformação sob carga instantânea de um corpo de prova de concreto é, na verdade, diretamente proporcional à tensão aplicada, nem é esta totalmente recuperada após o descarregamento. A causa da não-linearidade da relação tensão-deformação foi explicada a partir de estudos sobre o processo de micro-fissuração progressiva do concreto sob carga (Mehta, 1994).

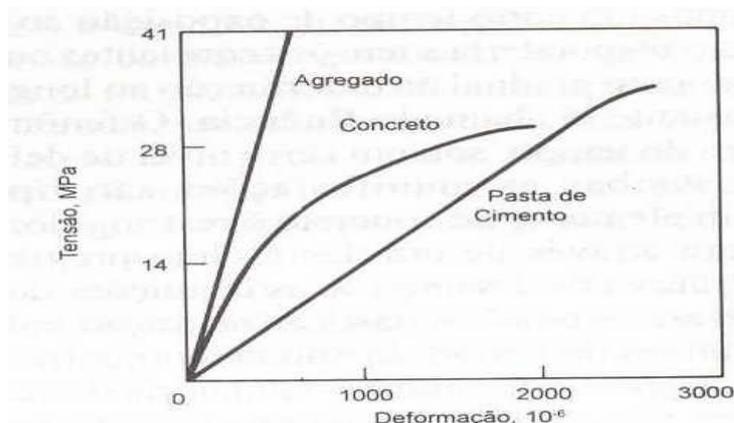


Figura 3.1 - Comportamento tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto (Mehta, 1994).

Do ponto de vista da relação entre o nível de tensão (expressa como porcentagem da carga última) e a microfissuração no concreto, na figura 3.2, mostram-se quatro estágios do comportamento do concreto. Hoje em dia, é bem conhecido que, mesmo antes da aplicação de carga externa, já existem microfissuras na zona de transição entre a matriz e

o agregado graúdo no concreto. O número e a aberturas destas fissuras em uma peça de concreto dependeriam, entre outros fatores, das características de exsudação, resistência da zona de transição e da história da cura do concreto. Sob condições normais de cura, devido às diferenças nos seus módulos de deformação, deformações diferenciais surgirão entre a matriz e o agregado graúdo, causando fissuras na zona de transição. Abaixo de cerca de 30% da carga última, as fissuras da zona de transição permanecem estáveis. Portanto, a curva tensão-deformação permanece linear e, a partir desse valor, começam a aumentar em comprimento, abertura e quantidade, criando uma interligação e formando um sistema contínuo de fissuras (Mehta, 1994).

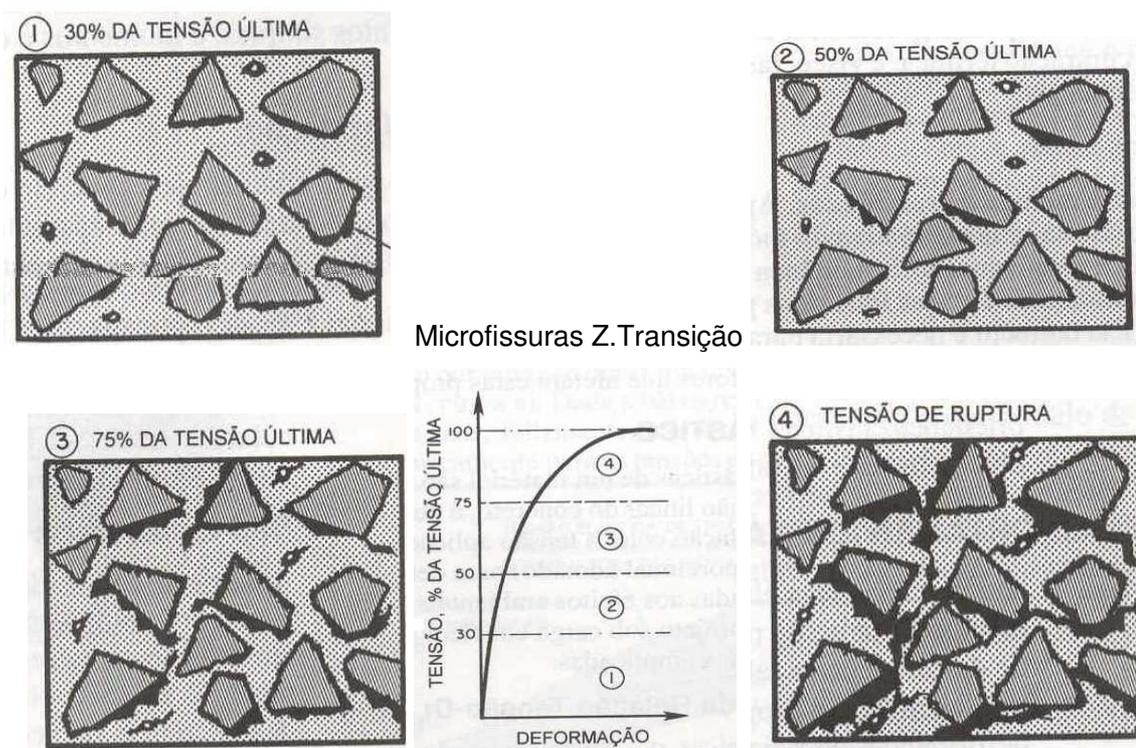


Figura 3.2 - Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial (Mehta, 1994).

3.4 Durabilidade do concreto

O concreto, material mais utilizado na construção civil, até pouco tempo, era visto como um material de durabilidade infinita, no entanto, nas últimas décadas, foram observadas inúmeras estruturas comprometidas, em decorrência de problemas relativos à durabilidade.

Um concreto durável é aquele que resiste às condições para o qual foi projetado, sem deterioração, por muitos anos. As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas no projeto e quando utilizadas corretamente, conservem sua segurança e estabilidade em serviço durante um período mínimo de 50 anos, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo (NB-1, 2003; Neville, 1997).

A durabilidade depende basicamente da qualidade do concreto e do ambiente ao qual o material está inserido.

O concreto de qualidade tem uma resistência à compressão compatível com os esforços a que será submetido e apresenta um alto grau de impermeabilidade. Estas características podem ser obtidas por um alto consumo de cimento, por uma baixa relação água-cimento, uma trabalhabilidade adequada, assim como operações corretas no que se refere à mistura, ao lançamento, ao adensamento e à cura do concreto (Mehta, 1994, Neville, 1997; Ribeiro et al., 2006).

É preciso assinalar que a deterioração do concreto raramente é devida a uma causa isolada. Um concreto pode, muitas vezes, ser satisfatório, apesar de alguns aspectos desfavoráveis, mas um único fator adverso suplementar pode provocar a sua deterioração (Ribeiro et al, 2006; Vasconcelos,1996).

O domínio da tecnologia do concreto evita o aparecimento de fissuras, fator de grande influência na durabilidade. As fissuras iniciais normalmente são devidas à deformação por retração e as fissuras que surgem ao longo da vida útil do concreto são causadas por diferenças de temperaturas, sobrecargas estruturais, corrosão das armaduras e reação álcalis-agregado. No que se refere às fissuras, é preciso levar em consideração que a fissuração só é nociva quando a abertura das fissuras na superfície do concreto ultrapassar os seguintes valores: 0,1mm para peças não protegidas em meio agressivo,

0,2mm para peças não protegidas em meio não agressivo e 0,3mm para peças protegidas em meio não agressivo.

Vários estudos vêm sendo realizados sobre aspectos referentes à qualidade do concreto, visando propor melhorias nas condições de obtenção e uso de estruturas. Paulo Helene, no seu livro “Reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto”, cita alguns casos de estruturas mal executadas, por exemplo, a ruptura de um pilar, tendo como causa provável um concreto apresentado apenas 7MPa em resistência à compressão axial, o que é uma resistência inadequada para um pilar no subsolo de um edifício, onde seria recomendável um mínimo de 20MPa (Helene, 1992b).

Outro problema apresentado refere-se à durabilidade e à corrosão de armaduras na base do pilar, tendo como causas prováveis um cobrimento dessas armaduras em desacordo com o projeto, uma falta de homogeneidade do concreto, a perda de nata de cimento pela junta das fôrmas, uma alta permeabilidade e uma insuficiência de argamassa para o envolvimento total dos agregados. A falta de cobrimento das armaduras também pode causar despassivação das armaduras por carbonatação, em consequência da penetração do gás carbônico ou por elevado teor de cloretos presentes no ambiente.

Em ambientes úmidos, o gás carbônico, os sulfatos e outros gases presentes na atmosfera atacam o concreto, dissolvendo e removendo parte do cimento endurecido. Esta forma de ataque ocorre em ambiente urbanos ou industriais, que estão classificados como de agressividade média a forte. Os produtos dessas reações têm um volume consideravelmente maior do que os compostos iniciais, de modo que a reação como os sulfatos, por exemplo, leva à expansão e desagregação do concreto.

Reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos, que provocam expansões e desagregações no concreto, vêm sendo objeto de inúmeros trabalhos, principalmente os que se referem à durabilidade de estruturas em grandes hidrelétricas.

Os mecanismos relativos às ações mecânicas (abrasão, erosão e cavitação) são de grande interesse para os engenheiros que projetam canais e galerias pluviais e materiais submetidos à abrasão, enquanto retração, fluência e relaxação, vêm sendo exaustivamente trabalhadas por pesquisadores da área estrutural.

3.4.1 Abordagem da durabilidade pela normalização brasileira

Os grandes avanços obtidos com a evolução tecnológica exigiram uma maior atenção à durabilidade do material, que passou, então, a ser abordada de uma forma mais efetiva pela Normalização Brasileira. A NB-1, Projeto de estruturas de concreto, em sua nova versão, considera que se deve utilizar um concreto compatível para cada tipo de ambiente. O concreto é subdividido em classes que correlacionam resistência à compressão e o fator água-cimento, em função do meio a que está exposto (tabela III.5).

Os elementos estruturais de uma edificação como lajes, vigas e pilares também foram objeto de uma especificação que considera o ambiente e têm, portanto, de apresentar, independentemente do projeto, uma espessura mínima de cobrimento das armaduras, visando garantir uma maior durabilidade e, conseqüentemente, uma maior vida útil das edificações. Nas versões anteriores, essas medidas eram indicadas para efeito de segurança estrutural e, desta forma, podiam variar conforme o engenheiro projetista.

Na NB-1 atualizada, os cobrimentos dos principais elementos estruturais são definidos em função das diferentes condições de agressividade, que são subdivididas em quatro classes, onde se considera a agressividade ambiental como causa determinante da deterioração de uma edificação ao longo do tempo. As agressividades englobam os principais ambientes nos quais as obras são implantadas: ambiente rural, ambiente urbano sem ataques pesados de poluição, ambiente marinho, ambiente industrial e outros mais específicos, sendo que a agressividade por sulfatos é característica dos ambientes urbanos ou industriais, classificados como ambientes de agressividade média a forte. A cada um dos ambientes deve corresponder uma espessura mínima de cobrimento da armadura dos diferentes elementos estruturais. Esses cobrimentos variam de 20 a 50mm e são apresentados nas tabelas III.4, III.5 e III.6.

Em condições de exposição adversas devem ser tomadas medidas especiais de proteção e conservação, como aplicação de revestimento hidrofugantes e pinturas impermeabilizantes sobre a superfície do concreto (NB-1, 2003).

Tabela III.4 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de Deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Média	Urbana ^{1);2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1);2)}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{1);3)}	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: NB-1, 2003.

- 1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto com argamassa e pintura).
- 2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.
- 3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Tabela III.5 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e fator água/cimento (a/c)

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c	Concreto Armado	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
Em massa	Concreto Protendido	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	Concreto Armado	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	Concreto Protendido	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

Fonte: NB-1, 2003.

Tabela III.6 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido	Todos	30	35	45	55

Fonte: NB-1, 2003.

3.4.2 Permeabilidade do concreto

A permeabilidade do concreto vem sendo enfocada em muitas pesquisas que têm como objetivo correlacionar este parâmetro à deterioração do material, uma vez que a permeabilidade pode representar uma alta ou baixa capacidade de defesa a agentes externos agressivos, decisivos quanto à vulnerabilidade do concreto.

A permeabilidade do concreto está diretamente ligada à quantidade de cimento empregada, ao fator água/cimento e ao grau de adensamento. Para uma mesma relação água/cimento, um cimento mais grosso tende a produzir uma pasta com porosidade mais elevada do que um cimento mais fino. Em linhas gerais, pode-se dizer que quanto maior a resistência da pasta, menor é a sua permeabilidade.

Para avaliar a influência do agregado na permeabilidade do concreto, pode-se comparar uma pasta, cimento e água, com o concreto produzido com uma pasta similar e o agregado em estudo. Se o agregado utilizado tiver uma permeabilidade baixa, reduzirá a área efetiva de fluxo, o qual deverá ainda contornar as partículas do agregado, tornando a distância mais longa, de forma que o efeito do agregado na redução da permeabilidade deve ser levado em consideração. No entanto, a influência do teor de agregado na mistura, geralmente, é pequena e, desde que as partículas de agregado sejam envolvidas pela pasta de cimento, num concreto bem adensado, a permeabilidade da pasta é mais significativa para a permeabilidade do concreto (Neville, 1997).

O volume ocupado pelos poros do concreto, que não deve ser confundido com a permeabilidade, é medido pela absorção. As duas quantidades não estão, necessariamente, relacionadas. A absorção é medida, normalmente, secando-se uma amostra até a constância de massa, imergindo-a, em seguida, em água e determinando-se o acréscimo de massa expressa em porcentagem de massa seca. São utilizados diversos métodos cujos resultados variam bastante. Uma das razões da variação dos valores de absorção, é que, num extremo, a secagem em temperaturas normais pode não ser suficiente para remover toda água; por outro lado, a secagem, em temperaturas elevadas, pode remover parte da água combinada.

A absorção não pode ser usada como medida da qualidade de um concreto, mas grande parte dos concretos de boa qualidade tem absorção bem abaixo de 10% (Neville, 1997). Portanto, um concreto durável tem que ser impermeável, dificultando a penetração de substâncias agressivas.

Vários estudos têm sido realizados visando determinar e quantificar a influência da permeabilidade na durabilidade do concreto. Métodos utilizados por Sebe (2002), avaliando a penetração de água no concreto por absorção, através de imersão ou capilaridade, permeabilidade (pressão diferencial) e difusão (gradiente de concentração), foram fundamentados nos princípios da Lei de Darcy para sólidos porosos na determinação do coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica do concreto.

Silva, em seu trabalho intitulado "Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para caracterização e análise estrutural de concretos de cimento Portland", avalia técnica para quantificar os poros existentes no concreto através de adsorção de nitrogênio. A técnica apresentada em seu trabalho se refere à adsorção de nitrogênio, a qual mede a quantidade de gás adsorvido em uma superfície sólida, com uma pressão de vapor de equilíbrio, pelo método volumétrico estático. Os dados são obtidos pela admissão ou remoção de uma quantidade conhecida de gás adsorvido para dentro ou para fora de um porta-amostra contendo o sólido adsorvente, mantido a uma temperatura constante abaixo da temperatura crítica do adsorvato. Com a ocorrência da adsorção, a pressão no porta-amostra varia até ser estabelecido o equilíbrio. A quantidade de gás adsorvido na pressão de equilíbrio é a diferença entre a quantidade de gás admitida ou removida e a quantidade requerida para preencher o espaço ao redor do adsorvente (espaço vazio). O

ensaio de adsorção de nitrogênio geralmente é realizado controlando-se a temperatura da amostra e, por isso, as curvas obtidas são chamadas de isotermas de adsorção. O processo de adsorção/dessorção de um gás em uma amostra porosa gera um ciclo de histerese e a análise deste ciclo permite calcular o volume total de poros e o tamanho médio dos poros (Silva, 1998).

3.4.3 O papel da cura na durabilidade do concreto

O conjunto de procedimentos adotados para promover a hidratação do cimento é conhecido como cura do concreto e consiste num controle de temperatura e de movimentação de umidade após o lançamento do concreto nas fôrmas. A cura adequada é decisiva na durabilidade das estruturas, uma vez que o período de cura representa a garantia de que as reações de hidratação do cimento sejam convenientemente processadas.

Mais especificamente, o objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou o mais próximo possível dessa condição, até que os espaços inicialmente ocupados pela água na pasta fresca, sejam ocupados pelos produtos da hidratação do cimento. A necessidade de cura é devida ao fato de que a hidratação do cimento só pode se efetuar nos capilares cheios de água. A perda de água depende da temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (Neville, 1997).

Para evitar a fissuração superficial, deve-se proteger a superfície do concreto, a fim de impedir a perda de água que pode ocorrer mesmo antes da pega. Depois da pega, pode-se fazer a cura com aspersão de água. É preciso ressaltar que secagens prematuras resultam em camadas superficiais porosas com baixa resistência ao ataque de agentes agressivos (Helene, et al., 1996).

Mehta apresenta um estudo sobre a influência da umidade de cura sobre a resistência de concretos com mesmo fator água-cimento, figura 3.3, demonstrando que, após 180 dias, o concreto curado sob condições continuamente úmidas apresentou uma resistência três vezes maior do que o concreto curado ao ar (Mehta, 1994).

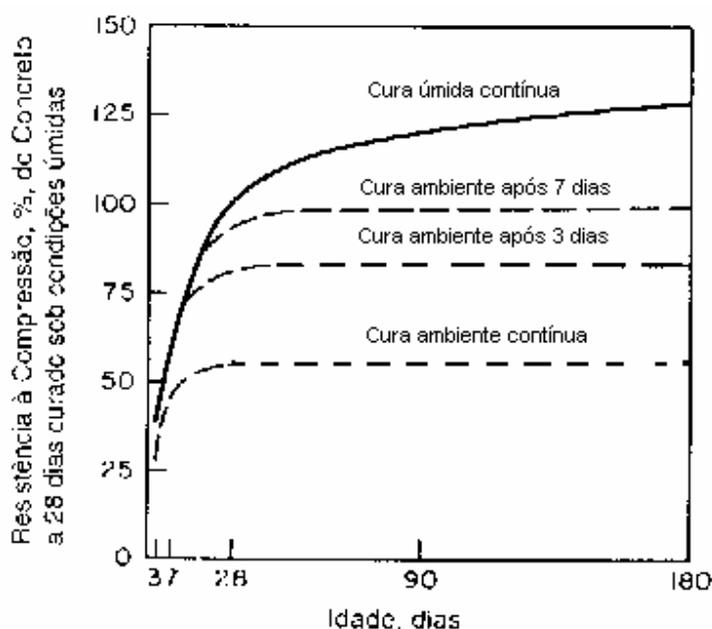


Figura 3.3 - Influência das condições de cura sobre a resistência (Mehta, 1994).

3.4.4 Problemas que comprometem a durabilidade das obras

Vasconcelos (1996), em sua análise sobre problemas recorrentes nas estruturas de concreto, enfatiza a importância de se fazer uma discussão sobre os fatores que comprometem a durabilidade, desde o início de uma edificação. Dentre as questões apontadas, enfatiza que, muitas vezes, uma concepção estrutural deturpada é decorrente de um projeto arquitetônico mal concebido, uma vez que o engenheiro, forçado a obedecer todos os detalhes arquitetônicos, concebe uma estrutura que não funciona bem, por não ter tido um contato com o arquiteto, demonstrando que é primordial a interação entre essas áreas do conhecimento.

No que se refere ao projeto estrutural, a falta de clareza na especificação de alguns parâmetros leva à tomada de decisões que nem sempre correspondem ao atendimento das condições de projeto. Um destes parâmetros é a resistência do concreto a ser adotada e outro é a espessura das lajes. Segundo Vasconcelos (1996), estes parâmetros devem estar em destaque e, muitas vezes, são apenas umas pequenas notas no final da página.

Outra questão recorrente é a retirada de escoramentos antes do tempo, para adiantar a execução da obra, o que acarreta uma deformação do concreto “jovem”, que passa a apresentar uma flecha significativa. Uma laje, por exemplo, pode apresentar uma flecha de 5,0cm, ao invés de 2,0cm. Esta deformação demanda um nivelamento do piso, logo, mais massa, mais peso, mais deformação. Os projetos devem, portanto, conter as especificações sobre descimbramento, ou seja, a retirada do escoramento, respeitando a idade do concreto (Vasconcelos, 1996).

No que se refere à colocação de cargas na estrutura, vale lembrar que, os carregamentos de uma laje projetada para uma sobrecarga de 200kg/m^2 , mais 150kg/m^2 de revestimento de piso e 50kg/m^2 do teto, deveriam ser especificados e o engenheiro, ao ler essas anotações, não colocaria, durante a fase de obra, um depósito de tijolos, sacos de cimentos, areia, enfim, cargas de até 700kg/m^2 . Esta sobrecarga, provavelmente, vai provocar fissuras e diminuir a vida útil do concreto. Vale ressaltar que as fissuras nem sempre são percebidas imediatamente.

3.4.5 Durabilidade das estruturas sob o ponto de vista econômico

Do ponto de vista econômico, é importante abordar a regra de Sitter que, por sua pertinência, consta nas diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto da NB-1. De acordo com esta regra, que avalia o custo/benefício de prevenção e manutenção de estruturas em relação à durabilidade, os custos de recuperação de estruturas se apresentam segundo uma progressão geométrica de razão 5 (cinco), na qual são consideradas quatro etapas distintas, variando desde a fase de projeto até a fase de utilização da estrutura. Estas fases são: fase de projeto; fase de execução; fase de manutenção preventiva; fase de manutenção corretiva.

De acordo com sua avaliação, qualquer providência tomada ainda durante a fase de projeto, visando prevenir ou corrigir futuras manifestações patológicas, corresponde a um custo arbitrado como valor unitário.

Durante a fase de execução, qualquer medida adicional às especificadas em projeto, visando sanear ou evitar ocorrências patológicas não previstas durante a fase anterior, corresponderão a um custo da ordem de 5 vezes maior do que se a medida já houvesse sido tomada.

Durante a fase de utilização da construção, se houver manutenção preventiva, se a ocorrência patológica puder ser prevista ou antecipada quando da manutenção regular da construção e se forem tomadas, imediatamente, as medidas cabíveis para o seu controle ou supressão, o custo dessa intervenção será 5 vezes menor do que custaria se a medida corretiva fosse tomada após a ocorrência da manifestação. Mesmo assim, esse custo seria 25 vezes superior ao custo incorporado à estrutura, se a medida houvesse sido recomendada quando da elaboração do projeto.

Durante a fase de utilização da construção, se houver necessidade de manutenção corretiva, o custo para a correção da ocorrência de manifestação patológica evidente será 5 vezes aquele de fase anterior, o que corresponde a 125 vezes superior aos custos da fase de projeto.

3.5 Dosagem de concreto

Dosagem é a determinação da mistura mais econômica de um concreto, com características capazes de atender às condições de serviço, utilizando os materiais disponíveis.

Apesar dos métodos de dosagem diferirem entre si, certas considerações são comuns a todos, como, por exemplo, o cálculo da resistência de dosagem, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento, a evolução do crescimento da resistência com o tempo, o consumo de água por unidade de volume para obtenção da trabalhabilidade requerida, certos ajustes experimentais em laboratório e as correções em obra.

A resistência à compressão é o parâmetro principal utilizado no cálculo da dosagem e controle de qualidade dos concretos. Do ponto de vista do controle da resistência à compressão, é importante assinalar os principais fatores que a influenciam. Através de dedução teórica, tomando-se como referência o modelo de Abrams, obtém-se uma equação que explicita os fatores intervenientes, permitindo avaliar a influência relativa de cada um na variabilidade total do concreto.

O controle da resistência à compressão do concreto das estruturas é parte integrante da construção, sendo indispensável a comprovação permanente da resistência que está sendo obtida. Avaliar se o que está sendo produzido corresponde ao que foi adotado

previamente, por ocasião do dimensionamento da estrutura, faz parte da própria concepção do processo construtivo como um todo (Helene, 1992).

Apesar de estudos realizados anteriormente, considera-se que o primeiro estudo de proporcionamento racional dos materiais tenha sido feito por René Ferét, em pesquisas na École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. Em 1892, Ferét estabeleceu a lei fundamental que correlaciona a resistência da argamassa com a compacidade. Estudando misturas com cimento e areia, com idade e condições de cura idênticas, verificou, experimentalmente, que a resistência à compressão de argamassas inicialmente plásticas é função da relação do volume absoluto de água mais o volume de vazios da argamassa com o cimento. Mais tarde, em 1896, aperfeiçoou esse modelo matemático, correlacionando a resistência à compressão com o volume de água e de vazios e propondo a expressão 3.1:

$$f_{cj} = k_1 \left(\frac{C_{abs}}{1 - M} \right)^2 \quad (3.1)$$

Onde,

f_{cj} - resistência do concreto à compressão prevista para a idade de j dias;

k_1 - constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura;

C_{abs} - volume absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa;

M - volume absoluto do agregado miúdo por unidade de volume de argamassa.

Segundo Helene (1992), Abrams chegou às mesmas conclusões que Ferét havia chegado vinte e dois anos antes, desprezando, porém, o volume de vazios e considerando apenas a relação entre o volume de água e o volume aparente de cimento, para o qual adota a massa unitária fixa de 1.500kg/m^3 . Dessa forma, propõe o seguinte modelo matemático para expressar a dependência entre as variáveis em questão, expressão 3.2:

$$f_{cj} = \frac{k_2}{k_3^{H/C_{ap}}} \quad (3.2)$$

Onde:

$f_{c,j}$ - resistência do concreto à compressão prevista para a idade de j dias;

k_2 e k_3 - constantes que dependem da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura;

H - volume de água por unidade de concreto;

C_{ap} - volume aparente do cimento por unidade de volume de concreto.

O proporcionamento dos materiais, ou seja, a dosagem do concreto, pode ser feito de duas formas: uma não experimental ou empírica e a dosagem experimental.

Dosagem não experimental ou empírica

Na dosagem não experimental, a proporção dos materiais é fixada pela experiência do construtor ou através da utilização de tabelas. De acordo com a NB-1, a dosagem não experimental só é permitida para obras de pequeno vulto, sendo a quantidade mínima de cimento de 300kg/m^3 e respeitadas as condições referentes à trabalhabilidade (Ribeiro et al., 2006).

Dosagem experimental

Os materiais constituintes e o concreto obtido são previamente ensaiados em laboratório. A dosagem experimental visa estabelecer o traço do concreto com a resistência e a trabalhabilidade previstas. A dosagem experimental poderá ser feita por qualquer método que estabeleça uma correlação entre estes parâmetros. Os métodos de dosagem mais conhecidos são: método do ACI – American Concrete Institute (ACI, 1973), método da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, método do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e método do INT – Instituto Nacional de Tecnologia (Ribeiro et al., 2006).

A dosagem experimental é feita, portanto, a partir da fixação do fator água-cimento, que depende da resistência de dosagem e das características da obra e da definição de uma trabalhabilidade compatível com os materiais e com a execução do concreto (Ribeiro et al., 2006).

Resistência de dosagem

O objetivo do controle da resistência à compressão do concreto é a obtenção de um valor potencial, único e característico da resistência à compressão de um certo volume de concreto, a fim de comparar esse valor com aquele que foi especificado no projeto

estrutural e, conseqüentemente, tomado como referência para o dimensionamento da estrutura (Helene, 1992).

Os valores de ensaio que se obtêm dos diferentes corpos de prova têm uma certa dispersão, variável de uma obra a outra conforme o rigor de produção do concreto. Verifica-se que só a média dos resultados não seria suficiente para definir e qualificar uma produção de concreto. É necessário considerar a dispersão dos resultados medida através do desvio-padrão do processo de produção e ensaio, tendo sido adotado o conceito de resistência característica do concreto à compressão, que é uma medida estatística que engloba a média e a dispersão dos resultados, permitindo definir e quantificar um concreto através de um valor característico. A aplicação dos métodos estatísticos é o melhor meio de que se dispõe para avaliar a qualidade e a resistência provável do concreto de uma estrutura (Bauer, 1994).

Deve-se ressaltar que a resistência característica avaliada estatisticamente, curva de Gauss, se refere ao $f_{ck,est}$, que deverá ser maior ou igual ao f_{ck} estabelecido no projeto estrutural. (Ribeiro et al., 2006).

O valor da resistência de dosagem, conhecido como f_{cj} , visa garantir que seja assegurado o valor de f_{ck} especificado no projeto. De acordo com a Norma Brasileira, a resistência de dosagem é calculada pela equação: (NBR-12655, 1996)

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (3.3)$$

Onde,

f_{ck} - Resistência característica do concreto à compressão especificada no projeto estrutural;

f_{cj} - Resistência do concreto à compressão prevista para a idade de j dias;

s_d - Controle da obra;

s_d - 4,0 MPa - Rigoroso (profissional presente na obra e materiais em peso);

s_d - 5,5 MPa - Razoável (profissional presente na obra e material em peso e volume);

s_d - 7,0 MPa - Regular (materiais em peso e volume).

Calculada a resistência de dosagem, deve-se adotar um dos métodos de dosagem experimental, para definir as proporções adequadas de cimento, areia, brita e água, que são os materiais constituintes do concreto.

3.6 Principais mecanismos de ataque ao concreto

Andrade (1997) apresenta, em seu trabalho desenvolvido em Furnas, os principais agentes agressivos e os diferentes graus de deterioração que provocam no concreto, tabela III.7.

Tabela III.7 - Agentes agressivos ao concreto

Ácido					
Material	Efeitos no concreto	Material	Efeitos no concreto		
Sulfuroso	Desintegração	Bórico	Nenhum		
Sulfúrico		Oxálico			
Carbônico		Esteárico	Desintegração lenta		
Nítrico		Oléico			
Clorídrico		Acético			
Lático		Tânico	Desintegração quando dissolvido em água		
Muriático		Sulfídrico			
Fosfórico	Ataque lento à superfície				
Sais e Alcalis					
Material	Efeitos no concreto	Material	Efeitos no concreto		
Carbonato de amônia	Nenhum	Nitrato de amônia	Desintegração		
Carbonato de potássio		Sulfato de amônia			
Carbonato de sódio		Sulfato de potássio			
Hidróxido de sódio		Sulfato de alumínio			
Hidróxido de potássio		Sulfato de magnésio			
Hidróxido de cálcio		Sulfato de zinco			
Nitrato de cálcio		Sulfato de sódio			
Nitrato de potássio		Sulfato de níquel			
Nitrato de sódio		Sulfato de cálcio			
Silicatos		Sulfato de cobre			
Permanganato de potássio		Sulfato de ferro			
Cloreto de cálcio		Nenhum (exceto quando submetido ao efeito molhagem/secagem)		Cloreto de magnésio	Desintegração lenta
Cloreto de potássio				Cloreto férreo	
Cloreto de sódio	Cloreto de mercúrio				
Fluoretos	Nenhum (exceto o fluoreto de amônia)		Cloreto de zinco		
			Cloreto de cobre		
		Cloreto de amônia			
Derivados de petróleo					
Material	Efeitos no concreto	Material	Efeitos no concreto		
Gasolina	Requer concreto impermeável e um tratamento de superfície	Óleos minerais leves	Requer concreto impermeável e um tratamento de superfície		
Querosene		Óleos minerais pesados	Nenhum		
Benzina					

Fonte: Andrade, 1997.

Propõe-se focar nesta pesquisa o papel dos sulfatos como agentes agressivos e suas implicações na durabilidade do concreto, uma vez que, as estruturas de concreto podem estar expostas a ataques por sulfatos presentes em vários meios, como solos, águas subterrâneas, efluentes domésticos, ambientes industriais e agrícolas, pântanos, lagos pouco profundos, poços de mineração e na atmosfera.

A degradação do concreto, como resultado de reações químicas entre o cimento portland hidratado e sulfatos de fontes externas, pode ocorrer de duas formas: por expansão do concreto e pela perda progressiva de massa e de resistência. Estas formas de deterioração dependem da concentração dos sulfatos presentes nos agentes de contato e da composição da pasta de cimento no concreto. O ataque por sulfato, que pode se manifestar na forma de expansão, provoca a fissuração do concreto, aumentando a sua permeabilidade e facilitando a penetração do agente agressivo. O ataque por sulfato pode, também, provocar uma perda progressiva de massa e resistência, devido à deterioração na coesão dos produtos de hidratação do cimento (Mehta, 1984).

Os fatores que influenciam o ataque dependem da natureza e quantidade do sulfato presente, do nível da água e sua variação sazonal, do fluxo da água subterrânea e porosidade do solo, assim como, da qualidade do concreto e da construção.

Em função do grau de severidade do ataque por sulfato, são propostas algumas precauções visando garantir a durabilidade do concreto, citadas abaixo.

- . Ataque negligenciável - sulfato abaixo de 0,1% no solo, ou abaixo de 150ppm (mg/l) na água - sem restrições quanto ao tipo de cimento e fator água/cimento propostos;
- . Ataque moderado - sulfato entre 0,1 a 0,2% no solo, ou 150 a 1500ppm (mg/l) na água - usar cimentos tipo Portland composto, pozolânico ou de alto-forno, com fator água/cimento menor que 0,5;
- . Ataque severo - sulfato entre 0,2 a 2,0% no solo, ou 1500 a 10.000ppm (mg/l) na água - fator água/cimento menor que 0,50 e resistência mínima à compressão aos 28 dias de 28MPa;
- . Ataque muito severo - sulfato acima de 2% no solo, ou acima de 10.000ppm (mg/l) na água - fator água/cimento menor que 0,45 e resistência mínima à compressão aos 28 dias de 28MPa.

Os ataques descritos provocam uma deterioração que comumente começa nos cantos e arestas, seguida por uma fissuração progressiva e um desprendimento de lascas que reduzem o concreto a uma condição friável ou até fraca (Neville, 1997).

Alguns casos de ataques por sulfato são citados na literatura, dentre eles os pilares de uma ponte na Alemanha Oriental. Nesta construção, a fundação atingiu uma fonte de água natural que continha 2.040mg/l de sulfato, provocando a expansão do concreto e causando uma intensa fissuração, fazendo-se necessário demolir e reconstruir a fundação. A ocorrência de expansão por sulfato pode ser evitada através de um levantamento completo das condições ambientais e pelo uso de proteção contra o ataque por sulfato (Mehta, 1994).

Outro ataque por sulfato ocorreu em uma barragem em Montana (EUA), quando o sulfato contido em águas subterrâneas, da ordem de 10.000mg/l, provocou, após um período de 20 anos, uma perda significativa da resistência das estruturas de concreto da barragem.

Concreto com baixo consumo de cimento é atacado mais rapidamente e a composição do cimento tem maior influência na durabilidade do concreto, uma vez que sua vulnerabilidade ao ataque por sulfatos pode ser reduzida pelo uso de cimento com baixo teor de C_3A . Na prática, foi constatado que o teor de 7% de C_3A estabelece, a grosso modo, uma divisão entre cimentos de desempenho bom e fraco, em águas sulfatadas. Aparentemente, no entanto, há outros fatores, ainda não identificados, que têm influência sobre a resistência dos cimentos aos sulfatos (Neville, 1997).

Os sulfatos presentes nas soluções podem reagir com a pasta de cimento endurecida, reagindo com o $Ca(OH)_2$ e com o aluminato tricálcico hidratado (C_3A) presentes no cimento, sendo que os produtos dessas reações, gesso e sulfo-aluminato de cálcio, têm um volume consideravelmente maior do que os compostos iniciais, o que provoca a expansão e desagregação do concreto (Neville, 1997).

Diante da importância das questões relatadas, apreende-se a relevância de se pesquisar concretos com características marcantes de qualidade e com camadas protetoras superficiais visando garantir sua durabilidade.

3.7 Mecanismos de proteção do concreto a ataques externos

Nas últimas décadas, foram observadas inúmeras estruturas comprometidas em decorrência de problemas relativos à durabilidade, sinalizando a premência de se ampliar a pesquisa de materiais e de métodos construtivos enfocando a qualidade do concreto, a ataques externos que possam afetá-lo e proteções superficiais.

Os avanços ocorridos na química nos últimos anos vêm possibilitando o desenvolvimento de inúmeros tipos de proteção que, aliados à inovação das metodologias de aplicação, permitem garantir a durabilidade através da redução da absorção de água, da penetração de sais e de gases agressivos, desde que as proteções propostas sejam periodicamente inspecionadas para verificação da necessidade de renovação, a fim de continuarem mantendo sua funcionalidade.

Dentre as proteções desenvolvidas, as tintas têm um papel de destaque, porque, quando aplicadas, aderem à superfície do concreto formando um filme contínuo de baixa permeabilidade. As tintas, além de oferecerem a proteção necessária contra os principais agentes agressivos, devem possuir resistência ao intemperismo, à fotodegradação, evitar o desenvolvimento de fungos e bactérias e ser resistente a pequenos impactos e riscos. Devem apresentar, também, estabilidade química em relação ao concreto, de forma a evitar a ocorrência de eflorescências, saponificação e outras anomalias, decorrentes da elevada alcalinidade do substrato (Helene, 1992b).

O mecanismo básico de proteção por pinturas de superfície consiste na formação de uma película semiflexível e contínua. Estas pinturas requerem um substrato homogêneo e liso, com poros de abertura máxima de 0,1mm e devem ter flexibilidade superior à do concreto, a fim de poderem acompanhar pequenas movimentações estruturais. A maioria destas pinturas é capaz de vedar uma fissura existente de até 0,1mm, não absorvendo eventuais fissurações posteriores que venham a ocorrer na estrutura, uma vez que a película é rompida se a estrutura vier a fissurar após a pintura de proteção concluída. Em outros países já são disponíveis sistemas de alta elasticidade, capazes de absorver movimentações de até 5mm (Helene, 1992b).

Almusallam, em seu trabalho "*Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability*", classifica as proteções do concreto em cinco grandes grupos, após uma

avaliação geral que o autor realizou sobre as proteções que vêm sendo utilizadas na engenharia civil em função dos agentes agressores. Os grupos foram denominados como proteções acrílicas, emulsões de polímero, resinas epóxi, poliuretanos e borrachas cloradas (Almusallam et al., 2003).

As proteções são compostas por matérias-primas que vão influenciar suas propriedades. No caso da proteção acrílica, é uma tinta monocomponente, à base de resina acrílica obtida da reação de polimerização de monômeros acrílicos, como o metacrilato de metila e acrilato de butila. O metacrilato de metila é duro e quebradiço e o acrilato de butila é mole e elástico. A combinação de ambos resulta em copolímeros com propriedades intermediárias, que são interessantes às tintas (Gnecco, C., 2003). Tendo sido desenvolvidos especialmente para serem utilizados na proteção superficial de estruturas de concreto (Helene, 1992b)

As tintas acrílicas industriais não são saponificáveis, não amarelam com o tempo, têm dureza e resistência à abrasão. Apresentam resistência à fotodegradação e a atmosferas agressivas, mantendo seu brilho característico. Elas são de qualidade similar à borracha clorada em termos gerais, apesar de serem mais resistentes a respingos ácidos e alcalinos (Nunes, 1990). Requerem uma boa limpeza de superfície, devendo ser especificadas para atmosferas mediamente agressivas.

Formulação básica: Emulsão acrílica - 22%; Dióxido de titânio - 14%; Sulfato de Bário (Barita) - 12%; Caolin - 2%; Carbonato de cálcio precipitado - 23%; Sílica Diatomácea - 2%; Carboximetilcelulose (CMC) - 1%; Água - 20%; Poliacrilato de amônio - 0,03%; Solução de soda cáustica a 5% - 1%; Agente antiespumante - 1%; Dietilenoglicol - 1,77%; Anti-séptico - 0,20%.

O pigmento branco é o dióxido de titânio, enquanto o sulfato de bário, o caolim, o carbonato de cálcio e a sílica diatomácea são substâncias denominadas cargas, as quais são acrescentadas às tintas afim de aumentar seu rendimento e torná-las mais opacas e rígidas. O agente tensoativo (emulsionante) já está incorporado à emulsão acrílica. A ação umectante do poliacrilato de amônio ajuda na dispersão dos pigmentos e cargas, enquanto o CMC age como espessante. O agente antiespumante é o óleo de silicone. A soda cáustica regula o pH, facilitando a manutenção da emulsão. O dietilenoglicol pode

ser dispensado no Brasil, dado a ser apenas um anticongelante. Finalmente, o anti-séptico evita a proliferação de fungos, mofo e similares (Nunes, 1990).

A borracha clorada é uma tinta monocomponente, contendo solventes, resina e pigmentos. A resina é um polímero à base de borracha clorada. A resina é um tipo de veículo obtido pela cloração de borrachas naturais ou de elastômeros. Em função da obtenção deste polímero, ocorre uma falta de flexibilidade, fazendo-se necessário a utilização de plastificantes selecionados, a fim de melhorar a elasticidade, aderência e formação do filme. Com este artifício utilizado na fabricação, obtêm-se borrachas cloradas que têm boa resistência e desempenho em ambientes industriais com altas concentrações de vapores, respingos de álcalis e ácidos. Necessitam de boa limpeza de superfície, para assegurar uma aderência ao substrato, e têm baixa permeabilidade à umidade (Nunes, 1990).

Apresenta-se, a seguir, uma formulação básica desta tinta que, devido à inexistência de óleo, mostra-se resistente à maresia, à imersão em água do mar, bem como a álcalis e ácidos: Borracha clorada - 18%; Plastificantes (parafina clorada) - 12%; Óxido de titânio (rutilo) - 20%; Solvente aromático - 37,5%; Aguarrás mineral - 12,5%.

O líquido incolor à base de silano-siloxano é conhecido como selador, tendo a propriedade de tornar as superfícies repelentes à água, impedindo sua penetração. Uma característica a ser assinalada é a não alteração do brilho e da aparência dos materiais, evitando eflorescências, manchas e escurecimento do rejunte.

Os métodos atuais e mais utilizados na avaliação e análise da qualidade de tintas para proteção do concreto são os que consideram poder de cobertura, viscosidade, dispersão do pigmento, matéria volátil, rendimento, espessura da película, brilho, flexibilidade, resistência às intempéries (naturais e artificiais), resistência à abrasão, resistência à névoa salina e resistência à luz.

3.8 Perfilometria

A técnica de perfilometria é muito utilizada para avaliar a textura superficial de diversos materiais e vem contribuindo significativamente no desenvolvimento da área de metalurgia e materiais. Considerando a importância de se utilizarem experiências bem sucedidas na área de materiais, propõe-se, neste trabalho, utilizar esta técnica na avaliação superficial do concreto, a fim de avaliar degradações decorrentes da sua produção e de ataques a que possa estar submetido. Deve-se assinalar a importância para a área da construção civil da utilização desta técnica, uma vez que ainda não foram publicados trabalhos na avaliação da textura superficial do concreto.

CAPÍTULO 4: METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida numa parceria entre a UFMG, PUC Minas e CDTN permitiu a análise da textura superficial do material, através de uma abordagem topográfica, avaliando a durabilidade do concreto submetido a ataque químico. A metodologia foi realizada de acordo com as seguintes etapas.

4.1 Composição de métodos de dosagem

O concreto abordado neste trabalho foi dosado a partir de resultados obtidos em pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, levando em consideração os métodos de dosagens do ACI – American Concrete Institute e do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. O trabalho desenvolvido permitiu a obtenção de um concreto de qualidade e de alta resistência.

O estudo foi iniciado a partir da comparação entre concretos de composições diversas, com materiais tradicionais e/ou materiais substitutivos, para ser utilizado em diferentes situações. As inúmeras dosagens realizadas nos laboratórios da UFMG e da PUC permitiram fazer comparações entre concretos de diferentes resistências, trabalhabilidade, grau de adensamento e, inclusive, com diferentes tipos de aditivos.

4.2 Produção do concreto

A partir das dosagens foram produzidos os concretos a serem avaliados. Esta produção corresponde às etapas de homogeneização dos materiais constituintes, lançamento, adensamento e cura, que são fundamentais para garantir a obtenção de concretos resistentes e duráveis.

Os concretos foram produzidos de acordo com as dosagens propostas. A produção propriamente dita, que corresponde à mistura dos materiais constituintes, foi feita em betoneira em um tempo que variou de três a cinco minutos, período de amassamento que foi necessário para garantir uma boa homogeneização. Este cuidado é fundamental, uma vez que a falta de homogeneidade implica em um sensível decréscimo da resistência mecânica e da durabilidade do concreto.

4.3 Análise do concreto no estado fresco

A avaliação do concreto em estado fresco foi feita pelo abatimento do tronco de cone, figura 4.1. O molde foi preenchido em três camadas, adensadas com 25 golpes cada. A medida do abatimento, conhecida como "slump", que tem como objetivo verificar se a trabalhabilidade está de acordo com a utilização prevista para o concreto, foi estipulada em 2 a 4cm, para garantir uma trabalhabilidade condizente com o concreto em estudo.



Figura 4.1 - Ensaio do abatimento do tronco de cone - "Slump"

4.4 Análise do concreto no estado endurecido

4.4.1 Moldagem dos corpos de prova

O lançamento, o adensamento e a cura, em câmara úmida, foram feitos de acordo com as especificações correntes na construção civil em todas as concretagens, uma vez que os corpos de prova, por representarem as estruturas, devem ser produzidos cuidadosamente.

Os corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm foram moldados e rompidos de acordo com as NBR-5738 e NBR-5739. Os concretos para o preenchimento dos corpos de prova foram lançados em duas camadas, adensadas com 15 golpes cada. Após a regularização

da superfície, foi feita uma proteção dos corpos de prova com placa de vidro, para evitar a perda de água por evaporação, uma vez que essa água é calculada e necessária à hidratação do cimento. Os corpos de prova foram desformados após 24 horas e colocados na câmara úmida até a data de rompimento.

4.4.2 Resistência à compressão

Foi feita uma análise das diversas dosagens através das resistências obtidas no rompimento dos corpos de prova, figura 4.2, o que permitiu selecionar o concreto ideal, por apresentar resistência à compressão e trabalhabilidade adequadas, fundamentais nesta pesquisa de durabilidade do concreto.

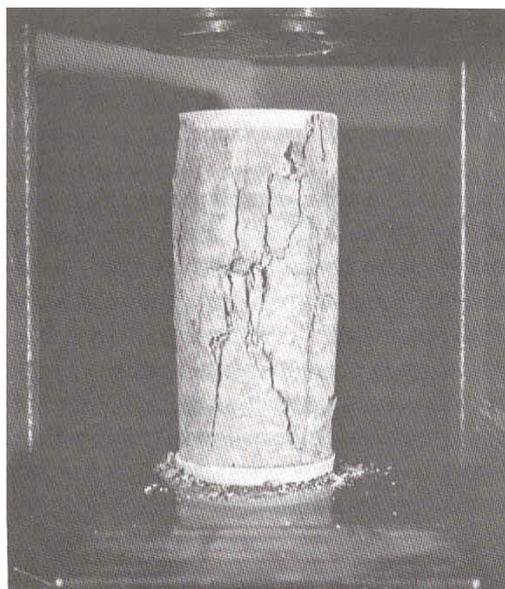


Figura 4.2 - Ruptura de corpos de prova à compressão

4.5 A influência da cura na resistência à compressão do concreto

A influência da cura do concreto foi avaliada através da comparação da resistência à compressão nas idades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21 e 28 dias, permitindo quantificar o ganho de resistência nos corpos de prova submetidos a dois tipos de cura. Em um deles, a temperatura e a umidade do ar foram mantidas sob controle. No outro, o processo se deu em temperatura ambiente (cura ao ar).

4.6 Absorção d'água do concreto

Para avaliar a penetração de água no concreto, foram realizados ensaios de absorção d'água em corpos de prova de 5x10 cm. O concreto selecionado teve como característica, um baixo fator água-cimento, condição primeira para obtenção de um concreto com baixa permeabilidade.

Os corpos de prova foram colocados em estufa, a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, durante períodos variáveis. Após o período de secagem, foram imersos em água à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante períodos que variaram de 24 a 72 horas. A absorção foi medida pelo acréscimo de massa. A partir dos dados obtidos neste ensaio, foram determinados a massa específica e os índices de vazios do concreto, NBR-9778,1992.

4.7 Avaliação das camadas protetoras

Para os estudos, foram utilizadas camadas protetoras à base de selador associado à tinta acrílica, tinta acrílica e borracha clorada. A proteção do concreto vem de encontro à necessidade de se propor proteções suplementares, quando as estruturas estão expostas a ambientes agressivos, o que já é um consenso entre os pesquisadores de todo o mundo (Almusallam, 2003).

Atendendo às recomendações para a aplicação de camadas protetoras, a superfície áspera do concreto deve estar perfeitamente seca, limpa, isenta de pó e com idade superior a 1 mês. As camadas foram aplicadas em 2 demãos, de 50 μm cada, com trincha, com intervalo mínimo de 24 horas entre as aplicações (Vedacit, 2003), figura 4.3.

A secagem das proteções teve uma duração de oito dias, em local ventilado e em condições normais de temperatura (25°C).

Atingidas todas as condições necessárias a uma boa proteção, foram efetuados ataques nos concretos.



Figura 4.3 - Corpos de prova de 5x10cm de concreto protegido com borracha clorada, tinta acrílica e concreto sem proteção.

4.8 Simulação do ataque do concreto

Foram realizados ataques no concreto em solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 2,5%, por imersão durante sete dias, uma vez que segundo Almusallam, muitas pesquisas tem atribuído a deterioração do concreto exposto a ambientes agressivos a uma má avaliação da exposição ao meio (Almusallam, 2003).

O ataque proposto e realizado teve como principal objetivo, portanto, simular um ataque acelerado ao concreto, para permitir uma comparação com os efeitos decorrentes de meios agressivos.

4.9 Perda de massa

A degradação do concreto foi avaliada através das perdas de massa em corpos de prova de concreto sem proteção e protegido, antes e após ataque químico.

4.10 Permeabilidade do concreto

Os ensaios de adsorção de nitrogênio e de picnometria a hélio permitiram avaliar a permeabilidade do concreto através de uma abordagem qualitativa pelo estudo de conectividade de poros, empregado por Reis (2006), que correlaciona a conectividade dos poros, C_v , com a superfície específica, S_g , e a densidade, ρ_v , segundo a equação 4.1:

$$C_v = 0,1540 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot K_1^{1/2}} - \frac{1}{K_1^{3/2}} \right) \cdot \frac{S_g^3 \cdot \rho_v^{3/2}}{V_g^{3/2}} + 1 \quad (4.1)$$

Onde,

C_v - Conectividade de poros/unidade de volume

S_g - Superfície específica do concreto (m^2/g)

V_g - Volume específico de poros (cm^3/g)

K_1 - Média ponderada do número de vizinhos de cada nó

ρ_v - Densidade específica (g/cm^3)

4.11 Caracterização topográfica superficial do concreto através do perfilômetro

A textura superficial do concreto foi avaliada através da técnica de perfilometria utilizando-se o perfilômetro T4000 da HOMMELWERKE, do Laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, figura 4.4. Foi utilizado o apalpador móvel TKU 600; a área varrida foi de 15x15mm, sendo realizadas 30 medições com espaçamento de 517 μ m. Utilizou-se uma velocidade de 0,5mm/s. A obtenção das imagens topográficas e a elaboração da metodologia utilizada foram realizadas através do software Turbo Rugosidade e Hommelmap Expert 3.0 (Mountains), figura 4.5.



Figura 4.4 - Perfilômetro do Laboratório de Recobrimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

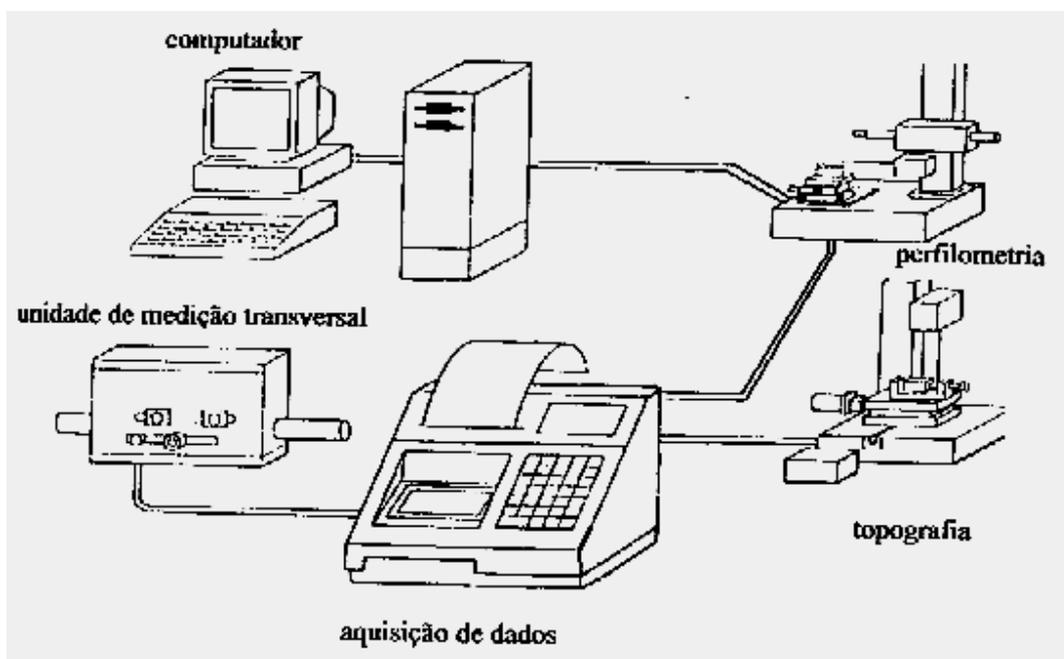


Figura 4.5 - Unidades básicas de um perfilômetro (Mummery, 1992)

O perfilômetro possui uma agulha muito fina que percorre a superfície do material, sendo que o seu deslocamento vertical é convertido em um gráfico bi-dimensional que representa um perfil. É feito um grande número de perfis ao longo da superfície, deslocando-se a ponta em uma direção perpendicular à de varredura, figura 4.6. Assim, uma superfície é interpolada através destes perfis gerando uma imagem tri-dimensional. Esta técnica denomina-se perfilometria 3D e os parâmetros de amplitude obtidos descrevem a textura superficial do material e são bem representativos da superfície.

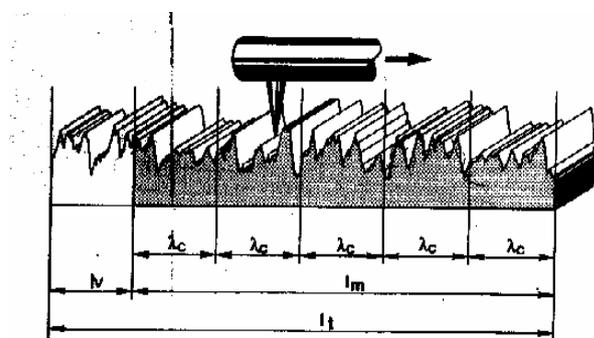


Figura 4.6 - Detalhe da varredura no perfilômetro (Mummery, 1992)

Uma importante utilidade desta técnica é a possibilidade de separar os perfis de rugosidade e de ondulação de uma superfície, sendo que esta separação é possibilitada pelo uso de um filtro. A determinação do filtro é muito importante, pois perfis muito diferentes são gerados, com a alteração do filtro utilizado. Os filtros são denotados por λ_c e são denominados de cut-off (Mummery, 1992).

Pode-se observar que um aumento do valor de λ_c utilizado permite visualizar melhor o perfil de rugosidade (o filtro retém mais a ondulação, permitindo a passagem de rugosidade). O contrário ocorre com a diminuição do λ_c utilizado (figura 4.7).

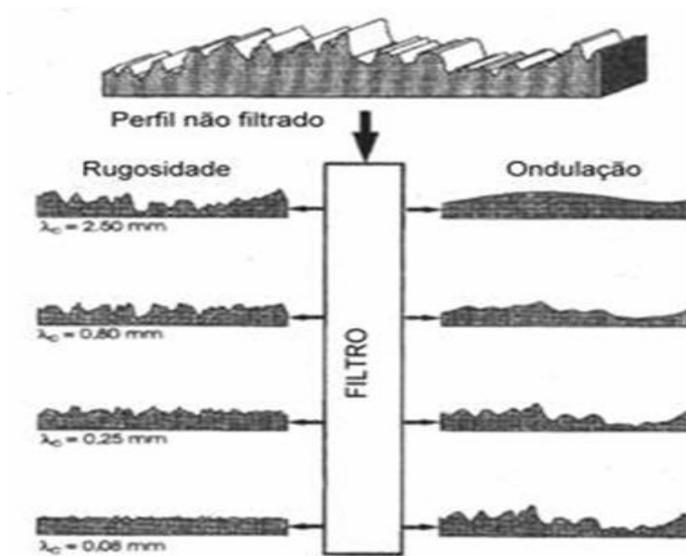


Figura 4.7 - Modificação dos perfis de rugosidade e ondulação, de acordo com o filtro utilizado (Mummery, 1992).

Parâmetros de amplitude de textura superficial

A avaliação topográfica da textura superficial do material abordado foi feita pela geração de perfis e de valores numéricos, parâmetros de amplitude, que permitiram caracterizá-lo e diferenciá-lo nas diversas situações de degradação propostas.

S_a - Parâmetro de Rugosidade Média

Obtido pela média aritmética dos valores absolutos dos desvios do plano médio (acima e abaixo) dentro da área de varredura.

Este parâmetro é a extensão do Ra bidimensional, figura 4.8, que é o parâmetro mais conhecido em perfilometria. Como este parâmetro mede a média da rugosidade, defeitos da superfície não são captados, sendo assim, diferentes superfícies podem ter o mesmo valor de Ra, figura 4.9. O parâmetro S_a não caracteriza totalmente uma superfície e é dependente do valor de λ_c utilizado.

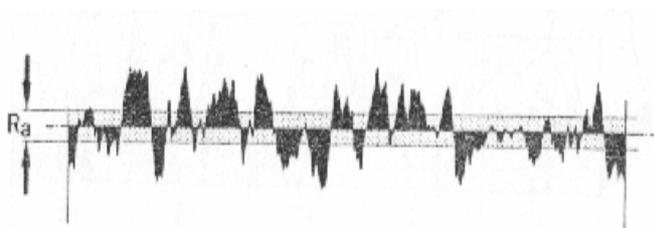


Figura 4.8 - Esquema para obtenção do parâmetro R_a (Mummery, 1992).

Apesar de ser usado comumente em muitas aplicações práticas, o parâmetro S_a, principalmente por não distinguir entre picos e vales, não caracteriza bem uma superfície.

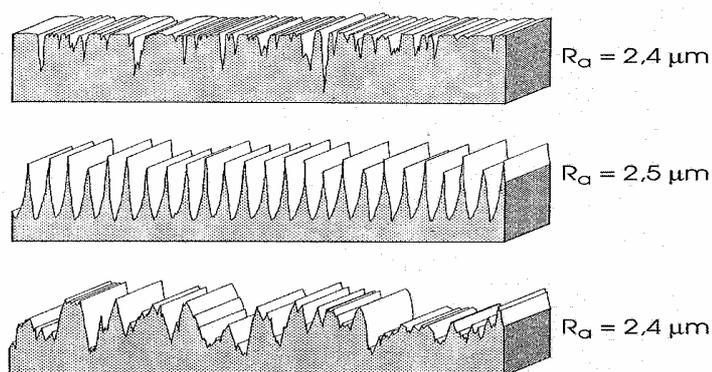


Figura 4.9 - Perfis diferentes, com mesmo valor de Ra (parâmetro bidimensional), correspondente a S_a (parâmetro tridimensional).

S_q - Desvio padrão da superfície

É a medida dos desvios de amplitude de uma superfície do plano de mínimos quadrados em uma área de amostragem, sendo utilizado para indicar rugosidade de uma forma estatística. Não depende dos intervalos de varreduras (Δx e Δy) selecionados, mas depende da área de amostragem. É uma extensão direta do parâmetro bidimensional R_q , figura 4.10.

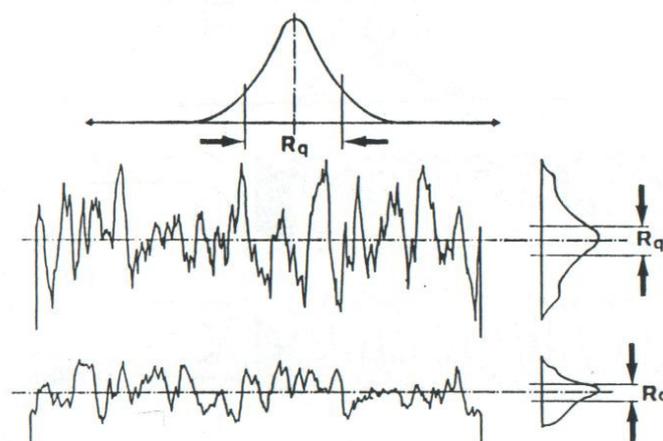


Figura 4.10 - Desvio padrão da curva de distribuição de amplitudes (Mummery, 1992).

S_p e S_v - Altura máxima dos picos e profundidade máxima dos vales da superfície

São os parâmetros em 3D correspondentes aos parâmetros bidimensionais R_p e R_v . Esses parâmetros correspondem, respectivamente, à altura máxima dos picos e à profundidade máxima dos vales.

S_z - Altura dos dez pontos da superfície

Parâmetro definido como a média das alturas dos 5 maiores picos e a profundidade dos 5 maiores vales dentro de uma área de amostragem. Depende da definição do que é pico ou vale. É um parâmetro mais dependente da área de amostragem que S_q .

St - Altura total da superfície

Altura entre o pico mais alto e o vale mais profundo, figura 4.11.

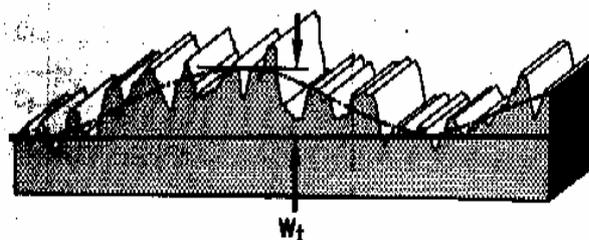


Figura 4.11 - Determinação do parâmetro W_t (Mummery, 1992).

Considerando as diversas possibilidades de se abordar a superfície do concreto, a forma de obtenção dos dados para gerar as imagens e os parâmetros de amplitude foi composta pelas seguintes etapas:

- . Geração do perfil tridimensional sem filtro, a partir de inúmeras varreduras bidimensionais no topo de corpo de prova;
- . Remoção de forma com polinômio de grau 2 no perfil sem filtro tridimensional, para otimizar o cálculo dos parâmetros topográficos, através da redução da interferência de uma possível ondulação do perfil obtido;
- . Obtenção de histogramas correspondentes à frequência das alturas de cada perfil, para mostrar e diferenciar a frequência das amplitudes nos perfis.
- . A partir do perfil obtido, geração dos perfis de rugosidade e de ondulação, utilizando o filtro 2,5mm (foi utilizado este filtro, porque a área varrida foi de 15x15mm);
- . Obtenção de parâmetros do perfil sem filtro, de rugosidade e de ondulação - S_a , S_q , S_p , S_v , S_t e S_z ;
- . A partir do perfil sem filtro, utilização de um recurso de inversão do perfil em relação ao eixo Z;
- . Utilização de histogramas do perfil invertido, referentes à densidade de picos (que correspondem aos vales).

4.12 Análise estrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura tem seu uso consolidado em diversas áreas do conhecimento e foi proposta para análise do concreto submetido a ataque químico e de camadas protetoras utilizadas visando à minimização da corrosão do material, uma vez que, na ciências dos materiais, tem sido uma ferramenta importante para a investigação da estrutura e morfologia do concreto, da argamassa, pasta de cimento, metais ou polímeros.

A avaliação de camadas protetoras com o uso de microscopia, comparativamente aos resultados obtidos na perfilometria, é de grande interesse para a compreensão do processo, tanto do ponto de vista dos componentes do concreto, como dos efeitos do ataque químico e eficiência das proteções. Além disso, permite estabelecer critérios de falha dos revestimentos produzidos com o intuito de aumentar a vida útil do concreto.

As análises em microscópio eletrônico de varredura - MEV foram feitas sobre a superfície do concreto antes e após ataque químico. As imagens e microanálises foram obtidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Engenharia Metalúrgica de Materiais da UFMG, através do MEV JEOL JSM 6360LV, equipado com microsonda EDS THERMO NORAN, modelo QUEST, para análise da composição química das áreas analisadas no MEV.

A espectrometria de dispersão de energia – EDS, foi utilizada para determinar a composição química aproximada dos constituintes, ou seja, de regiões e/ou pontos de interesse. A função do EDS é detectar, contar e distribuir, em classes de energia, os raios-X produzidos por uma pequena região da amostra selecionada para análise. O aparelho de raios-X é conectado a um medidor automático dos ângulos de difração e suas correspondentes intensidades.

Um cuidado especial deve ser dado no preparo da amostra. No caso de amostras não condutoras de elétrons, como o concreto, é preciso que a superfície a ser observada seja recoberta por uma camada com material condutor de elétrons (metais ou ligas de metais), cujo processo é denominado metalização de amostras. As amostras foram recobertas por uma camada com material condutor de elétrons – carbono grafite.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Método de dosagem do concreto

O concreto selecionado neste estudo resultou de pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, com base nos métodos de dosagens do ACI e do IPT. Partiu-se da definição da resistência a ser atingida para garantir um concreto com características marcantes de durabilidade e da escolha de um fator água/cimento condizente com condições ambientais agressivas.

A partir da resistência a ser atingida, foi proposto um concreto com baixo fator água/cimento e uma quantidade de aglomerante necessária para garantir a durabilidade, tendo sido utilizados agregados previamente ensaiados.

A partir da fixação do fator água/cimento, foram determinados/calculados os demais materiais constituintes do concreto:

- . Determinação da quantidade de água necessária para fornecer ao concreto fresco uma consistência seca a plástica;
- . Determinação do consumo de cimento, calculado através da relação entre o consumo de água e o fator água/cimento;
- . Determinação do consumo de agregado graúdo, levando-se em consideração o diâmetro máximo da brita e o módulo de finura da areia;
- . Cálculo do consumo de agregado miúdo para a composição de 1m³ de concreto;
- . Definição do traço do concreto em massa, onde o cimento é considerado a unidade padrão.

5.2 Seleção do concreto a partir do estudo de dosagem

Na produção dos concretos, foram utilizados cimento CII E-32, agregado miúdo natural silicoso e agregado graúdo de gnaiss.

A partir das dosagens realizadas, foi possível definir a composição de um metro cúbico de concreto, a ser proposta como referência: trezentos e setenta quilos de cimento, oitocentos e sessenta e cinco quilos de areia, hum mil e quatro quilos de brita, cento e sessenta e sete litros de água, tabela V.1, e três quilos e setecentos gramas de aditivo plastificante polifuncional.

Tabela V.1 - Dosagem do concreto

Fator a/c	Cimento Kg/m ³	Areia Kg/m ³	Brita Kg/m ³	Água l/m ³	Aditivo kg/m ³
0,50	370	865	1004	167	3,7

5.3 Resistência à compressão

A partir da composição tomada como referência, foi avaliada uma alteração do fator água-cimento, tabela V. 2.

Tabela V.2 - Estudo comparativo de dosagem

Dosagem	Consumo de cimento (kg/m ³)	Aditivo	Fator a/c*	Resistência à compressão (MPa)	
				7 dias	28 dias
1	370	1%	0,45	29,4 ± 0,6	32,9 ± 0,4
2	370	1,5%	0,45	22,5 ± 0,2	39,4 ± 0,1
3	370	1%	0,45	24,5 ± 0,4	28,7 ± 0,7
4	370	1%	0,50	28,0 ± 0,8	35,0 ± 0,3
5	370	1%	0,50	26,5 ± 0,5	39,1 ± 0,8

* a/c - água/cimento

Os resultados de resistências à compressão apresentados para cada dosagem se referem a média aritmética de quatro corpos de prova, cujos desvios relativos foram bem inferiores ao máximo estipulado pela norma, que é de 6%.

A seleção da dosagem nº 5 se baseou na possibilidade de diminuir a porcentagem de 1,5 para 1% de aditivo, mantendo o mesmo nível de trabalhabilidade, para um fator água/cimento aumentado apenas de 0,45 para 0,50, que atende aos requisitos de durabilidade e permitindo alcançar um elevado patamar de resistência à compressão de 39MPa. (Tabela III.5).

Deve-se assinar também que para fatores água-cimento equivalentes foram obtidas resistências à compressão diferenciadas em função do adensamento realizado.

A alta resistência à compressão de 39 MPa, figura 5.1, foi obtida não apenas em função da dosagem proposta, como também dos cuidados referentes ao processo de mistura, adensamento e cura durante 28 dias em câmara úmida, impedindo a micro fissuração precoce do concreto.

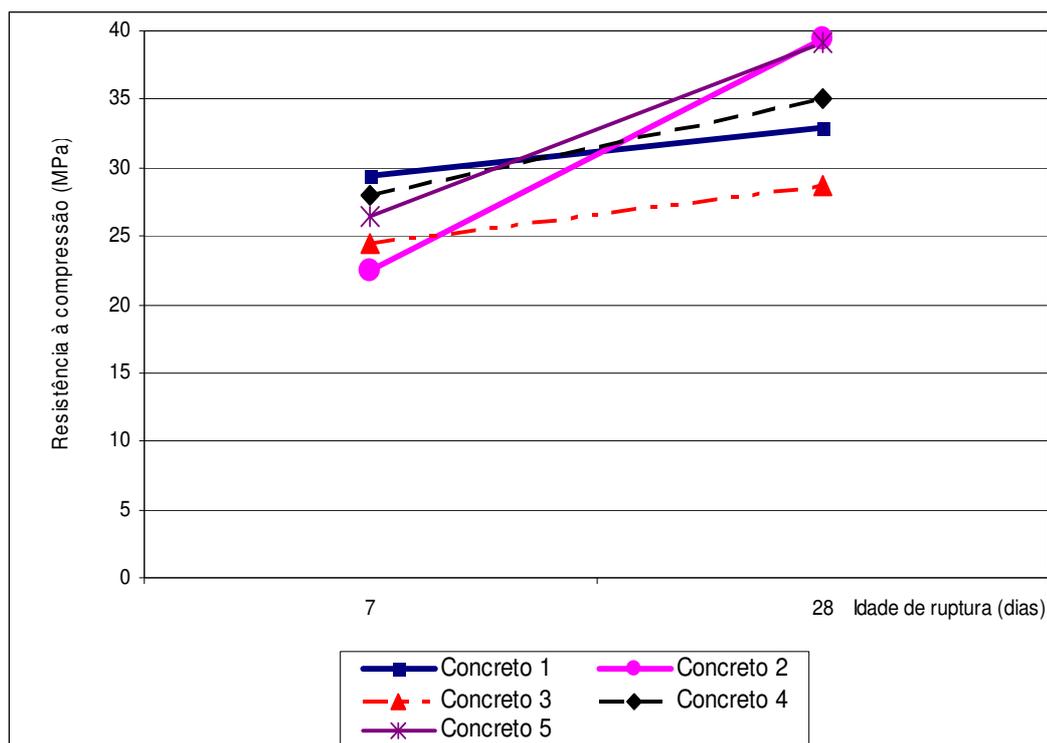


Figura 5.1 - Resistência à compressão x idade de ruptura

5.3.1 Resistência à compressão e cura do concreto

A influência da cura do concreto foi avaliada através da comparação da resistência à compressão em corpos de prova de 10x20cm nas idades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21 e 28 dias, figura 5.2.

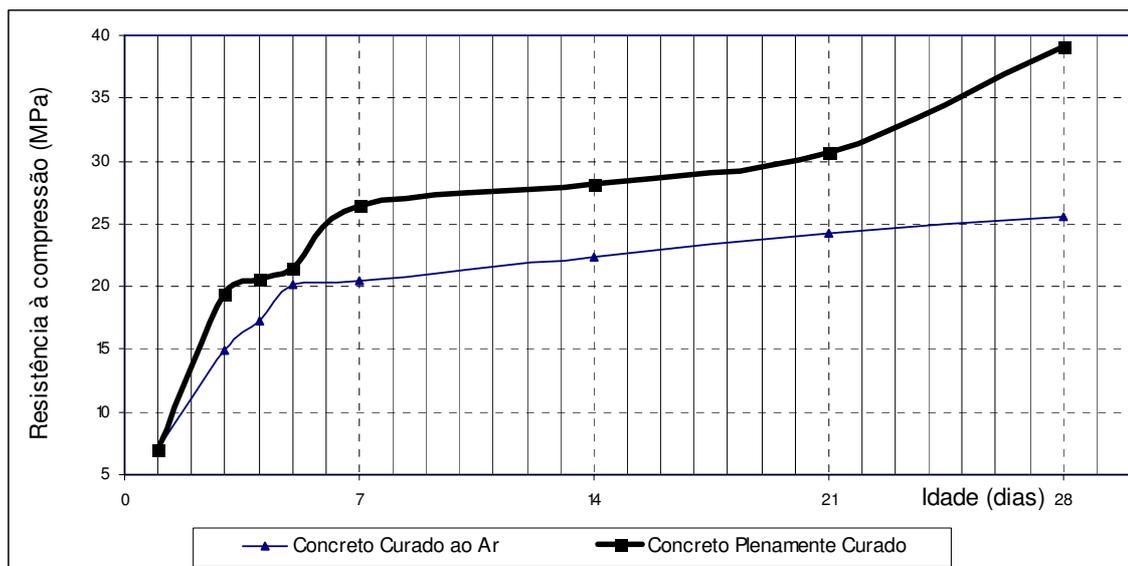


Figura 5.2 - Evolução da resistência à compressão para cura ao ar e em câmara úmida

Na curva inferior da figura 5.2, observam-se os valores das resistências para os corpos de prova mantidos à temperatura e umidade ambientes. Na curva superior, há um aumento das resistências à compressão de corpos de prova curados em câmara úmida a uma temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 95%. A importância da cura pode ser também comprovada pela tendência de ganho de resistência após 28 dias.

5.4 Ensaios de absorção d'água, índices de vazios e massas específicas

A tabela V.3 permite fazer uma comparação quanto a absorção d'água, índice de vazios e massa específica entre concretos sem proteção e concretos com diferentes tipos de camadas protetoras.

Tabela V.3 - Absorção d'água, índices de vazios e massa específica do concreto

Concreto	Absorção d'água após imersão (%)	Índices de vazios (%)	Massa específica (kg/m ³)
Sem proteção	4,5 ± 0,01	9,5 ± 0,01	2.318 ± 10
Proteção acrílica	4,0 ± 0,05	9,0 ± 0,05	2.513 ± 5
Proteção selador/acrílica	3,8 ± 0,02	8,4 ± 0,02	2.432 ± 10
Proteção borracha clorada	3,5 ± 0,02	8,3 ± 0,02	2.572 ± 10

O concreto sem proteção tem uma absorção d'água de aproximadamente 4,5%, enquanto os concretos protegidos apresentam uma absorção um pouco menor, de 3,5 a 4,0%. Os ensaios de absorção confirmam que o concreto em estudo atende à característica primordial para ser considerado um concreto durável, ou seja, um concreto com absorção bem abaixo de 10% (Neville, 1997).

A partir dos parâmetros obtidos no ensaio de absorção, pode-se calcular o índice de vazios do concreto, relação entre os volumes de poros permeáveis e o volume total, permitindo quantificar os poros presentes no material. Através deste índice foi feita uma avaliação da vulnerabilidade do concreto a agentes agressivos químicos, confirmando que os índices de vazios são menores para os concretos protegidos (tabela V.3).

As massas específicas variam de 2.300kg/m³ para o concreto sem proteção a 2.500kg/m³ para os concretos protegidos, em função das camadas protetoras superficiais dos concretos.

Observa-se uma ligeira diminuição na absorção d'água, quando se passa da proteção acrílica para a composição selador/tinta acrílica e borracha clorada, indicando que a

proteção de borracha clorada é a que impede com maior eficiência a entrada de água, assim como de outros agentes agressivos. Observa-se, também, um aumento da eficiência da tinta acrílica, quando aplicada conjuntamente com o selador, uma vez que o conjunto formado pelo selador e a tinta acrílica representa uma barreira maior do que a tinta acrílica aplicada diretamente sobre o concreto.

O índice de vazios também indicou a mesma tendência observada para a absorção d' água, com valores mais altos para o concreto sem proteção, seguido da proteção acrílica, composição de selador/tinta acrílica e, finalmente, a borracha clorada, confirmando a maior eficiência da borracha clorada na proteção do concreto contra a penetração de agentes agressivos.

5.5 Análise topográfica da textura superficial do concreto

A textura superficial do concreto foi estudada através da técnica de perfilometria, que possibilitou avaliar o material, quando submetido a meio agressivo químico, H_2SO_4 a 2,5%, durante sete dias, tendo ou não recebido camadas protetoras.

Os três tipos de proteções propostos, borracha clorada, tinta acrílica e uma composição de selador/tinta acrílica, foram comparados através de perfis topográficos gerados com o objetivo de avaliar o grau de proteção de cada camada.

Os perfis topográficos sem filtragem (denominados perfis originais), obtidos nas superfícies dos concretos antes e após os ataques, estão nas figuras 5.4 a 5.11. Foi considerada uma mesma escala em cada sistema, para comparação visual do efeito do ataque químico. A escala da direita indica a maior amplitude, S_t (distância pico-vale), observada na superfície topográfica das amostras analisadas. Uma maior amplitude significa uma maior modificação na textura superficial 3D, decorrente do ataque químico.

A textura superficial do material foi feita por varredura no topo dos corpos de prova, figura 5.3, mantendo-se sempre a mesma área e o mesmo sentido de leitura, antes e após o ataque químico, o que permitiu avaliar a influência do ataque ao concreto.



Figura 5.3 - Área varrida dos corpos de prova

A perfilometria permitiu avaliar a degradação superficial do concreto atacado, assim como a minimização da agressividade ao material em função das proteções propostas, figuras 5.4 a 5.11.

5.5.1 Imagens topográficas sem filtragem das texturas superficiais dos concretos

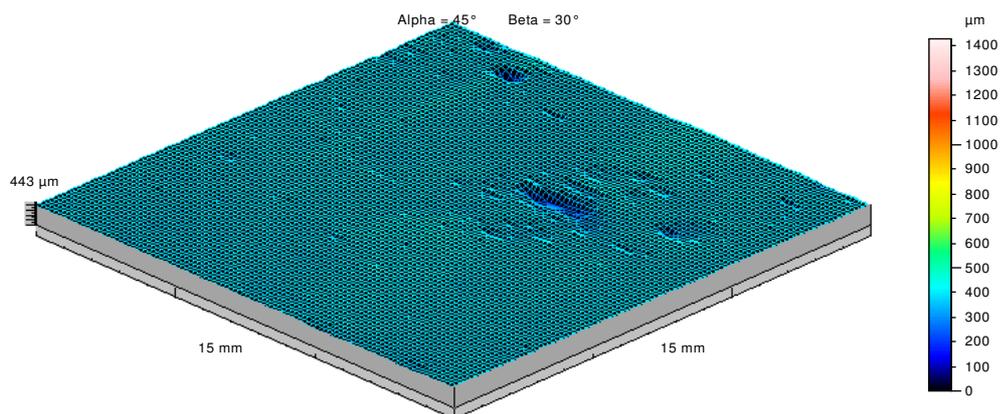


Figura 5.4 - Imagem 3D sem filtragem do concreto sem proteção, antes do ataque químico de H_2SO_4

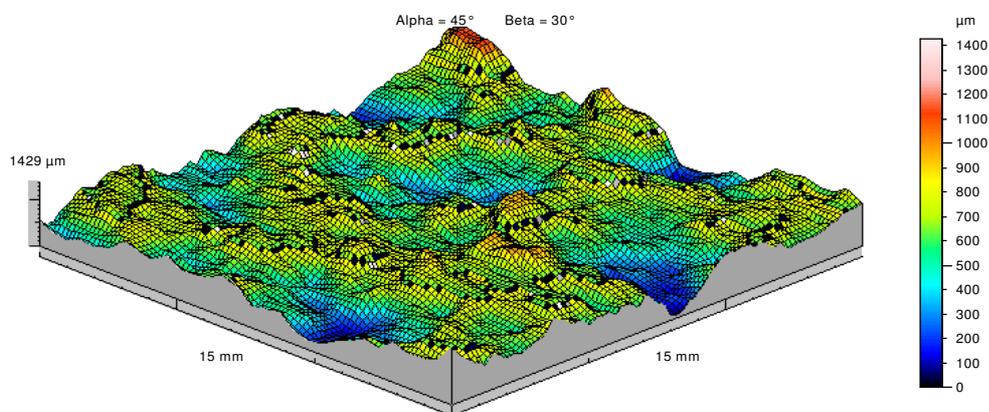


Figura 5.5 - Perfil sem filtragem do concreto sem proteção, após ataque químico de H_2SO_4

Pode-se observar a nítida degradação do concreto sem proteção após ataque químico relativamente ao concreto antes do ataque, figuras 5.4 e 5.5, o que pode ser confirmado através do parâmetro S_t , distância entre o pico mais alto o vale mais profundo, que variou de 443μm para 1.429μm, o que corresponde uma variação de 223%, no concreto sem proteção antes e após ataque.

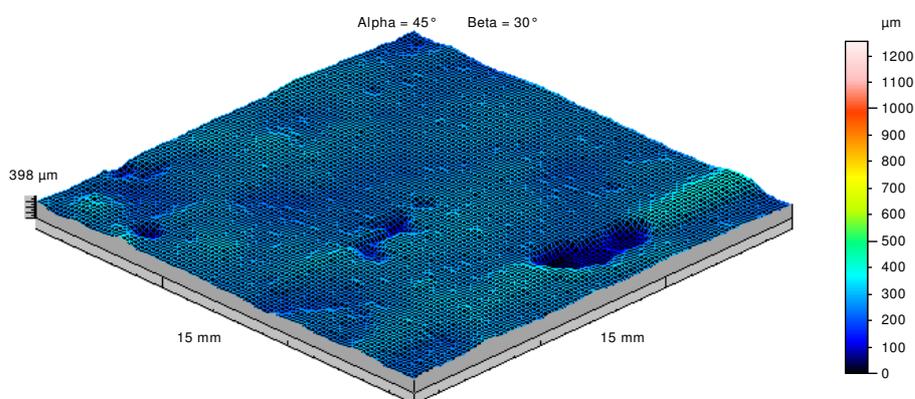


Figura 5.6 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico de H_2SO_4

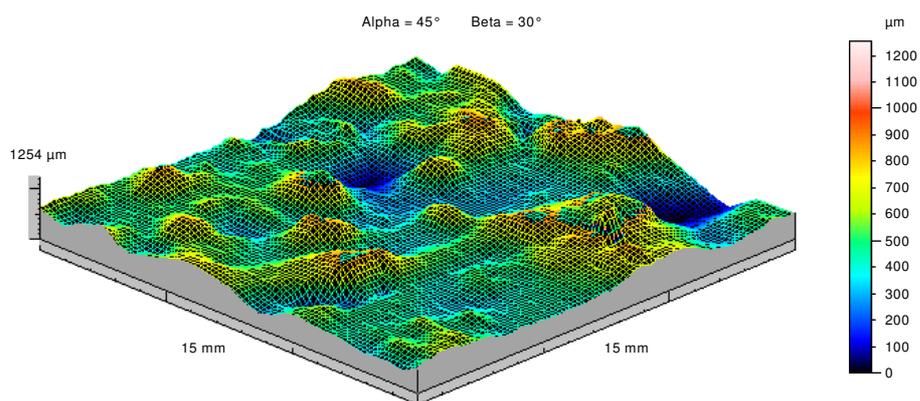


Figura 5.7 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção acrílica, após ataque químico de H_2SO_4

O desempenho da tinta acrílica, antes e após ataque químico, pode ser observado através das imagens, figuras 5.6 e 5.7, e da variação de 215% do parâmetro S_t , de 398μm a 1.254μm, que permite avaliar os efeitos resultantes do ataque químico no concreto com proteção por tinta acrílica.

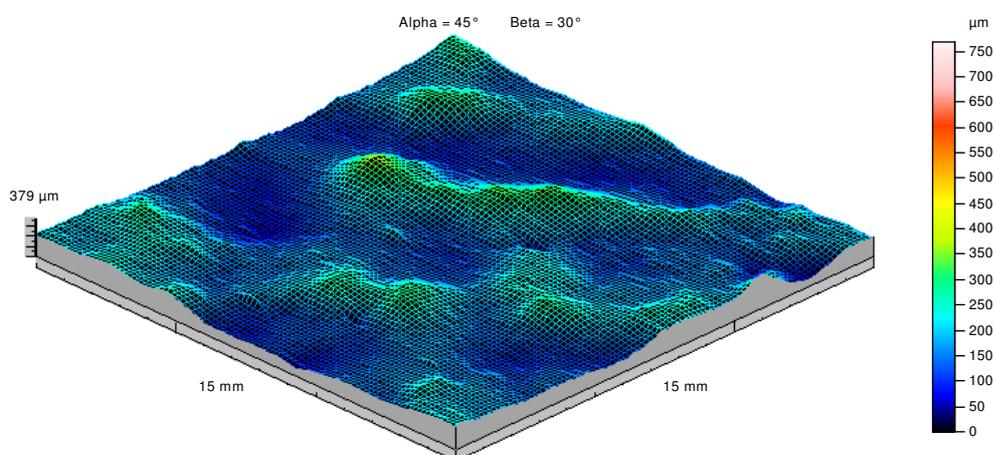


Figura 5.8 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico de H_2SO_4

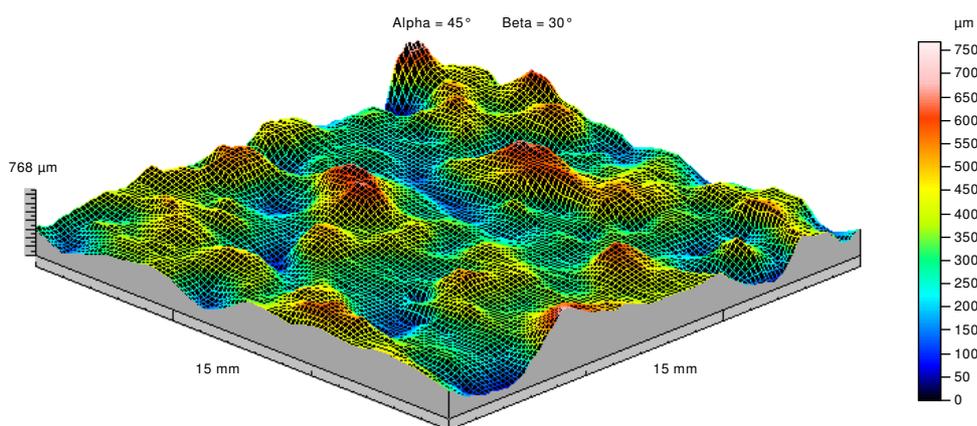


Figura 5.9 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção selador/acrílica, após ataque químico de H_2SO_4

A composição do selador e tinta acrílica apresentou um S_t antes do ataque de 379μm e após ataque de 768μm, com variação de aproximadamente 100%, variação bem menor que a apresentada no concreto somente com tinta acrílica, demonstrando uma maior eficiência na proteção de superfície de concretos.

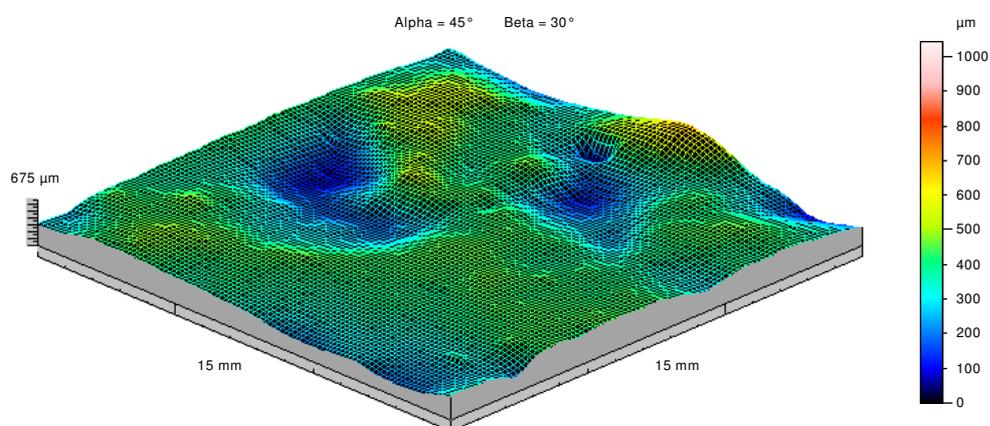


Figura 5.10 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção de borracha clorada, antes do ataque químico de H_2SO_4

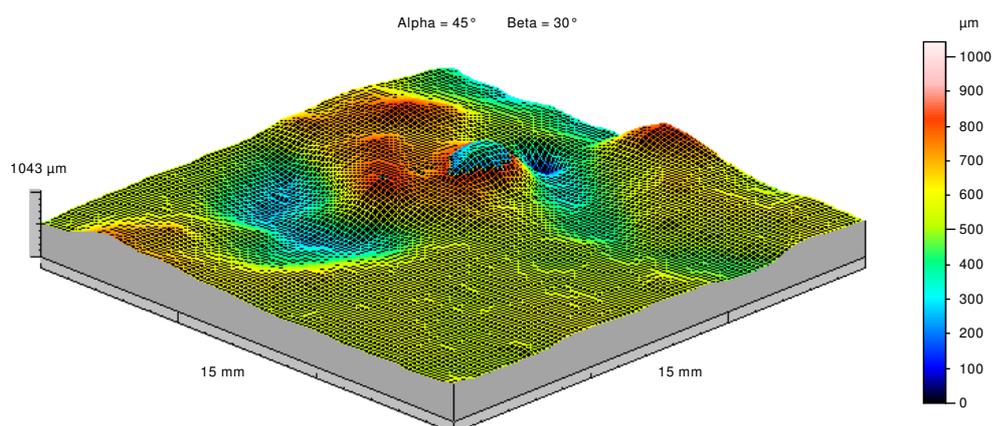


Figura 5.11 - Imagem 3D sem filtragem do concreto com proteção de borracha clorada, após ataque químico de H_2SO_4

O desempenho da borracha clorada, antes e após ataque químico, pode ser observado através das imagens, figuras 5.10 e 5.11, e da variação de 55% do parâmetro St, de 675 μm a 1.043 μm .

A avaliação da degradação superficial do concreto a partir das imagens das figuras 5.4 a 5.11 e dos parâmetros S_t , permite fazer as seguintes análises:

A degradação superficial do concreto avaliada pela variação positiva do S_t , indica que a textura superficial do concreto sofre uma significativa alteração com o ataque químico por ácido H_2SO_4 a 2,5%, tanto num concreto sem proteção, como num concreto protegido.

As proteções propostas atuam significativamente na minimização da degradação superficial do concreto submetido a ataque químico. O grau de proteção avaliado, tanto pelas imagens, quanto pelo parâmetro S_t , permite classificá-las em grau crescente de eficiência: tinta acrílica, composição de selador/tinta acrílica e borracha clorada. Pode-se concluir, portanto, que a borracha clorada foi a proteção que apresentou maior eficiência na minimização da degradação do concreto submetido a ataque químico.

5.5.2 Análise dos parâmetros de amplitude - S_a , S_q , S_p , S_v e S_z

Os resultados através do parâmetro S_t indicaram a possibilidade de se fazer outras análises a respeito da degradação e da eficiência das proteções utilizando os parâmetros S_a , S_q , S_p , S_v , e S_z .

Estes parâmetros de amplitude, foram obtidos a partir de um perfil topográfico sem filtragem e dos perfis de rugosidade e de ondulação utilizando o filtro de 2,5mm. Foram feitas varreduras nos topos dos corpos de prova numa área de 15x15mm que foi subdividida em 30 perfis bi-dimensionais gerados por aproximadamente 8.000 pontos cada, o que permite caracterizar topograficamente a superfície do concreto do ponto de vista estatístico. Vale ressaltar também que foram realizadas réplicas em todas as situações estudadas, permitindo comprovar a mesma tendência dos deltas analisados.

A análise destes parâmetros foi feita de acordo com a expressão 5.1, que leva em consideração o valor gerado antes e após o ataque químico. Este recurso trabalha com a variação dos parâmetros, tendo em vista a heterogeneidade do concreto.

$$Delta = \frac{S_{(antes\ ataque)} - S_{(após\ ataque)}}{S_{(antes\ ataque)}} \times 100 \quad (5.1)$$

Os parâmetros obtidos nas superfícies dos concretos antes e após aos ataques estão nas tabelas V.4 a V.6 e figuras 5.12 a 5.14.

Tabela V.4 - Parâmetros de amplitude obtidos a partir do perfil sem filtragem

Parâmetros	Sem Proteção			Acrílica			Selador/Acrílica			Borracha Clorada		
	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta
S_a (μm)	7,62	157	1.960	24,4	125	412	39,3	81,8	108	67,7	84,4	25
S_q (μm)	15,8	202	1.178	37,8	164	334	48,5	103	112	85,9	117	36
S_p (μm)	47,8	740	1.448	121	739	511	203	426	110	305	492	61
S_v (μm)	395	689	74	277	515	86	176	342	94	370	551	49
S_t (μm)	443	1.429	223	398	1.254	215	379	768	103	675	1.043	55
S_z (μm)	239	1.129	372	297	965	225	280	587	110	379	682	80

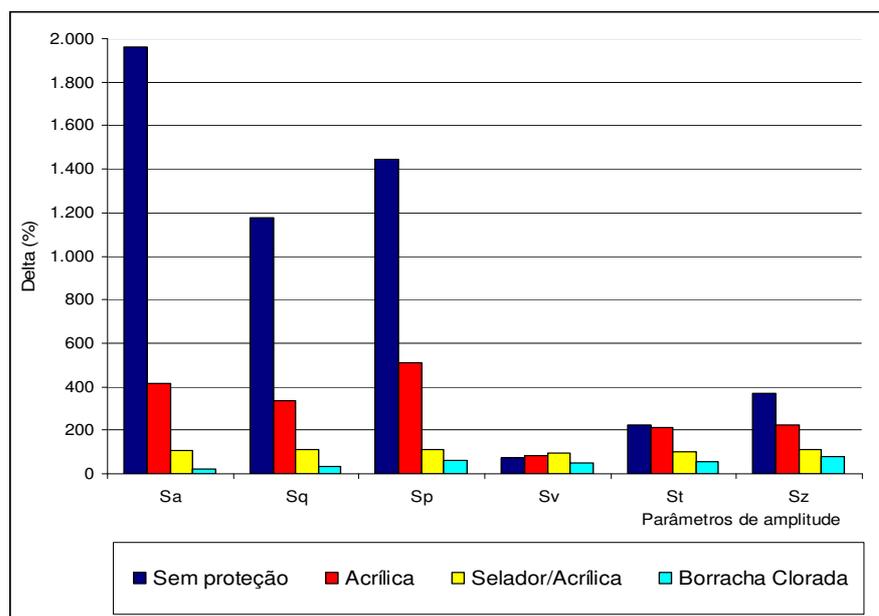


Figura 5.12 - Delta dos parâmetros de amplitude do perfil sem filtragem, antes e após ataque químico de H_2SO_4

Tabela V.5 - Parâmetros de amplitude obtidos a partir do perfil de rugosidade e filtro 2,5mm

Parâmetros Rugosidade	Sem Proteção			Acrílica			Selador/Acrílica			Borracha Clorada		
	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta
S_a (μm)	4,81	59,1	1.129	10,5	40,3	284	10,2	29,3	187	12,3	15,1	23
S_q (μm)	9,54	75	686	17,5	53,9	208	13,8	38,6	180	18,5	24,1	30
S_p (μm)	55,7	302	442	80,8	379	369	80,9	169	109	93,4	175	87
S_v (μm)	163	290	78	148	307	107	164	250	52	278	316	14
S_t (μm)	219	593	171	229	686	200	245	419	71	372	491	32
S_z (μm)	168	567	238	198	515	160	138	328	138	148	268	81

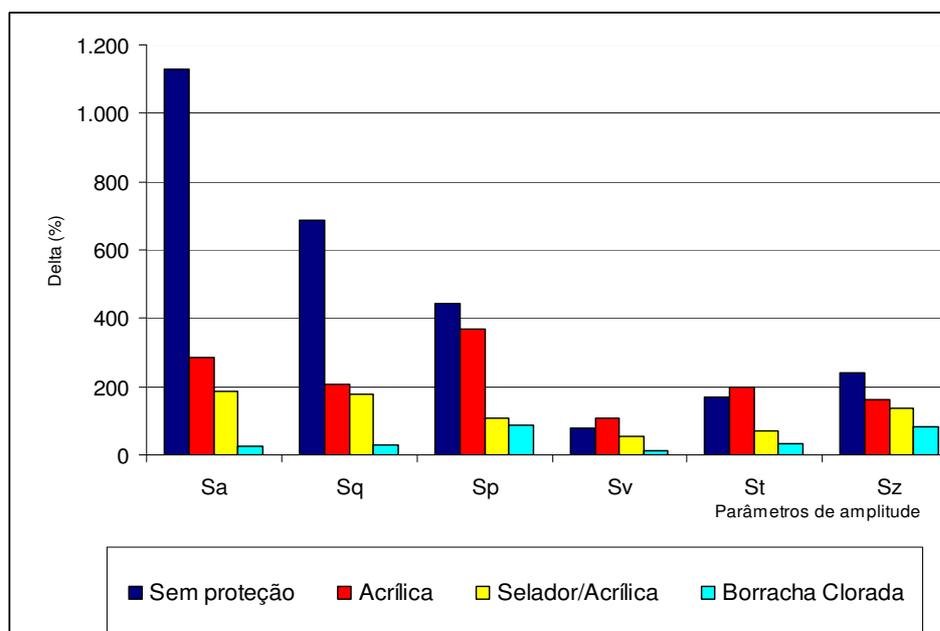
Figura 5.13 - Delta dos parâmetros de amplitude do perfil de rugosidade, antes e após ataque químico de H_2SO_4

Tabela V.6 - Parâmetros de amplitude obtidos a partir do perfil de ondulação e filtro 2,5mm

Parâmetros Ondulação	Sem Proteção			Acrílica			Selador/Acrílica			Borracha Clorada		
	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta	Antes	Após	Delta
S_a (μm)	6,14	112	1.724	19,5	106	444	33,9	58	71	61,4	83,1	35
S_q (μm)	10,7	142	1.227	29,1	139	378	41,7	71,1	72	76,8	112	46
S_p (μm)	25,2	404	1.503	79	485	514	128	224	75	158	378	139
S_v (μm)	74,5	458	515	169	405	140	84,1	160	90	234	253	8
S_t (μm)	99,7	862	765	248	890	259	212	383	81	391	631	61
S_z (μm)	-	600	-	-	-	-	-	221	-	283	-	-

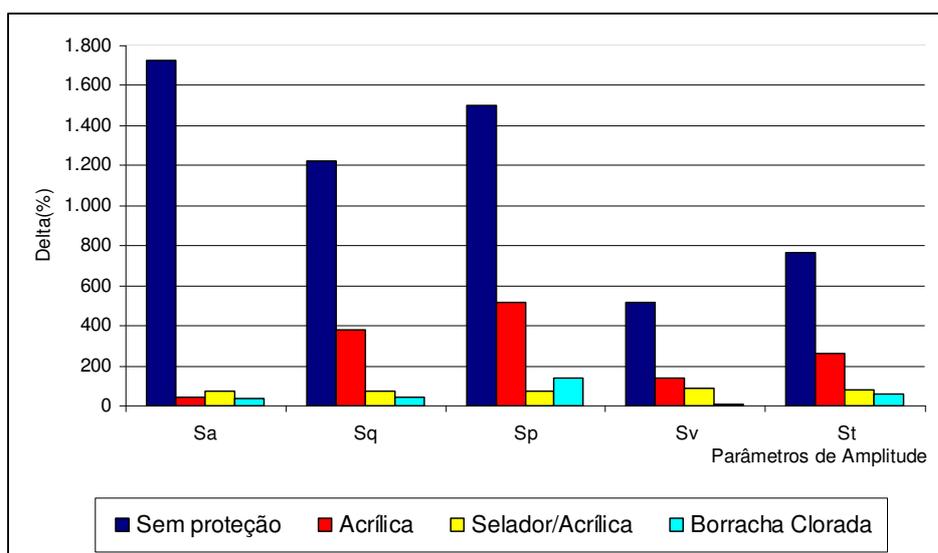


Figura 5.14 - Delta dos parâmetros de amplitude do perfil de ondulação, antes e após ataque químico de H_2SO_4

Considerando os resultados obtidos, foi possível verificar que a proposta de filtragem não alterou significativamente a análise dos resultados, indicando que a adoção do perfil sem filtragem atende plenamente à análise da textura superficial do concreto.

Através dos parâmetros de amplitudes, S_a , S_q , S_p , S_v , S_t e S_z , sem filtragem, pode-se verificar a deterioração superficial do concreto devido ao ataque químico, sendo possível observar, através destes parâmetros, a influência benéfica da proteção, uma vez que no concreto sem proteção as variações dos parâmetros foram mais acentuadas que nos concretos com camadas protetoras.

A comparação do grau de proteção das três camadas propostas neste estudo, acrílica, composição de selador/acrílica e borracha clorada, demonstram que o delta, ou seja, a variação dos parâmetros de amplitude foi maior para o concreto com proteção acrílica do que para o concreto com proteção selador/acrílica, sendo que, para o concreto com borracha clorada, as variações foram ainda maiores, confirmando que esta última camada é mais eficiente na proteção superficial do concreto, figuras 5.15 e 5.16.

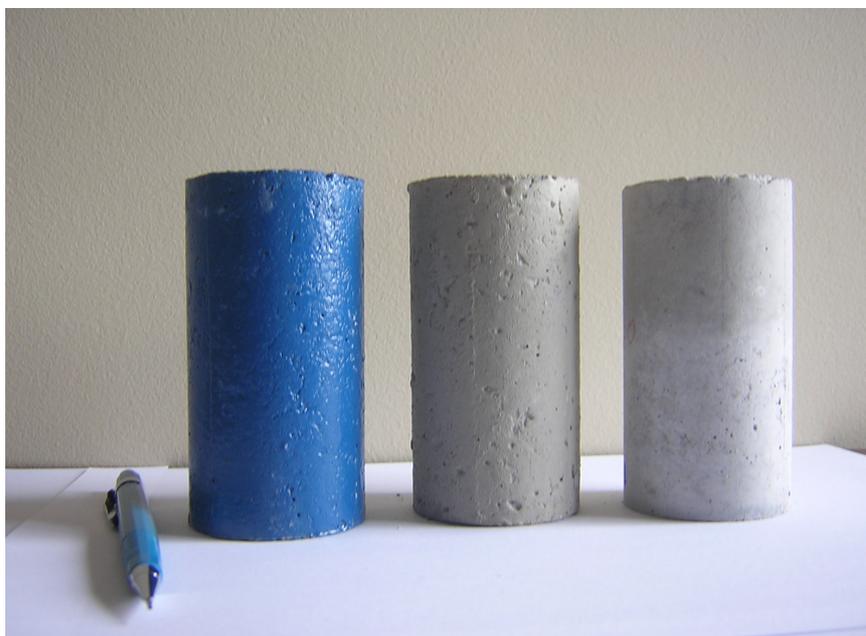


Figura 5.15 - Corpos de prova com proteção de borracha clorada, tinta acrílica e sem proteção, respectivamente da esquerda para a direita, antes do ataque químico de H_2SO_4



Figura 5.16 - Corpos de prova com proteção com tinta acrílica, selador/acrílica e borracha clorada, respectivamente da esquerda para a direita, após ataque químico de H_2SO_4

5.5.3 Histogramas gerados a partir das imagens 3D

São apresentados nas figuras 5.17 a 5.24, os histogramas referentes à frequência das amplitudes (pico-vale) de imagens 3D sem filtro que permitem verificar a concentração da frequência de material em determinada amplitude. A análise dos histogramas foi feita para um concreto sem proteção e para concretos protegidos, antes e após o ataque químico.

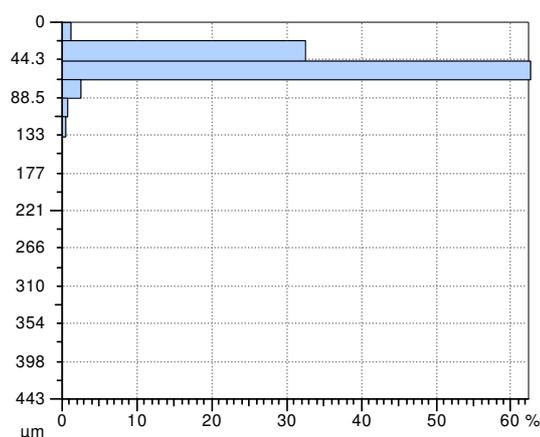


Figura 5.17 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto sem proteção, antes do ataque químico

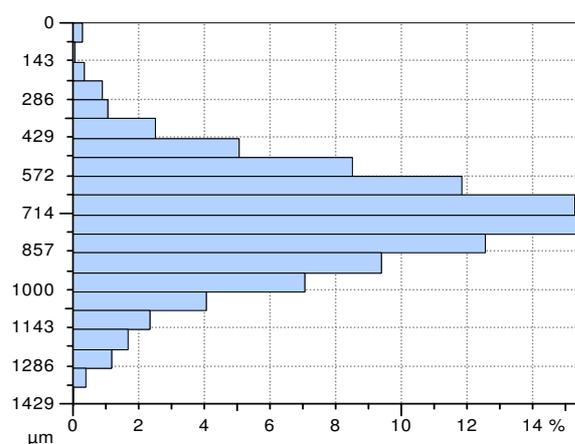


Figura 5.18 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto sem proteção, após o ataque químico

Os histogramas do concreto sem proteção evidenciam que 60% das amplitudes estão entre 44 e 66µm, figura 5.17, antes do ataque, e que, após o ataque químico, 64% das amplitudes estão entre 572 e 928µm, figura 5.18, confirmando uma alta degradação do concreto após o ataque químico. Além disso, observa-se uma distribuição espalhada, significando a presença de amplitudes com valores mais altos com alta frequência.

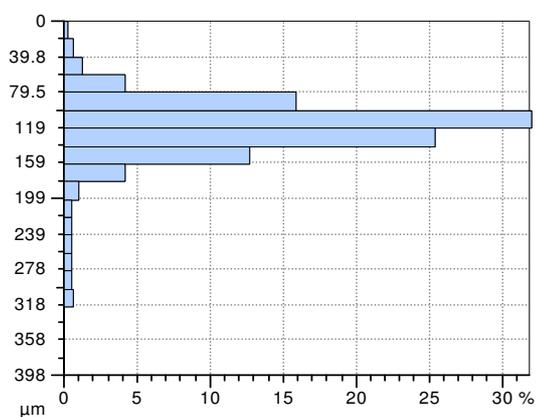


Figura 5.19 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico

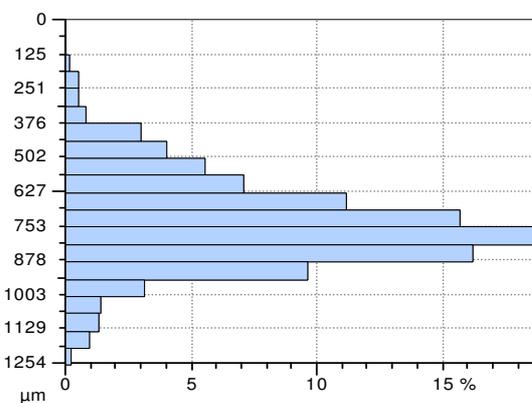


Figura 5.20 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção acrílica, após ataque químico

A análise dos histogramas do concreto protegido com tinta acrílica demonstra que, antes do ataque, 57% das amplitudes variaram entre 100 e 120µm, figura 5.19, e que após o ataque, 52% das amplitudes se situaram entre 690µm e 878µm, figura 5.20, demonstrando a minimização da degradação em relação ao concreto sem proteção.

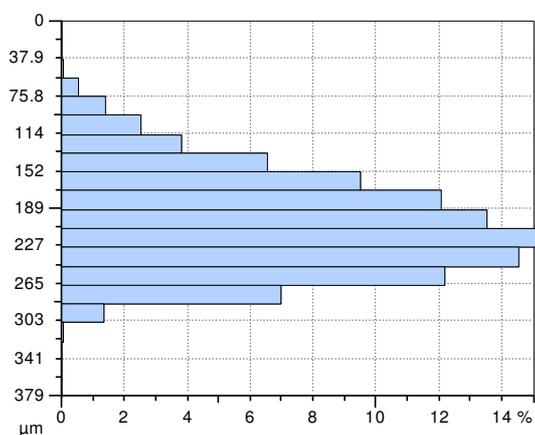


Figura 5.21 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico

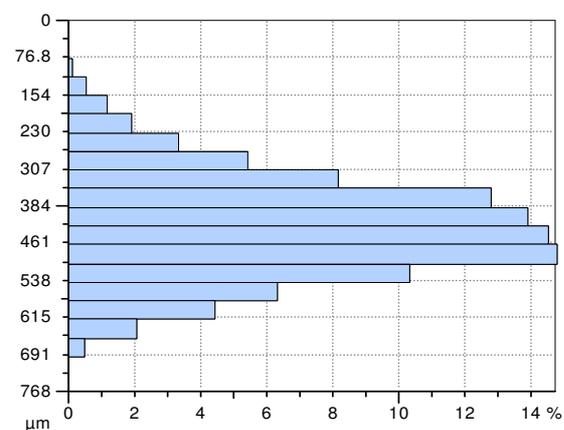


Figura 5.22 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção selador/acrílica, após ataque químico

O avaliação do desempenho da proteção com selador/acrílica, através dos histogramas, mostra que, antes do ataque, 45% das amplitudes foram distribuídas entre 189 e 250 μm , figura 5.21, e que após o ataque, aproximadamente 45% das amplitudes variaram de 384 e 500 μm , figura 5.22, demonstrando a maior eficiência da composição de selador com tinta acrílica comparativamente à proteção acrílica.

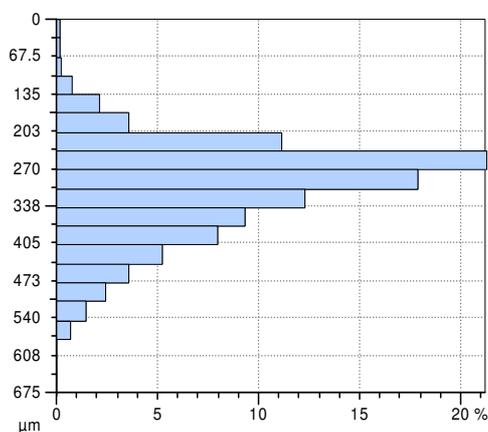


Figura 5.23 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção borracha clorada, antes do ataque químico

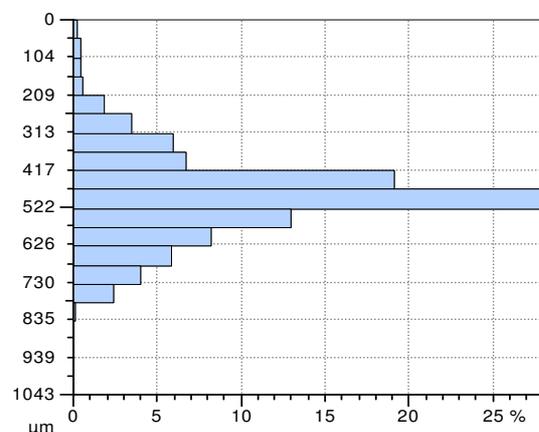


Figura 5.24 - Histograma gerado a partir da imagem 3D do concreto com proteção borracha clorada, após ataque químico

A análise, através dos histogramas, permite verificar que no concreto protegido com borracha clorada, antes do ataque, 42% das amplitudes variaram de 250 e 338μm e, após o ataque, 60% das amplitudes ficaram entre 417μm e 570μm, comprovando a eficiência da borracha clorada na minimização da degradação do concreto.

5.5.4 Histogramas gerados a partir das imagens 3D invertidas sem filtro

A fim de fazer uma interpretação da degradação superficial do concreto sob um outro enfoque, foi utilizado um recurso fornecido pelo software “Mountains“, que permite visualizar a imagem invertida, indicando a forma dos vales. Na construção de histogramas, os vales passam a ser representados por picos e, através desta leitura, pode-se fazer a medida da frequência de vales por área (vale/mm²). As imagens produzidas após este procedimento estão indicadas nas figuras 5.25 a 5.32. Observa-se o aumento da amplitude total após ataque químico.

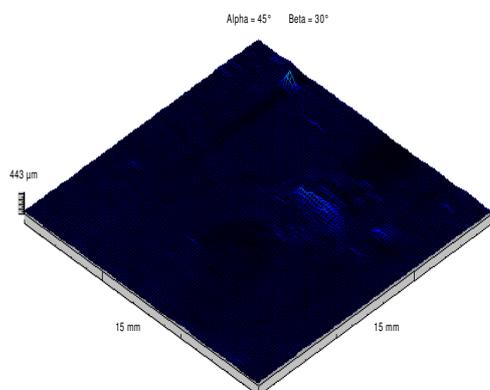


Figura 5.25 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto sem proteção, antes do ataque químico

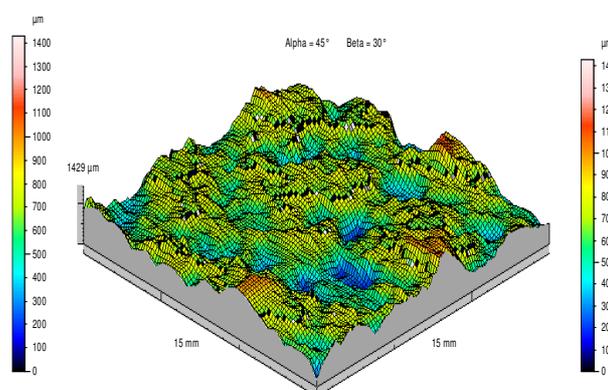


Figura 5.26 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto sem proteção, após ataque químico

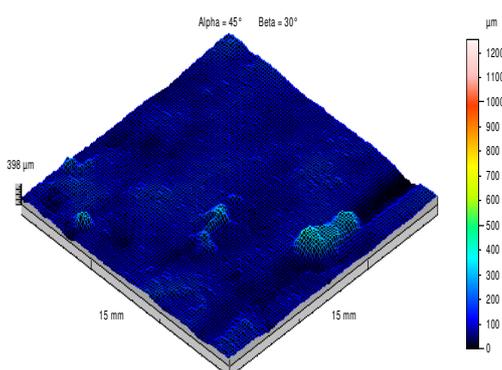


Figura 5.27 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico

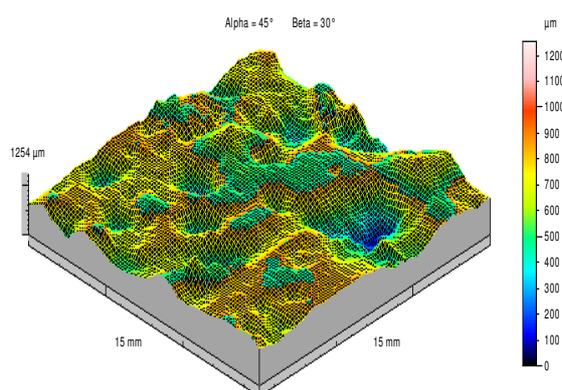


Figura 5.28 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção acrílica, após o ataque químico

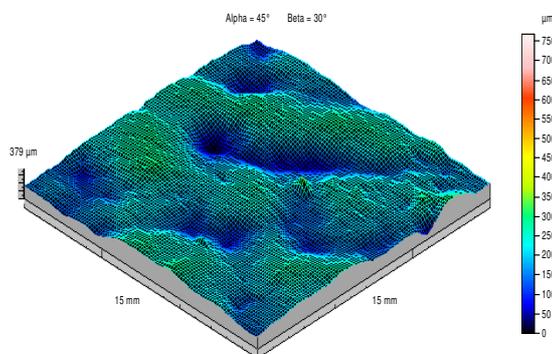


Figura 5.29 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico

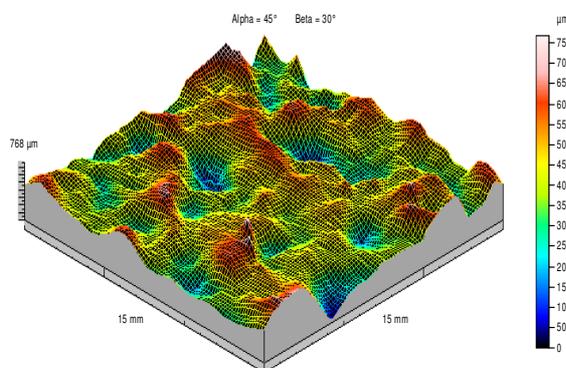


Figura 5.30 - Imagem 3D original invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção selador/acrílica, após o ataque químico

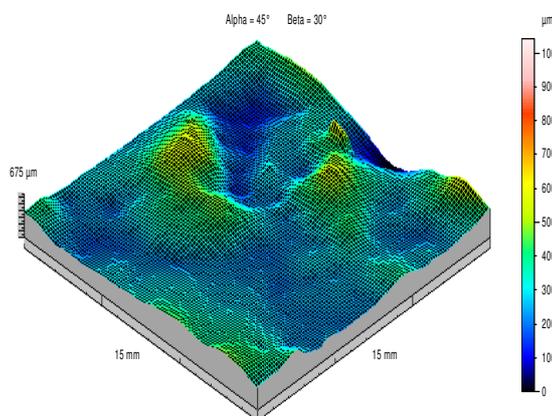


Figura 5.31- Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção de borracha clorada, antes do ataque químico

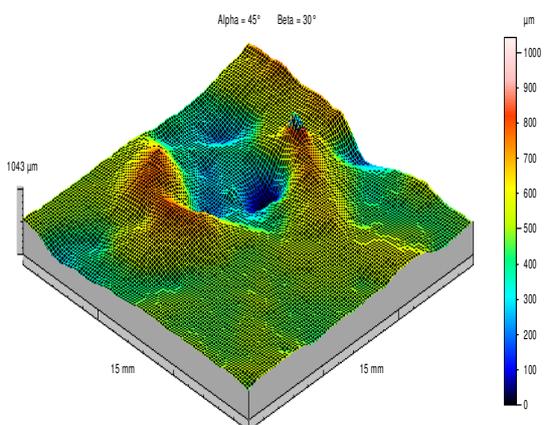


Figura 5.32 - Imagem 3D invertida em relação ao eixo Z do concreto com proteção de borracha clorada, após o ataque químico

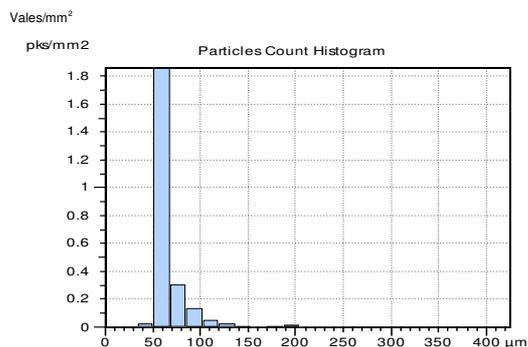


Figura 5.33 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto sem proteção, antes do ataque químico

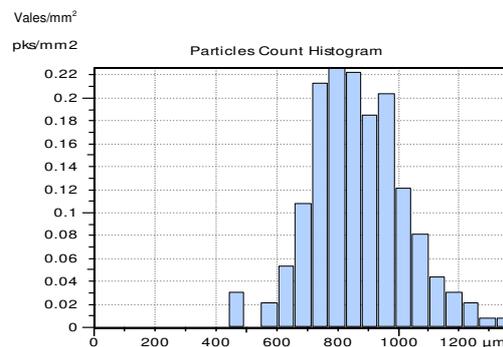


Figura 5.34 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto sem proteção, após ataque químico

A distribuição da densidade de vales do concreto sem proteção, antes do ataque, indicada no histograma da figura 5.33, mostra uma maior freqüência das amplitudes entre 50 a 80µm, enquanto no concreto sem proteção, após ataque químico, as freqüência se situaram entre 650 e 1100µm, figura 5.34, demonstrando um alto grau de degradação do concreto sem proteção, após ataque químico.

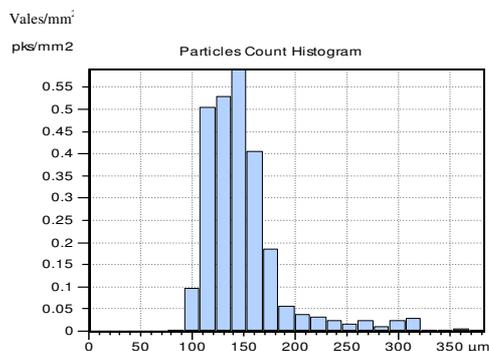


Figura 5.35 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção acrílica, antes do ataque químico

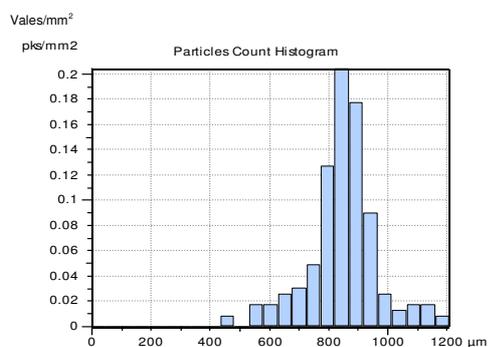


Figura 5.36 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção acrílica, após ataque químico

A avaliação dos histogramas do concreto com proteção acrílica, permite verificar que as amplitudes com maior freqüência, antes do ataque, estão entre 100 e 180µm, figura 5.35,

e que, após ataque químico, entre 750 e 950 μm , figura 5.36, o que indica a vulnerabilidade da proteção em pontos específicos, o que pode ser constatado através da visualização dos corpos de prova protegidos com tinta acrílica.

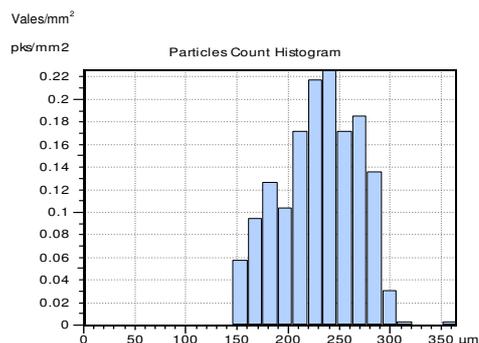


Figura 5.37 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque químico

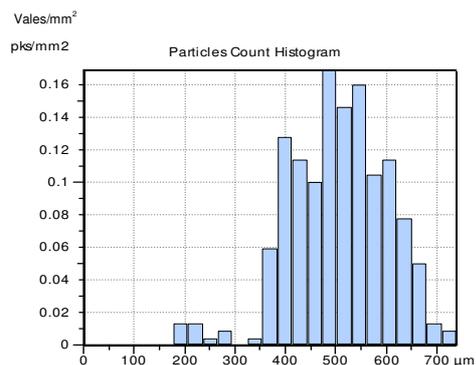


Figura 5.38 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção selador/acrílica, após ataque químico

Na figura 5.37, a frequência de vales/mm² observada para o concreto com proteção selador/acrílica, antes do ataque, varia de 150 a 300 μm e, após ataque, de 350 a 700 μm , figura 5.38. Este aumento de amplitude indica, como no caso anterior, a vulnerabilidade de alguns pontos da proteção.

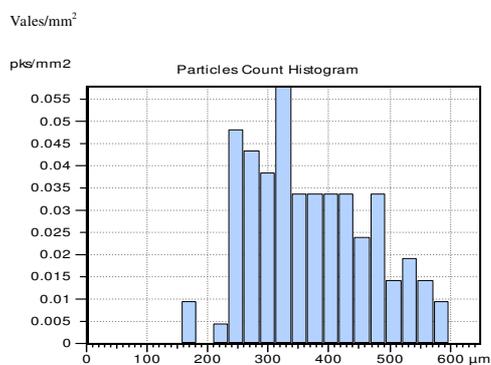


Figura 5.39 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção borracha clorada, antes do ataque químico

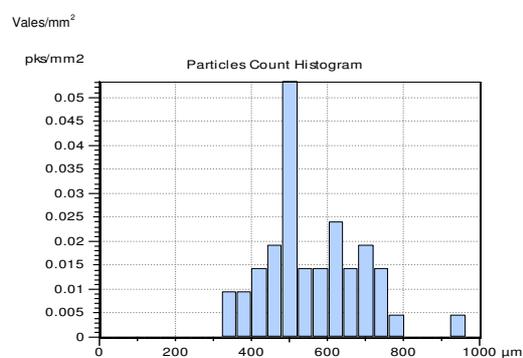


Figura 5.40 - Histograma de densidade gerado a partir da imagem 3D invertida do concreto com proteção borracha clorada, após ataque químico

As amplitudes observadas de 250 a 600μm, antes do ataque, figura 5.39, e de 300 a 800μm, após ataque, figura 5.40, no caso da borracha clorada, indicam uma maior proteção ao ataque químico, uma vez que a mudança na faixa de amplitude dos vales presentes não foi significativa para esta proteção.

5.6 Perda de massa

Os valores obtidos nas perdas de massa foram comparados com alguns parâmetros de perfilometria, como mostra a tabela nº V.7, a seguir.

Tabela V.7 - Perdas de massa antes e após ataque e parâmetros obtidos na perfilometria

Concreto	Antes do Ataque	Após ataque	Delta *	Antes ataque	Após ataque	Delta *	Antes ataque	Após ataque	Delta *
	Massa (g)		(%)	Sa (µm)		(%)	Sz (µm)		(%)
Sem proteção	472,6±3,2	463,7±3,2	1,9	7,62	157	1.960	239	1.129	372
Proteção Acrílica	481,3±3,0	479,4±3,0	0,4	24,4	125	412	297	965	225
Selador/acrílica	458,5±3,3	457,5±3,3	0,2	39,3	81,8	108	280	587	110
Borracha Clorada	470,1±2,5	468,3±2,5	0,4	67,7	84,4	25	379	682	80

$$* \text{Delta} = \frac{\text{antes do ataque} - \text{após ataque}}{\text{antes do ataque}} \times 100$$

A partir da tabela V.7, foi possível quantificar as perdas de massa de corpos de prova de concreto submetidos a ataque químico, assim como correlacioná-las à corrosão do material, através dos parâmetros de amplitude Sa e Sz. O material que apresentou maior perda de massa, de aproximadamente 2%, foi o concreto sem proteção e os concretos protegidos tiveram uma perda que variou entre 0,2 e 0,4%, enquanto a variação dos parâmetros de amplitude Sa foi de 1.960µm para o concreto sem proteção e entre 25 a 412µm para os concretos protegidos, confirmadas pela variação do Sz nas diferentes situações.

Deve-se assinalar que não seria possível fazer uma diferenciação entre a borracha clorada, selador/tinta acrílica e a tinta acrílica, ao se analisar apenas as perdas de massa. No entanto, a sensibilidade do perfilômetro permite confirmar, através dos seus parâmetros de amplitude, a eficiência em ordem crescente da proteção acrílica, seguida da composição de selador e tinta acrílica e da borracha clorada, que apresentou, portanto, a maior proteção ao ataque químico ao qual o concreto foi submetido.

5.7 Difração de raios-X do concreto sem proteção

A identificação das fases sólidas principais presentes no concreto pode ser observada no difratograma da figura 5.41:

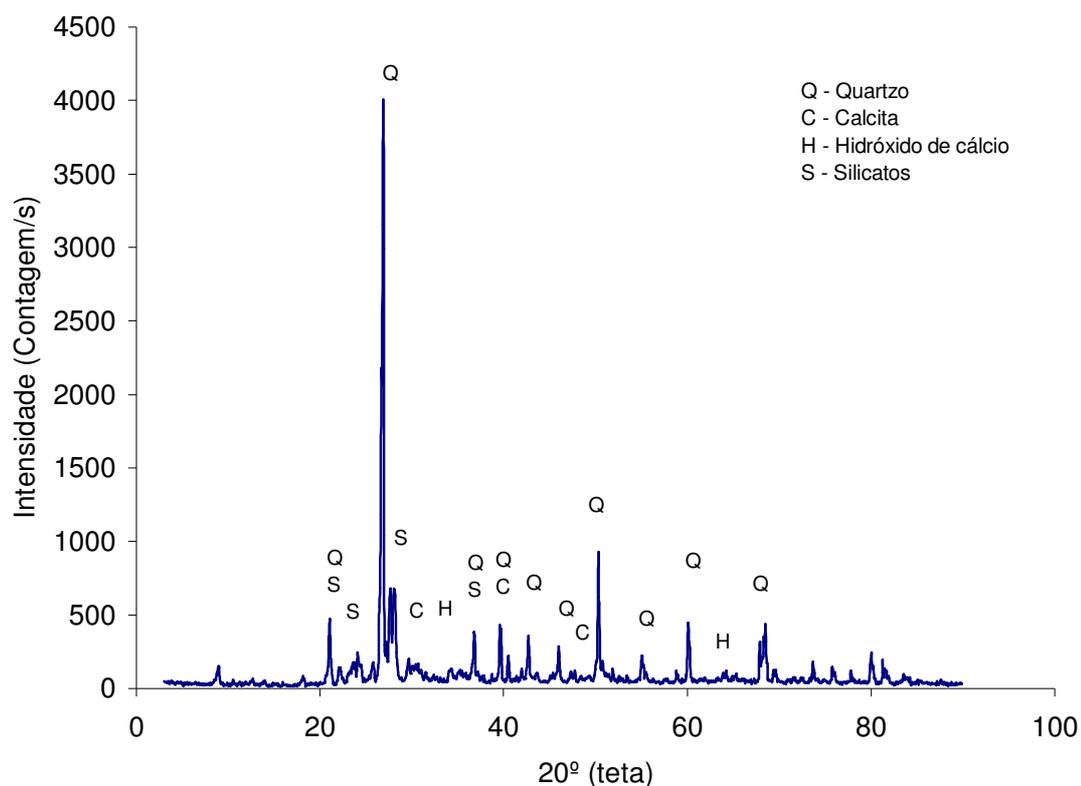


Figura 5.41 - Difratograma de raios-X do concreto sem proteção e sem ataque químico

O difratograma de raios-X, figura 5.41, permite constatar que o concreto apresenta uma cristalinidade bastante grande, uma vez que a linha de base não tem uma elevação considerável, sendo possível identificar as fases sólidas presentes nas estruturas dos concretos: Quartzo (SiO_2), Calcita (CaCO_3), Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Silicatos de cálcio e Estringita [$\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6$].

5.8 Análise estrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura

Foram realizados ensaios com microscópio eletrônico de varredura (MEV), a fim de se fazer uma análise da microestrutura do concreto submetido a meio agressivo e da influência das proteções na manutenção da durabilidade.

O concreto tem uma estrutura muito heterogênea e complexa e possui diferentes constituintes que se caracterizam por pasta de cimento, agregados e zona de transição.

A caracterização microestrutural realizada neste estudo enfoca a superfície do concreto abordando os dois constituintes presentes na área superficial do material, ou seja, uma que se refere à pasta (cimento e água) e outro formado pelos agregados (areia e brita).

As análises microestruturais da pasta de cimento permitem identificar os compostos de silicatos de cálcio hidratado, C-S-H, cristais de hidróxido de cálcio, portlandita e sulfoaluminatos de cálcio, estringita, que são derivados do clínquer, produto obtido nos fornos de fabricação do cimento, composto por C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF e C. O silicato de cálcio hidratado constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado e é, conseqüentemente, o mais importante na determinação das propriedades da pasta. A portlandita constitui de 20 a 25% do volume da pasta hidratada e os sulfoaluminatos de cálcio, C_4ASH_{18} ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida.

As análises microestruturais permitiram identificar a presença de quartzo, feldspato, mica, anfibólio e granada (Ca, Al, Si, O, Mg, Mn, Fe) provenientes dos agregados graúdos (brita de gnaiss) e miúdos (areia natural).

Amostras não condutoras de elétrons, como o concreto, devem ser recobertas por uma camada com material condutor, num processo denominado metalização. Na análise da superfície do concreto, a metalização foi feita com grafite, portanto, o carbono visualizado nos espectros EDS (Espectrometria de Dispersão de Energia) é proveniente da metalização. No caso do uso da proteção acrílica, o aumento significativo do carbono se deve ao carbono da composição da tinta acrílica.

A seguir, são apresentadas as imagens geradas no microscópio eletrônico (ME) e os espectros de EDS das superfícies do concreto de resistência à compressão de 39 MPa, antes e após ataque químico, estando ou não protegidas. Vale lembrar que teores abaixo de 0,5% em peso não são significativos e, portanto, não serão levados em consideração nas análises.

A heterogeneidade da superfície do concreto sem proteção, antes do ataque químico, é mostrada na figura 5.42, onde são identificadas duas regiões diferenciadas.

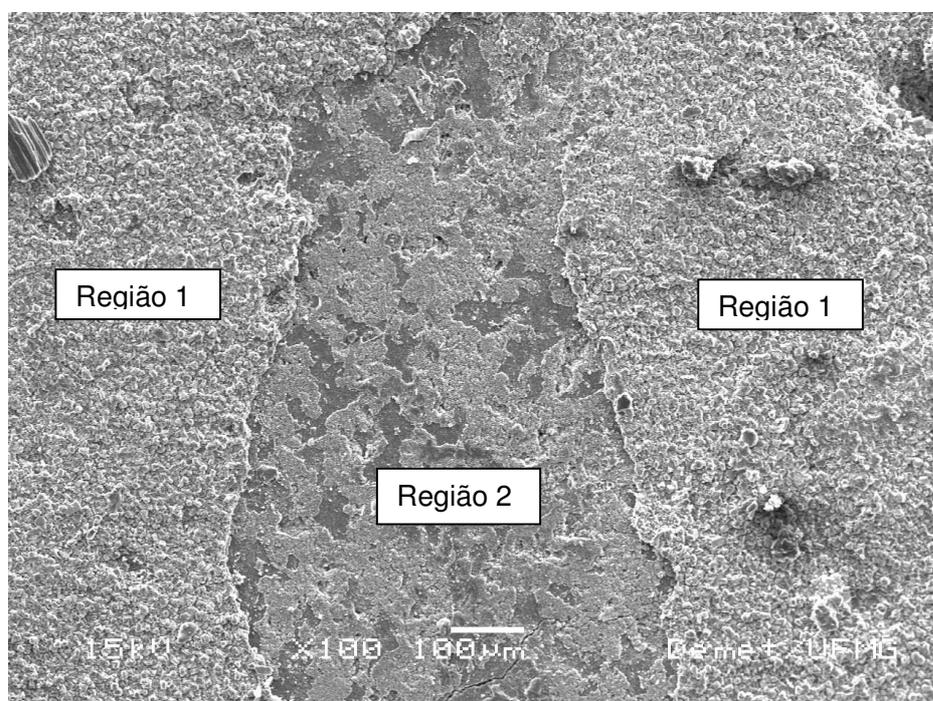


Figura 5.42 - Imagem de elétrons secundários, obtida em microscópio eletrônico (ME), da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, ampliada 100x.

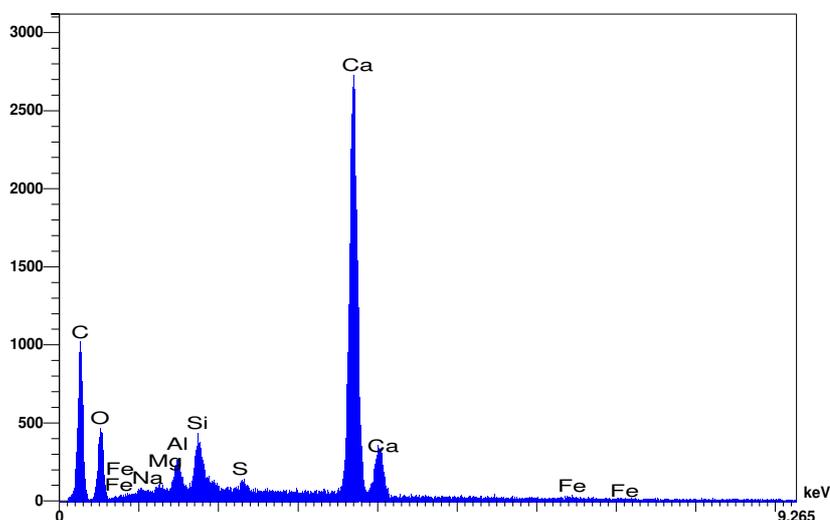


Figura 5.43 - Espectro EDS do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 1, da figura 5.42 com predominância de Ca, elemento presente na portlandita

Tabela V.8 - Composição química do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 1

Elementos	% Peso	% Atômica
C	29.96	48.22
O	23.54	28.43
Na	0.28	0.24
Mg	0.13	0.10
Al	0.67	0.48
Si	3.10	2.13
S	0.38	0.23
K	0.44	0.22
Ca	41.08	19.81
Fe	0.42	0.14
	100.00	100.00

Na região 1, figura 5.42, observa-se uma predominância de Ca e O (19,8% e 28%, respectivamente), indicando a presença de cristais de portlandita - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produto resultante da hidratação do cimento, figura 5.43. A portlandita tende a formar grandes cristais, sob forma de prismas hexagonais, figuras 5.44 e 5.45, que correspondem a ampliações de 1000 e 5000x da região 1. Consta-se também Al e Si, elementos que compõem a pasta de cimento, tabela V.8.

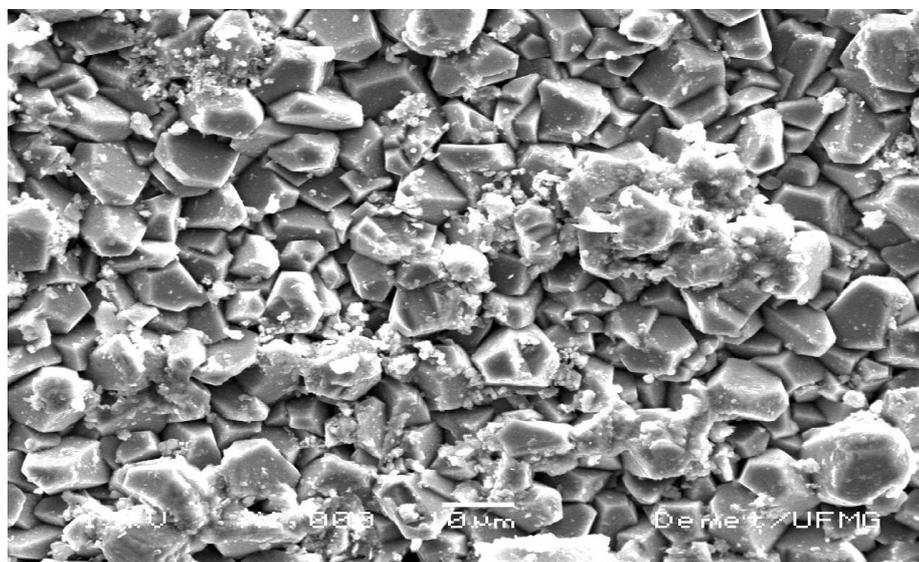


Figura 5.44 - Imagem ampliada 1000x da região 1, figura 5.42, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, mostrando cristais de portlandita – Ca(OH)_2

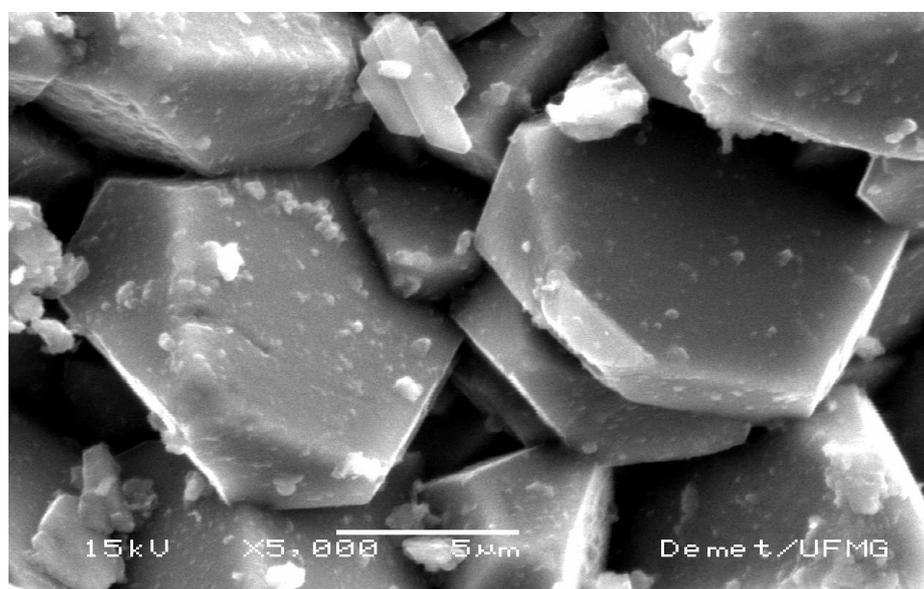


Figura 5.45 – Imagem ampliada 5000x da região 1, figura 5.42, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, mostrando detalhe dos cristais de portlandita – Ca(OH)_2

A imagem referente à região 2, apresenta duas sub-áreas com texturas diferenciadas A e B. Ver figuras 5.46, 5.47 e 5.49.

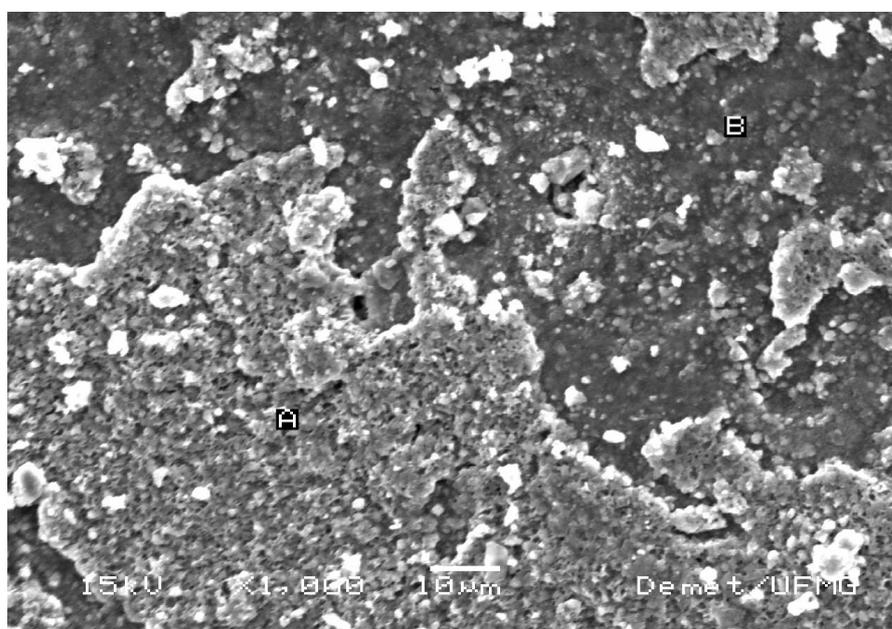


Figura 5.46 - Imagem ampliada 1000x da região 2, figura 5.42, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico, áreas analisadas A e B

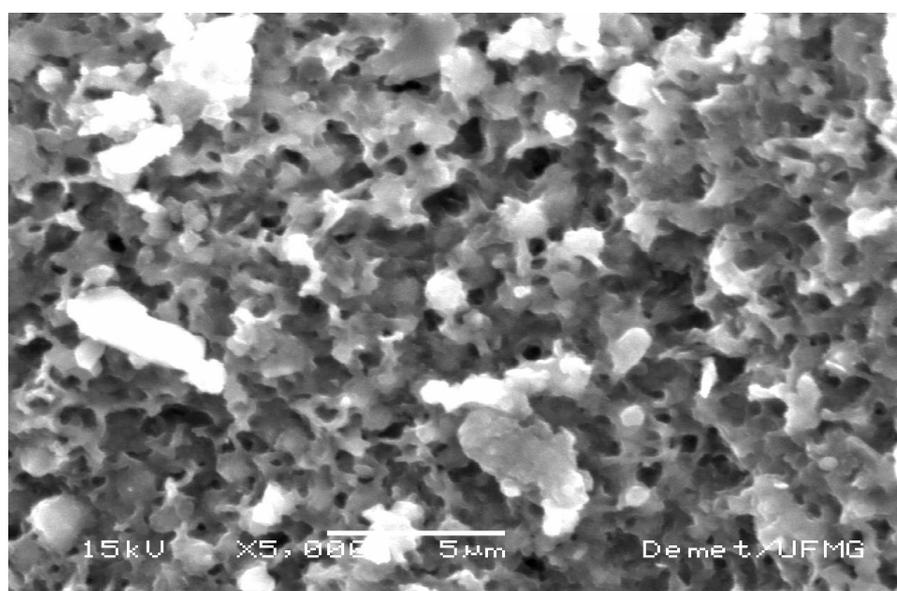


Figura 5.47- Imagem ampliada 5000x da região 2, figura 5.42, área A, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque.

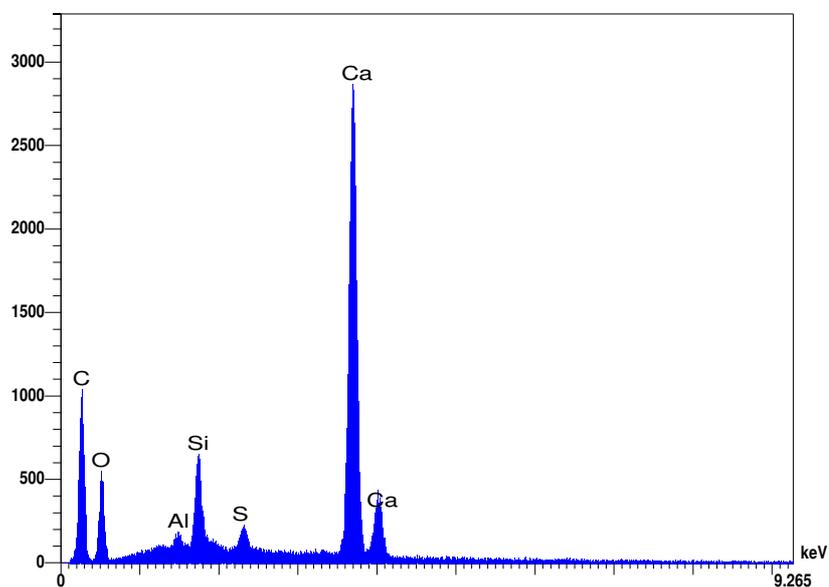


Figura 5.48 - Espectro EDS do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área A, presença de Ca, Si e C

Tabela V.9 - Composição química do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área A

Elementos	% Peso	% Atômica
C	31.14	49.76
O	22.49	26.98
Na	0.00	0.00
Mg	0.70	0.55
Al	1.01	0.72
Si	3.02	2.07
S	0.81	0.49
K	0.22	0.11
Ca	39.72	19.02
Fe	0.89	0.30
	100.00	100.00

Verifica-se que a região 2, área A, apresenta os mesmos elementos químicos da região 1, com predominância de Ca e O (19% e 27%, respectivamente) e teores de Al, Si, S e Fe, indicando ser placa de portlandita deformada, figura 5.48 e tabela V.9.

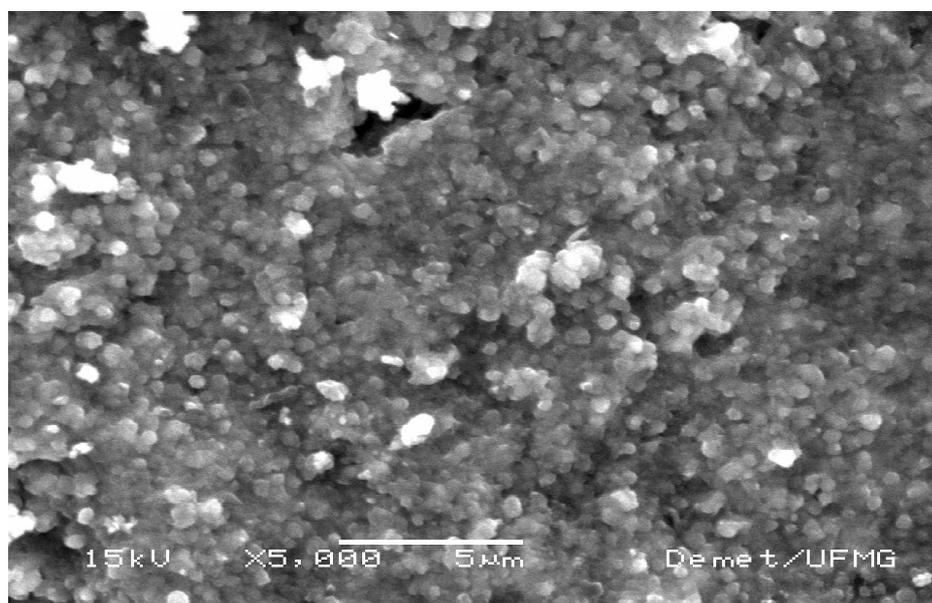


Figura 5.49 - Imagem ampliada 5000x da região 2, figura 5.42, área B, da superfície do concreto sem proteção e sem ataque químico

A estrutura desta superfície, figura 5.49, é formada por produtos hidratados arredondados, em forma de flocos, cuja microanálise indica serem partículas de silicatos de cálcio hidratado, C-S-H, (Silva, 1998).

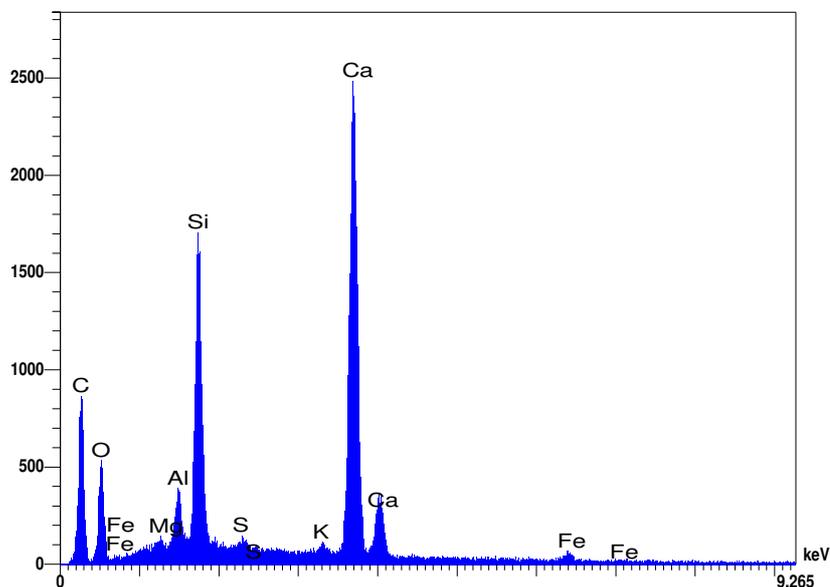


Figura 5.50 - Espectro EDS do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área B, predominância de Ca e Si, presentes nas partículas de C-S-H

Tabela V.10 - Composição química do concreto sem proteção e sem ataque químico, região 2, área B

Elementos	% Peso	% Atômica
C	38.57	58.23
O	17.30	19.60
Na	0.00	0.00
Mg	0.46	0.34
Al	1.57	1.05
Si	9.76	6.30
S	0.61	0.34
K	0.24	0.11
Ca	29.66	13.42
Fe	1.84	0.60
	100.00	100.00

Na região 2, área B, a análise por EDS confirma a presença de partículas de C-S-H, a diminuição de Ca e O, comparativamente às outras áreas analisadas, um aumento do Si e a presença de algumas impurezas Al, S e Fe, figura 5.50 e tabela V.10.

A superfície do concreto sem proteção após ataque químico se caracteriza por três regiões diferenciadas, como mostra a figura 5.51, 5.52, 5.54 e 5.56.

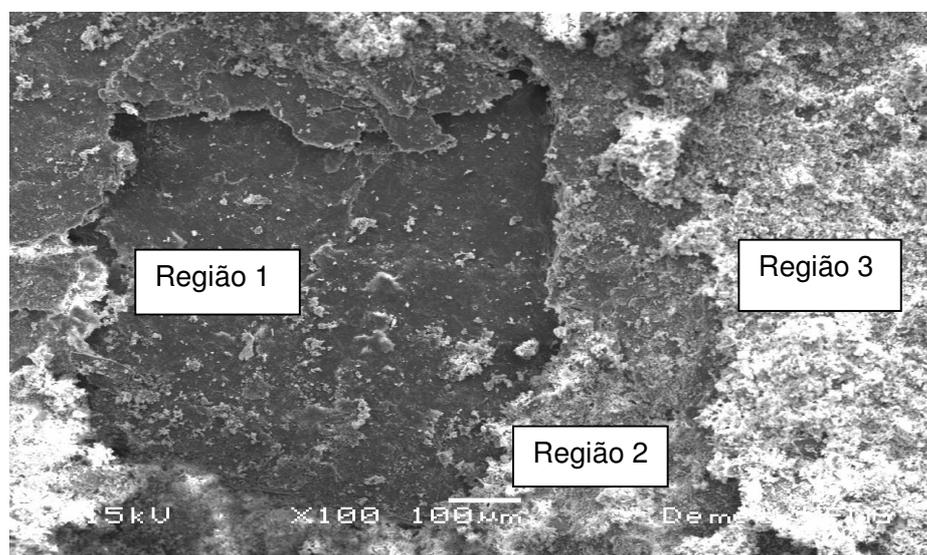


Figura 5.51 - Imagem obtida da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico, ampliada 100x

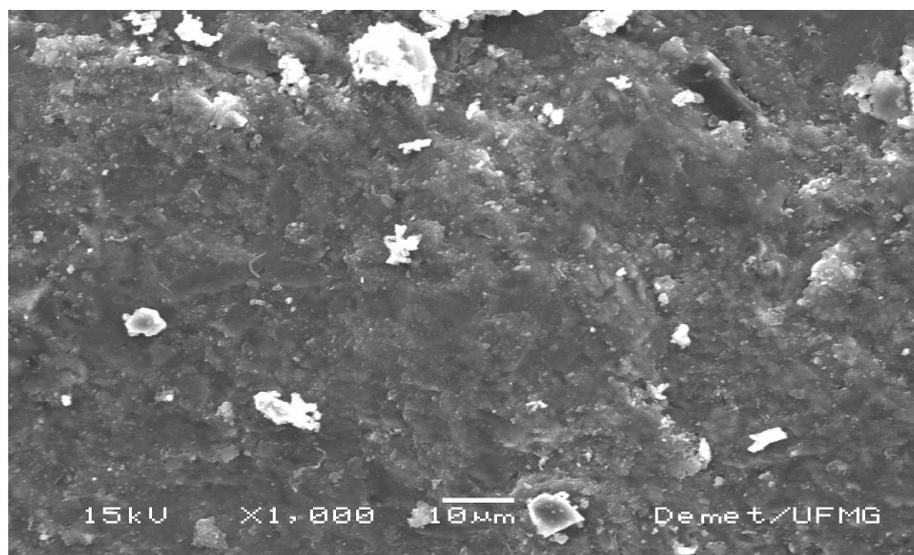


Figura 5.52 - Imagem ampliada 1000x da região 1, figura 5.51, da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico

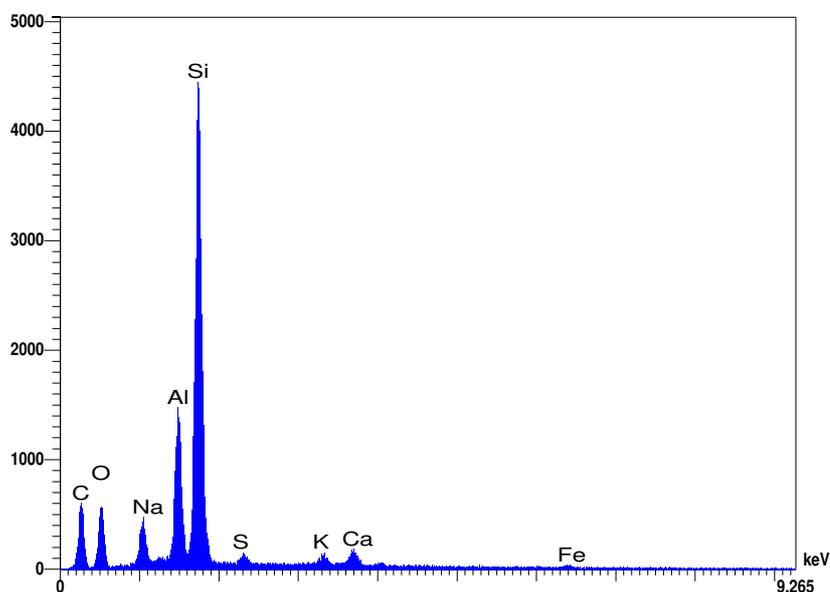


Figura 5.53 - Espectro EDS do concreto sem proteção e após ataque químico, região 1

Tabela V.11 - Composição química do concreto sem proteção e após ataque químico, região 1

Elementos	% Peso	% Atômica
C	35.64	49.89
O	26.15	27.48
Na	3.49	2.55
Mg	0.10	0.07
Al	7.88	4.91
Si	20.64	12.36
S	1.86	0.98
K	0.24	0.10
Ca	3.83	1.61
Fe	0.16	0.05
	100.00	100.00

A deterioração do concreto após ataque químico pode ser comprovada pelo aumento do Si, Al e Na, provenientes dos agregados, uma vez que o ataque retirou a pasta que recobre os agregados, figura 5.53 e tabela V.11.

No concreto sem proteção após ataque químico, a imagem referente à região 2, figura 5.54, permite visualizar uma névoa em consequência do ataque químico ao qual o concreto foi submetido.

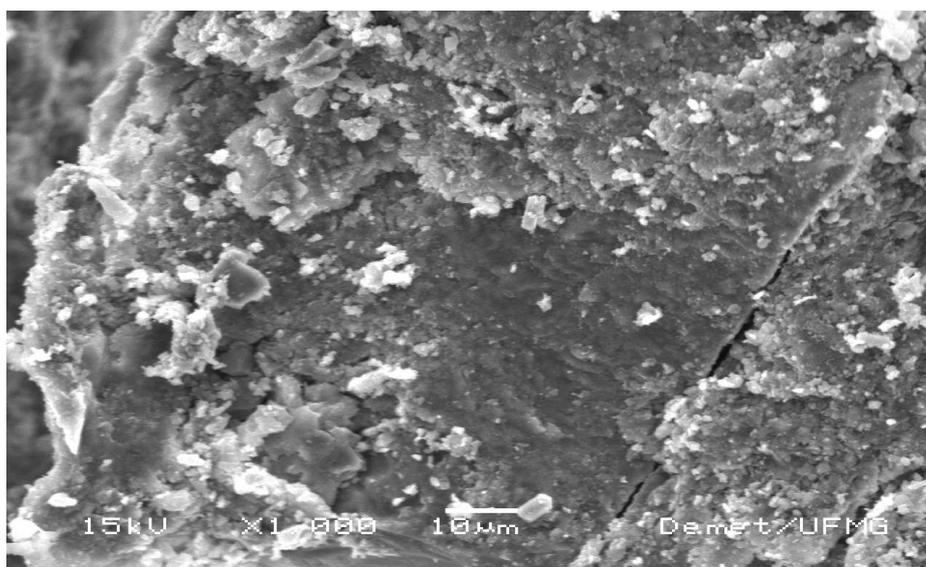


Figura 5.54 - Imagem ampliada 1000x da região 2, figura 5.51, da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico

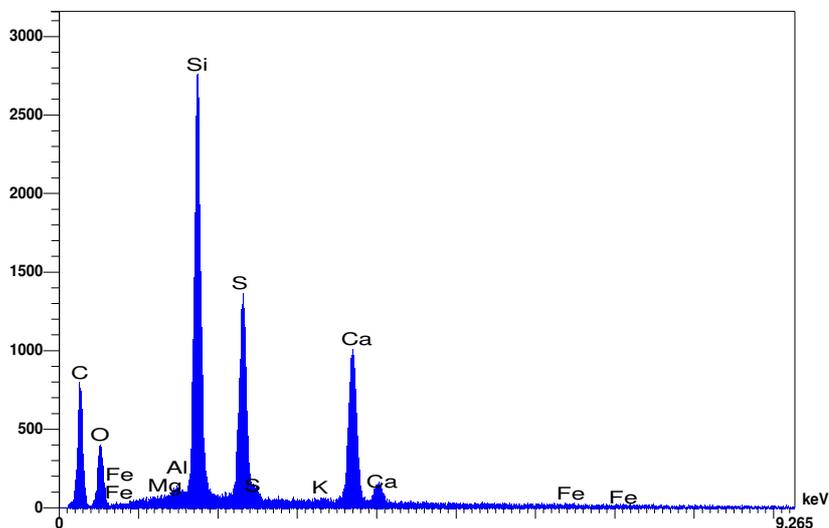


Figura 5.55 - Espectro EDS do concreto sem proteção, após ataque químico, região 2

Tabela V.12 - Composição química do concreto sem proteção, após ataque químico, região 2

Elementos	% Peso	% Atômica
C	35.13	50.06
O	27.81	29.75
Na	1.03	0.77
Mg	0.09	0.06
Al	3.73	2.37
Si	13.41	8.17
S	7.73	4.13
K	1.08	0.47
Ca	9.65	4.12
Fe	0.34	0.11
	100.00	100.00

A partir do EDS, figura 5.55, pode-se constatar um aumento da sílica, proveniente do afloramento dos agregados, e do enxofre, originário do ataque químico com ácido sulfúrico.

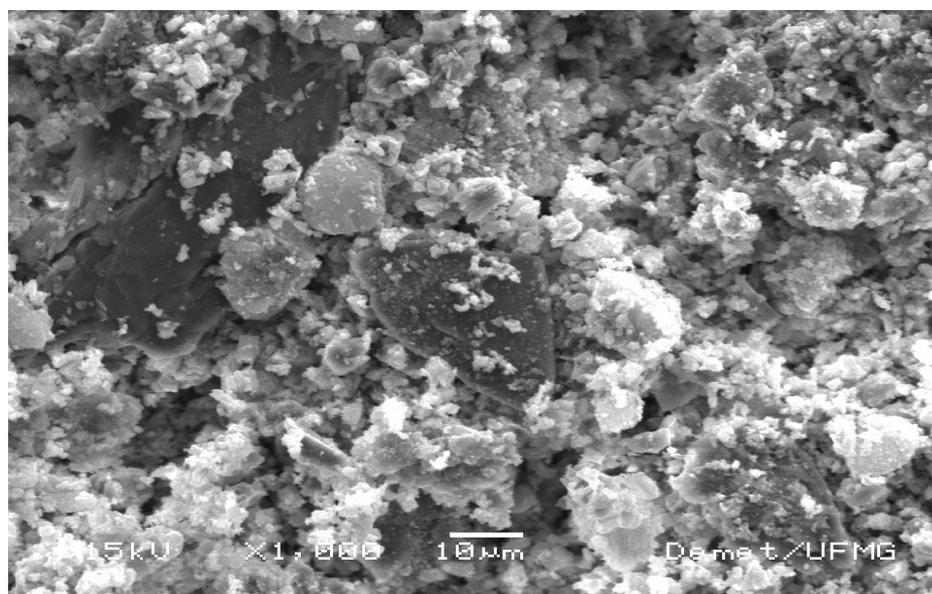


Figura 5.56 - Imagem ampliada 1000x da região 3, figura 5.51, da superfície do concreto sem proteção e após ataque químico

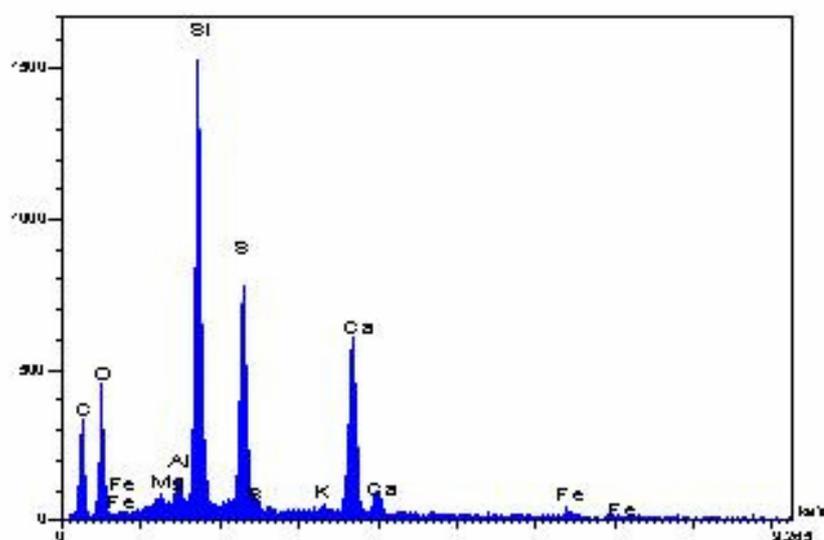


Figura 5.57 - Espectro EDS do concreto sem proteção, após ataque químico, região 3

Tabela V.13 - Composição química do concreto sem proteção, após ataque químico, região 3

Elementos	% Peso	% Atômica
C	37.94	54.39
O	23.82	25.64
Na	0.01	0.00
Mg	0.00	0.00
Al	0.37	0.24
Si	13.40	8.22
S	9.66	5.19
K	0.08	0.04
Ca	14.40	6.19
Fe	0.31	0.10
	100.00	100.00

Na imagem, figura 5.56, pode-se observar cristais de portlandita recobertos de material rico em Si, Ca e O, figura 5.57, proveniente da presença de agregado e S devido ao produto de ataque do concreto (H_2SO_4), tabela V.13.

São apresentados, a seguir, os concretos com diferentes proteções, antes e após ataque químico. A primeira a ser caracterizada será a proteção acrílica, figuras 5.58 e 5.59.

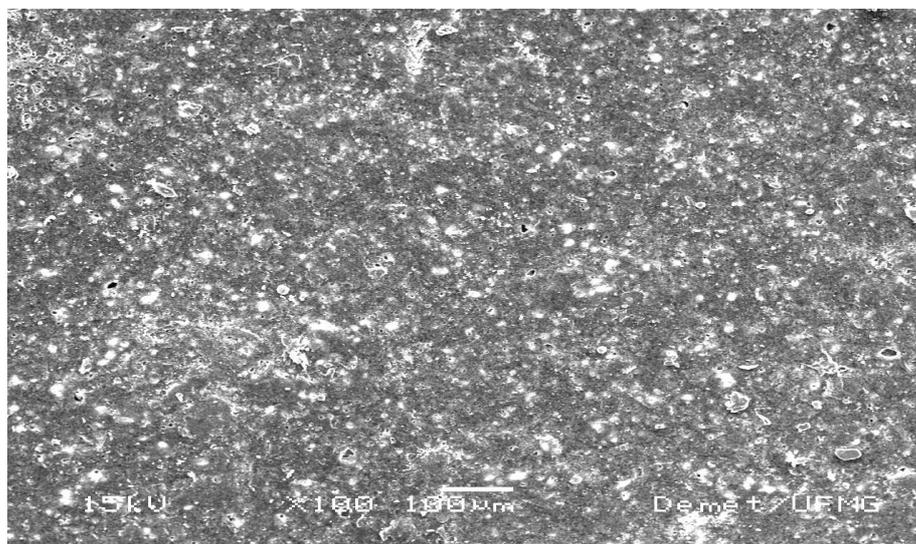


Figura 5.58 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico, ampliada 100x. Superfície mais homogênea do que o concreto sem proteção

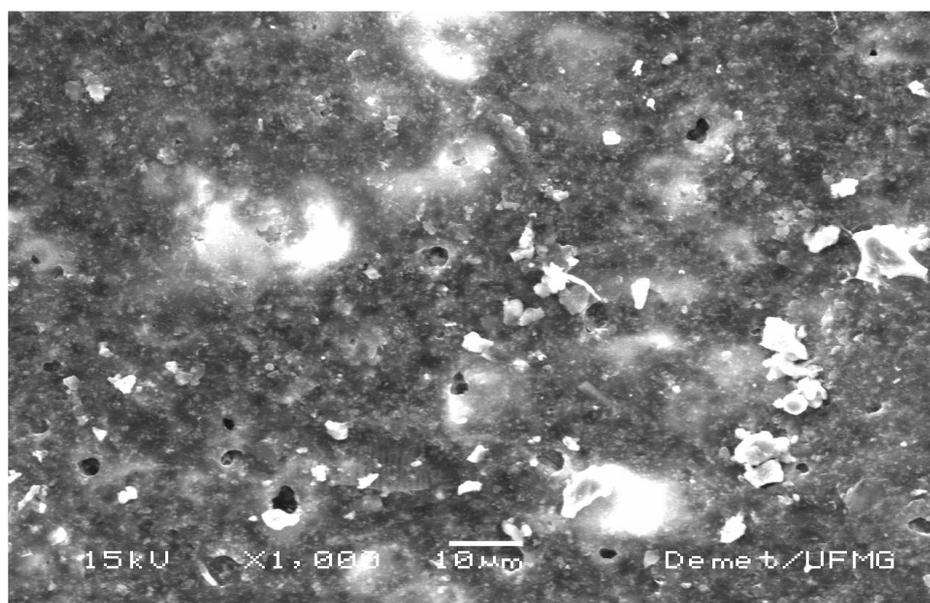


Figura 5.59 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico

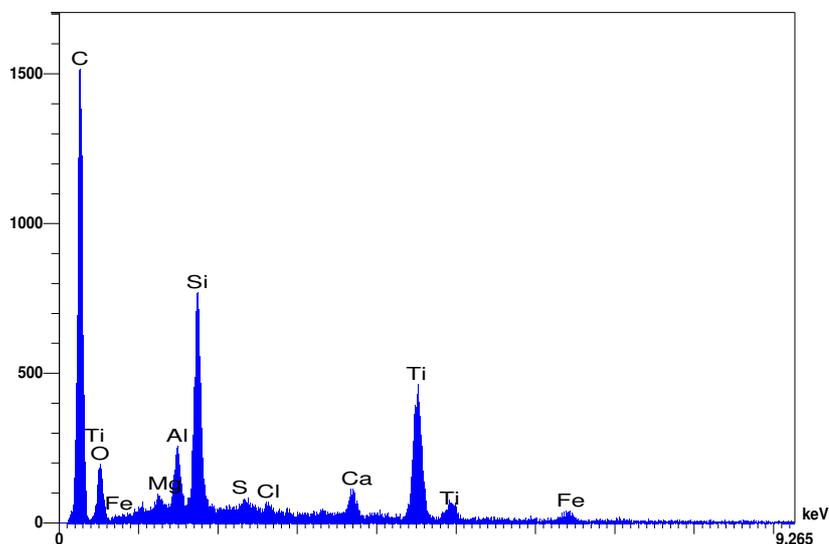


Figura 5.60 - Espectro EDS do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico

Tabela V.14 - Composição química do concreto com proteção acrílica e sem ataque químico

Elementos	% Peso	% Atômica
C	62.97	78.37
O	13.06	12.20
Na	0.08	0.05
Mg	0.33	0.20
Al	1.48	0.82
Si	5.59	2.98
S	0.82	0.38
Cl	0.49	0.21
K	0.18	0.07
Ca	1.63	0.61
Ti	12.09	3.77
Fe	1.28	0.34
	100.00	100.00

A homogeneidade da superfície demonstra a boa aderência da proteção acrílica ao substrato, ou seja, um recobrimento efetivo da superfície, figura 5.58 e 5.59. A análise por EDS mostra a predominância de C, O e Ti originários da proteção acrílica, figura 5.60. A tinta contém também S, Mg, Fe e Ca em menores proporções, tabela V.14.

No concreto protegido com tinta acrílica após ataque, observa-se uma superfície esbranquiçada em consequência do ataque químico, figura 5.61.

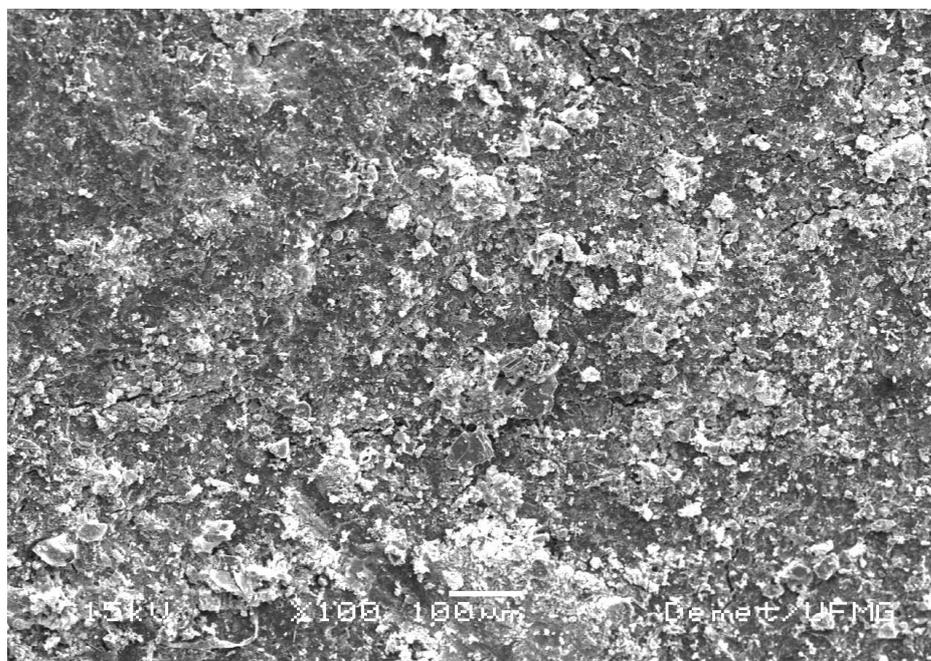


Figura 5.61 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção acrílica e após ataque químico, ampliada 100x

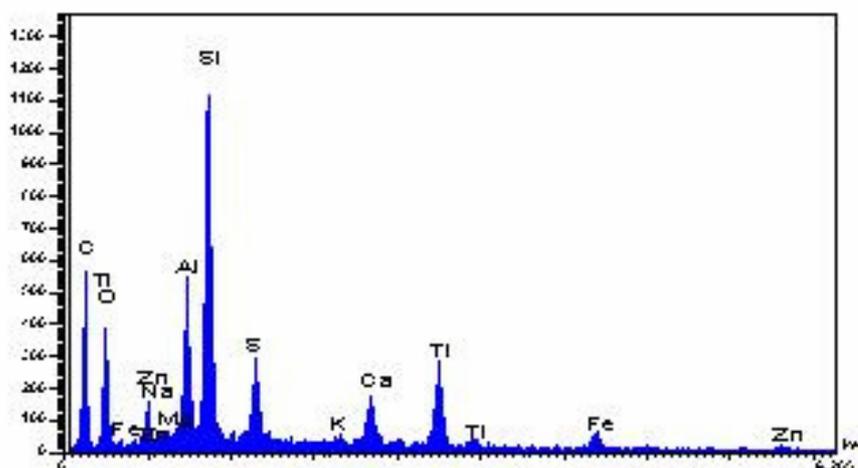


Figura 5.62 - Espectro de EDS do concreto com proteção acrílica e após ataque químico

Tabela V.15 - Composição química do concreto com proteção acrílica e após ataque químico

Elementos	% Peso	% Atômica
C	48.70	64.96
O	21.80	21.83
Na	0.39	0.27
Mg	0.24	0.14
Al	3.84	2.28
Si	7.31	4.17
S	3.05	1.52
Cl	0.19	0.09
K	0.71	0.29
Ca	0.94	0.38
Ti	9.22	3.08
Fe	2.42	0.70
Zn	1.21	0.30
	100.00	100.00

No espectro EDS, figura 5.62, pode-se verificar uma diminuição do C, devido à degradação da tinta acrílica, e um aumento do Si e O, em consequência do aparecimento de elementos presentes no concreto, e também um aumento de S, devido ao ataque químico, tabela V.15.

As imagens realizadas no MEV, figuras 5.63 e 5.64, referente à composição do selador com proteção acrílica, mostram superfícies mais homogêneas, sem falhas no recobrimento, indicando uma boa aderência do selador e tinta ao substrato.

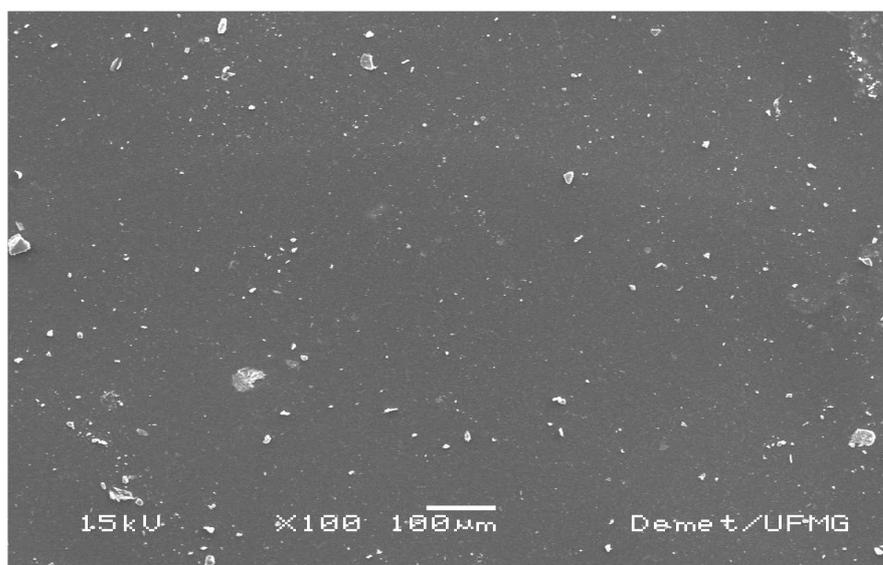


Figura 5.63 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção selador/acrílica e sem ataque químico, ampliada 100x. Superfície extremamente homogênea, sem falhas no recobrimento

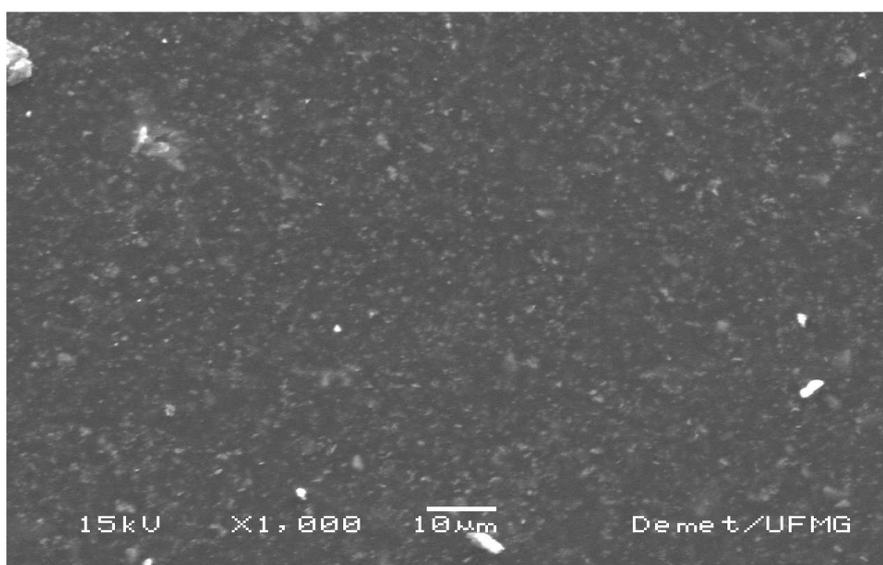


Figura 5.64 – Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção selador/acrílica e sem ataque químico

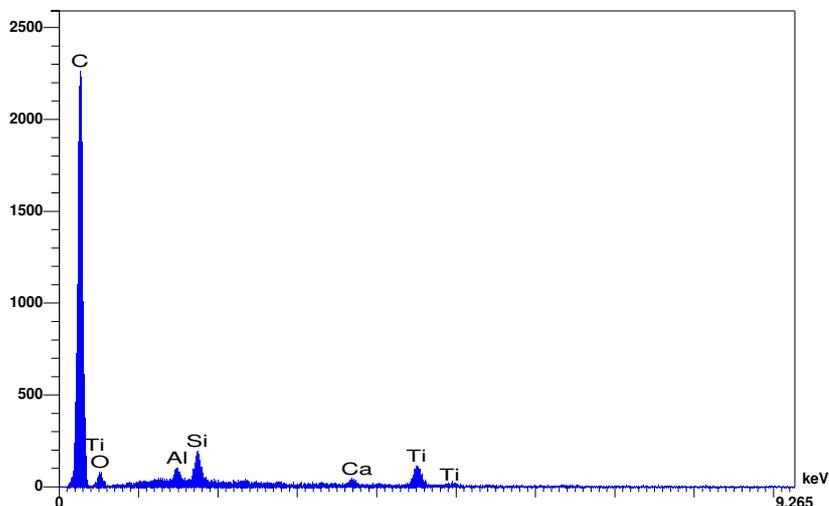


Figura 5.65 - Espectro EDS do concreto com proteção selador/acrílica e sem ataque químico, com predominância de Ti e C, elementos presentes na tinta acrílica

Tabela V.16 - Composição química do concreto com proteção selador/acrílica e sem ataque químico

Elemento	% Peso	% Atômica
C	85.06	91.46
O	7.41	5.98
Na	0.00	0.00
Mg	0.15	0.08
Al	0.70	0.34
Si	1.64	0.76
S	0.22	0.09
Cl	0.09	0.03
K	0.09	0.03
Ca	0.53	0.17
Ti	3.26	0.88
Fe	0.32	0.07
Zn	0.51	0.10
	100.00	100.00

O EDS do concreto com selador e tinta acrílica antes do ataque, figura 5.65, tem as mesmas características do concreto com apenas tinta acrílica, figura 5.60, uma vez que o selador não tem seus elementos expostos, por estar recoberto por tinta acrílica, tabela V.16.

Pode-se observar uma superfície mais esbranquiçada, devido ao produto de ataque, mostrando a corrosão da superfície.

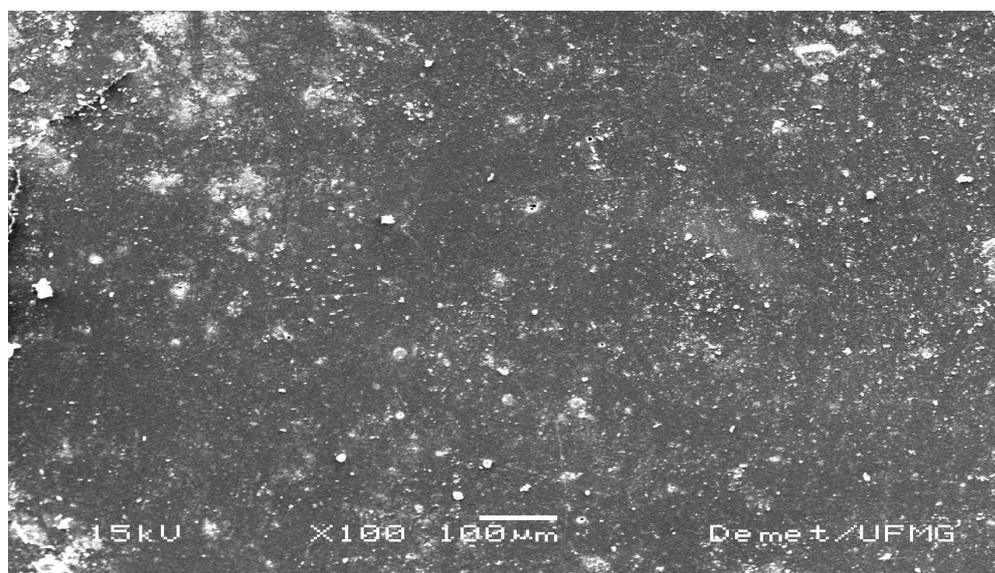


Figura 5.66 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção selador/acrílica e após ataque químico, ampliada 100x. Superfície com névoa esbranquiçada, caracterizando o ataque

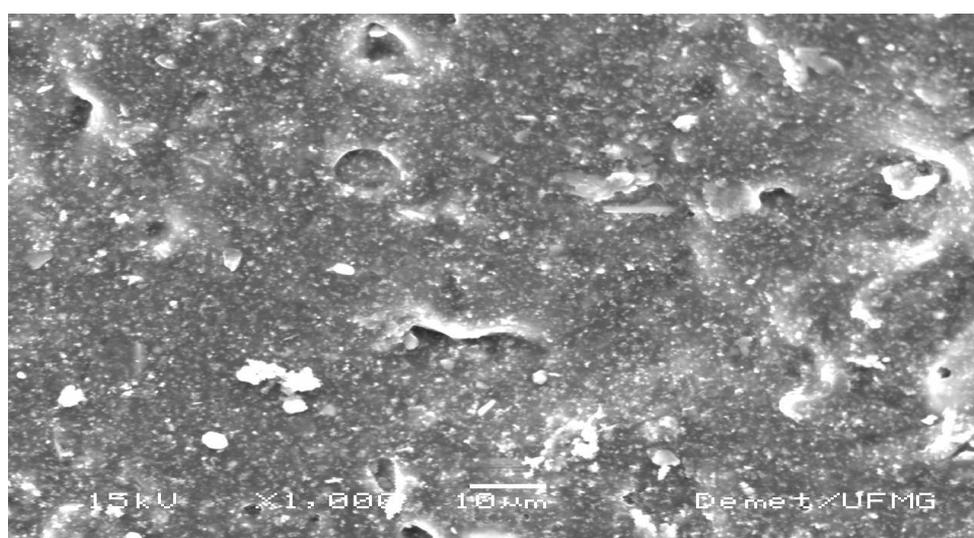


Figura 5.67 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção selador/acrílica e após ataque químico

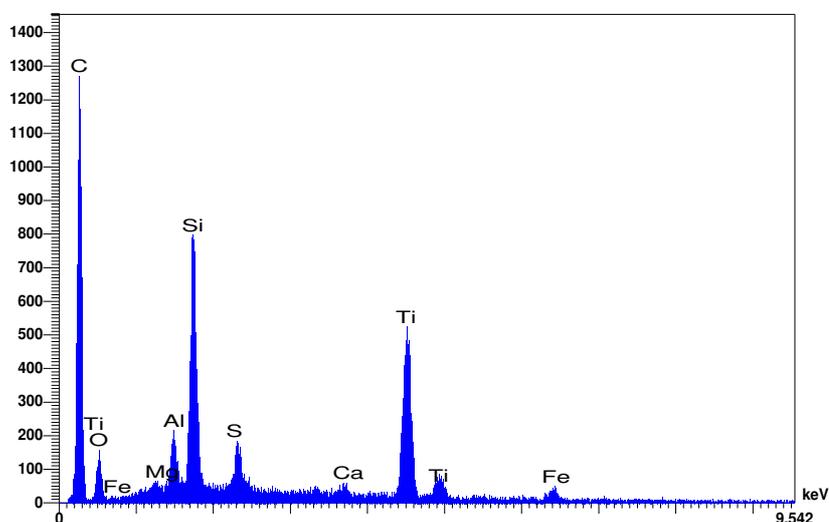


Figura 5.68 - Espectro EDS do concreto com proteção selador/acrílica e após ataque químico

Tabela V.17 - Composição química do concreto com proteção selador/acrílica e após ataque químico

Elementos	% Peso	% Atômica
C	63.66	80.24
O	10.07	9.53
Na	0.00	0.00
Mg	0.05	0.03
Al	1.18	0.66
Si	6.29	3.39
S	1.74	0.82
Cl	0.10	0.04
K	0.26	0.10
Ca	0.43	0.16
Ti	14.20	4.49
Fe	1.64	0.45
Zn	0.38	0.09
	100.00	100.00

No espectro EDS, figura 5.68, pode-se verificar uma diminuição do C, devido à degradação da tinta acrílica e um aumento do Si e O, em consequência do aparecimento dos elementos componentes do concreto, tabela V.17.

As figuras 5.69 e 5.70 representam a proteção com borracha clorada, mostrando superfícies também homogêneas.

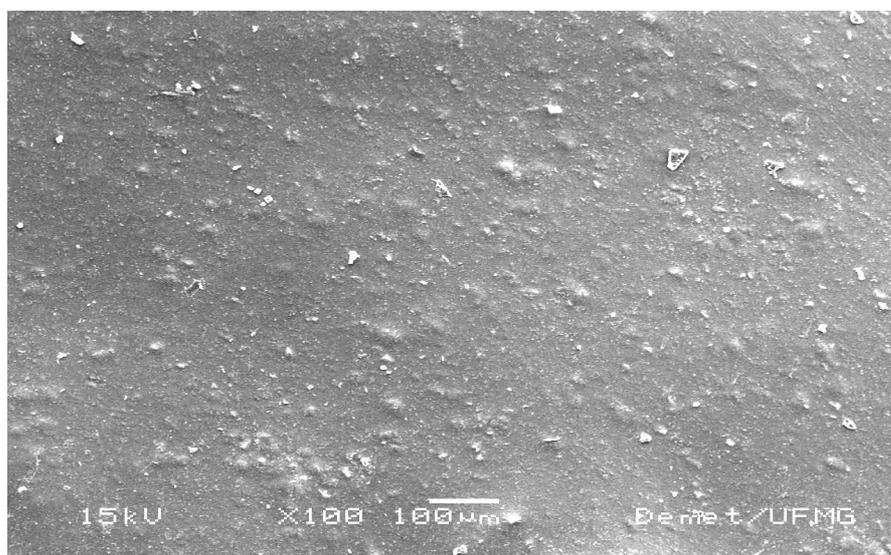


Figura 5.69 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e sem ataque químico, ampliada 100x

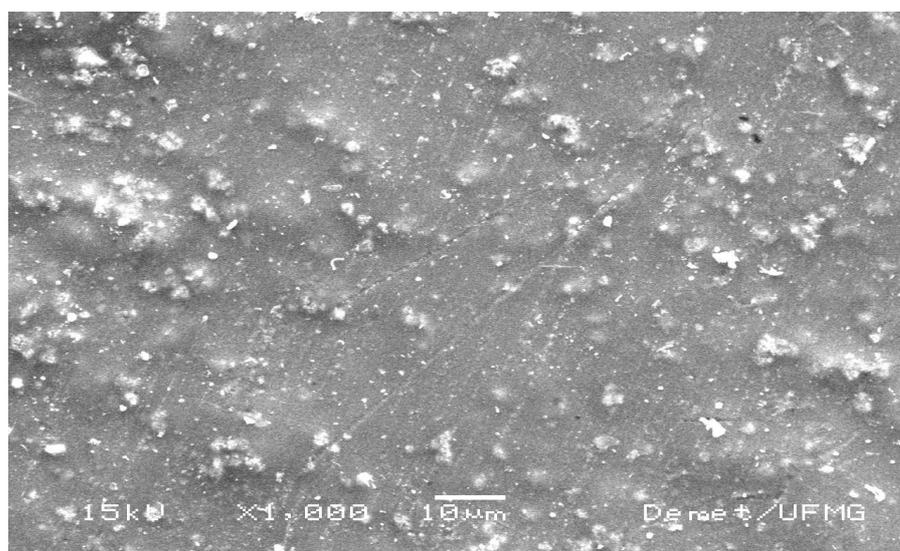


Figura 5.70 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e sem ataque químico

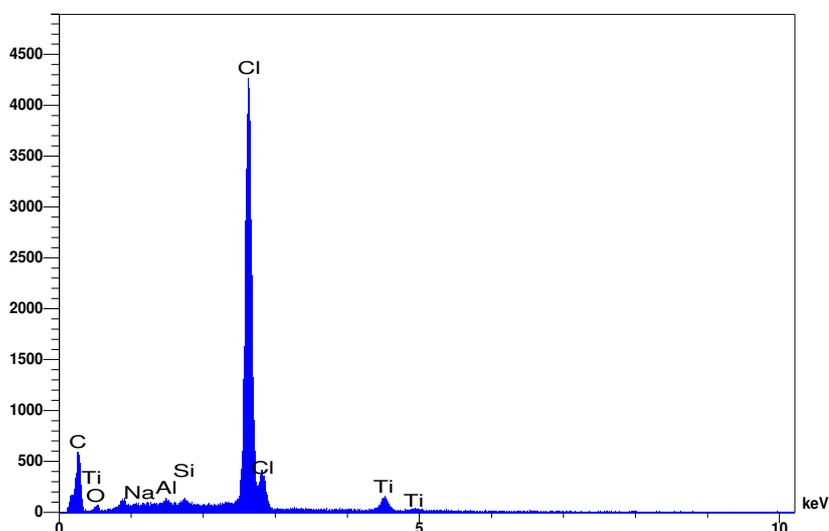


Figura 5.71 - Espectro EDS do concreto com proteção borracha clorada e sem ataque químico

Tabela V.18 - Composição química do concreto com proteção borracha clorada e sem ataque químico

Elementos	% Peso	% Atômica
C	62.21	81.63
O	3.01	2.97
Na	0.25	0.17
Mg	0.17	0.11
Al	0.36	0.21
Si	0.41	0.23
S	0.38	0.19
Cl	30.75	13.67
K	0.12	0.05
Ca	0.13	0.05
Ti	2.11	0.69
Fe	0.09	0.03
	100.00	100.00

A partir do EDS, figura 5.71, observa-se a predominância de C, O e Cl, originários do processo de fabricação da borracha clorada, tabela V.18.

Observa-se, nas figuras 5.72 e 5.73, a superfície do concreto protegido com borracha clorada após ataque.

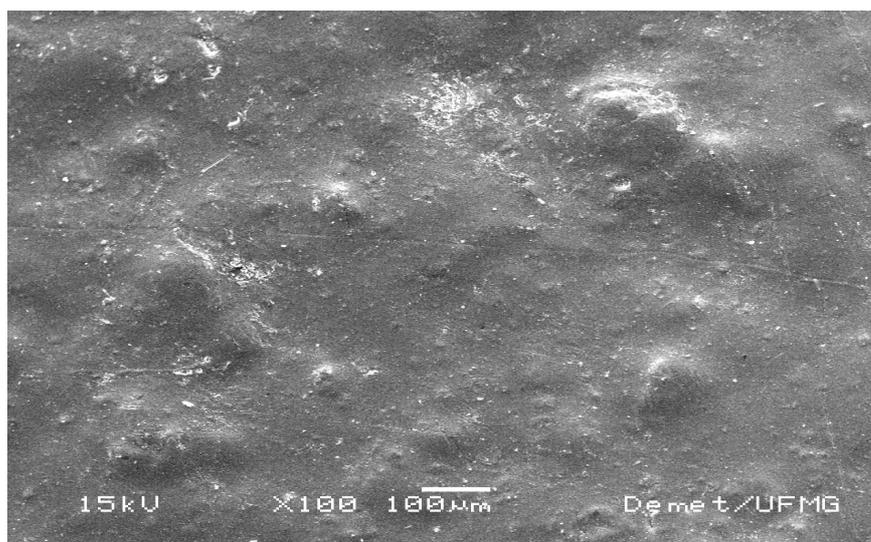


Figura 5.72 - Imagem obtida da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e após ataque químico, ampliada 100x

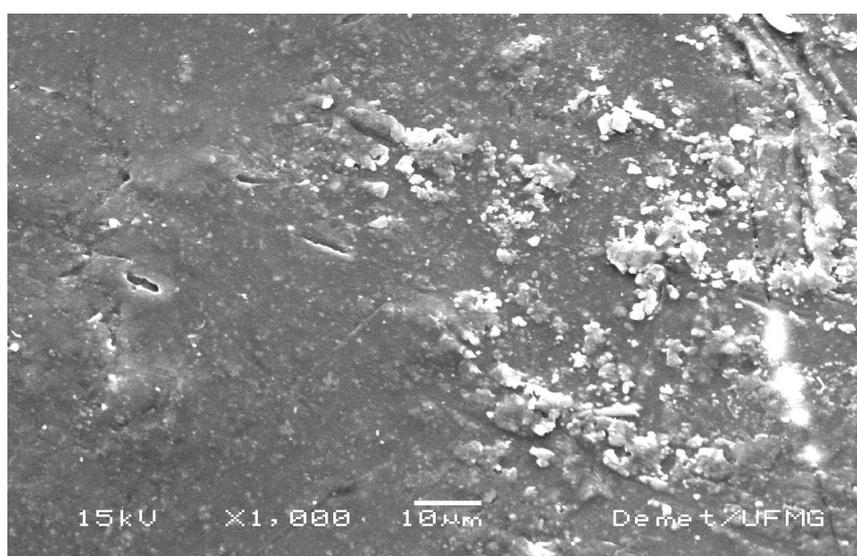


Figura 5.73 - Imagem ampliada 1000x da superfície do concreto com proteção de borracha clorada e após ataque químico

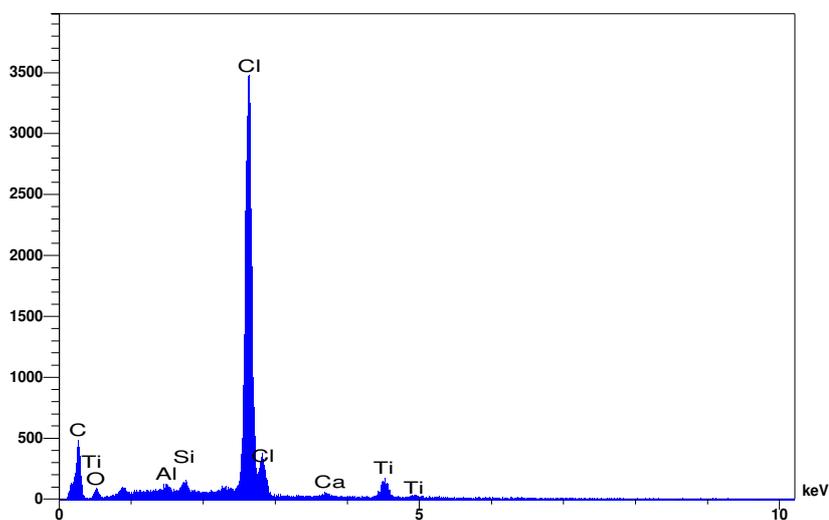


Figura 5.74 - Espectro EDS do concreto com proteção borracha clorada e após ataque químico

Tabela V.19 - Composição química do concreto com proteção borracha clorada e após ataque químico

Elementos	% Peso	% Atômica
C	53.78	74.82
O	6.27	6.55
Na	0.08	0.06
Mg	0.09	0.06
Al	0.49	0.30
Si	1.21	0.72
S	1.21	0.63
Cl	31.95	15.06
K	0.17	0.07
Ca	1.07	0.45
Ti	3.60	1.26
Fe	0.09	0.03
	100.00	100.00

Pode-se observar no EDS, figura 5.74, uma diminuição do C em consequência do ataque, a manutenção de teores equiparáveis de Cl e um pequeno aumento de O e Si, tabela V.19. A análise de dados demonstra que a borracha clorada manteve seus principais elementos, demonstrando sua eficiência.

Apresentam-se, a seguir, os espectros EDS obtidos em amostras de concreto com e sem proteção, antes e após ataque químico.

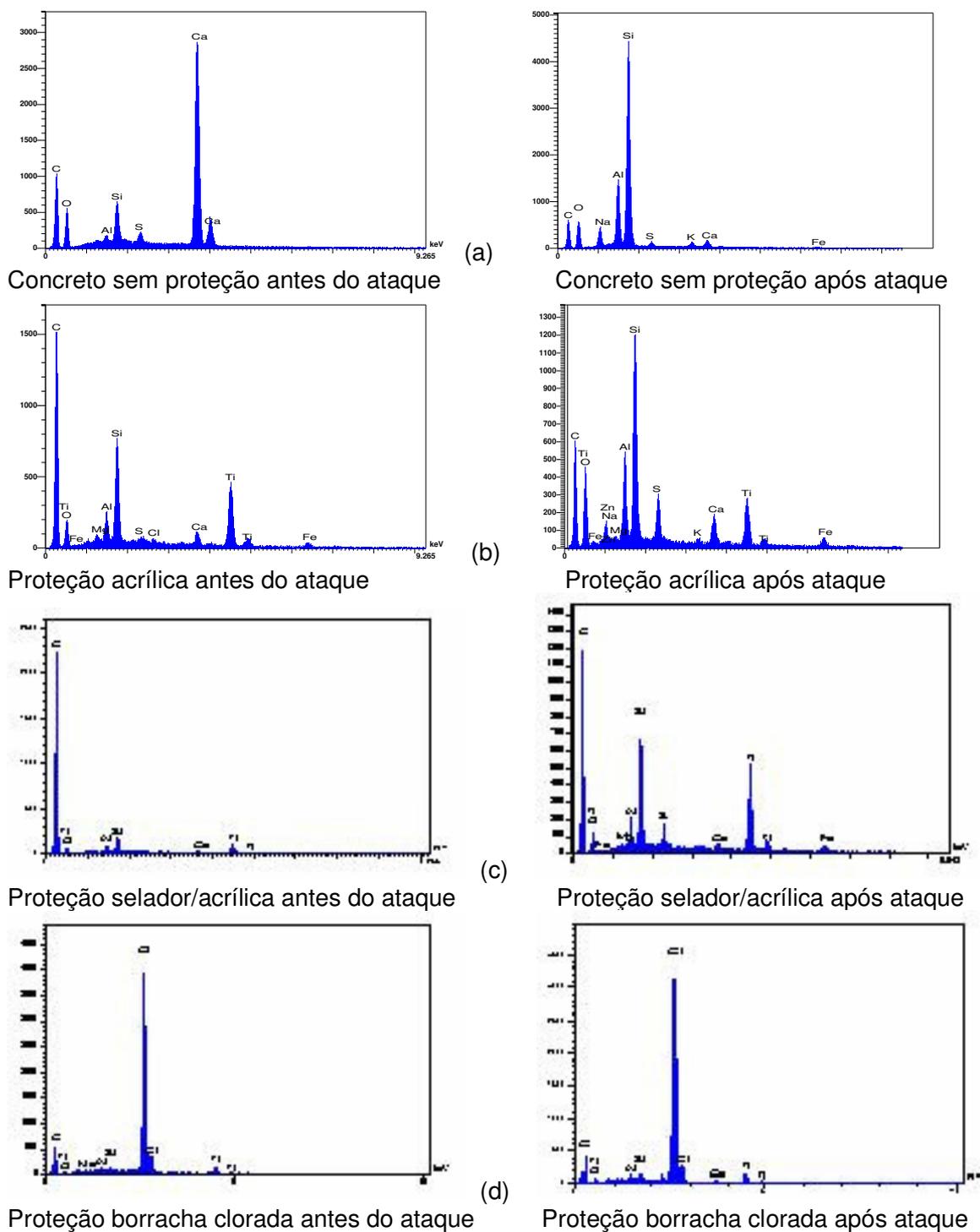


Figura 5.75 - Resumo dos espectros EDS

A presença de cristais de portlandita - Ca(OH)_2 , resultante da hidratação do cimento, foi comprovada através de teores de Ca e O obtidos a partir da análise de EDS em amostras de concreto sem proteção e não submetidos a ataque. Foram encontrados também C-S-H, Al, Si, S e Fe, elementos constituintes da pasta de cimento, figura 5.75a.

De acordo com os espectros EDS obtidos, figura 5.75 b, c e d, a presença de teores de Ti, C, O e Cl nos concretos protegidos que não foram submetidos a ataque, permite comprovar que as proteções de tinta acrílica e de borracha clorada, com boa aderência aos substratos e compostas basicamente por estes elementos, impedem a visualização de elementos constitutivos do concreto. A deterioração do concreto após ataque pode ser comprovada pelo aumento de Si, Al e Na, provenientes dos agregados, uma vez que o ataque retirou a pasta que recobre os agregados. A presença de S é devido ao ataque químico com ácido sulfúrico.

Resumidamente, pode-se dizer que a análise realizada em MEV/EDS permitiu apontar que a borracha clorada apresentou menor variação, seja morfológica ou de composição química na superfície, devido à corrosão química. A presença do selador antes da tinta acrílica também garantiu maior proteção do concreto quanto à corrosão em meio químico de H_2SO_4 , comparativamente com a proteção acrílica.

5.9 Permeabilidade do concreto

A permeabilidade do concreto, avaliada através do ensaio de adsorção de nitrogênio, figuras 5.76 a 5.78, medida pela quantidade de gás adsorvido na superfície sólida, permitiu determinar a área superficial, o volume específico e o diâmetro médio dos poros de um concreto sem proteção e de um concreto protegido com selador e tinta acrílica. A densidade do material foi obtida a partir da picnometria a hélio.

A fim de avaliar a permeabilidade num concreto protegido, optou-se por utilizar a composição de selador/acrílica, que apresenta uma eficiência intermediária entre a tinta acrílica e a borracha clorada. Os dados referentes a estes ensaios, que permitem avaliar a permeabilidade do concreto, são apresentados na tabela V.20.

Tabela V.20 - Ensaio de adsorção de nitrogênio

Concreto	Área superficial (m ² /g)	Volume específico total de poros (cm ³ /g)	Diâmetro médio de poros (Å)	Densidade (kg/m ³)
Sem proteção e sem ataque químico	4,73	0,0147	123,922	2.618
Sem proteção e com ataque químico	6,86	0,0162	94,393	2.605
Com proteção selador/acrílica, após ataque químico	7,26	0,0189	103,846	2.632

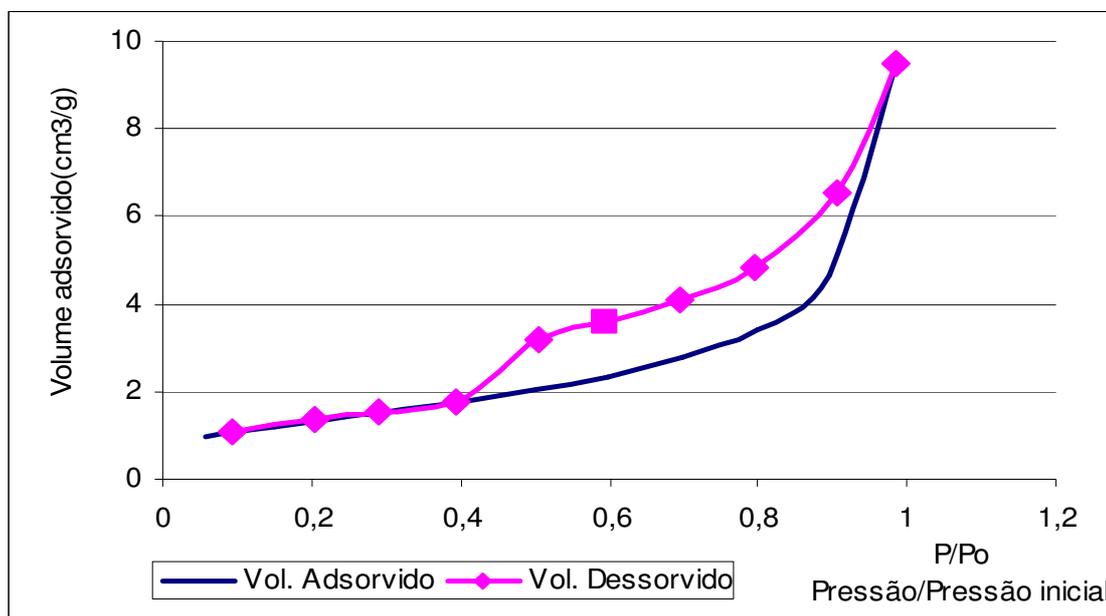


Figura 5.76 - Isotermas (adsorção/dessorção) para concreto sem proteção e sem ataque

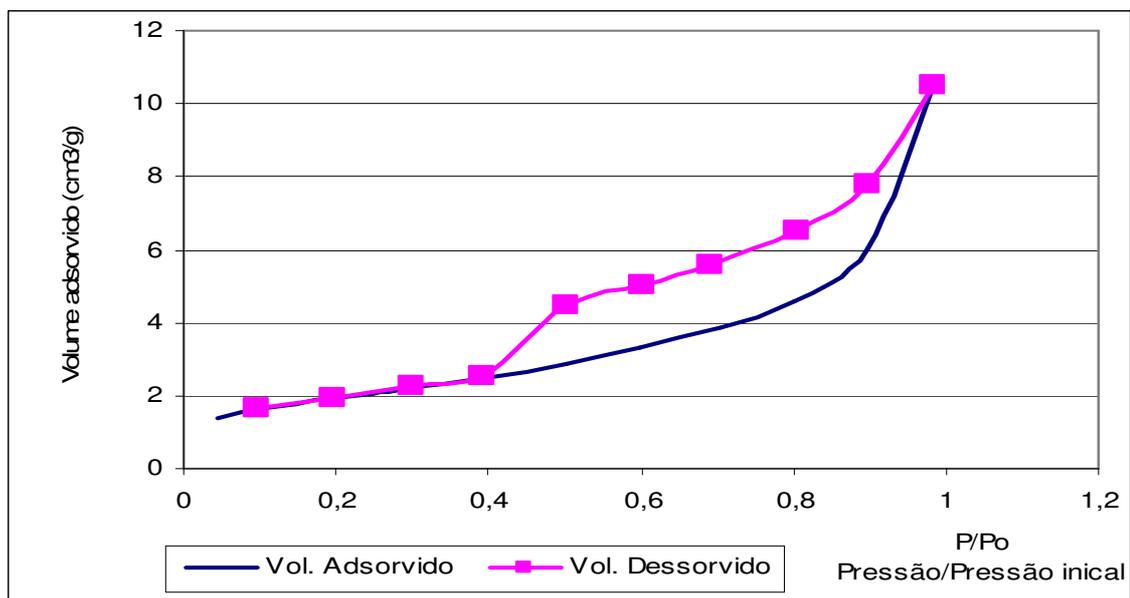


Figura 5.77 - Isotermas (adsorção/dessorção) para concreto sem proteção atacado

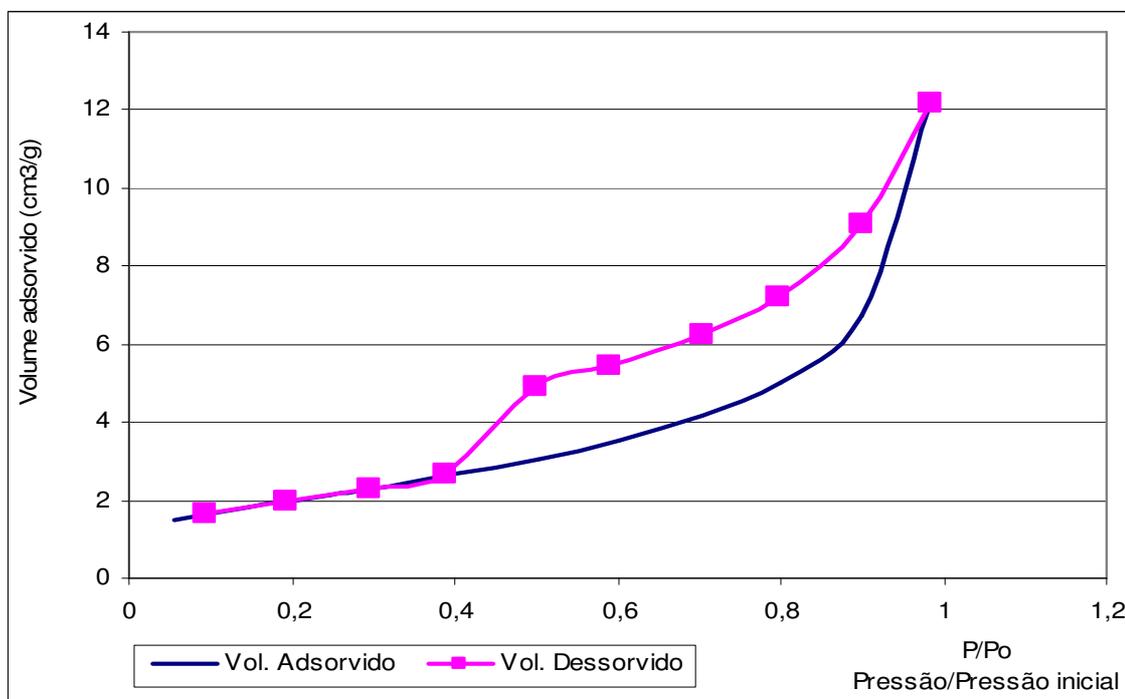


Figura 5.78 - Isotermas (adsorção/dessorção) para concreto com proteção selador/acrílica atacado

A análise dos dados obtidos nos ensaios permite observar que, tomando-se como referência o concreto sem proteção e sem ataque químico, constata-se um aumento da área superficial e do volume específico total de poros nos concretos submetidos a ataque químico, independentemente de estarem ou não protegidos, indicando aumento da permeabilidade em consequência da degradação superficial do concreto.

Através das figuras 5.76 a 5.78, pode-se observar que as isotermas de adsorção se fecham nos extremos das curvas. Esta convergência demonstra a eficiência dos ensaios de adsorção e dessorção do nitrogênio.

5.10 Conectividade dos poros

São apresentados, a seguir, o modelo matemático e as curvas de conectividade, figura 5.79, que permitem avaliar a permeabilidade do concreto de forma qualitativa, correlacionando a conectividade dos poros, C_v , com a superfície específica, S_g , a densidade, ρ_v e o volume específico dos poros, V_g , e a média ponderada do número de vizinhos de cada nó, denominada K_1 , parâmetros obtidos através dos ensaios de adsorção de nitrogênio e de picnometria a hélio.

$$C_v = 0,1540 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot K_1^{1/2}} - \frac{1}{K_1^{3/2}} \right) \cdot \frac{S_g^3 \cdot \rho_v^{3/2}}{V_g^{3/2}} + 1 \quad (4.1)$$

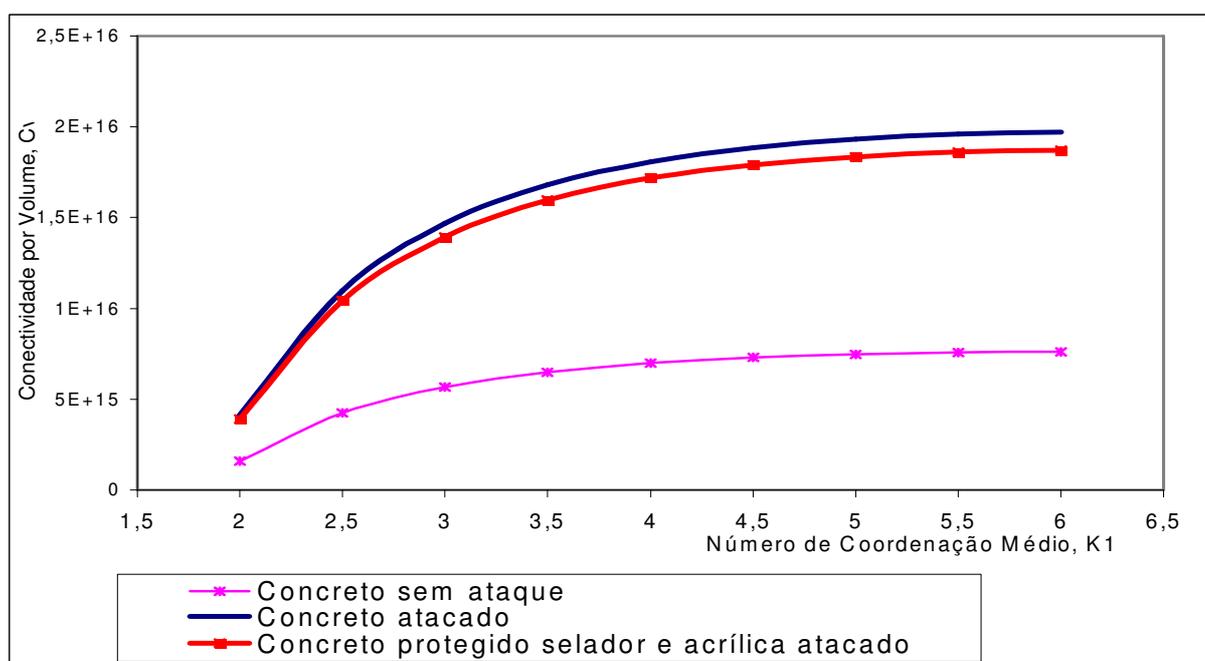


Figura 5.79 - Conectividade por volume em função do número de coordenação relativo.

Estudo do concreto sem proteção, sem ataque e atacado e concreto protegido com selador/acrílica e atacado

As curvas da figura 5.79 demonstram claramente um grande aumento da conectividade do concreto sem proteção e sem ataque químico em relação aos concretos submetidos a ataque, não havendo uma diferença apreciável entre o concreto sem proteção e o concreto protegido.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

O concreto produzido a partir dos estudos de dosagens permitiu aliar baixo fator água-cimento, resistência à compressão e impermeabilidade, requisitos imprescindíveis para garantir a durabilidade deste material.

Estas características fundamentais de um concreto durável foram avaliadas através de ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e determinação de índices de vazios, o que permitiu comprovar a elevada resistência à compressão e baixa permeabilidade do concreto produzido.

O papel das proteções na minimização da degradação do concreto foi avaliada através de ensaios de perda de massa em corpos de prova, com e sem proteção, antes e após ataque químico, os quais permitiram constatar a eficiência das proteções propostas em concretos submetidos a ácido sulfúrico.

A técnica de difração de raios-X, utilizada para caracterizar as diversas fases sólidas presentes na estrutura do concreto, permitiu identificar a presença de quartzo, calcita, portlandita, silicatos de cálcio e etringita, assim como a cristalinidade do concreto, demonstrada claramente pelas linhas de base que não apresentam uma considerável elevação.

A análise microestrutural feita por microscopia eletrônica de varredura, MEV/EDS, nas seções transversais da superfície do concreto sem proteção antes do ataque químico, permite comprovar a predominância de cristais de portlandita, Ca(OH)_2 , e de partículas de silicatos de cálcio hidratado, C-S-H, derivados da pasta de cimento, além de quartzo e feldspato, provenientes dos agregados. Após ataque químico, constata-se um aumento de Si, Al e Na, provenientes dos agregados, que se tornam mais visíveis após a deterioração da pasta de cimento.

Através do MEV/EDS, foi possível, também, avaliar a eficiência das proteções nas superfícies do concreto, uma vez que as camadas protetoras impediram a visualização dos materiais constituintes do concreto, por estarem abaixo destas camadas. Após o ataque químico e a degradação pontual das proteções, é possível observar uma névoa originária do produto utilizado no ataque químico e, a partir do EDS, pode-se constatar um material rico em Si, proveniente dos agregados, assim como a presença de enxofre originário do ataque por ácido sulfúrico.

A menor variação, seja morfológica ou de composição química na superfície do material protegida com borracha clorada, observada através da análise MEV/EDS, permite concluir que esta proteção apresentou melhor desempenho do que a composição selador/acrílica, que por sua vez garantiu maior proteção do que a tinta acrílica, quando aplicada diretamente no concreto submetido à corrosão em meio químico.

A degradação da textura superficial do concreto submetido a um meio agressivo ácido, com e sem camadas protetoras, com metodologia de análise feita através do perfilômetro, possibilitou uma clara compreensão deste processo, verificada através da visualização das imagens topográficas, da variação dos parâmetros de amplitude e dos histogramas. A perfilometria também permitiu verificar a eficiência de camadas protetoras, onde a variação dos valores obtidos foi significativamente maior para o concreto sem proteção, seguida do concreto com tinta acrílica, concreto com selador/acrílica e concreto com borracha clorada, demonstrando a eficiência de camadas protetoras e ainda a minimização da corrosão do concreto.

Os resultados obtidos permitiram comprovar que a metodologia adotada, ou seja, os ensaios clássicos do concreto e o MEV/EDS, aliados à utilização da técnica da perfilometria, permite visualizar a degradação do material e a minimização obtida com a utilização de camadas protetoras, demonstrando que a perfilometria é uma ferramenta precisa e eficiente nos estudos relativos à modificação da textura superficial do material, o que traz uma importante contribuição em pesquisas sobre a durabilidade do concreto, ampliando ainda mais a interação entre a Engenharia de Materiais e a Engenharia Civil.

CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Analisar o efeito da adição de fibras, a fim de avaliar a influência deste parâmetro na durabilidade do concreto;
2. Avaliar novas proteções do concreto, utilizando a metodologia adotada para análise das texturas superficiais;
3. Estudar a corrosão mecânica, através da análise da textura superficial do concreto, a partir da simulação de desgaste provocado pela erosão em canais pluviais e vertedouros;
4. Avaliar a corrosão do concreto submetido a meios agressivos biológicos e industriais;
5. Propor outros ensaios que permitam avaliar a resistência ao desgaste, simulando a vida útil em serviço dos concretos;
6. Analisar novos parâmetros topográficos que também permitam descrever a textura superficial do concreto;
7. Analisar o concreto submetido a meio agressivo ácido, a partir de ensaios químicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P.C. The durability characteristics of high performance concrete: a review, *Cement & Concrete Composites*, n.25, p409-420, 2003.

ALMUSALLAM, A.A.; KHAN, F.M.; DULAIJAN, S.U.; B.AL-AMOUDI, O.S. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. *Cement & Concrete Composites*, n. 25, p.473-481, 2003.

AMARAL, E. M. F. Concreto de alta resistência, *Ibracon*, ano II, nº 4, p. 40-49, 1992.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice. Part I. 1973.

ANDRADE, W. P. Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades. Equipe de FURNAS, Laboratório de Concreto. São Paulo: Pini,1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NB-1*; Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003. 221p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-11578*; Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-12655*; Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-5732*; Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-5733*; Cimento Portland Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-5735*; Cimento Portland de Alto Forno. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-5736*; Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-7211*; Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-8953*; Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 1992. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NBR-9778*; Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 3p.

BAUER, L. A.F. *Materiais de construção 1*, 5ª edição, Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed., 435p, 1994.

HELENE, P.R. L. *Manual de dosagem e controle de concreto*, 1ª ed., São Paulo: Editora Pini Ltda, 349p., 1992.

HELENE, P.R. L. *Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto*, 2ª ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 213p., 1992b.

HELENE, P.R.L.; LEVY, S. Cura como, quando e por quê. *Téchne*. N.20, p18-21, 1996.

HERVÉ, E.N. A nova engenharia do concreto. *Comunidade da construção*, 4p, 2003.

GNECCO, C., MARIANO, R., FERNANDES, F. Tratamento de superfície e pintura. Rio de Janeiro: IBS/SBCA, 94p., 2003.

MEHTA, P.K. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, São Paulo: Editora Pini Ltda, 573p., 1994.

MUMMERY, L. *Surface texture analysis*, The Hand Book, 1ed., West Germany: Hommelwerke GmbH, 105p., 1992.

NEVILLE, A. *Propriedades do Concreto*, 2ª Ed. São Paulo: Editora Pini, 828p., 1997.

NUNES, N.V. *Pintura Industrial Aplicada*. Rio de Janeiro: Maity Comunicação e Ed.; 1990.

NUNES, L.P. ; LOBO, A. C. *Pintura Industrial na proteção anticorrosiva*. Rio de Janeiro : LTC - Livros Técnicos e Científicos Ed. : Petrobrás, 1990.

PETRUCCI, E.G.R. *Concreto de cimento Portland*. São Paulo: Globo, 1980.

PINTO, J.D.S. *Tratamento de esgotos sanitários através de filtro anaeróbico de fluxo ascendente utilizando escória de alto-forno como meio suporte*, Belo Horizonte: Escola de

Engenharia da UFMG, 67p., 1995. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental).

REIS, S. C. *Modelagem computacional no estudo da conectividade de materiais a base de sílica-tungstênio obtidos com Teos*. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, CBECiMat, Foz do Iguaçu. 2006.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J.D.S.; STARLING, T. *Materiais de Construção Civil*, 2ª ed. Revisada. Editora UFMG, 103p., 2006.

RIBEIRO, C.C. *Caracterização da escória de alto-forno como agregado graúdo para concreto*, Escola de Engenharia da UFMG, 20p., 1986.

RIBEIRO, Couto, C.; PINTO, J.D.S. *Aplicabilidade de escória de alto-forno em argamassas de assentamento e argamassas de revestimento*. III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Vitória, 1999.

SEBE, J. *Estudo da permeabilidade a água do concreto de alto desempenho*, Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 124p., 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Estruturas).

SILVA, C.A.R. *Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para caracterização e análise estrutural de concreto de cimento Portland*, Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 410p. 1998. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

VASCONCELOS, A.C. Engenharia não é ciência exata. *Abece Informa*. Ano 1, n.2, 2-5. Mar. 1996.

VEDACIT, Impermeabilizantes. *Manual técnico: Recuperação de estruturas*. 1ª edição, 102p., 2003.

BIBLIOGRAFIA

AITCIN, P.C. Concreto de elevado desempenho - 120 MPa sem mistérios. *Téchne*, n.19, p.29-33. Nov/dez. 1995.

AL-DULAIJAN, S.U.; MASLEHUDDIN, M.; AL-ZAHRANI, M.M.; SHARIF, A.M., SHAMEEM, M.; IBRAHIM, M. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate. *Cement & Concrete Composites*, n.25, p.429-437, 2003.

ALMEIDA, I.R., ET AL. Exemplos de obras em concreto de alta resistência no Brasil. In: *37ª Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto*, v.2, 1995, Goiânia. P435-450.

ÁVILA, R.F. *Desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N, Ti-C-N e Ti-Al-N (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 190p. 2003. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BEDDOE, R. E., DORNER, H. W. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 2005.

BOCCHILE, C. Dosagem: a medida do concreto, *Téchne*, n.81, p. 52-57, dez. 2003.

CARVALHO, K. Concreto à beira mar: a durabilidade em risco. *Téchne*, n.55, p48-53, out. 2001.

CLÁUDIO, S.K. *Contribuição para análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado como o objetivo de proteção contra a carbonatação*, USP – Engenharia civil, Tese de doutorado, 1v, 168p, 1995.

DELUCCHI, M., BARBUCCI, A., CERISOLA, G. Study of the physico-chemical properties of organic coating for concrete degradation control. *Construction and Building Materials*, vol. 11, Nº 7-8, p. 365-371, 1997.

DONAIRE, G.A.M.D. *Princípios de estatística*. 4.ed, São Paulo: Atlas, 1990. 255p.

FRANÇA, E.P.; RESENDE C.J. A zona de transição - como conviver com ela. *Beton News*, ano XIII, n.61. p. 4. Abr/jun. 2003.

HELENE, P.R.L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. *Ambiente construído*, ANTAC, São Paulo, vol. 1, nº 2, p. 45-57, 1997.

HO, D.W.S., CHIRGWINT, G.J. A performance specification for durable concrete. *Construction and Building Materials*, vol.10, nº5, p. 375-379, 1996.

JUNQUEIRA, R.M.R. *Caracterização de filmes finos de coloração por interferência em aços inoxidáveis*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 158p. 2004. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

KATTAR, J.E., ABREU, J.V. *Tecnologia básica e aplicação do concreto*, Holdercim Brasil S.A., São Paulo, 38p.

LEAL, U. Aditivos - Química aplicada. *Téchne*. N.81, p42-45, dez. 2003.

LEONARDO, C.R.T., PORTELLA, K.F., POSSAN, E., SALES, A. Concreto de alto desempenho como material de reparo para estruturas hidráulicas erodidas. *Revista Ibracon*. Ano X, nº31, 2002.

LEONHARDT, F.; MONNIG, E. *Construções de concreto: volume 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Rio de Janeiro: Interciência, 305p, 1983.

MATHER, B. Concrete durability. *Cement & Concrete Composites*, n.6, p.3-4, 2003.

MOREIRA, H.P. et all. Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo. 2001

NETO, P.M.P.; DJANIKIAN, J.G. Concretos de alta resistência. *Revista Ibracon*. N.12, p.28-33.

NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 34, nº 8, p. 1275-1296, 2004.

PERSSON, B. Sulphate resistance of self-compacting concrete. *Cement and concrete research*, n.33, p.1933-1938, 2003.

RIBEIRO, C.C.; PINTO, J.D.S. *Avaliação de materiais substitutos na composição na composição de argamassas*, V CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, Juiz de Fora, 2002.

RODRIGUES, J. Carbonatação. O inimigo esquecido do concreto. *Revista Recuperar*, p. 32-34, 1998.

ROJAS, D.L. Durabilidade do concreto colorido. *Revista Ibracon*, ano IX, n. 28, p.33-37. Jan/mar. 2002.

SILVA, J.K.M. *Correlação entre textura superficial e corrosão de conjugados processados por PAPVD: monocamada e duplex de Cr-N*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 143p. 2004. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

STOUT, K.J.;BLUNT L. *Three-Dimensional Surface Topography*, Penton Press, ISBN: 1 85718 026 7, London, 1994