

DAVID COSTA DE ALMEIDA

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM
SÍLICA ATIVA EM AMBIENTE MARINHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

MACEIÓ

2007

DAVID COSTA DE ALMEIDA

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM
SÍLICA ATIVA EM AMBIENTE MARINHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: *Estruturas*

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Aline da Silva Ramos Barboza

MACEIÓ

2007

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

A447d Almeida, David Costa de.
Desempenho de argamassas com sílica ativa em ambiente marinho / David Costa de Almeida. – Maceió, 2007.
108 f. : il., tabs., graf.

Orientadora: Aline da Silva Ramos Barboza.
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.

Bibliografia: f. 134-140.

1. Argamassa. 2. Sílica ativa. 3. Materiais de construção – Durabilidade.
4. Ambiente Marinho. I. Título.

CDU: 691.53



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGECC
Campus A. C. Simões
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel: (82) 32141276– Fax: (82) 32141276
E-mail: ppgecc@ctec.ufal.br
Site: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgecc>



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL/ESTRUTURAS

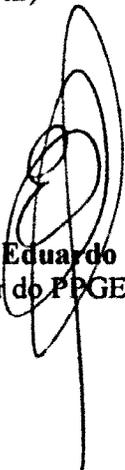
Em sessão pública, às nove horas e vinte minutos do dia três do mês de julho do ano de dois mil e sete, na Sala de Aula do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, foi iniciada a defesa da dissertação de mestrado do aluno **DAVID COSTA DE ALMEIDA** tendo como título: “**DESEMPENHO DA ARGAMASSA COM SÍLICA ATIVA EM AMBIENTE MARINHO**”, como requisito parcial para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, na área de concentração de **ESTRUTURAS**. A Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof^a Dr^a Aline da Silva Ramos Barboza (Orientadora - CTEC/UFAL), Prof. Dr. Sandro Marden Torres (UFPB) e Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes (CTEC/UFAL). O candidato fez a apresentação da dissertação em uma hora e vinte e sete minutos. A defesa foi encerrada às doze horas e cinquenta minutos. Após o encerramento da defesa, em reunião confidencial, a Banca Examinadora, com base no Regimento Interno, decidiu por **APROVAR** a dissertação de mestrado.

Em 03 de julho de 2007.

Prof^a Dr^a Aline da Silva Ramos Barboza (Orientadora-CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Sandro Marden Torres (UFPB)

Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes (CTEC/UFAL)



Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages
Coordenador do PPGECC/CTEC/UFAL

À Gabriella, meu amor e incentivadora
A Daniel, meu pai e exemplo

Agradecimentos

A Deus por todas as benções.

Aos meus queridos pais e irmãos pelo apoio e carinho em todos os momentos.

A Gabriella pela inspiração e companheirismo de todas as horas.

A Professora Aline da Silva Ramos Barboza por guiar este trabalho e pela atenção presenteada.

Ao engenheiro Adilson Evaristo do Nascimento e ao José Hilário de Araújo Júnior, pela ajuda e paciência nas atividades de campo.

A Professora Ana Cristina Melo da Costa do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Campina Grande pelas análises experimentais dos compósitos.

Aos professores Paulo César Correia Gomes, Sílvia Beatriz Beger Uchôa, Josealdo Tonholo e Heliene Ferreira da Silva pelos esclarecimentos e orientações em momentos de decisão.

Aos professores e colegas de curso, em especial ao Jonathas Tenório, pela amizade e troca de informações.

Aos funcionários e técnicos dos laboratórios que, anonimamente, tornam possível o desenvolvimento dos trabalhos.

A todos (e foram muitos!) que contribuíram com pequenos esforços capazes de realizar grandes feitos.

Por fim, a Capes pelo incentivo financeiro, essencial para a realização dessa pesquisa.

Resumo

O reparo de estruturas de concreto armado atrai cada vez mais a atenção de pesquisadores e construtores que vêem um número crescente de fenômenos patológicos em diversas construções com este material. A noção errônea de que o concreto é um material eterno e imutável foi substituída pelo fato de que ele é uma substância dinâmica e complexa, vulnerável a muitos compostos agressivos que modificam e causam dano à sua estrutura química e física. O presente trabalho propôs-se a coletar dados sobre o comportamento da sílica ativa como uma adição mineral a argamassas expostas ao ambiente marinho, na zona de variação da maré, e também avaliar se o sulfato de magnésio participa de alguma maneira no desenvolvimento das propriedades da argamassa. Para alcançar os objetivos do estudo dois grupos de argamassas foram feitos, um de argamassa convencional e o outro usando sílica em sua composição. Corpos de prova cilíndricos (10 x 5 cm) e prismáticos (50 x 15 x 4 cm com armadura de aço) foram sujeitos a ciclos naturais de molhagem e secagem no litoral de Maceió. Os testes foram feitos nas idades de 14, 28, 91, 135 e 180 dias e compreenderam medir a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade das amostras. Ensaios de potencial de corrosão foram conduzidos nas placas de argamassa armada de acordo com a ASTM C 876 – 91 e análise por difração de raios X foram efetuadas para verificar mudanças nos compostos das argamassas. Resultados mostram que, ao fim do período de testes, a argamassa com sílica desenvolveu resistência à compressão menor quando comparada à argamassa convencional. A resistência à tração mostrou resultados mais equilibrados, com alguma vantagem para a argamassa com sílica. Análise da difração de raios X sugere possíveis mudanças nas fases da argamassa com sílica. Os resultados apontam que o uso de sílica ativa em matriz cimentícia aplicada em ambiente marinho não apresenta o mesmo desempenho quando comparado a matriz cimentícia convencional.

Palavras-Chave: *sílica ativa, durabilidade, ambiente marinho.*

Abstract

The repair of reinforced concrete structures attracts more and more attention of researchers and constructors who see an ever growing number of pathologic phenomenons on several constructions that make use of this widely accepted material. The wrong notion which claims the concrete is an eternal and unchangeable matter has been definitively substituted by the fact that it's a dynamic and complex substance, vulnerable to several aggressive compounds which modify and cause damage to its chemical and physical structure. The present work intended to gather data about the performance of silica fume as a chemical admixture to mortars under the marine atmosphere in the tidal zone, and also evaluate if the magnesium sulfate has any major role in the development of the mortar's properties. To achieve the objectives of the study two groups of mortar were made, one used silica in its composition, and the other didn't. The mortar was cast in cylindrical and prismatic molds to, later, be subjected to natural drying and wetting cycles in the sea coast of Maceió. The cylindrical specimens were 10 x 5 cm and the prismatic ones were 50 x 15 x 4 cm and had reinforcement inside. The tests were conducted in the ages of 14, 28, 91, 135 and 180 days and concerned measuring the compressive, tensile and elastic modulus of the samples and also determine the corrosion potential of the reinforced mortar using the ASTM C 876-91 method. As an addition, X-Ray diffraction tests were conducted to verify if the compounds within the mortars had change and help explain the results from the earlier experiments. Results show that the silica fume mortars developed lower compressive strength than ordinary Portland cement mortars. The tensile strength tests displayed more balanced values for both mortars, with the ordinary exhibiting less strength than its silica fume counterpart at 91 and 135 days, but catching up with it (even slightly surpassing it) at latter ages. X-ray diffraction indicates changes on the phases of the hydrated paste. The analysis of the results suggests that cement mortar with silica fume addition doesn't present the same behavior related to ordinary cement mortar

Keywords: *Silica fume, durability, marine environment.*

Lista de Figuras

Figura 1	População costeira e degradação da linha litorânea em 2001. ...	2
	Fonte: Adaptado de Burke et al., World Resources Institute, Washington DC, 2001; Paul Harrison, Fred Pearce, AAAS Atlas of Population and Environment 2001, American Association for the Advancement of Science, University of California Press, Berkeley.	
Figura 2	Fissura em viga do píer da Braskem.	5
Figura 3	Liberação de resíduos de sílica na atmosfera.	9
	Fonte: Silica Fume Association.	
Figura 4	Sílica não densificada.	10
	Fonte: Silica Fume Association	
Figura 5	Sílica densificada.	11
	Fonte: Silica Fume Association.	
Figura 6	Sílica em calda.	11
	Fonte: Silica Fume Association	
Figura 7	Partículas de Sílica e Cimento.	14
Figura 8	Corrosão eletroquímica em elementos armados.	
	Fonte: Adaptado de CASCUDO, 1997.	32
Figura 9	Materiais separados para testes de traço.	43
Figura 10	Aspecto da 3ª mistura com plastificante = 1% e a/c = 0.5.	44
Figura 11	Aspecto da 4ª mistura com superplastificante = 0.5% e a/c = 0.45.	45
Figura 12	Aspecto da 5ª mistura com superplastificante = 0.5% e a/c = 0.45.	46
Figura 13	Aspecto da 6ª mistura com superplastificante = 0.1% e a/c = 0.45.	47
Figura 14	Método de produção dos corpos-de-prova cilíndricos.	49
Figura 15	Corpos de prova moldados à espera da desfôrma.	49
Figura 16	Fôrmas para moldagem das placas.	50
Figura 17	Placa de argamassa.	50

Figura 18	Argamassa colocada nas fôrmas.	51
Figura 19	Equipamentos e materiais empregados no ensaio de potencial de corrosão.	53
Figura 20	Esquema geral dos corpos de prova e placas de argamassa.	55
Figura 21	Quebra-mar e píer da Braskem.	56
Figura 22	Caixa com corpos de prova cilíndricos.	57
Figura 23	Caixa com placas de argamassa armada.	58
Figura 24	Descendo uma das caixas.	59
Figura 25	Caixas dentro da zona da maré.	59
Figura 26	Acomodação e amarração das caixas em conjunto.	59
Figura 27	Caixas amarradas e em posição final na maré baixa.	59
Figura 28	Corpos de prova separados para os ensaios de propriedades mecânicas.	61
Figura 29	Ensaio de compressão em CP sem sílica ativa.	62
Figura 30	Ensaio de compressão em CP com sílica ativa.	62
Figura 31	Ensaio de tração.	63
Figura 32	Corpos de prova com sílica aos 135 dias, rompidos à tração.	65
Figura 33	Ensaio do módulo de elasticidade.	66
Figura 34	Ligação dos pólos na mesma barra.	70
Figura 35	Pontos de medida do potencial de corrosão.	70
Figura 36	Área intacta e atacada de diferentes seções transversais.	83
Figura 37	Ponto de corrosão em placa com sílica aos 41 dias.	88
Figura 38	Manchas de corrosão em placas com e sem sílica.	89
Figura 39	Corrosão dos arames de fixação dos espaçadores.	89
Figura 40	Corrosão nas armaduras de argamassas sem sílica aos 180 de exposição.	90
Figura 41	Corrosão nas armaduras de argamassas com sílica aos 180 de exposição.	90

Lista de Gráficos

Gráfico 1	Consumo de matérias-primas nos Estados Unidos.	3
	Fonte: United States Geological Survey (USGS).	
Gráfico 2	Relação entre a quantidade de sílica e a porosidade do concreto.	17
	Fonte: Adaptado de ABO EL-ENEIN <i>et al.</i> , 1995.	
Gráfico 3	Relação entre o ambiente, estrutura e vida útil.	23
Gráfico 4	Evolução da resistência média à compressão das argamassas. ...	63
Gráfico 5	Evolução da resistência média à tração das argamassas.	64
Gráfico 6	Dispersão dos valores do módulo de elasticidade.	69
Gráfico 7	Potencial de corrosão da argamassa com sílica.	71
Gráfico 8	Potencial de corrosão da argamassa sem sílica.	72
Gráfico 9	DRX da argamassa interna sem sílica aos 28 dias.	73
Gráfico 10	DRX da argamassa superficial sem sílica aos 28 dias.	73
Gráfico 11	DRX da argamassa interna com sílica aos 28 dias.	74
Gráfico 12	DRX da argamassa superficial com sílica aos 28 dias.	74
Gráfico 13	DRX da argamassa interna sem sílica aos 91 dias.	75
Gráfico 14	DRX da argamassa superficial sem sílica aos 91 dias.	75
Gráfico 15	DRX da argamassa interna com sílica aos 91 dias.	76
Gráfico 16	DRX da argamassa superficial com sílica aos 91 dias.	76
Gráfico 17	DRX da argamassa interna sem sílica aos 180 dias.	77
Gráfico 18	DRX da argamassa superficial sem sílica aos 180 dias.	77
Gráfico 19	DRX da argamassa interna com sílica aos 180 dias.	78
Gráfico 20	DRX da argamassa superficial com sílica aos 180 dias.	78
Gráfico 21	Dispersão dos resultados da resistência à tração.	84
Gráfico 22	Evolução do módulo de elasticidade.	86
Gráfico 23	Resultados do ensaio de potencial de corrosão.	91
	Fonte: DOTTO <i>et al.</i> , 2004.	

Lista de Tabelas

Tabela 1	Área específica de materiais finos.	14
	Fonte: Adaptado de AITCIN (2000), NEVILLE (1997) e JUSTICE (2005).	
Tabela 2	Porosidade de argamassa com cimento resistente a sulfatos com fumo de sílica.	18
	Fonte: Adaptado de NEVILLE, 1997.	
Tabela 3	Frequência de fissuras.	18
	Fonte: Adaptado de MAAGE & SELLEVOLD, 1987.	
Tabela 4	Exigências químicas e físicas da sílica ativa.	21
	Fonte: NBR 13956, 1997.	
Tabela 5	Pressão de cristalização para sais.	26
	Fonte: Adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 1994.	
Tabela 6	Requisitos para concreto exposto a soluções com sulfatos.	30
	Fonte: NBR 12655, 2006.	
Tabela 7	Classes de agressividade ambiental.	35
	Fonte: NBR 6118, 2003.	
Tabela 8	Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.	36
	Fonte: NBR 6118, 2003 e NBR 12655, 2006.	
Tabela 9	Propriedades Químicas e Físicas do Cimento CII-F-32.	40
Tabela 10	Propriedades físicas da areia.	41
Tabela 11	Propriedades Granulométricas da Areia.	41
Tabela 12	Dados técnicos do superplastificante.	42
	Fonte: Manual Técnico MBT, 2002.	
Tabela 13	Dados técnicos do plastificante.	42
	Fonte: Manual Técnico MBT, 2002.	
Tabela 14	Traços e consumos dos materiais.	48
Tabela 15	Concentração dos principais componentes da água do mar (para salinidade = 35 e pH = 8.1).	56
	Fonte: Adaptado de U.S. DOE (1994).	
Tabela 16	Concentração dos principais componentes da água do mar.	57
	Fonte: Estudos da QUALITEX Engenharia e Serviços.	

Tabela 17	Resistência à compressão das argamassas.	62
Tabela 18	Resistência à tração das argamassas.	64
Tabela 19	Módulo de elasticidade das argamassas.	66
Tabela 20	Comparação do módulo de elasticidade experimental e calculado.	67
Tabela 21	Comparação do módulo de elasticidade experimental, calculado e compensado.	68
Tabela 22	Potencial de corrosão das argamassas.	71

Lista de Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
a/c	Fator água cimento
BET	Brunauer, Emmett & Teller
CAD	Concreto de Alto Desempenho
Ca/Si	Relação calico-silício
CP (CPs)	Corpo de prova (corpos de prova)
CSE	Copper Sulfate Electrode
DDP	Diferença de potencial
DRX	Difração de Raios X
MEC	Módulo de Elasticidade Calculado
MEE	Módulo de Elasticidade Experimental
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
NOX	Número de Oxidação
NPT	Núcleo de Pesquisas Tecnológicas
P	Aditivo plastificante
SP	Aditivo superplastificante
U.S. DOE	United States Department of Energy
USGS	United States Geological Survey

Lista de Símbolos

A_{\square}	Área de pilar com seção quadrática
A_{\circ}	Área de pilar com seção circular
Al (A)	Alumínio (aluminato)
Ca (C)	Cálcio (cálcio)
Cl	Cloro
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
E_{ci}	Módulo de elasticidade do concreto na idade “i”
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto
f_{ck}	Resistência característica do concreto
GPa	Gigapascal
h	Altura do pilar
L	Lado do pilar quadrado
Mg	Magnésio
Mpa	Megapascal
M-S-H	Silicato de Magnésio Hidratado
mV	milivolts
$M\Omega$	Megaôhm
Na	Sódio
O	Oxigênio
pH	Potencial de hidrogênio
r	Raio do pilar circular
\underline{S} (S)	Enxofre (“S” = sulfato, exceto nas fórmulas M-S-H ou C-S-H)
Si (S)	Silício ou silicato (“S” = silicato somente em M-S-H ou C-S-H)

$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius
γ_c	Fator de segurança para o concreto
μm	micrômetro
σ	Desvio padrão
#	Abertura da malha de peneira

Sumário

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Gráficos.....	xi
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Abreviaturas.....	xiv
Lista de Símbolos.....	xv
Capítulo 1.....	2
1 Introdução.....	2
1.1. Relevância do tema.....	5
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. <i>Objetivo geral:</i>	6
1.2.2. <i>Objetivos específicos:</i>	7
1.3. Estrutura da dissertação.....	7
Capítulo 2.....	9
2 Referencial Teórico.....	9
2.1. Sílica Ativa.....	9
2.1.1. <i>A Sílica na Argamassa e Concreto.....</i>	15
2.2. Durabilidade de concretos e argamassas.....	21
2.2.1. <i>Danos de origem física.....</i>	25
2.2.2. <i>Danos de origem química.....</i>	27
2.2.3. <i>Mecanismos de Deterioração em Ambientes Marinhos.....</i>	35
Capítulo 3.....	38
3 Materiais e métodos.....	38
3.1. Planejamento da parte experimental.....	38
3.2. Características dos materiais.....	39
3.2.1. <i>Aglomerante hidráulico.....</i>	39
3.2.2. <i>Adição pozolânica.....</i>	40
3.2.3. <i>Agregados miúdos.....</i>	41
3.2.4. <i>Aditivos.....</i>	42
3.3. Dosagem das argamassas.....	43
3.3.1. <i>1ª Mistura.....</i>	43
3.3.2. <i>2ª Mistura.....</i>	44
3.3.3. <i>3ª Mistura.....</i>	44
3.3.4. <i>4ª Mistura.....</i>	45
3.3.5. <i>5ª Mistura.....</i>	46

3.3.6. 6ª Mistura.....	47
3.4. Moldagem dos corpos de prova	49
3.5. Programa experimental.....	52
3.6. Ambiente de exposição e acomodação das argamassas.....	56
Capítulo 4.....	61
4 Resultados experimentais	61
4.1. Resistência à compressão	61
4.2. Resistência à tração	63
4.3. Módulo de elasticidade	65
4.4. Potencial de corrosão.....	69
4.5. Difração de raios X	72
Capítulo 5.....	80
5 Análise dos resultados	80
5.1. Resistência à compressão	80
5.2. Resistência à tração	84
5.3. Módulo de elasticidade	86
5.4. Potencial de corrosão.....	87
5.5. Difração de Raios X	91
Capítulo 6.....	97
6 Considerações finais.....	97
Referências Bibliográficas.....	102



Capítulo 1

Capítulo 1

Introdução

Segundo a National Geographic, em 1995 mais de 2.2 bilhões de pessoas se concentravam nos primeiros 100 km de costa dos continentes. Isso é o equivalente a distribuir quase 40% da população mundial em apenas 20% de todo o território habitável do planeta (figura 1).



Figura 1 – População costeira e degradação da linha litorânea em 2001.

Fonte: Adaptado de Burke et al., World Resources Institute, Washington DC, 2001; Paul Harrison, Fred Pearce, AAAS Atlas of Population and Environment 2001, American Association for the Advancement of Science, University of California Press, Berkeley.
Crédito da imagem: Philippe Rekacewicz, UNEP/GRID-Arendal.

A intensa ocupação humana, em especial das regiões costeiras, traz consigo a necessidade de modificar o espaço para melhor acomodar a população. Em muitos países, aliou-se o crescimento populacional e econômico com a expansão da malha urbana. Casas, edifícios, pontes, aeroportos, túneis, estradas, indústrias, redes de galerias subterrâneas, que configuram a infra-estrutura das cidades, foram

concomitantemente construídos fazendo uso, em sua maior parte, de concreto como material primário da indústria da construção.

Tal indústria é uma das maiores do mundo e a mais voraz consumidora de matérias-primas do planeta, sendo responsável por significativa parcela da degradação ambiental e da produção do CO₂ liberado na atmosfera. Dados do ano de 1995 sugerem que, nos Estados Unidos, a quantidade de matéria-prima destinada à construção foi uma vez e meia maior que o destinado a todas as outras atividades industriais somadas, como ilustrado no gráfico 1 (USGS, 2004).

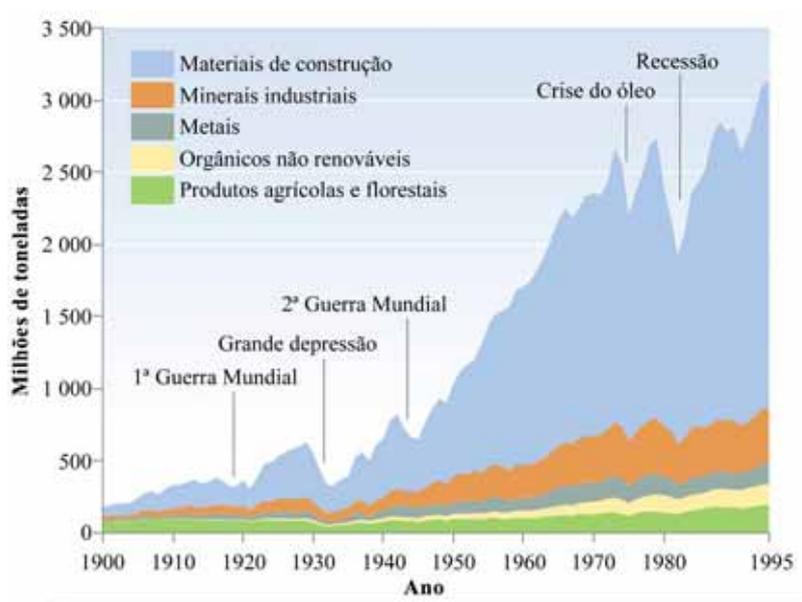


Gráfico 1 – Consumo de matérias-primas nos Estados Unidos.

Fonte: United States Geological Survey (USGS).

Crédito da imagem: Philippe Rekacewicz, UNEP/GRID-Arendal.

No âmbito nacional, um relatório do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior estima que 70% dos investimentos feitos em 1995 passaram pela rede de atividades formada pela construção. No caso específico dos materiais, a indústria do cimento e seus produtos arrecadaram mais de 3 bilhões de dólares no mesmo período no Brasil.

Ressalta-se que a produção mundial do cimento, em apenas quatro anos (2001-2005), aumentou de 1.74 bilhão de toneladas para 2.31 bilhões segundo dados do livro do ano da USGS (2005). Acompanhando a produção do cimento, o consumo de concreto saltou de 5.5 bilhões de toneladas em 1994 para mais de 9 bilhões em 2000. Em termos práticos, isto equivale a mais de uma tonelada e meia de concreto para cada

ser humano por ano, tornando tal material o segundo mais consumido no mundo, atrás apenas da água.

Este crescente uso do concreto, como relatado por METHA & MONTEIRO (1994) no início de seu livro, é consequência direta de sua facilidade de produção, manipulação e resistência. Sendo formado por três elementos básicos, cimento, agregados e água, o concreto está virtualmente disponível em qualquer continente, o que o torna uma solução competitiva quando comparado a materiais similares como o aço.

O emprego do concreto, armado ou não, em áreas próximas às zonas marinhas traz implicações importantes para este material. Ainda segundo METHA (1994), os efeitos da interação entre a água do mar e o concreto merecem atenção especial visto que o último se encontra sujeito a “*ação simultânea de numerosos processos de deterioração física e química*”. Mesmo estruturas localizadas vários quilômetros costa adentro podem estar em contato com a água do mar através dos ventos que carregam consigo gotículas de umidade marinha.

Os problemas estruturais decorrentes da deterioração de construções de concreto e argamassa são, periodicamente, noticiados em jornais. Muitas vezes sintomas que começam por simples rachaduras e manchas são subestimados (quando não, ignorados) por especialistas e podem terminar, em último caso, com o desabamento da estrutura.

Mesmo assim, a recuperação estrutural é na maioria das vezes possível, embora onerosa. Normalmente, as intervenções exigem que os materiais comprometidos por algum dano sejam substituídos por outros, de preferência mais resistentes e duráveis. Estes materiais, por sua vez, exigem mão-de-obra qualificada e conhecimentos especializados acerca do modo como reagem com a estrutura, com outros materiais de construção e com o meio ambiente.

Com o propósito de melhorar a durabilidade e permitir um desempenho superior a estruturas expostas aos mais diferentes meios foram desenvolvidos diversos aditivos e adições, dentre eles a sílica ativa (ou microsílica). Primordialmente um resíduo, a sílica ativa, quando adicionada ao concreto ou argamassa, possibilita a produção de um concreto ou argamassa capaz de, rapidamente, alcançar elevadas resistências mecânicas além de apresentar uma microestrutura mais densa e fechada, tudo sem o rígido controle da água de amassamento e das proporções da mistura, com custos competitivos em

relação ao concreto e argamassas convencionais. Estava popularizado o termo Concreto de Alto Desempenho (CAD).

A sílica foi rapidamente incorporada em muitas estruturas modernas e, de maneira sistemática, utilizada em diversas intervenções para recuperação de estruturas; tudo em um passo muito mais acelerado do que as pesquisas sobre as conseqüências de se utilizar tal material poderiam acompanhar. Certos parâmetros relativamente bem sedimentados sobre o cimento são verdadeiras incógnitas quando se trata da sílica ativa. Não existe, por exemplo, um consenso sobre a quantidade deste material que pode ser empregada com segurança, nem sobre as influências que o meio possui em misturas com sílica.

Uma vez que a sílica é um material comumente recomendado ao concreto quando se deseja obter ou recuperar uma estrutura, a fim de torná-la mais densa, resistente e durável, é imperativo que as influências da sílica no concreto e do ambiente na sílica sejam estudadas antes de sua aplicação em estruturas reais.

Dessa maneira, o presente trabalho almeja discutir certos aspectos sobre o comportamento da sílica ativa – em especial quando sujeita a ambientes marinhos – a fim de fornecer subsídios para um melhor aproveitamento deste material e seu correto emprego nas estruturas pertinentes.

1.1. Relevância do tema

Nos últimos 20 anos, o aparecimento de diversas patologias (figura 2), muito antes do fim da vida útil previsto em projeto de construções, atraiu a atenção de pesquisadores, construtores e órgãos responsáveis pela regularização das atividades ligadas à engenharia civil. Algumas obras chegaram a apresentar problemas estruturais mesmo antes que as atividades de construção estivessem finalizadas, acarretando desperdícios financeiros e materiais. Dados de MEHTA & MONTEIRO (1994) apontam que, em países



Figura 2 – Fissura em viga do píer da Braskem.

desenvolvidos, a indústria da construção aloca mais de 40% de seus recursos para o reparo e manutenção de suas estruturas.

Na tentativa de combater os problemas relativos à durabilidade das construções, novos tipos de materiais e procedimentos surgiram com o intuito de restituir ao concreto e/ou argamassa a durabilidade que deles se espera, destacando-se nesse cenário a sílica ativa. Entretanto, nem todas essas iniciativas mostraram resultados satisfatórios. O emprego pouco criterioso deste aditivo e de metodologias generalizadas levou, em alguns casos, ao agravamento das patologias, comprometendo ainda mais o desempenho das construções. Surge a necessidade de conhecer melhor o meio e o material.

Muitas pesquisas publicadas sobre a influência da sílica ativa na durabilidade das estruturas adotam uma abordagem reducionista e, às vezes, distante das verdadeiras condições ambientais que interagem de forma simultânea e complexa com os materiais. Tal metodologia é criticada por NEVILLE (2004), por ser desproporcional e poder distorcer as conclusões acerca do comportamento de estruturas expostas em meios reais.

Ao mesmo tempo, crescentes preocupações com o excessivo uso dos recursos naturais, com a produção de resíduos e com a liberação de gases causadores do efeito estufa estimulam o desenvolvimento de pesquisas que possam, de alguma maneira, amenizar o atual estado de degradação ambiental. O emprego da sílica pode colaborar para a utilização inteligente e parcimoniosa do cimento e demais produtos que dele fazem uso – além de aproveitar este subproduto industrial.

Diante deste cenário, a durabilidade dos materiais e estruturas tornou-se um parâmetro tão importante quanto a resistência à compressão, comumente prescrita em projetos estruturais. Logo, este trabalho ganha relevância ao analisar e comparar o comportamento das argamassas, com e sem adição de sílica ativa, expostas ao ambiente marinho e submetidas às intempéries características desse meio significativamente agressivo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral:

Avaliar o comportamento de elementos de argamassa armada, com e sem a adição de sílica ativa, quando expostas a ciclos de molhagem e secagem em ambiente marinho real.

1.2.2. Objetivos específicos:

a) Encontrar um traço de argamassa que possua características de trabalhabilidade e resistências compatíveis com um material utilizável em ambientes agressivos e reparos estruturais;

b) Analisar a influência do ambiente marinho nas propriedades físicas (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) de corpos de prova cilíndricos de argamassa, com e sem sílica ativa;

c) Quantificar o potencial de corrosão (de acordo com a norma ASTM C 876-91) de placas de argamassa armada, com e sem sílica, sujeitas às mesmas condições citadas;

d) Avaliar através de ensaios de Difração de Raios X (DRX) as possíveis variações na formação de compostos dentro da matriz de argamassa.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis seções. A *primeira* corresponde a uma breve introdução, à definição das metas e ao resumo da estrutura do trabalho.

Na *segunda seção* consta o referencial teórico realizado para o desenvolvimento da dissertação, aprofundando os conhecimentos sobre os materiais utilizados neste trabalho, os conceitos versados nas normas e no meio científico referentes à durabilidade das estruturas, bem como sobre os principais agentes agressivos do ambiente de exposição escolhido (o marinho).

A *terceira parte* do trabalho explica os passos metodológicos, desde o planejamento experimental, passando pela caracterização, seleção e dosagem dos materiais, comentando a respeito dos ensaios escolhidos e do meio marinho.

Na *quarta seção* são exibidos os resultados de todos os ensaios feitos nos elementos de argamassa. Nessa seção ainda se relata e justifica uma adaptação da metodologia realizada para determinação do módulo de elasticidade.

A *quinta seção* dedica-se à interpretação dos resultados do capítulo anterior e é realizada separadamente para cada um dos ensaios.

Na *sexta* e última seção são feitas considerações sobre as análises da seção anterior frente aos objetivos proposta para este trabalho. Também se discute a influência das respostas obtidas entre si e os reflexos que tal tipo de pesquisa pode projetar na indústria da construção.



Capítulo 2

Capítulo 2

Referencial Teórico

2.1. Sílica Ativa

A sílica (nome químico dado ao mineral quartzo) é um composto formado pelos dois elementos mais abundantes da superfície terrestre, oxigênio e silício, na forma de óxido de silício (SiO_2). Essa substância é a base para os minerais de diversos tipos de rochas que são matéria-prima para a indústria siderúrgica na fabricação de ferro-silício e silício metálico.



Figura 3 - Liberação de resíduos de sílica na atmosfera.

Fonte: Silica Fume Association.

Nos alto-fornos dessas indústrias, quartzo, carvão, pedaços de madeira e ferro (dependendo da liga a se produzir) são imersos em eletrodos capazes de gerar arcos elétricos que chegam a alcançar $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Neste processo um gás é produzido – o óxido de silício (SiO) – e escapa para regiões mais altas do forno, oxidando-se, à medida que esfria, para formar o SiO_2 amorfo ou vítreo. Como pode ser visto na figura 3, antes que

leis ambientais da década de 1970 passassem a regular a emissão de determinados resíduos, quase toda a sílica produzida era liberada sem nenhum controle na atmosfera, sob a forma de uma gigantesca nuvem esbranquiçada.

Sílica ativa é o nome dado a este resíduo artificial da fabricação de ferro-silício e silício metálico, e é chamada “ativa” por sua alta reatividade na presença de certo produto do cimento hidratado – o hidróxido de cálcio ou Ca(OH)_2 . A partir do seu aproveitamento, este resíduo se apresenta em cinco estados para uso na construção civil:

Não-Densificada – como mostrado na figura 4, é a sílica em seu estado bruto, da maneira em que foi produzida. Esta apresentação do material não é muito utilizada por dois motivos básicos: primeiramente, por estar em pó, o manuseio da sílica é difícil tanto para a indústria que a produz quanto para sua aplicação no concreto ou argamassa, e como sua dispersão em pó é muito grande resulta numa densidade pequena quando comparada a outras formas possíveis de tratar a sílica. Esta densidade inferior implica em menor massa de material transportado num mesmo volume, o que não é vantajoso em termos econômicos.



Figura 4 – Sílica não densificada.

Fonte: Silica Fume Association.

Densificada – esta é uma das maneiras mais comuns de se encontrar a sílica ativa. Através de um processo eletroestático, partículas de sílica são carregadas e terminam por atraírem-se umas às outras, formando pequenos aglomerados esféricos (figura 5). Este procedimento é considerado reversível e não acarreta perdas nas

propriedades da sílica, além de facilitar o manuseio e permitir o transporte de grandes quantidades do material.



Figura 5 – Sílica densificada.
Fonte: Silica Fume Association.

Suspensão Aquosa – a sílica ativa pode ser misturada a água em iguais proporções de massa para formar uma calda de sílica pronta para ser aplicada ao concreto/argamassa, como ilustra a figura 6. Com este tipo de apresentação a sílica precisa ser transportada em caminhões estanques ou em tonéis fechados. Antes de utilizar a calda deve-se lembrar de agitá-la vigorosamente a fim de suspender as partículas que se decantaram e de considerar a água já incorporada na calda de sílica para reduzir a mesma quantidade da água de amassamento.

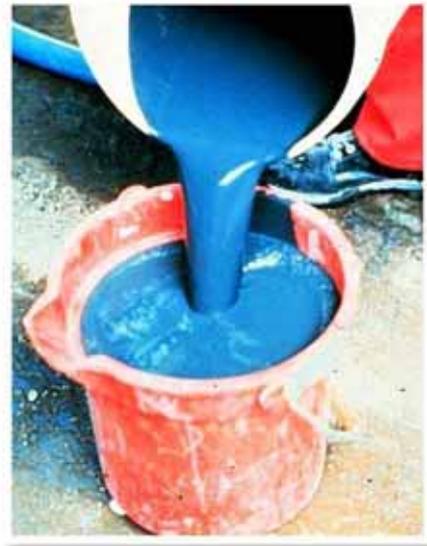


Figura 6 – Sílica em calda.
Fonte: Silica Fume Association.

Pré-misturada – certos fabricantes de cimento Portland já adicionam a sílica ao cimento em séries especiais (como alguns CII-Z). Este procedimento facilita o uso da sílica na construção, mas, por outro lado, impede que sua proporção seja especificada

com maior precisão em projeto uma vez que muitos fabricantes não disponibilizam em suas embalagens as informações quanto ao tipo e quantidade de pozolona utilizada.

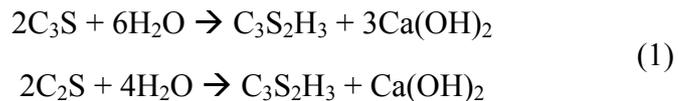
Pelotizada – muitos produtores de sílica a aglomeram na forma de duras pelotas através do uso de pequenas quantidades de água. Este processo mostra-se muito eficiente como meio de descartar a sílica ativa por reduzir bastante a poeira que esta produz e facilitar seu transporte até o local de disposição. Este tipo de sílica não é recomendável para uso direto em concretos ou argamassas uma vez que tal processo não é facilmente reversível e a sílica não reagirá na mistura de maneira adequada, mesmo com a utilização de vibração mecânica.

Apesar de ser quimicamente igual ao quartzo, e por ser um pó muito fino de origem mineral, a sílica ativa não apresenta riscos à saúde no tocante à intoxicação por silício. A silicose, como é conhecida, somente ocorre em casos onde haja exposição à sílica livre e cristalina. Apenas neste último cenário, a sílica é considerada material cancerígeno segundo critérios da Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer e da Organização Mundial da Saúde. A sílica ativa é, por definição, um material amorfo e, portanto, incapaz de causar este tipo de doença pulmonar.

Não obstante, certas precauções devem ser tomadas quando se utiliza sílica ativa – como o uso de máscaras e luvas – além de obedecer às instruções especificadas na embalagem do produto. Existem episódios relatados que sugerem contaminação, e até a morte de alguns trabalhadores depois de longos períodos de exposição à sílica amorfa. Porém, pesquisas sugerem que a principal causa destes episódios é a contaminação da sílica vítrea com a cristalina (MERGET *et al.*, 2002).

Uma vez adicionada à mistura, a sílica irá atuar de duas maneiras diferentes dentro da pasta de cimento – reagindo com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e preenchendo vazios formados pelas próprias partículas de cimento. São os conhecidos efeitos pozolânico e filler.

O hidróxido de cálcio, ou Ca(OH)_2 , é um composto formado a partir da reação entre o silicato tricálcico (C_3S) ou dicálcico (C_2S), presentes no clínquer do cimento, e a água de amassamento da mistura. Sua quantidade depende da proporção relativa de C_3S e C_2S na composição do cimento (equação 1) e é, em geral, maior para cimentos com altos teores de silicato tricálcico (NEVILLE, 1997).



O $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tem menor influência na resistência mecânica da pasta endurecida que o C-S-H, mas contribui decisivamente para manter o pH do sistema elevado, entre cerca de 12.5 e 13.5 (KASSELOURI *et al.*, 2000). Esses valores de potencial de hidrogênio ajudam a manter estável a fase estrutural e resistente da pasta hidratada de cimento, o C-S-H, influenciando, assim, a durabilidade do sistema (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Grandes quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ são encontradas ao redor de agregados e armaduras. No primeiro, o hidróxido de cálcio ajuda a tornar frágil esta região conhecida como zona de transição, e, na última, é o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que através de seu elevado pH, permite a formação de uma película de óxido férrico (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) ou uma combinação dos dois, que protege as armaduras da corrosão tornando-as passivas (GENTIL, 1996).

A reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio produz novo silicato de cálcio hidratado, favorecendo um aumento na resistência final da pasta e das áreas próximas aos agregados e armaduras por consumir o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ existente nessas regiões. A quantidade de sílica necessária para esgotar todo o hidróxido de cálcio é dependente da relação água/cimento (a/c) utilizada na mistura, e, de acordo com PERSSON (1998), essa pode ser tão baixa quanto 15% para um fator a/c de 0.48 até 10% de sílica, em relação ao peso do cimento, quando a razão a/c for de 0.28. A reação pozolânica obedece à equação (2) seguinte.



O segundo efeito atribuído à sílica, o filler, é uma consequência de suas características físicas como extrema finura (entre 0,1 e 1 μm) e grande área específica (entre 15000 e 25000 m^2/kg). Com suas dimensões reduzidas, é possível à sílica alcançar vazios dentro da pasta que nem mesmo grãos de cimento são capazes de fechar (figura 7). Além disso, a sílica contribui para diminuir a exsudação interna que ocorre

próximo aos agregados e armaduras por dispersar parte da água livre que, normalmente, se concentra nestas regiões (AİTCIN, 2000).

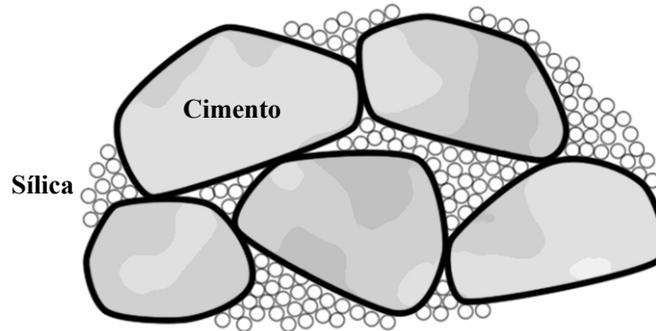


Figura 7 - Partículas de Sílica e Cimento

Como exemplo de sua grande área específica, pouco mais de 350 gramas de sílica ativa possui área superficial equivalente a um campo de futebol internacional de 105 por 70 metros. Em comparação, a mesma massa em cimento possui uma área suficiente para cobrir pouco mais do retângulo da pequena área (5.5 por 18.32 metros). A tabela 1 ilustra a área específica da sílica em relação a outras partículas.

Tabela 1 – Área específica de materiais finos.

Fonte: Adaptado de AİTCIN (2000), NEVILLE (1997) e JUSTICE (2005).

Material	Área específica (m²/kg)
Sílica Ativa	15000 a 25000
Metakaolin	10000 a 25000
Fumaça de cigarro	10000
Cinza volante (<i>fly ash</i>)	250 a 600
Cimento portland	300 a 400

Do ponto de vista da granulometria, as partículas de sílica estão, de acordo com AİTCIN (2000), “*longe da relação ótima ditada pelas leis da acomodação esférica*” para conseguir travamento e compacidade máxima por ser, aproximadamente, cem vezes mais fina que uma partícula média de cimento. Ainda assim, as principais conseqüências atribuídas ao efeito filler são o aumento da resistência final da pasta e

uma diminuição significativa da porosidade do sistema cimentício, provavelmente pela posterior conversão da sílica em C-S-H em sua reação pozolânica.

2.1.1. A Sílica na Argamassa e Concreto

Uma das maiores diferenças entre um concreto (ou argamassa) convencional e outro(a) que faz uso da sílica ativa é perceptível na zona de transição. Tipicamente, ao redor dos agregados e armaduras forma-se um filme de água que concentra grande quantidade de sais em suspensão, dentre eles o hidróxido de cálcio. Uma vez endurecido o cimento, estas regiões apresentam grande quantidade de vazios, microfissuras e Ca(OH)_2 e uma pequena quantidade de silicato de cálcio hidratado. Dessa forma, a literatura classifica os concretos e as argamassas como um material composto de três fases distintas – a pasta endurecida, os agregados e a zona de transição – sendo esta última a mais frágil delas (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Quando a sílica ativa é adicionada à mistura, a interface entre os agregados e a pasta muda sensivelmente. Ao invés de hidróxido de cálcio e grandes vazios é possível perceber muitas formações compactas de C-S-H, que é o produto de hidratação mais resistente da pasta endurecida. A consequência deste fenômeno é sentida nas propriedades mecânicas (que em geral apresentam melhor desempenho) e no plano de fratura de concretos e argamassas. Ao invés de seguir a zona de transição, contornando os agregados, as fissuras partem-os. Não raro é feito uso de agregados especiais, quando esta fase revela-se o elo fraco da estrutura, para obter resistências ainda maiores com misturas que usam sílica (AÏTCIN, 2000).

Outro efeito, talvez não tão desejado, resultante do uso da sílica é a diminuição da trabalhabilidade da massa úmida. Essa redução é tão significativa que, se não houver propósito de empregar um fator a/c muito alto, é quase que obrigatório valer-se de um aditivo plastificante ou, ainda melhor, um superplastificante. RADJY *et al* (1986) ressalta que

*experience and research gradually established the mandatory requirement of concurrent addition of plasticizers together with CSF [Condensed Silica Fume] in order to overcome the water demand problem.*¹

¹ “a experiência e pesquisa gradualmente estabeleceram o requisito obrigatório da adição conjunta de plastificantes junto com a SAC [Sílica Ativa Condensada] a fim de superar o problema da demanda de água.” Tradução do autor.

Por outro lado, alguns pesquisadores atribuem à sílica um efeito lubrificante para misturas de relação a/c muito baixas. Acredita-se que o formato esférico dessa adição atua como micro rolamentos em massas muito viscosas. Também se atribui à sílica a propriedade de ser capaz de expulsar parte da água aprisionada entre os grãos floclados de cimento, deixando mais líquido disponível para melhorar a trabalhabilidade do concreto ou da argamassa. Esse mecanismo de ação da sílica, nas palavras de AÏTCIN (2000), “*não tem sido completamente explicado*” e estimula questionamentos sobre quais situações se faz necessário acrescentar um aditivo plastificante, ou superplastificante, em misturas com sílica ativa.

A utilização experimental desse aditivo em concretos e argamassas é documentada desde 1952 quando o pesquisador norueguês Bernhardt (considerado pioneiro no estudo deste material) expôs prismas de concreto, feitos de uma variedade de misturas com e sem sílica, à água dentro de um túnel em Oslo. Entretanto, a sílica somente teve sua utilização difundida entre as décadas de 1970 e 1980, quando alcançou o restante da Europa e chegou à América do Norte (AÏTCIN, 2000).

Em 1971 a sílica ativa foi utilizada pela primeira vez em uma estrutura real. Metade de uma laje de cobertura em Fiskaa, Noruega, recebeu concreto com adição de sílica ativa, sendo a outra metade coberta com concreto convencional. Testes de potencial de corrosão, realizados em 1981, não acusaram corrosão das armaduras em nenhuma parte da laje, e inspeção realizada seis anos depois somente encontrou sinais de deterioração na parte da laje que não recebeu concreto com sílica. MAAGE e SELLEVOLD (1987) retiraram amostras desta laje e de mais outras duas estruturas na Noruega (um silo de grãos e uma residência) e uma na Suécia (um cais).

Em seus ensaios de compressão e permeabilidade à água, eles contataram que a utilização de sílica tinha, em geral, conferido maior resistência às construções, ao mesmo tempo em que as amostras que continham esta adição apresentaram um coeficiente de permeabilidade um pouco menor. Todavia, concluíram que, a longo prazo, não haviam diferenças significativas nas propriedades de concretos com sílica comparados a misturas convencionais (MAAGE & SELLEVOLD, 1987).

Com o potencial de fazer estruturas mais duráveis e resistentes, a sílica ativa ganhou lugar de destaque tanto na literatura acadêmica quanto nos canteiros de obras – pela primeira vez era possível moldar um concreto ou argamassa de alta resistência com

relativa facilidade e de trabalhabilidade aceitável, e tudo com o uso de um subproduto consideravelmente barato (RADJY *et al.*, 1986; ALMEIDA, 2000). Aliás, o fato de ser um subproduto industrial é mais um incentivo para o emprego da sílica numa época em que muito se discute sobre aquecimento global, reciclagem/reaproveitamento de resíduos e o uso inteligente de recursos naturais pela sociedade. Edificações como as Torres Gêmeas Petronas, em Kuala Lumpur, o Taipei 101 de Taiwan e a Sky Tower na Nova Zelândia são ícones do atual e crescente uso desse material em concretos e argamassas.

Esse aumento em sua aceitação foi seguido por pesquisas que abrangeram as mais diferentes propriedades e possíveis aplicações da sílica junto ao concreto. No entanto, mesmo depois de mais de 50 anos de sua primeira publicação, os estudos sobre certos aspectos da sílica ainda estão longe de chegar a um consenso e informações conflitantes são frequentemente encontradas nos meios científicos.

De acordo com ABO EL-ENEIN *et al.* (1995), a porosidade do concreto com sílica aumenta quando a taxa de sílica substituindo o cimento é superior a 5% em relação ao peso do cimento (gráfico 2). Este tipo de afirmação é a antítese de pesquisas como de ALEXANDER & MAGEE (1999) e NEVILLE (1997) (os primeiros fazendo vários testes, como permeabilidade ao oxigênio e absorção de água, e o último usando porosimetria por intrusão de mercúrio) que pregam uma diminuição da porosidade de concretos e argamassas que fazem uso do fumo de sílica em suas composições, como apresentado pela tabela 2. EL-ENEIN *et al.* (1995), infelizmente, não informa em seu artigo qual o método utilizado para chegar aos resultados acima mencionados.

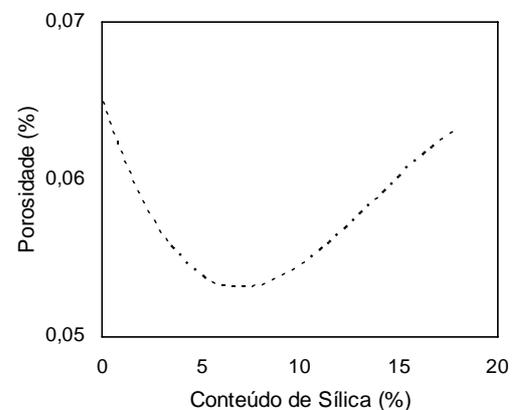


Gráfico 2 - Relação entre a quantidade de sílica e a porosidade do concreto.

Fonte: Adaptado de ABO EL-ENEIN *et al.*, 1995.

BACHE (*apud* MALHOTRA & CARETTE, 1983) também havia chegado aos resultados descritos por NEVILLE (1997) quando incorporou sílica ativa a argamassas. Ele atribuiu esse comportamento a mudanças na natureza dos poros presentes na pasta

de cimento e sílica, com uma diminuição dos poros de maior diâmetro enquanto a quantidade total de vazios permanecia praticamente igual à de uma argamassa comum.

Tabela 2 - Porosidade de argamassa com cimento resistente a sulfatos com fumo de sílica.

Fonte: Adaptado de NEVILLE, 1997.

Duração da cura (dias)	Quantidade de Sílica (%)			
	0	10	15	20
7	16.0	14.3	13.7	13.0
28	14.7	13.4	12.9	11.7
91	14.3	13.3	11.7	10.6
182	10.8	10.8	9.6	8.6
365	10.7	9.5	10.5	9.1

PERSSON (1998) cita estudos em que a utilização de sílica ativa era responsável por diminuir a porosidade nas primeiras idades de concretos, mas que esse efeito revertia-se com a maturação da estrutura. As misturas com sílica começaram a apresentar uma contagem de poros maior que as convencionais já aos 28 dias de idade. Esse efeito era mais proeminente à medida que mais sílica era utilizada em substituição ao cimento. MANGAT & KHATIB (1995) também mostram que uma quantidade maior de poros na matriz cimentante está ligada à incorporação de sílica ativa na mistura.

MAAGE & SELLEVOLD (1987), empregando microscopia fluorescente, encontraram evidências de uma maior quantidade de fissuras, tanto micro quanto macroscópicas, em concretos com até 16 anos de idade que utilizaram sílica ativa, como mostrado na tabela 3. Apesar destes resultados, é afirmado que os concretos estudados desenvolveram uma estrutura mais densa em sua pasta endurecida quando a sílica foi usada na mistura.

Tabela 3 – Freqüência de fissuras.

Fonte: Adaptado de MAAGE & SELLEVOLD, 1987.

	Macro fissuras	Micro fissuras	
		Pasta	Interface ¹
Concreto com sílica	1.75	3.38	3.50
Concreto convencional	1.00	2.50	2.85

Escala: Nenhuma fissura = 1.0 ; Muitas fissuras = 5.0

¹ Corresponde à zona de transição.

Sobre estes tipos de ensaios, AİTCIN (2000) ressalta a importância de escolher com cuidado seus procedimentos e técnicas quando mostra que os métodos consagrados para testar o concreto usual nem sempre se mostram satisfatórios quando têm que responder por características do concreto de alto desempenho, que é, na maioria das vezes, o caso do concreto com sílica ativa. Um exemplo citado em seu livro é o caso de determinar a permeabilidade desses concretos especiais, uma vez que os poros presentes são normalmente muito menores e menos conectados que em concretos convencionais (AİTCIN, 2000).

Como regra geral, AİTCIN (2000) (e outros autores como MEHTA & MONTEIRO 1994; NEVILLE, 1997) associa a pequena permeabilidade de concretos e argamassa de alto desempenho que usam sílica à sua alta resistência a ataques químicos externos e a uma grande durabilidade. MEHTA & MONTEIRO (1994) chegam a criar a máxima – “*Permeabilidade é a chave para durabilidade*”, o que não está longe das condições reais, mas não reflete com precisão o comportamento de misturas que envolvem sílica em suas composições. (AİTCIN, 2000; NEVILLE, 1997).

O desempenho da sílica quando exposta a ambientes agressivos, em especial os sulfatados (caso da água do mar e de alguns solos), talvez seja um dos casos de maior contradição com relação à durabilidade de concretos e argamassas de alto desempenho. Autores como LEE, MOON & SWAMY (2005), através de simulações em laboratório de soluções com sulfato de magnésio, provam que existe uma perda considerável da resistência à compressão de argamassas, e que tal perda é mais sensível quando a sílica é adicionada à mistura. COHEN & BENTUR (1988), fazendo testes em pastas de cimento com e sem a adição de sílica ativa, concluíram que o uso desta pozolana tinha um efeito extremamente deletério nas propriedades físicas da pasta, resultando numa perda de massa e de resistência à compressão da ordem de 5 a 10 vezes maior quando comparado a pastas convencionais.

Por outro lado, TÜRKER *et al.* (1997) relata que “*contrary to expectation, silica fume replacement [de uma parte do cimento] did not cause more performance loss*”² da argamassa quando comparada a uma argamassa convencional sob as mesmas condições. Isto, pelo menos por um período limitado, como ressaltado por esse autor.

² “contrário à expectativa, a substituição [de uma parte do cimento] por fumo de sílica não causou maior perda no desempenho”. Tradução do autor, grifo nosso.

Afirmção semelhante foi feita por STOEPOE (*apud* COHEN & BENTUR, 1988), quando sugere que o uso de pozolanas (caso da sílica ativa) tem efeito benéfico nas pastas de cimento exposta a ambientes que contenham água marinha ou sulfato de magnésio por aumentar a quantidade de C-S-H na matriz de concretos e argamassas.

Outros vão ainda mais longe ao dizer que a adição de sílica ativa melhora a resistência da mistura ao ataque de sulfatos quando a relação A/C fica abaixo de 0.67 (SILVA FILHO *apud* ALMEIDA, 2000).

Outra pesquisa interessante, publicada por ST JOHN (1995), revela que a sílica pode não possuir um efeito filler tão eficiente quanto o anunciado pela maioria dos artigos e livros. Seus resultados mostram que parte da sílica comercialmente disponível na forma densificada não se dispersa da maneira esperada e aglomerados de partículas podem se manter estáveis, sustentando um diâmetro de 50 μm ou mais.

Analisando o interior destes aglomerados, DIAMOND, SAHU e THAULOW (2004) mostram que C-S-H é formado, mas com uma relação Ca/Si de 0.6 contra o valor de 1.5 normalmente encontrado no silicato de cálcio hidratado de concretos e argamassas comuns. Estes valores são condizentes, em parte, com as informações apresentadas por REGOURD, MORTUREUX & HORNAIN (1983), que mediram fatores Ca/Si da ordem de 1.2 para o C-S-H de material pozolânico e 1.7 para o de cimento portland. As conseqüências destas observações nas misturas que envolvem sílica ativa ainda não estão bem claras, mas já existem evidências (DIAMOND, SAHU & THAULOW, 2004) de que estes aglomerados podem sofrer danos típicos da reação álcali-agregado e apresentar intensa fissuração.

RADJY *et al.* (1986) afirma que o C-S-H gel formado pela reação da sílica com o hidróxido de cálcio tem alta capacidade de incorporar íons externos. Talvez esse fenômeno reflita uma natureza instável e pouco conhecida desta fase cimentante à base de sílica e justifique as possíveis fraquezas relatadas por alguns pesquisadores quando se expõe argamassas ou concretos com adição/substituição de sílica ativa a ambientes ricos em sulfato de magnésio. Mais pesquisas são necessárias para melhor compreender a natureza e propriedades deste tipo de C-S-H. Tal aprofundamento, no entanto, não faz parte deste trabalho.

A Norma Brasileira é escassa em dados sobre a sílica ativa e seu uso em estruturas de concreto. A norma NBR 13957: **Sílica ativa para uso em cimento**

Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Métodos de ensaio, de 1997, regula sobre os procedimentos necessários para quantificar resíduos e teor de SiO₂ presente, perda ao fogo e equivalente alcalino da sílica ativa, enquanto que a NBR 13956: **Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação**, do mesmo ano, especifica propriedades químicas e físicas (tabela 4) que a sílica, em suas diversas apresentações, deve possuir para que seja aceito o seu uso em concretos, argamassas ou pastas de cimento Portland.

Tabela 4 - Exigências químicas e físicas da sílica ativa.

Fonte: NBR 13956, 1997.

Componente	Unidade	Limite
SiO ₂	%	≥ 85.0
Umidade ¹	%	≤ 3.0
Perda ao Fogo	%	≤ 6.0
Equivalente Alcalino em Na ₂ O	%	≤ 1.5
Resíduo na Peneira 45 µm	%	≤ 10.0
Teor de Sólidos na Lama ²	%	Não pode variar mais que 2% para mais ou para menos do valor declarado pelo fabricante
Área Específica BET ³	m ² .g ⁻¹	≥ 15 ≤ 30

¹ Não se aplica à sílica ativa na forma de lama.

² Só se aplica à sílica ativa na forma de lama.

³ Ensaio facultativo.

2.2. Durabilidade de concretos e argamassas

A NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, de 2003, define durabilidade como a

capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. (...) As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conservem suas segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

Analisando o texto dessa norma, é possível perceber que a durabilidade é, talvez, a características mais dispendiosa e difícil de aferir a uma estrutura de concreto. Ao

contrário dos tradicionais ensaios mecânicos realizados no concreto (tipicamente realizados aos 28 dias de idade), a durabilidade envolve estudar um material sujeitando-o às diversas solicitações (estruturais e ambientais) que poderá vir a sofrer durante sua vida útil e então avaliar parâmetros que possam representar o comportamento de tal estrutura em seu ambiente natural. Para alcançar uma durabilidade aceitável, faz-se necessário encontrar harmonia entre as solicitações impostas pelo meio, a capacidade da estrutura de resistir a tais solicitações e o tempo durante o qual a estrutura poderá se manter funcional.

O conceito de durabilidade está intimamente ligado a noções de vida útil. Toda estrutura, inclusive os materiais que dela fazem parte, interage com seu meio, modificando-se, muitas vezes, de maneira indesejável. Essas transformações deletérias necessitam de determinado tempo até conseguirem causar certa severidade de danos à estrutura. Neste momento, não intervir na causa e/ou sintomas da patologia pode resultar num crescimento escalar das avarias apresentadas pela construção e, em último caso, ruína. Por tal período de tempo, entende-se o conceito de vida útil da estrutura.

A indústria da construção evoluiu de maneira notável nos últimos 70 anos – e continua a fazê-lo (MEHTA, 1997). Concretos e argamassas podem ter suas propriedades modificadas com o uso de pequenas quantidades de aditivos químicos, resultando em resistências maiores e em idades mais precoces. E, atendendo às expectativas do mercado, multiplica-se a quantidade de materiais direcionados a aplicações específicas; grautes industrializados, argamassas poliméricas, resinas, fibras, colas, adições pozolânicas etc. No entanto, toda essa vanguarda tecnológica não garante maior durabilidade às estruturas se não for empregada de maneira criteriosa.

As condições ambientais, citadas na NBR 6118, são aquelas a que a estrutura estará sujeita durante todo o período de sua vida útil. Existe uma grande relação de troca entre a construção e o local em que ela se situa, e esta relação é singular – ambientes marinhos apresentam uma grande variedade de compostos químicos e alta umidade, regiões desérticas normalmente exibem significativas amplitudes térmicas e poucas chuvas, locais afastados dos trópicos apresentam ciclos de congelamento e degelo. Com tantas variações de clima, microclima, umidade do ar, temperatura, composições químicas e solicitações físicas, é seguro dizer que não há duas construções expostas ao mesmo meio.

É possível perceber que, dos três principais fatores citados na norma: o meio ambiente, a resistência da estrutura e a vida útil, os dois primeiros interagem entre si para definir a qualidade e duração do último. O gráfico 3 ilustra como é essa relação e a sua influência na vida útil; de acordo com ele observa-se que determinado grau de agressividade ambiental corresponde a um intervalo de resistência, uma tolerância dentro da qual a estrutura deve estar para assegurar uma vida útil satisfatória.

Vale ressaltar que a resistência da estrutura não está limitada ao conceito de resistência à compressão ou tração, tão familiar aos engenheiros, mas se estende a todas as características físicas e químicas intrínsecas do material e desenho da construção.

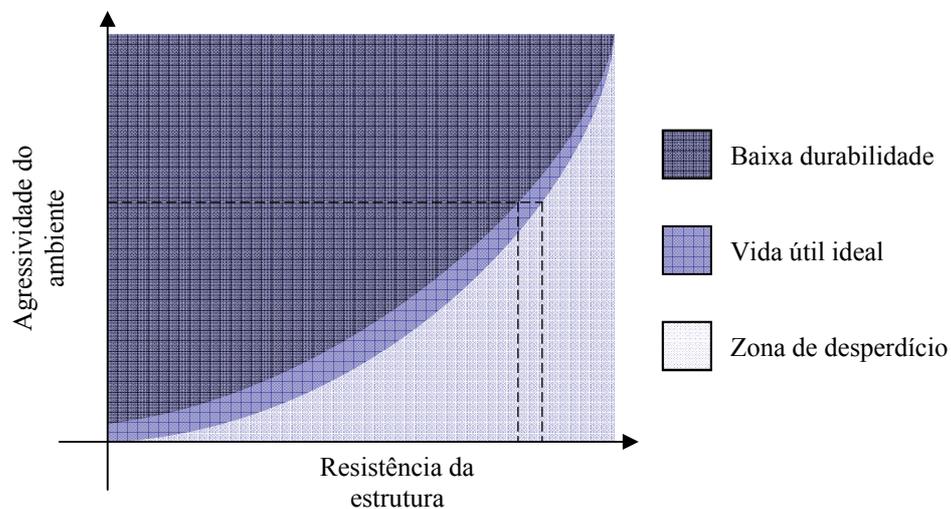


Gráfico 3 – Relação entre o ambiente, estrutura e vida útil.

Dessa maneira, é imprescindível o conhecimento prévio do ambiente de exposição e das propriedades dos materiais, para tornar possível a estimativa do espaço de tempo no qual a estrutura apresentará desempenho adequado ao uso a que foi projetada; durante esse período, determinado material deve prover condições mínimas de funcionalidade, segurança e resistência.

Nos últimos anos a durabilidade recebeu crescente atenção, tanto do meio científico quanto fora dele. Entretanto, este interesse quase sempre está relacionado a eventos desastrosos. Recentemente, 72 escolas de Pernambuco foram interditadas por apresentarem risco de desabamento. Em 2004, no mesmo estado, o edifício Areia Branca, de 12 andares, desmoronou. Em janeiro de 2007, São Paulo foi notícia internacional quando uma cratera com mais de 100 metros de diâmetro se abriu onde

estava sendo construída uma estação de metrô. No Rio de Janeiro um bloco de concreto pesando cerca de dez toneladas caiu do 12º andar do prédio principal da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Nos Estados Unidos, a durabilidade do concreto sofreu um grande abalo em sua credibilidade quando, em 1987, um relatório da *National Materials Advisory Board* denunciou que aproximadamente 253000 pontes estavam em diversos estados de deterioração e, a cada ano, 35000 novas pontes eram adicionadas a esse relatório. Esse fato levou a indústria a adotar misturas cada vez mais fortes, com regras para limitar fatores a/c a não menos que 0.35 e elevadas resistências à compressão. Em 1995 ROGALLA *et al.* (*apud* MEHTA, 1997) mostrava que tais medidas não apenas falharam na resolução do problema como, em alguns casos, acentuou-os. No último relatório de 1995, a *National Cooperative Highway Research Program* levantou que mais de 100 mil lajes de pontes sofreram fissuração completa da seção transversal menos de um mês após a construção (MEHTA, 1997).

No caso do concreto, a relação com o ambiente pode acarretar diversos tipos de danos que são classificados de maneiras diferentes (e às vezes confusa) por cada autor. JOHNSON (1973) propõe 11 causas principais para a deterioração das estruturas de concreto e argamassa. Estes itens são ainda desmembrados em 21 subitens que totalizam 32 possíveis origens de patologias. SOUZA & RIPPER (1998) vão ainda mais longe ao levantar 53 causas para danos estruturais, classificadas em dois grandes grupos nomeados de Causas Intrínsecas e Causas Extrínsecas.

MEHTA (1997), por sua vez, defende um enfoque holístico no estudo da durabilidade. Sua abordagem não exclui necessariamente o entendimento separado de cada processo responsável pela deterioração de concretos e argamassas, mas esse conhecimento perde significância se não for entendido em conjunto com o meio ambiente e sua complexa dinâmica com os materiais citados.

Os processos deletérios a que as estruturas de concreto e argamassa são sujeitos, podem ser classificados, de acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), em relação à origem dos ataques, como de ordem física e química.

2.2.1. Danos de origem física

Compreende os ataques que tem como causa um fator físico; a abrasão, a cavitação, os gradientes de temperatura, o congelamento e degelo, o fogo, carregamentos etc. são exemplos de fenômenos físicos deletérios ao concreto. Seus sintomas são, na maioria dos casos, fissuração e desgaste superficial das estruturas.

Cabe, neste trabalho, ressaltar e definir os ataques que podem ocorrer no meio (marinho) de exposição dos elementos de argamassa, não aprofundando toda a gama de ataques possíveis nos mais diversos ambientes.

Os danos oriundos do choque de partículas em movimento com a superfície de concreto ou argamassa pode ser de três tipos: **abrasão**, **erosão** e **cavitação**.

Defini-se **abrasão** como o atrito entre pequenos fragmentos sólidos em um meio seco; onde parte da massa da estrutura é danificada e retirada nas partes de contato, como ocorre, por exemplo, em pisos, pavimentos e rodovias.

A **erosão** das estruturas é também causada pelo choque entre partículas sólidas e elementos de concreto ou argamassa. A diferença entre abrasão e erosão é que esta última acontece em um meio líquido. É possível perceber este fenômeno em canais de irrigação, drenagem e abastecimento, pilares parcialmente submersos de pontes entre outros.

No caso dos dois ataques acima citados, o principal sintoma percebido é a retirada por desgaste de parte da matriz cimentante e exposição dos agregados na superfície dos elementos. A abrasão e erosão podem facilitar o ataque de outros agentes agressivos a concretos e argamassas por deixar à mostra camadas mais internas, e anteriormente protegidas, das peças estruturais. Além disso, se o processo perdurar por longos períodos, perdas consideráveis de massa poderão comprometer propriedades mecânicas, como a resistência a compressão e o módulo de elasticidade, essenciais para a estabilidade estrutural e funcionamento da construção.

Cavitação, por sua vez, é um fenômeno relacionado a mudanças de pressões dentro de um meio líquido quando este flui a altas velocidades no interior de canalizações. Sabe-se que o estado físico de um líquido depende da pressão, volume e temperatura a que este está sujeito. No caso da água, quanto menor a pressão aplicada sobre ela, menor será a temperatura necessária para transformá-la em vapor. Quando flui a altas velocidades, variações significativas de pressão podem ocorrer em intervalos

de tempo muito curtos levando a água a vaporizar-se e liquefazer-se rapidamente, originando ondas de choques que causam significativos impactos na superfície de concretos e argamassas (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A **crystalização de sais nos poros** é, às vezes, confundida como um processo químico de deterioração das estruturas (NEVILLE, 2004). Apesar de envolver reações químicas de hidratação e desidratação, o mecanismo de deterioração está ligado a esforços físicos gerados no interior da matriz cimentante.

Quando soluções supersaturadas entram em contato com um meio poroso parte delas pode ficar retida e perder umidade. Os sais, antes diluídos, voltam a se cristalizar ocupando um volume maior que o da solução supersaturada nos poros. Dependendo do sal em questão, as tensões causadas por essa expansão são capazes de produzir esforços suficientes para fissurar ou, até mesmo romper, a maioria das rochas, como mostra a tabela 5.

Tabela 5 – Pressão de cristalização para sais.

Fonte: Adaptado de MEHTA & MONTEIRO, 1994.

Sal	Fórmula química	Pressão (MPa) ¹
Tenardita	Na ₂ SO ₄	32.27
Mirabilita	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	7.85
Halita	NaCl	61.30
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	31.21
Kieserita	MgSO ₄ .H ₂ O	30.19
Hexaidrita	MgSO ₄ .6H ₂ O	13.12
Epsomita	MgSO ₄ .7H ₂ O	11.65

¹ Valores válidos para grau de saturação igual a 2 e temperatura de 25 °C.

Gradientes de temperatura são responsáveis por variações cíclicas de volume em elementos de concreto e argamassa. Quando essas mudanças volumétricas ultrapassam determinado limite elástico, pequenas fissuras originam-se na pasta de cimento devido a um residual de deformação que não pôde ser absorvido pela matriz cimentante e sua ligação com os agregados. Sabe-se que esses últimos possuem um coeficiente de dilatação diferente daquele encontrado na pasta de cimento, assim, na

presença de gradientes térmicos, uma expansão diferencial pode surgir nessas duas fases, gerando tensões e fissuras na zona de transição.

Outra possibilidade para o surgimento de fissuras em elementos de concreto e argamassa armada expostos a gradientes de temperatura é a deformação impedida, que acontece quando tais elementos têm seu deslocamento contido por alguma outra peça estrutural, o que causa trincamento por desenvolver tensões internas de compressão ou tração.

É prática tentar combater tais fissuras com o emprego de armaduras auxiliares em elementos de concreto e argamassa armados. Na verdade, a utilização do aço não impede completamente sua formação, mas sim subdivide uma grande fissura térmica em inúmeras outras de menor abertura.

2.2.2. Danos de origem química

Os danos relacionados a reações químicas dos componentes do concreto com substâncias deletérias são vastos. Soluções ácidas podem comprometer a alcalinidade da pasta e estabilidade da fase resistente do concreto (C-S-H), determinados sais (como o sulfato de sódio ou sulfato de magnésio) podem reagir com moléculas da matriz cimentícia e formar novos compostos químicos indesejáveis ou então penetrar até as armaduras e favorecer a formação de pilhas eletroquímicas corrosivas; até mesmo a água, quando pura ou semi-pura, pode ser danosa ao concreto por hidrolisar seus compostos e transportá-los para fora da matriz.

Em relação aos ataques químicos possíveis de ocorrer em concretos ou argamassas, ressaltando-se aqui os ataques em ambientes marinhos, MEHTA & MONTEIRO (1994) os classifica da seguinte maneira:

Hidrólise dos componentes da pasta de cimento – como comentado acima, a água pura ou semi-pura, quando em contato com a pasta hidratada de cimento pode dissolver os produtos químicos que contenham, principalmente, cálcio oriundo do Ca(OH)_2 . Este fenômeno acontece pelo fato dessas águas possuírem poucos, ou nenhum, íons em suspensão, o que as deixam em desequilíbrio químico com a solução alcalina dos poros da matriz cimentante.

Esta reação pára uma vez que a dissolução suficiente de cristais de hidróxido de cálcio retorna o equilíbrio iônico à solução química. Se novas quantidades de água

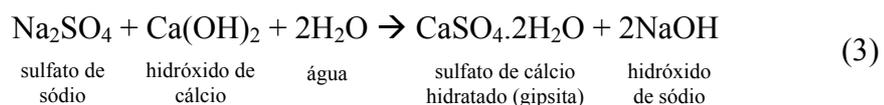
“mole” (ou seja, água pura ou semi-pura) entrarem em contato com a pasta de cimento haverá novo desequilíbrio e a reação de hidrólise terá continuidade. Este é o caso, por exemplo, das águas de chuva que infiltram em elementos à base de cimento. Um sinal característico desta patologia é a eflorescência – fruto da precipitação de cristais de carbonato de cálcio.

Reação por troca de cátions – a troca de cátions com os produtos hidratados do cimento ocorre quando há o contato desses com soluções ácidas ou sais contendo magnésio. Os ácidos tendem a reagir com o hidróxido de cálcio, que é uma base, formando, essencialmente, sal e água. Esses sais podem ser solúveis ou insolúveis e a sua natureza influencia na severidade do dano que os elementos de concreto ou argamassa podem sofrer.

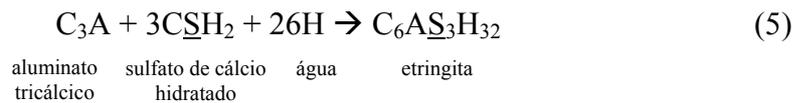
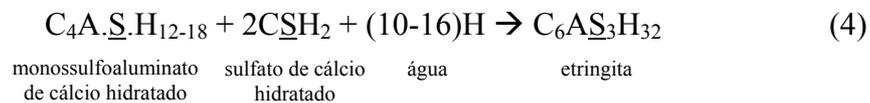
No caso dos sais de magnésio, encontrados na forma de cloretos, sulfatos ou bicarbonatos a troca do cátion cálcio do Ca(OH)_2 por Mg é prontamente realizada. Se persistirem em contato por tempo suficiente, os sais de magnésio estendem o seu ataque ao Ca presente no silicato de cálcio hidratado, comprometendo a estabilidade e resistência da matriz de cimento.

Ataque por sulfatos – o ataque de sulfato aos produtos hidratados da pasta de cimento acontece de diferentes maneiras, variando a agressividade, em função do cátion associado ao íon sulfato: normalmente o sódio ou o magnésio.

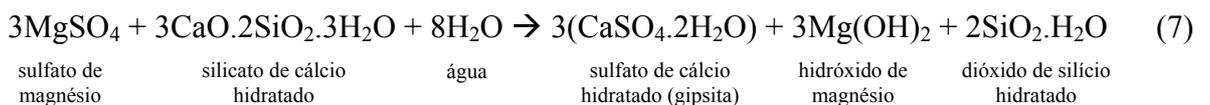
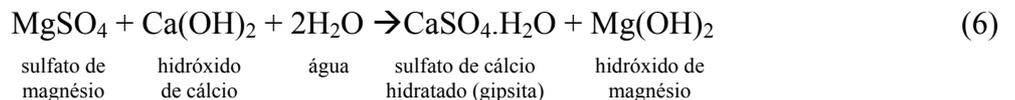
O sulfato de sódio (Na_2SO_4) pode danificar a estrutura da pasta de duas maneiras, mas com resultados semelhantes. Num primeiro momento, os cátions entre o sulfato e o hidróxido são trocados como mostra a equação 3, formando sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), conhecido como gipsita. Esta transformação é relatada por COHEN (1988) e MEHTA & MONTEIRO (1994) como capaz de causar danos através de expansão e redução de rigidez e resistência, transformando a pasta em um material frágil e sem propriedades cimentantes.



Outro mecanismo associado à ação do sulfato de sódio é o desequilíbrio das fases monossulfoaluminosa ($C_4A.S.H_{12-18}$)³ e do aluminato tricálcico (C_3A) ainda não hidratado presentes na matriz cimentícia. Com o ingresso de novos íons sulfato (SO_4^{-2}) na pasta, e com a presença de gipsita, os compostos aluminosos citados irão reagir, absorvendo o sulfato e formando trissulfoaluminato de cálcio hidratado (como ilustra as equações 4 e 5), conhecido por sua nomenclatura mineralógica etringita. Considera-se que a formação desse mineral, de estrutura prismática alongada, provoca expansão e fissuração no interior da pasta endurecida. A maneira como isto ocorre ainda é investigada, mas se aceita que está associada a pressões provocadas pelo crescimento e cristalização da etringita e pela absorção de água em sua estrutura acicular.



O sulfato de magnésio atua de maneira semelhante ao sulfato de sódio na reação com o hidróxido de cálcio, com a diferença de que irá produzir hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) ao invés de NaOH como apresentado na equação 6. A formação de $Mg(OH)_2$ é consideravelmente insolúvel e pouco alcalina (com pH entre 9.5 e 10.5) se comparada ao hidróxido de cálcio e sódio. Essa redução do pH pode desestabilizar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e torná-lo suscetível a reagir na presença do sulfato de magnésio, como pode ser observado na equação 7.



³ Fórmula não estequiométrica.

A substituição do silicato pelo sulfato (na presença de água) no C-S-H forma novamente hidróxido de magnésio e gipsita. Além disso, também é formado um hidrato de silício ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) que, em contato com o $\text{Mg}(\text{OH})_2$ produzirá silicato de magnésio hidratado (M-S-H), que não possui as mesmas características cimentantes do silicato de cálcio hidratado. A perda do C-S-H é bastante prejudicial à estrutura resistente da pasta de cimento (MEHTA & MONTEIRO, 1994). COHEN (1988) constatou perdas na resistência à compressão superiores a 10% em pastas de cimentos expostas ao sulfato de magnésio por 140 dias.

Apesar de não ser comum encontrar sulfatos em altas concentrações na natureza, a sua quantidade é, em geral, suficiente para causar danos às estruturas à base de cimento. Construções em ambiente marinho ou costeiro, em solos destinados à agricultura e a indústria, de canalizações de esgoto e águas subterrâneas requerem atenção especial por serem esses meios os principais locais onde se detecta a presença de sulfatos. Em função da quantidade desse composto, a NBR 12655:2006 apresenta a seguinte tabela de requisitos para concretos (tabela 6).

Tabela 6 – Requisitos para concreto exposto a soluções com sulfatos.

Fonte: NBR 12655, 2006.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel no solo (SO_4). (% em massa)	Sulfato solúvel (SO_4) presente na água. (ppm)	a/c máxima	fck mínimo (agregado normal ou leve). (MPa)
Fraca	0.00 a 0.10	0 a 150	-	-
Moderada ²	0.10 a 0.20	150 a 1500	0.50	35
Severa ³	Acima de 0.20	Acima de 1500	0.45	40

¹ Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

² Água do mar.

³ Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos (NBR 5737).

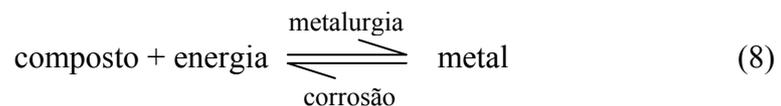
De acordo com a NBR 12655:2006, a água do mar contém sulfato solúvel em quantidades que variam entre 150 e 1500 ppm (partes por milhão). Tal informação contradiz publicações de autores como HEM (1985), MEHTA & MONTEIRO (1994) e ANTHONI (2006), cujos estudos mostram concentrações de SO_4^{2-} da ordem de 2700 ppm na água marinha. Esta quantidade de sulfato é suficiente para elevar o grau de

agressividade da água do mar de “moderada” para “severa”, como apresentado na classificação proposta pela tabela 6.

Corrosão – Um dos tipos de patologia mais danosa às estruturas é a corrosão. Estima-se que países desenvolvidos, como os Estados Unidos, tenham custos relacionados à corrosão na ordem de 3.5% do seu Produto Nacional Bruto – PNB (GENTIL, 1996). Dessa maneira, calcula-se que os EUA (com PNB de 12,97 trilhões de dólares) sofreram prejuízos de aproximadamente 450 bilhões de dólares em 2005⁴, o que equivale a mais de 70% do PNB do Brasil, cujo total é 644,1 bilhões de dólares.

O fenômeno da corrosão é definido por GENTIL (1996) “(...) *como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos*”. Assim, neste amplo conceito, o ataque à borracha pelo ozônio e de sulfatos ao cimento também podem ser classificados como processos corrosivos.

No caso dos metais, a corrosão reflete a tendência do material a entrar num estado de equilíbrio com o meio em que se encontra. No exemplo das ligas de ferro, a corrosão produz, em geral, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ – forma hidratada da hematita (Fe_2O_3) que é o minério de ferro mais comumente encontrado na natureza. O processo de corrosão é, em si, o inverso do processo metalúrgico como apresentado por GENTIL (1996) na equação 8.



Para instalação do processo corrosivo eletrolítico, situação mais comum em estruturas armadas, certas condições devem ser satisfeitas. É necessária a presença de um ânodo (que sofre oxidação), um cátodo (onde ocorre redução), um eletrólito normalmente líquido e condutor, uma ligação entre o ânodo e o cátodo e uma diferença de potencial (ddp). A falta de um destes componentes afeta os demais e inibe a corrosão.

Em uma estrutura real o aço faz o papel de ânodo e cátodo de modo simultâneo, já o concreto (ou argamassa) umedecido corresponde ao eletrólito. Logo, para iniciar o fenômeno da corrosão deve existir uma diferença de potencial. Esta acontece quando o

⁴ Valor calculado a partir de dados do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) publicados no jornal Zero Hora, de Porto Alegre, no dia 04 de setembro de 2006.

equilíbrio do sistema é afetado ocasionando uma corrente elétrica, como nas áreas que apresentam diferencial de aeração, de concentrações salinas, pontos de contatos de materiais distintos, entre outros.

No processo siderúrgico, o ferro ganha dois ou três elétrons transformando-se em liga ao zerar seu número de oxidação (NOX). No ato da corrosão, as moléculas de ferro da liga cedem para o eletrólito os elétrons anteriormente adquiridos e íons Fe^{+2} ou Fe^{+3} começam a se dispersar na solução nas regiões anódicas. Os elétrons liberados fluem pela barra de aço em direção aos cátodos onde serão incorporados a moléculas de água e oxigênio, sendo a presença do último facultativa. As equações 9, 10 e 11 e a figura 8 a seguir demonstram o mecanismo eletroquímico nas regiões anódicas e catódicas da corrosão (GENTIL, 1996).

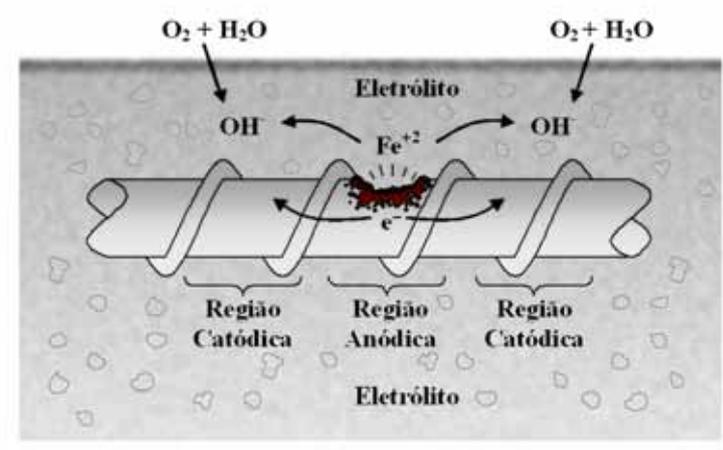
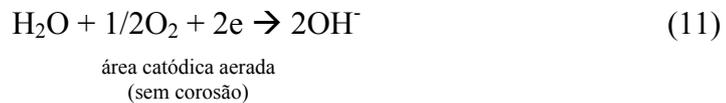
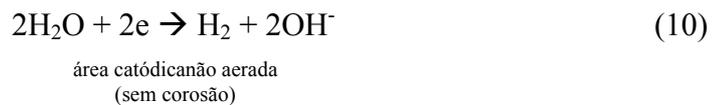


Figura 8 – Corrosão eletroquímica em elementos armados.
Fonte: Adaptado de CASCUDO, 1997.

Em seu estado natural, a pasta de cimento endurecida constitui uma barreira satisfatória contra o ingresso de substâncias que possam iniciar o processo corrosivo. Ao mesmo tempo, o elevado pH da matriz cimentante favorece a formação de uma fina película (entre 10^{-3} e 10^{-1} μm de espessura) composta por óxido de ferro bastante impermeável (CASCUDO, 1997).

Contudo, em condições naturais pequenas fissuras presentes em elementos estruturais permitem o acesso de substâncias danosas às fases cimentícias e a camada passivante do aço. Esses agentes deletérios podem ser ácidos (H_2SO_4 , HCl , H_2CO_3), gases (principalmente CO_2), sais (NaCl , CaCl_2), águas e qualquer outra substância capaz de alterar a química dos produtos hidratados de cimento e da camada passivante do aço. Uma vez que se comprometam essas últimas, a proteção oferecida pela pasta de cimento ao aço é, de modo significativo, reduzida.

Os processos acima citados são os mais comuns e relatados na literatura específica da durabilidade das estruturas. Contudo, vale comentar que existem diversos outros mecanismos de deterioração que não foram abordados no presente momento por fugirem do escopo deste trabalho, ou seja, o ambiente marinho.

Apesar de se estudar os agentes deletérios separadamente, em ambientes reais é bastante incomum o concreto ser agredido por um único processo patológico – os mecanismos de ataque geralmente agem em cooperação, um facilitando, potencializando, os danos causados pelo outro. Por exemplo, não raro as fissuras causadas pela dilatação térmica, carregamentos excessivos ou retração autógena servem de entrada para o gás carbônico (que reduz o pH do sistema) e para o cloreto de sódio (bastante prejudicial ao aço presente no concreto armado). Com a corrosão das armaduras as fissuras crescem, aumentando a escala dos danos e promovendo a continuidade deste ciclo de deterioração.

Deve-se ressaltar que

não existe um ensaio que possa avaliar a durabilidade absoluta de um concreto [ou argamassa]. Ao contrário do ensaio de resistência à compressão ou do ensaio de resistividade elétrica, a durabilidade é usualmente expressa em termos do ataque (ou ataques) a que a obra estará sujeita. O conhecimento do meio em que se encontra a construção é peça fundamental para o correto emprego dos materiais, sejam eles para construir ou recuperar estruturas. (ALMEIDA, 2004)

Garantir a durabilidade de uma estrutura é, em muitos casos, mais importante que alcançar elevadas resistências à compressão. Isto não significa dizer que a resistência é um parâmetro secundário, mas sim que um concreto de resistência elevada não é, necessariamente, durável. Essa afirmação é mais relevante se for considerado que a resistência usada no cálculo de estruturas no Brasil é aquela alcançada aos 28 dias de idade do concreto. Este reduzido tempo de estudo é insuficiente para caracterizar os concretos e argamassas que atualmente fazem uso de adições e/ou aditivos em suas composições – a não ser que as estruturas sejam construídas para durar apenas 28 dias.

O concreto de alto desempenho compreende um novo campo de pesquisas para os engenheiros no tocante à sua durabilidade. Conceitos consolidados sobre o comportamento do concreto convencional necessitam de estudos aprofundados quando se trata do concreto de alto desempenho e tais estudos são, ainda, limitados ou raros. No caso específico do concreto de alto desempenho, como com adição de sílica ativa, poucos artigos relatam o desempenho do mesmo em estudos de caso (AİTCIN, 2000). Utilizar um material sem o conhecimento de seu desempenho a longo prazo implica em correr riscos; talvez grandes demais para ignorar a necessidade de estudos mais aprofundados.

De maneira oportuna, como observado por AİTCIN (2000), o estudo da durabilidade do concreto vem crescendo nas últimas décadas, movido, principalmente, “*porque um número muito grande de estruturas de concreto apresenta sérios sinais de deterioração avançada*” (SKALNY *apud* AİTCIN, 2000). Esse aumento na quantidade de pesquisas é muito importante para viabilizar o uso de concretos de alto desempenho, uma vez que o mercado da durabilidade deverá ser o principal nicho de aplicação deste material (AİTCIN, 2000).

Apesar das pesquisas, o uso de concreto de alto desempenho (caso da sílica ativa) em vários ambientes ainda não é uma prática adotada de forma abrangente. Esta conclusão pode estar relacionada à carência de pesquisas aplicadas à realidade da construção com a devida apreciação das características reais do ambiente; a disponibilidade dos materiais com custo compatível e a rápida evolução dos materiais (aditivos, cimentos e da própria sílica ativa) que faz com conceitos e metodologias se tornem obsoletos rapidamente.

2.2.3. Mecanismos de Deterioração em Ambientes Marinhos

O ambiente marinho é notório por sua alta agressividade às estruturas de concreto com ou sem armadura. De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), o estudo do concreto exposto ao ambiente marinho é de grande importância, tanto por causa do grande número de estruturas sujeitas a este ambiente, quanto pelas inúmeras interações físico-químicas sofridas por concretos e argamassas próximos a regiões costeiras.

Estima-se que seja a corrosão das armaduras a principal causa de deterioração de estruturas de concreto. Porém, para que a corrosão se instale, é preciso que agentes agressivos penetrem na matriz do concreto até alcançar o aço, visto que, em seu estado natural, o concreto constitui uma barreira físico-química que protege as armaduras em seu interior.

Entretanto, antes da corrosão aparecer, outras formas de deterioração podem estar ocorrendo nas estruturas de concreto. Substâncias presentes em água marinha, como o sulfato de sódio (Na_2SO_4) e o sulfato de magnésio (MgSO_4) reagem com produtos de hidratação do cimento reduzindo a alcalinidade e comprometendo a estabilidade de uma fase muito importante da pasta, o C-S-H. Ao contrário da corrosão, o ataque por sulfatos pode ocorrer desde a superfície da estrutura, contanto que exista o sulfato associado ao seu cátion e água disponível.

Outro tipo de ataque que não requer penetração na massa é o próprio movimento das águas marítimas que, carregando sedimentos, é danoso ao concreto pela erosão. Com a contínua exposição, camadas da matriz são retiradas através do atrito entre as partículas em suspensão, expondo partes cada vez mais profundas, e anteriormente protegidas, da estrutura. Além disso, o ato de molhar e secar uma parte da estrutura pode permitir que sais presentes na água cristalizem, diluam e voltem a se cristalizar repetidas vezes, criando pressões internas de tração que facilmente superam os 50 MPa (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Dessa forma, o ambiente marinho constitui um dos mais agressivos meios a que uma estrutura de concreto ou argamassa pode estar sujeita. A tabela 6.1 da NBR 6118:2003 classifica tal ambiente como níveis III e IV com risco de deterioração grande e elevado respectivamente, como transcrita na tabela 7.

De posse dessa classificação, a NBR 6118:2003 e 12655:2006, prescrevem limites mínimos que devem ser seguidos na escolha e consumo do cimento e definição do fator a/c utilizado na mistura. Essas recomendações, de acordo com a norma 6118, têm o objetivo de assegurar a durabilidade da estrutura e são reproduzidas na tabela 8. Este trabalho procurou, sempre que possível, seguir essas orientações normativas.

Tabela 7 – Classes de agressividade ambiental.

Fonte: NBR 6118, 2003.

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

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 revestido 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 8 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto.

Fonte: NBR 6118, 2003 e NBR 12655, 2006.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 7)			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA ¹	≤ 0.65	≤ 0.60	≤ 0.55	≤ 0.45
	CP ²	≤ 0.60	≤ 0.55	≤ 0.55	≤ 0.45
Classe de concreto (NBR 8953)	CA ¹	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP ²	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento (kg/m ³) (NBR 12655)	CA ¹ e CP ²	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

¹ Concreto armado

² Concreto protendido.



Capítulo 3

Capítulo 3

Materiais e métodos

Para averiguar o comportamento físico e químico de argamassas expostas a um ambiente marinho agressivo fez-se necessário adotar metodologias específicas que permitissem quantificar e qualificar, comparativamente, o desempenho dos materiais em estudo. As etapas seguintes detalham os procedimentos adotados e resultados obtidos.

3.1. Planejamento da parte experimental

Visando alcançar o objetivo principal deste trabalho, optou-se por desenvolver dois traços que possuíssem características semelhantes de trabalhabilidade e resistência e expô-los por períodos iguais de tempo em zona de molhagem e secagem costeira. A diferença entre os traços seria a presença de sílica ativa em apenas um deles.

Em primeiro lugar, decidiu-se pelo uso de 6% de sílica em substituição ao cimento no traço da argamassa. Essa fração foi definida de acordo com experiências anteriores de ALMEIDA (2004), com o uso da sílica, estando dentro da margem recomendada pelo fabricante (5 a 10% em relação ao peso do cimento) e de publicações internacionais, que recomendam o uso da sílica entre 4 e 15% também em relação ao peso do cimento (SILICA FUME USER'S MANUAL, 2005).

Decidida a quantidade de sílica, era preciso definir o traço da argamassa. O objetivo foi desenvolver uma relação entre cimento e areia que permitisse a moldagem de peças com alta resistência, boa trabalhabilidade, agradável aparência superficial (sem o aspecto áspero da areia), além de relativa economia. O método utilizado nesta etapa foi de empirismo – foram realizadas várias misturas de argamassa até se obter aquela que apresentasse qualidades em estado fresco condizentes com um material a ser utilizado em obras de recuperação ou reparo estrutural.

3.2. Características dos materiais

Os materiais constituem uma das partes mais importantes do trabalho, uma vez o comportamento desses fornecerá informações para o estudo de suas interações com o meio marinho. Suas principais características são descritas a seguir.

3.2.1. Aglomerante hidráulico

A escolha do cimento para a pesquisa implicava em selecionar um material comercialmente disponível e que fosse o mais neutro possível, em sua composição, para não mascarar os resultados dos ensaios. O cimento que melhor atende a essa necessidade é o CPI, cuja sua produção e comercialização são bastante restritas por falta de demanda pelo mercado.

A preferência pelo cimento CPI deve-se à natureza deste trabalho. Uma vez que se deseja verificar as influências (benéficas ou danosas) da sílica ativa em argamassas, é importante que o cimento utilizado não incorpore adições que possam interferir nas propriedades da mistura de modo semelhante à sílica. Da mesma forma, preferia-se empregar um cimento que não fosse resistente ao meio de exposição (ambiente marinho). Ignorar tais cuidados com o tipo de cimento poderia afetar os resultados.

Na época deste trabalho, procurou-se através de diversas fontes obter o cimento citado, ou algum similar. O único tipo disponível nos distribuidores e estabelecimentos comerciais pesquisados foi, e ainda é, o CPII-Z-32. Entretanto, a escolha deste tipo de cimento, que possui adição de material pozolânico, poderia interferir na química dos produtos de hidratação do cimento e, assim, competir com a sílica ativa nas reações pozolânicas, dificultando a percepção de sua real influência na mistura.

Com a impossibilidade de se obter o CPI em tempo hábil para a pesquisa, decidiu-se utilizar um cimento composto, mas sem oferecer resistência especial a sulfatos (como o do tipo RS) nem apresentar incorporação de material pozolânico. Através de uma fábrica, encontrou-se um cimento tipo CPII-F-32, composto com filler, que atendia aos parâmetros apontados acima. Tal produto somente é ofertado a granel para concreteiras interessadas. Este foi o cimento escolhido para a pesquisa e suas características médias constam na tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades¹ Químicas e Físicas do Cimento CII-F-32.

	Propriedade ou Composto	Cimento CII-F-32	Limite	Norma	
Ensaio Químicos	SO ₃	2.62%	≤ 4.0%	NBR NM 16	
	SiO ₂	20.58%	-		
	Al ₂ O ₃	3.21%	-		
	Fe ₂ O ₃	3.40%	-		
	CaO	63.43%	-		
	K ₂ O	0.61%	-		
	Perda ao Fogo	4.10%	≤ 6.5%	NBR NM 18	
	Resíduo Insolúvel	2.12%	≤ 2.5%	NBR NM 15	
Ensaio Físicos e Mecânicos	Início de Pega (h:min)	4:10	≥ 1:00	NBR NM 65	
	Finura #200	1.1%	≤ 10%	NBR 11579	
	Área Específica ² (cm ² /g)	3530	≥ 2600	NBR NM 76	
	Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	14.9	-	
		3 dias	28.4	≥ 10.0	NBR 7215
		7 dias	33.5	≥ 20.0	
28 dias		41.7	≥ 32.0		

¹ Valores médios.

² Encontrada pelo método de Blaine.

3.2.2. Adição pozolânica

A sílica ativa utilizada é do tipo densificada e da marca SX⁵. A data de fabricação impressa na embalagem é de 02 de maio de 2005 e, de acordo com as instruções do fabricante, o produto não possui data de validade definida desde que esteja estocado em local arejado e seco. Seu uso é, de acordo com as mesmas instruções, recomendado para casos extremos como grandes estruturas, obras marítimas e reparos em concretos e argamassas.

Outra informação que consta diz respeito à dosagem, que deve ser de substituição do cimento e estar no intervalo de 5 a 12% em relação ao material cimentício total. Por exemplo, se uma mistura consumir 10 kg de cimento e ficar decidido utilizar sílica num percentual de 10%, a quantidade de sílica a ser empregada é

⁵ Nome real omitido.

1 kg, e o consumo de cimento fica reduzido a 9 kg (9 kg de cimento + 1 kg de sílica = 10 kg de material cimentício total).

3.2.3. Agregados miúdos

O agregado miúdo (areia) empregado encontra-se disponível em baias de armazenamento próximas ao Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT) da UFAL. Antes de sua utilização, a areia foi peneirada, limpa de matéria orgânica, e espalhada para retirar o máximo de umidade absorvida. Este material tem origem natural e foi coletado em leito de rio. Sua caracterização granulométrica e física consta nas tabelas 10 e 11.

Tabela10 - Propriedades físicas da areia.

Propriedade	Valor	Norma
Absorção de Água	1.22 %	NBR NM 30
Massa Específica	2.68 kg/dm ³	NBR NM 52
Teor de Material Fino	1.0 %	NBR NM 46

Tabela 11 - Propriedades Granulométricas da Areia.

Peneira (mm)	Massa Média (%)	
	Retida	Acumulada
9.5	-	-
6.3	1	-
4.8	2	3
2.4	6	9
1.2	17	26
0.6	31	57
0.3	32	89
0.15	9	98
Fundo	2	-
Total	100	282
Tamanho Máximo (mm)		4.8
Módulo de Finura		2.82
Zona Granulométrica		Utilizável

3.2.4. Aditivos

Esperava-se que a mistura exigisse o uso de algum aditivo para lhe conferir trabalhabilidade adequada à realização dos trabalhos. Dois aditivos disponíveis no laboratório da UFAL foram pré-selecionados para fazer parte da argamassa – o plastificante M 390⁶ e o superplastificante G 51⁶.

Tabela 12 - Dados técnicos do superplastificante.

Fonte: Manual Técnico MBT, 2002.

Parâmetro	Característica/Valor
Função Principal	Superplastificante de 3ª Geração
Base Química	Policarboxilatos
Aspecto	Líquido Viscoso
Cor	Marrom
Densidade	1.067 a 1.107 g/cm ³
pH	5 a 7
Sólidos	28.5 a 31.5 %
Viscosidade	95 a 160 cps

Tabela 13 - Dados técnicos do plastificante.

Fonte: Manual Técnico MBT, 2002.

Parâmetro	Característica/Valor
Função Principal	Plastificante
Base Química	Lignosulfonatos
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho Escuro
Densidade	1.18 ± 0.02 g/cm ³
pH	8 ± 1
Sólidos	38 %

A escolha de um aditivo específico somente foi feita no momento da determinação do traço, usando o ensaio de consistência de acordo com a norma NBR 13276: 2002 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto** –

⁶ Nome real omitido.

Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. As características de cada um, fornecidas pelo fabricante, estão nas tabelas 12 e 13.

3.3. Dosagem das argamassas

Com os materiais em mãos fazia-se necessário determinar o traço das argamassas. Todos os materiais foram pesados e separados (figura 9), e diversas misturas foram preparadas com a intenção de produzir uma que apresentasse aspecto homogêneo e facilidade de trabalhar com a espátula. Além de observações visuais e mecânicas, realizaram-se ensaios de consistência para balizar a escolha das argamassas.



Figura 9 – Materiais separados para testes de traço.

3.3.1. 1ª Mistura

Traço 1:2.5 com 6% de sílica ativa.

Descrição: nesta mistura fez-se uso de 188 gramas de cimento, 12 gramas de sílica ativa e 500 gramas de areia (as características de cada material encontram-se discriminadas na seção seguinte). A princípio não foi utilizado nenhum aditivo plastificante ou superplastificante com o intuito de verificar a influência que a sílica teria sobre a trabalhabilidade da argamassa. O fator a/c adotado foi de 0.5.

Resultados: a massa em estado fresco possuía boa aparência, mas apresentava certo grau resistência ao ser amassada com a espátula, e era possível notar que um pouco da areia sobressaía-se da mistura. Estava claro que o uso da sílica iria requerer maior adição de água, o emprego de aditivos para melhorar a trabalhabilidade da

mistura ou uma redução na quantidade de areia. A última opção foi escolhida para fazer a segunda mistura.

3.3.2. 2ª Mistura

Traço 1:2 com 6% de sílica ativa.

Descrição: na segunda mistura utilizaram-se os mesmos 188 gramas de cimento e 12 gramas de sílica ativa, mas, apenas, 400 gramas de areia. Ainda não foi utilizado nenhum aditivo plastificante ou superplastificante, esperando que, com a diminuição da quantidade de areia (e conseqüente maior proporção de material cimentante), a trabalhabilidade fosse melhorada em relação à mistura anterior. O fator a/c adotado continuou em 0.5.

Resultados: as características da massa em seu estado fresco definitivamente melhoraram, diminuindo o problema da mistura anterior. No entanto, a argamassa ainda apresentava um aspecto seco e sua manuseabilidade com a espátula mostrava que a pasta não possuía a trabalhabilidade adequada ao uso em recuperação de uma estrutura ou em obra exposta a ambientes agressivos.

3.3.3. 3ª Mistura

Traço 1:2.5 com 6% de sílica.

Descrição: pelas misturas anteriores ficou claro que o uso de um aditivo seria indispensável para que não se aumentasse o fator a/c ou a quantidade de material cimentante. A primeira opção de aditivo foi o M 390, que é um plastificante a base de lignosulfonatos. O fabricante recomenda uma dosagem entre 0.20 a 1 litro do aditivo para cada 100 kg de cimento (entre 0.2 a 1% de aditivo por massa de cimento, em l/kg). Foram adotadas duas dosagens de plastificante nesta mistura, a primeira de 0.6% e a segunda de



Figura 10 – Aspecto da 3ª mistura com plastificante = 1% e a/c = 0.5

1%, equivalente a 1.2 e 2ml respectivamente para os 188g de cimento e 12g de sílica ativa. Usaram-se os 500 gramas originais de areia e foi feita a mistura com fator a/c de 0.4, 0.45 e 0.5.

Resultados: o uso do plastificante praticamente não influenciou na trabalhabilidade da argamassa – pequena melhora obtida foi descompensada por uma visível segregação da areia em relação à pasta de cimento. O aumento do fator a/c de 0.4 a 0.5 teve influência mais significativa do que o incremento do uso do aditivo de 0.6% para 1%. O ensaio de consistência, realizado para o fator a/c de 0.45, resultou em diâmetros de 18 cm, 16.2 cm e 16.7 cm, que seriam bons resultados, não fosse o aspecto embolotado e quebradiço da massa, como mostra a figura 10. O aditivo plastificante, definitivamente, se apresentou incompatível com a argamassa em questão.

3.3.4. 4ª Mistura

Traço 1:2.5 com 6% de sílica.

Descrição: por fim, decidiu-se usar um superplastificante para verificar possíveis melhoras nas propriedades da argamassa no estado fresco. O aditivo escolhido



Figura 11 – Aspecto da 4ª mistura com superplastificante = 0.5% e a/c = 0.45.

foi o G 51 que, de acordo com as especificações do fabricante, é um superplastificante a base de policarboxilatos cuja quantidade deve ser de 0.5 a 0.8 litros para cada 100 kg de cimento. A exemplo do traço com plastificante, fez-se tentativas com duas dosagens do aditivo, 0.65 e 0.5 ml por 100 gramas de cimento. Os fatores a/c testados foram de 0.45 e 0.5.

Resultados: Os resultados obtidos com o uso do superplastificante foram sensivelmente melhores que os com o uso do plastificante (figura 11), mesmo quando se fez uso da dosagem mínima de superplastificante recomendada. Apenas 1.5 ml (a taxa mínima)

do aditivo para 300 gramas de material cimentante foram suficientes para elevar em

mais de dois centímetros o diâmetro médio do ensaio de consistência em relação ao traço com aditivo plastificante. O superplastificante ainda se mostrou mais vantajoso no aspecto visual da massa fresca, que não apresentava segregação ou embolotamento e sua manuseabilidade com a espátula era fácil dado o aspecto tixotrópico da argamassa.

Com isso, o traço com sílica escolhido estava fixado em 1:2.5, com fator a/c de 0.45 e utilização do aditivo superplastificante G 51 em sua dosagem mínima para não tornar a argamassa desnecessariamente cara. Fazia-se importante, então, definir o traço da argamassa sem sílica ativa, que serviria de baliza para comparar o desempenho das argamassas. É importante que em ensaios comparativos, as partes concorrentes compartilhem ao máximo das mesmas condições para que não haja favorecimento que possa mascarar o resultado dos testes. Ainda assim, uma argamassa com sílica sempre vai ser diferente de uma argamassa sem essa adição, então, optou-se por tentar fazer uma argamassa convencional que fosse constituída dos mesmos componentes da argamassa com sílica e que possuísse propriedades semelhantes no estado fresco.

3.3.5. 5ª Mistura

Traço 1:2.5 com 0% de sílica.

Descrição: numa primeira tentativa, retirou-se somente a sílica da mistura 4, compensando sua ausência com cimento para manter o traço de uma parte de cimento para duas partes e meia de areia peneirada e seca. Todos os outros ingredientes da argamassa (0.5% de superplastificante, em ml/g, e fator a/c de 0.45) foram mantidos constantes.



Figura 12 – Aspecto da 5ª mistura com superplastificante = 0.5% e a/c = 0.45.

Resultados: os resultados mostraram que a massa adquiriu uma fluidez muito grande (figura 12), obtendo valores no ensaio de consistência de 33.2, 33.7 e 34.2 centímetros sem perder a homogeneidade nem segregar. Isto foi interessante em dois aspectos. Primeiro, a grande fluidez alcançada pela argamassa, mesmo usando a dosagem mínima de superplastificante, prova que a sílica ativa tem um papel muito importante na trabalhabilidade da massa, em geral, piorando a mesma.

Em segundo lugar, esse ensaio mostrou que era necessário substituir (ou até eliminar) o aditivo ou reduzir sua quantidade abaixo da especificada pelo fabricante para se tentar alcançar uma consistência compatível com a obtida na argamassa com sílica ativa. Por motivos de assemelhar as condições das argamassas com e sem a adição de sílica, decidiu-se por reduzir ainda mais o aditivo superplastificante.

3.3.6. 6ª Mistura

Traço 1:2.5 com 0% de sílica

Descrição: para esta mistura a quantidade de superplastificante G 51 foi reduzida a 1/5 do mínimo recomendado pelo fabricante, resultando em 0.1 ml de aditivo para cada 100 gramas de cimento. Todos os outros componentes foram mantidos constantes.



Figura 13 – Aspecto da 6ª mistura com superplastificante = 0.1% e a/c = 0.45.

Resultados: a diminuição do superplastificante mostrou resultados e aspecto satisfatórios, como ilustra a figura 13, com diâmetros de 21.1, 21.4 e 21.4 centímetros no ensaio de consistência. Mesmo sendo esses valores um pouco maiores que os obtidos

com a sílica, essa diferença pode ser ignorada uma vez que a aparência das massas e tixotropia estavam em níveis muito próximos. Dessa maneira, este foi o traço escolhido para a moldagem dos elementos de argamassa sem o uso da sílica ativa.

Assim, os traços experimentados e o escolhido estão representados na tabela 14. Os valores entre colchetes indicam o consumo de cada material necessário à moldagem de 24 corpos de prova e 3 placas.

Tabela 14 - Traços e consumos dos materiais.

Mistura	Tipo de Argamassa	Traço (em massa)	Quantidade de Sílica ¹	Água	Plastificante ou Superplastificante ²
1	Argamassa com sílica	1:2.5	6%	0.5	0%
2	Argamassa com sílica	1:2	6%	0.5	0%
3	Argamassa com sílica	1:2.5	6%	0.4	0.6% P
				0.45	0.6% P
				0.5	0.6% P
				0.4	1.0% P
				0.45	1.0% P
				0.5	1.0% P
4	Argamassa com sílica	1:2.5	6%	0.45	0.5% SP
				0.5	0.5% SP
5	Argamassa sem sílica	1:2.5	0%	0.45	0.5% SP
6	Argamassa sem sílica	1:2.5	0%	0.45	0.1% SP
Mistura proposta	Argamassa com sílica	1:2.5 [10kg:25kg] ³	6% [600g]	0.45 [4.5 litros]	0.5% SP (ml/g) [50ml]
	Argamassa sem sílica	1:2.5 [10kg:25kg]	0%	0.45 [4.5 litros]	0.1% SP (ml/g) [10ml]

¹ A quantidade de sílica é em relação à massa de cimento e é usada em substituição de parte dessa massa.

² P = PLATIFICANTE; SP = SUPERPLASTIFICANTE.

³ Os 10 kg referem-se ao material cimentante total, ou seja, 9.4 kg de cimento e 600 g de sílica ativa.

3.4. Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados de acordo com a norma NBR 5738:1994 – **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**, que foi recentemente substituída. A norma antiga foi adotada pelo fato de que, no momento da moldagem dos primeiros corpos-de-prova, a norma nova ainda estava em período de implantação e as novas fôrmas, necessárias para moldar os corpos de prova de acordo com ela, ainda não estavam disponíveis.

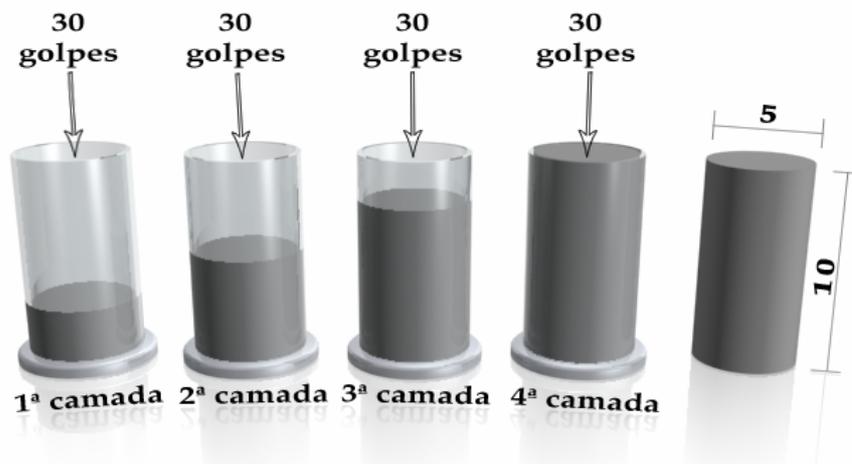


Figura 14 – Método de produção dos corpos-de-prova cilíndricos. (medidas em centímetros)



Figura 15 – Corpos de prova moldados à espera da desfôrma.

As dimensões dos corpos-de-prova cilíndricos era de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro em sua base, sendo moldados em quatro camadas de massa no estado fresco e cada camada recebendo 30 golpes de bastão padronizado para fins de adensamento da

argamassa, como ilustra a figura 14. Após este procedimento, as fôrmas, já completas de argamassa, eram cobertas com placas de vidro e deixadas por 24 horas em descanso até o desmolde (figura 15).

A moldagem das placas necessitou de fôrmas especialmente manufaturadas para este fim. Elas foram feitas de madeira compensada embebida em impermeabilizante e, depois, revestidas com fórmica (figura 16). Todo o conjunto era aparafusado para facilitar a operação de desmolde e reuso das fôrmas. As placas foram



Figura 16 – Fôrmas para moldagem das placas.

moldadas nas dimensões de 50 x 15 x 4 cm, com uma armadura de aço em forma de grade distante 1 cm da face inferior, como mostra a figura 17.

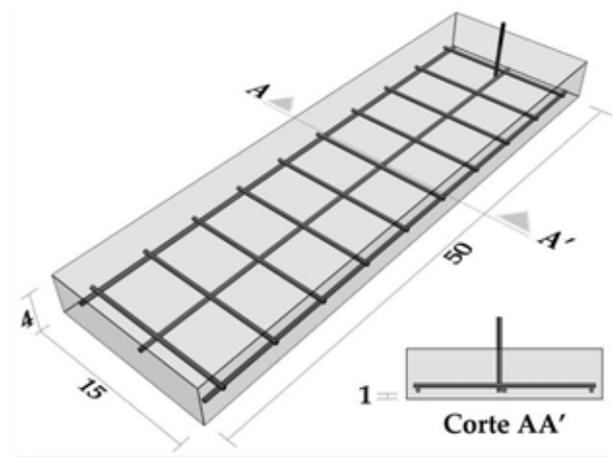


Figura 17 - Placa de argamassa.
(medidas em cm)

A armadura foi feita a partir de uma grade de aço já pré-fabricada, mas com abertura de malha de 10 cm. Esta distância entre as barras não se mostrava adequada para conferir resistência à placa e talvez dificultasse a execução do ensaio de potencial de corrosão. Dessa forma, soldaram-se barras de ferro no mesmo diâmetro da armadura da grade para dividir a malha ainda mais, conferindo à armadura final uma abertura de 5

cm. Uma pequena barra saliente foi também soldada para, mais tarde, realizar o ensaio de potencial de corrosão. Essa pequena barra foi envolta em uma grossa camada de fita isolante antes da moldagem para minimizar seu contato com o ambiente de exposição.

As placas foram moldadas em paralelo com os corpos de prova cilíndricos para reduzir, ao mínimo, possíveis variações na composição da argamassa. O adensamento foi efetuado com auxílio de uma mesa vibratória até que a massa adquirisse um assentamento adequado e pouca liberação de bolhas (figura 18). Após cerca de vinte minutos de descanso, a face superior das placas, que normalmente ficava saturada de bolhas, era aplainada com colher de pedreiro para melhorar o aspecto final da peça e evitar a formação de uma camada frágil e porosa. As placas, a exemplo dos corpos de prova, também foram mantidas por 24 horas em suas fôrmas até o desmolde.

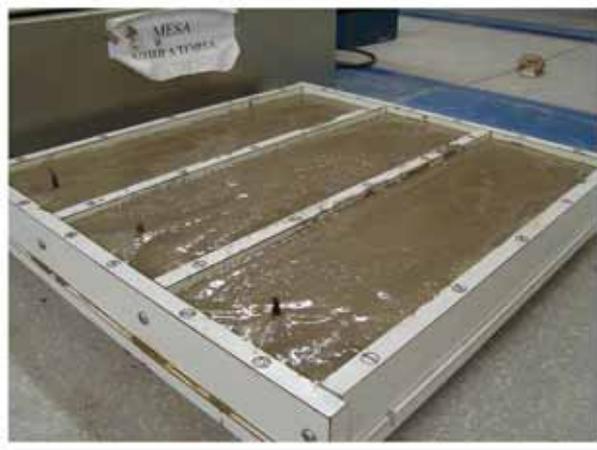


Figura 18 – Argamassa colocada nas fôrmas.

A existência de bolhas, por vezes excessiva, foi explicada pelo fabricante do aditivo superplastificante G 51. Ele informou que tal substância estava reagindo de maneira não prevista com a areia local e disponível no laboratório do NPT, formando bolhas de ar. É bem sabido que aditivos incorporadores de ar também melhoram a trabalhabilidade da mistura em estado fresco sem comprometer, de maneira significativa, a durabilidade da argamassa ou concreto.

Mais tarde, uma investigação dos corpos-de-prova rompidos mostraria que estas bolhas se limitaram à parte mais superficial e de contato com os moldes, sem atingir a matriz cimentante. O fabricante prontamente disponibilizou um outro aditivo superplastificante que, segundo ele, estava adaptado às condições da areia em questão.

Infelizmente, em virtude de um grande número de amostras já moldadas e expostas, decidiu-se não adotar este novo aditivo.

3.5. Programa experimental

Selecionar os ensaios pertinentes para alcançar o objetivo do estudo é essencial a qualquer pesquisa científica. Quando se investiga o comportamento de estruturas de concreto ou argamassa é quase imperativo que se façam considerações sobre a resistência à compressão destas, visto que esta propriedade é a mais explorada em estruturas reais que fazem uso dos materiais em questão. Porém, a resistência à compressão de concretos e argamassas não é algo alienável de suas outras propriedades – pelo contrário, é reflexo direto da coesão entre as fases e dos elementos químicos que compõem a matriz e os agregados e, portanto, um bom indicativo do estado de deterioração do material.

Não obstante, a resistência à compressão, mesmo sendo muito importante, não é a única propriedade que deve ser buscada para suprir as necessidades de uma estrutura. A resistência à tração deve ser cuidadosamente ponderada quando se quiser evitar formação de microfissuras que podem servir de entrada para agentes agressivos, como os cloretos, sulfatos, ácidos, além de água. A penetração de alguns destes agentes, por sua vez, pode afetar a resistividade elétrica da estrutura. Se esta resistividade cair, uma diferença de potencial pode nascer entre partes diferentes da peça e iniciar um processo corrosivo.

Como o ambiente marinho é notório por se altamente agressivo ao aço de estruturas armadas, decidiu-se utilizar o método do potencial de corrosão para tentar medir uma provável deterioração por corrosão das placas de argamassa armada. Para tanto, decidiu-se utilizar como guia a norma C 876 – 91 da ASTM, **Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. Tal norma exige o seguinte aparato para realizar o ensaio:

- Um eletrodo de cobre-cobre sulfato, composto de um tubo rígido (e aberto dos dois lados) feito de material dielétrico (como vidro), um eletrólito a base de sulfato de cobre saturado em água destilada ou deionizada, uma placa de cobre com dimensões que permitam entrar no tubo sem tocar suas paredes e um

fundo para o eletrodo, feito de material poroso que permita a passagem do eletrólito por capilaridade;

- Um meio de contato entre o fundo do eletrodo e a amostra. Ele deve apresentar pouca resistência elétrica de modo a não interferir, significativamente, nos resultados. A norma aconselha o uso de uma ou várias esponjas embebidas em solução de baixa resistividade;
- Uma solução de contato elétrico, feita de uma mistura de detergente caseiro com água potável, para umedecer a interface entre a amostra e o eletrodo;
- Um voltímetro a bateria, com precisão mínima de 0.02 V ou menos e impedância maior que 10 MΩ quando operado numa escala de 100 mV.
- Condutores cuja resistência elétrica não perturbe o circuito em mais de 0.0001 V.

Os materiais e equipamentos utilizados neste ensaio são mostrados na figura 19. O procedimento de medição consiste em conectar o terminal positivo do multímetro a uma barra de aço da argamassa ou concreto armado a ser testado. É recomendado realizar uma pequena raspagem no contato da armadura para assegurar uma ligação sem interferências de produtos de corrosão ou outro material isolante.



Figura 19 – Equipamentos e materiais empregados no ensaio de potencial de corrosão.

O pólo negativo do multímetro deve ser conectado à barra de cobre que está no interior do eletrodo e o outro pólo posicionado sobre a amostra em teste. A leitura do

multímetro deve estar estável num faixa de ± 0.02 V por, pelo menos, cinco minutos antes do valor ser considerado válido. Se houver flutuação da voltagem medida, deve-se umedecer o concreto ou argamassa até que haja estabilização no multímetro.

De acordo com a ASTM C 876 – 91, os resultados podem ser interpretados de três maneiras diferentes, de acordo com a Técnica de Magnitude Numérica⁷:

- Se os potenciais de corrosão encontrados forem maiores que $- 0.20$ V CSE (*copper-copper sulfate electrode*) então existe uma probabilidade maior que 90% de que não esteja ocorrendo corrosão no aço da armadura naquele momento e região de medição.
- Se os potenciais aferidos estiverem entre $- 0.20$ e $- 0.35$ V CSE, então a corrosão da armadura naquela região é incerta;
- Se os potenciais de corrosão de determinada área forem mais negativos que $- 0.35$ V CSE, então a probabilidade de que o aço dessa região esteja em processo corrosivo é superior a 90%.

É salientado na referida norma que o ensaio de potencial de corrosão pode não ser definitivo. Em determinadas condições – como concreto ou argamassas carbonatadas até o nível das armaduras, onde os elementos estão saturados de água ou submetidos a altas concentrações de cloretos – é necessário que um profissional com experiência em corrosão verifique os resultados. Também se recomendam ensaios complementares a exemplo do teste de profundidade de carbonatação, teor de cloretos e/ou, até mesmo, destruição parcial da peça para verificação do estado das armaduras.

O inevitável contato do concreto e da argamassa com o meio externo traz conseqüências aos compostos da matriz que devem ser considerados e estudados para melhor compreender as transformações que a matriz cimentante sofre e aplicar corretamente os materiais. Muitas vezes, a estrutura química da pasta e suas alterações guardam dados importantes para o entendimento de mudanças sentidas nas propriedades físicas da estrutura, como resistência à compressão e módulo de elasticidade. Um dos ensaios usado para este fim é o de Difração de Raios X, mostrado por MEHTA & MONTEIRO (1994) ao analisar o clínquer do cimento e amostras de uma barragem deteriorada por ataque de sulfatos. Este procedimento foi também empregado em

⁷ *Numeric Magnitude Technique*, como referenciado na ASTM C 876-91.

massas com adição de sílica por LILKOV, DIMITROVA & PETROV (1997); LEE, MOON & SWAMY (2005); GANJIAN & POUYA (2004) e DOTTO *et al.* (2004).

Assim, os ensaios das argamassas foram divididos em duas categorias – os ensaios físicos e os químicos – para aferir parâmetros que qualifiquem e quantifiquem a durabilidade dos elementos em estudo. Os ensaios físicos consistiam em medir características mecânicas das argamassas, como a resistência à compressão, tração e o módulo de elasticidade. Os ensaios químicos serviram para avaliar variações nas fases da argamassa (com a Difração de Raios X) e possível suscetibilidade à corrosão das armaduras com o ensaio de potencial de corrosão.

As datas pré-determinadas para realização dos ensaios foram de 07, 28, 91, 135, e 180 dias para a avaliação das propriedades físicas (com mudança da idade de 7 para 14 dias em circunstância do calendário de visitas à Braskem), 28, 91, 135 e 180 dias para os testes de potencial de corrosão e 28, 91 e 180 dias para os ensaios de difração de raios X. Assim, para cada idade, a figura 20 ilustra os ensaios realizados para cada lote dos elementos de argamassa.

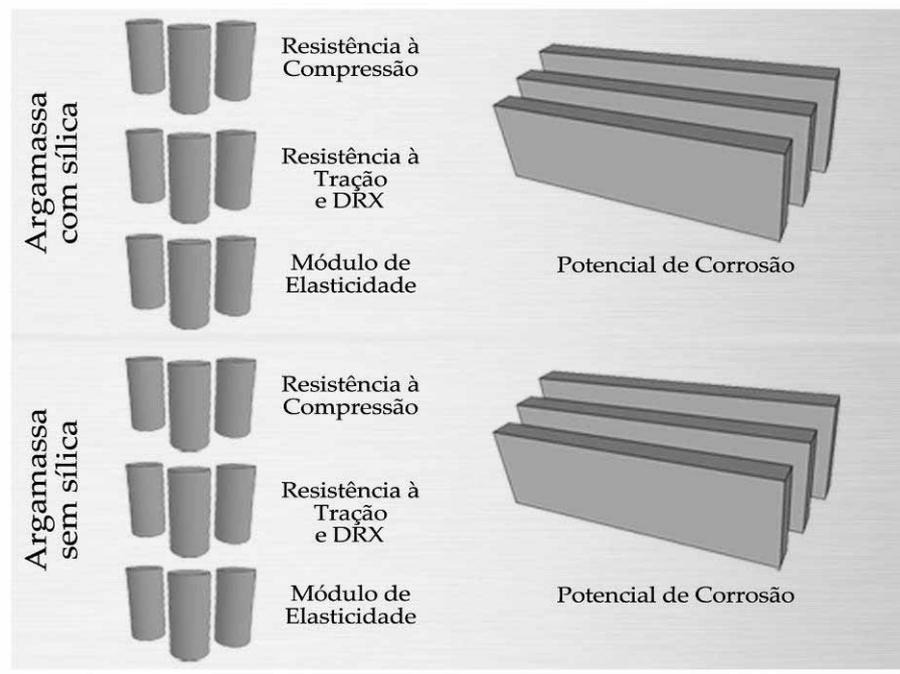


Figura 20 - Esquema geral dos corpos de prova e placas de argamassa.

3.6. Ambiente de exposição e acomodação das argamassas

Após serem desmoldados, os corpos de prova e as placas precisavam ser levados até seu ambiente de exposição final em, no máximo, dois dias. O local a ser escolhido precisava ter vigilância e possuir um cais ou píer que facilitasse a colocação e retirada das argamassas, além de permitir que os corpos de prova ficassem num local de variação de maré. O quebra-mar do píer localizado no bairro do Pontal (figura 21), pertencente à companhia Braskem, atendia a esses parâmetros.



Figura 21 – Quebra-mar e píer da Braskem.

A água do mar, conhecida por sua elevada agressividade ao concreto e argamassa, é monitorada periodicamente pela empresa. Sua concentração dos principais íons foi relatada como muito próxima da média mundial, mostrada na tabela 15. Os dados cedidos pela Braskem (tabela 16) não contemplam, de maneira satisfatória, todos os parâmetros, mas servem como referência para informações como pH, salinidade e temperatura diurna, em função da profundidade aferida.

Tabela 15 – Concentração dos principais componentes da água do mar (para salinidade = 35 e pH = 8.1).

Fonte: Adaptado de U.S. DOE¹ (1994).

Componente	Concentração (mol/kg)	Componente	Concentração (mol/kg)
H ₂ O	53.6	Ca ²⁺	0.0103
Cl ⁻	0.546	K ⁺	0.0102
Na ⁺	0.469	Br ⁻	0.00084
Mg ²⁺	0.0528	Sr ²⁺	0.000091
SO ₄ ²⁻	0.0282	F ⁻	0.000068

¹ United States Department of Energy

Tabela 16 – Concentração dos principais componentes da água do mar.

Fonte: Adaptado de estudos da QUALITEX Engenharia e Serviços.

Profundidade (m)	Temperatura °C	Salinidade	pH
0	29.3	34	8.2
1	29.1	34	8.2
2	29.0	34	8.2
3	28.9	34	8.2
4	28.8	35	8.2
5	28.7	35	8.2
6	28.6	35	8.2
7	28.6	35	8.2
8	28.5	35	8.2
9	28.5	35	8.1
10	28.5	35	8.1
11	28.4	35	8.1
12	28.4	35	8.1
13	28.4	35	8.1
14	28.4	35	8.1
15	28.4	35	8.1

Com a autorização para fazer uso do píer nesta pesquisa, necessitou-se acondicionar os corpos de prova (CP) e placas de maneira que estes ficassem estáveis e seguros, livres dos choques excessivos causados pelas ondulações e aptos a interagirem com o ambiente. Para os corpos de prova cilíndricos foram usadas caixas de refrigerantes, com cada CP ocupando a vaga originalmente desenhada para uma garrafa, como mostra a figura 22. Por fim, uma grade de nylon era costurada na abertura superior da caixa para prevenir que corpos de prova fossem perdidos.

**Figura 22 – Caixa com corpos de prova cilíndricos.**

As placas não poderiam ser colocadas no mesmo recipiente dos corpos de prova – neste caso obteve-se uma caixa de plástico maior (com características muito semelhantes às de refrigerante) e as placas foram colocadas lado a lado, com mangueiras de jardim entre elas, servindo de amortecedor (figura 23). Cada caixa comporta 5 placas e, devido ao grande peso total, não era preciso costurar uma grade, bastava amarrar uma mangueira por cima de todas as placas, unificando o conjunto.



Figura 23 – Caixa com placas de argamassa armada.

O píer da Braskem é uma estrutura preparada para atracar grandes embarcações e mantê-las estáveis para que produtos químicos sejam embarcados ou coletados. Sua funcionalidade depende do enrocamento (ou quebra-mar) que é uma base de blocos de rocha responsável por sustentar três ancoradouros, feitos em concreto armado, e um farol. As regiões do quebra-mar próximas aos ancoradouros mostraram-se ideais para acomodar as caixas com os elementos de argamassa.

Observando a linha d'água demarcada nas rochas, as caixas foram içadas com cordas até a zona de variação de maré e, em seguida, descia-se até elas para colocá-las em uma posição que impedisse ao máximo sua movimentação pelas ondas. Por fim, as várias caixas foram amarradas individualmente ao *dolfim* de atracação e uma corda mais grossa juntou-as todas para formar um conjunto monolítico e mais resistente às ondulações. O processo é ilustrado nas figuras 24 a 27. Para acomodar todos os 90 corpos de prova e 24 placas utilizou-se dois dos ancoradouros disponíveis.

A retirada dos elementos de argamassa foi feita sem remover as caixas – essas foram preenchidas com pequenas rochas à medida que se esvaziavam para assegurar um peso mínimo ao grupo.



Figura 24 – Descendo uma das caixas.



Figura 25 – Caixas dentro da zona da maré.



Figura 26 – Acomodação e amarração das caixas em conjunto.



Figura 27 – Caixas amarradas e em posição final na maré baixa.



Capítulo 4

Capítulo 4

Resultados experimentais

Neste capítulo, dividido em cinco partes, são mostrados os resultados através dos ensaios realizados com os elementos de argamassa. Cada idade de testes consistiu em avaliar os aspectos mecânicos de nove corpos de prova cilíndricos (3 para a cada ensaio de compressão, tração e módulo, como mostra a figura 28), o potencial de corrosão de 3 placas de argamassa armada e as fases presentes nas argamassas por difração de raios X.



Figura 28 – Corpos de prova separados para os ensaios de propriedades mecânicas.

4.1. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu o procedimento determinado pela NBR 5739:1994 – **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos** e foi efetuado com auxílio da máquina EMIC modelo DL 3000. Cada ensaio (mostrado na figura 29 e 30) foi realizado com, no mínimo, três corpos de prova capeados nas faces superior e inferior por uma mistura de cimento e enxofre. Isso ajudou a minimizar

desvios e assegurar maior confiança aos resultados. As resistências obtidas constam na tabela 17 e no gráfico 4.



Figura 29 – Ensaio de compressão em CP sem sílica ativa.



Figura 30 – Ensaio de compressão em CP com sílica ativa.

Tabela 17 - Resistência à compressão das argamassas.

Os valores em negrito representam a média dos três corpos de prova e σ corresponde ao desvio padrão.

Tipo de Argamassa	Resistência à Compressão (MPa)														
	14 Dias			28 Dias			91 Dias			135 Dias			180 Dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Com Sílica	47.1	47.3	46.4	54.3	54.3	52.7	55.3	52.5	54.9	45.2	39.2	46.7	42.0	38.3	39.2
	$\sigma = 0.47$			$\sigma = 0.92$			$\sigma = 1.51$			$\sigma = 3.97$			$\sigma = 1.93$		
	46.93			53.77			54.23			43.70			39.04		
Sem Sílica	46.7	46.5	45.8	48.4	45.2	47.4	47.4	48.6	47.9	48.6	45.4	47.8	52.6	49.8	52.5
	$\sigma = 0.47$			$\sigma = 1.64$			$\sigma = 0.60$			$\sigma = 1.67$			$\sigma = 1.59$		
	46.33			47.00			47.97			47.27			51.63		

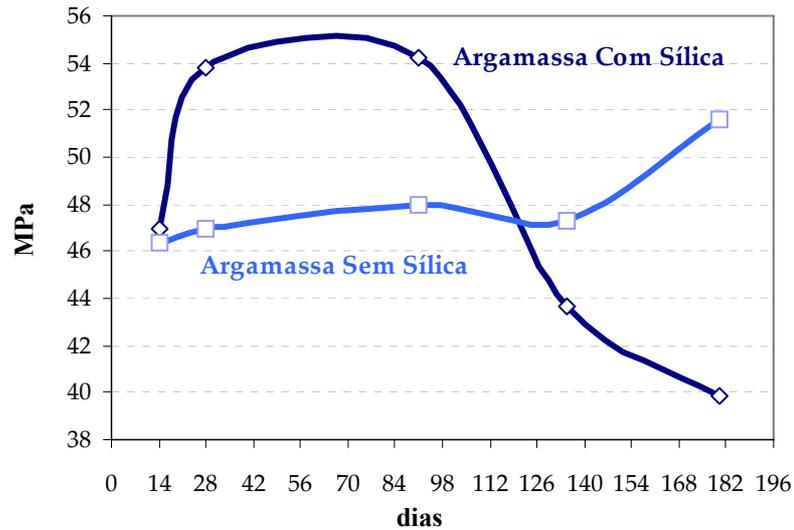


Gráfico 4 - Evolução da resistência média à compressão das argamassas.

4.2. Resistência à tração

Para avaliar a resistência à tração dos corpos de prova cilíndricos, obedeceu-se aos procedimentos descritos na NBR 7222:1994 – **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. O ensaio (figura 31) também foi realizado com, no mínimo, três corpos de prova e, no caso da resistência à tração, não era necessário capear os CPs – isto fez deles candidatos ideais como fonte de amostras a fim de servir ao ensaio de difração de raios X, visto que neles não havia contaminação de enxofre do capeamento. A tabela 18 e o gráfico 5 ilustram a evolução da resistência à tração.



Figura 31 – Ensaio de tração.

Tabela 18 - Resistência à tração das argamassas.
Os valores em negrito representam a média dos três corpos de prova e σ corresponde ao desvio padrão.

Tipo de Argamassa	Resistência à Tração (MPa)														
	14 Dias			28 Dias			91 Dias			135 Dias			180 Dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Com Sílica	5.3	5.4	4.9	4.7	5.2	5.0	5.5	5.1	5.1	5.2	4.9	5.5	4.9	4.8	5.4
	$\sigma = 0.26$			$\sigma = 0.25$			$\sigma = 0.23$			$\sigma = 0.30$			$\sigma = 0.32$		
	5.20			4.97			5.23			5.20			5.03		
Sem Sílica	4.3	4.1	4.8	4.9	4.7	5.4	4.3	4.4	4.6	3.6	3.2	3.4	4.8	5.2	5.1
	$\sigma = 0.36$			$\sigma = 0.36$			$\sigma = 0.15$			$\sigma = 0.20$			$\sigma = 0.21$		
	4.40			5.00			4.43			3.40			5.04		

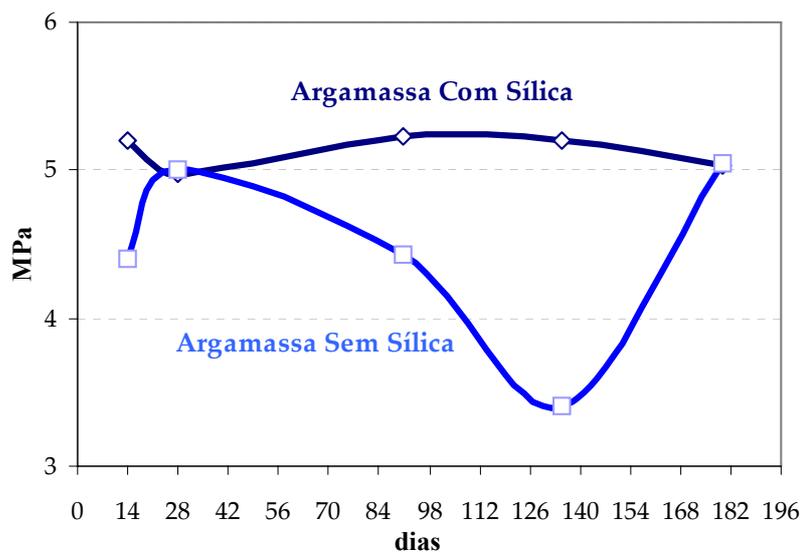


Gráfico 5 - Evolução da resistência média à tração das argamassas.

Após o rompimento à tração, alguns corpos de prova, em especial os de idade mais avançada, mostraram sinais escuros nas regiões mais externas de sua seção fraturada, como mostra a figura 32. Esse fenômeno foi sensivelmente mais intenso nos corpos de prova com períodos de exposição acima dos 135 dias e que tinham de sílica ativa em suas misturas. Não se percebeu tal ocorrência nos elementos de argamassa convencional.



Figura 32 – Corpos de prova com sílica aos 135 dias, rompidos à tração.

4.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma propriedade fundamental para o dimensionamento de estruturas. É com o módulo de elasticidade que se podem prever as deformações de pilares, vigas e lajes e, com isso, adequar as dimensões das peças às necessidades do projeto.

Os ensaios para determinar o módulo de elasticidade das peças de argamassa seguiram as orientações da NBR 8522:2003 – **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação**. Vale ressaltar que, a referida norma se aplica, primordialmente, à determinação do módulo de elasticidade para estruturas de concreto. Dada a inexistência de uma norma similar dedicada às argamassas, e visto que os testes são comparativos, decidiu-se por usar esta norma como guia nos procedimentos experimentais.

O módulo de elasticidade necessitava ser determinado após os ensaios de compressão, uma vez que, os resultados destes eram pré-requisitos para aferir o módulo. Com as resistências à compressão de, pelo menos, três corpos de prova, fez-se a média da resistência e multiplicou-se por 0.30. Esse dado foi inserido no *script* de programação da máquina EMIC que seguiu o procedimento determinado pela norma –

manter, durante 60 segundos, um carregamento equivalente a 30% da carga de ruptura, aliviar o esforço até 0.5% desta carga por 60 segundos, repetindo este procedimento por três vezes, como mostra a figura 33. Ao final do ensaio, cada CP eram rompido à compressão para verificar se sua resistência convergia para a média calculada antes.



Figura 33 – Ensaio do módulo de elasticidade.

A tabela 19 e mostra o comportamento deste parâmetro e sua variação para as idades de 14, 28 e 91 dias. Nota-se que os valores do módulo de elasticidade a partir da idade de 91 dias da argamassa com sílica e 135 dias para a argamassa sem sílica não constam na tabela. Infelizmente, problemas técnicos impossibilitaram encontrar o módulo pelos mesmos meios empregados até então.

Tabela19 – Módulo de elasticidade das argamassas.

Os valores em negrito representam a média dos três corpos de prova e σ corresponde ao desvio padrão.

Tipo de Argamassa	Módulo de Elasticidade (GPa)														
	14 Dias			28 Dias			91 Dias			135 Dias			180 Dias		
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Com Sílica	35.9	36.3	36.8	38.1	36.8	37.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\sigma = 0.45$			$\sigma = 0.67$			-			-			-		
	36.33			37.48			-			-			-		
Sem Sílica	35.5	34.5	34.9	35.8	34.5	35.6	37.9	36.4	38.7	-	-	-	-	-	-
	$\sigma = 0.50$			$\sigma = 0.70$			$\sigma = 1.17$			-			-		
	34.97			35.30			37.67			-			-		

Com a impossibilidade de determinar empiricamente o módulo de elasticidade, decidiu-se tentar encontrá-lo através da formulação apresentada pela **Norma 6118 – Projeto de Estrutura de Concreto**.

$$E_{ci} = 5600 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (12)$$

Na expressão acima (equação 12), E_{ci} corresponde ao módulo de elasticidade e f_{ck} à resistência característica do concreto. Antes de calcular os valores incógnitos é necessário verificar se os resultados obtidos através desta equação são condizentes com os valores encontrados experimentalmente (tabela 20).

Tabela 20 - Comparação do módulo de elasticidade experimental e calculado.

Tipo de Argamassa	Idade (Dias)	Módulo de Elasticidade Experimental (MEE - GPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade Calculado (MEC - GPa)	Diferença $\frac{MEC}{MEE} - 1$
Argamassa com sílica	14	36.33	46.93	38.36	6%
	28	37.48	53.77	41.06	10%
	91	-	54.23	41.24	-
	135	-	43.70	37.02	-
	180	-	39.04	34.99	-
Argamassa sem sílica	14	34.97	46.33	38.12	9%
	28	35.30	47.00	38.39	9%
	91	37.67	47.97	38.79	3%
	135	-	47.24	38.49	-
	180	-	51.63	40.24	-

De acordo com a tabela, pode-se ver que a formulação proposta pela norma tende a fornecer resultados um pouco maiores que os obtidos através do ensaio de laboratório. Alguns desses resultados apresentam diferença muito pequena entre si, como o caso da argamassa sem sílica a 91 dias de idade, enquanto que em outros tipos/idades de argamassa, essa diferença pode chegar 10%. Em média, uma compensação de 7.2% para menos nos valores encontrados pela equação 12 pode aproximar melhor os resultados empíricos dos calculados, como mostrado na tabela 21.

Analisando os novos valores, vê-se que o intervalo de confiança foi reduzido para um valor mínimo de -4.4% e máximo de 1.7% em relação ao valor exato. Aplicando a fórmula diretamente resultou em valores sempre maiores e com variação de 3% a 10%. O gráfico 5 ilustra a dispersão, em módulo, da relação entre aos resultados dos ensaios e os valores calculados pela norma e os compensados.

Tabela 21 - Comparação do módulo de elasticidade experimental, calculado e compensado.

	Idade (Dias)	Módulo de Elasticidade Experimental (MEE - GPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade Calculado (MEC - GPa)	Módulo de Elasticidade Compensado (MECO - GPa)	Diferença $\frac{MECO}{MEE} - 1$
Argamassa com sílica	14	36.14	46.93	38.36	35.60	-2.0%
	28	37.57	53.77	41.06	38.10	+1.7%
	91	-	54.23	41.24	38.27	-
	135	-	43.70	37.02	34.35	-
	180	-	39.04	34.99	32.47	-
Argamassa sem sílica	14	34.94	46.33	38.12	35.38	+1.2%
	28	35.17	47.00	38.39	35.63	+1.0%
	91	37.64	47.97	38.79	36.00	-4.4%
	135	-	47.24	38.49	35.72	-
	180	-	51.63	40.24	37.34	-

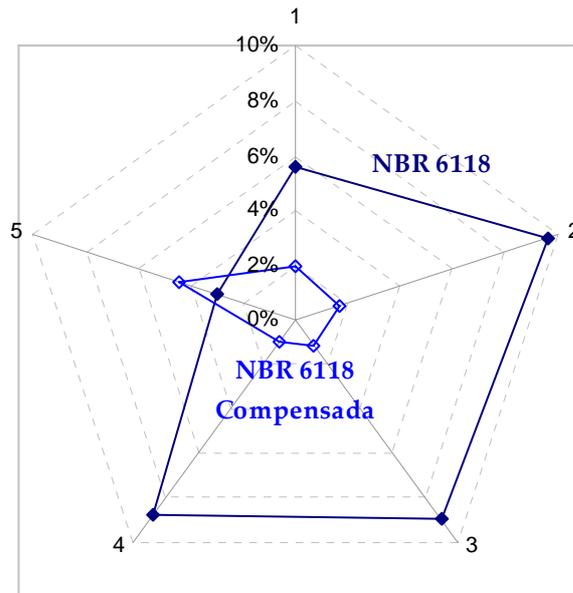


Gráfico 6 – Dispersão dos valores do módulo de elasticidade.

Ainda de acordo com o gráfico 6, quanto mais próximo estiverem os valores do centro, marcado como 0%, mais perto eles estarão do valor real obtido no ensaio de módulo de elasticidade. Vê-se que, a compensação aplicada trouxe os valores para uma área menor e mais compacta de erro, fortalecendo a premissa de, com esta metodologia, encontrar os valores até então incógnitos.

4.4. Potencial de corrosão

O ensaio de potencial de corrosão foi realizado nas placas de argamassa armadas e utilizou, assim como nos demais testes, pelo menos, três amostras para cada série. Os testes foram realizados tão logo as placas atingiam a idade adequada que, neste caso, foram adotadas como 28, 91, 135 e 180 dias. Vale ressaltar que a idade de 14 dias não foi considerada por apresentar valores muito semelhantes à de 28 dias.

No laboratório, as placas foram submersas em água potável durante o tempo que esperavam para ser ensaiadas. Este procedimento facilita uma leitura mais rápida e precisa dos potenciais por evitar a diminuição excessiva da umidade interna dos elementos. Esta atitude também se justifica pelo fato de que o ambiente de exposição das placas apresenta umidade relativa do ar muito elevada – praticamente 100% durante todo o tempo. Elas permaneciam imersas antes do ensaio por, no máximo, dois dias.

Antes de realizar um ensaio as presilhas de contatos dos cabos, que ligavam o multímetro ao eletrodo e à amostra, foram raspadas e limpas de qualquer resíduo de

corrosão. Elas ainda foram ligadas, em contato direto, para verificar se a leitura no multímetro mostrava 0.00 V e permanecia estável neste valor por, no mínimo, 1 minuto. Este procedimento garantia que não houvesse diferença de potencial medida pelo equipamento que não se originasse na placa de argamassa armada.

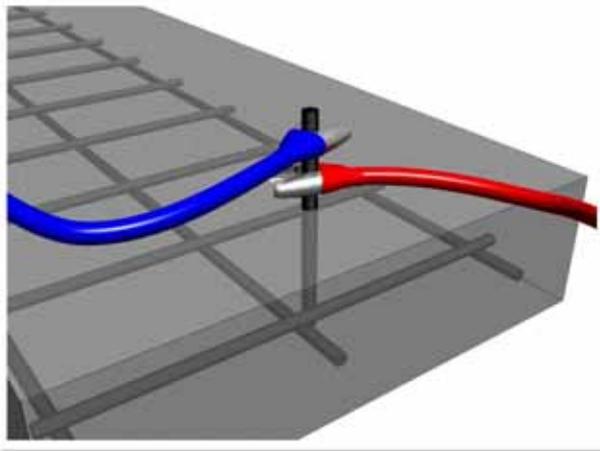


Figura 34 – Ligação dos pólos na mesma barra.

Logo após, a barra de ferro saliente – destinada a se ligar com o pólo positivo do multímetro – teve sua fita isolante retirada e foi também raspada para remover resíduos de corrosão. Para assegurar um contato ideal entre a barra exposta e os pólos do multímetro, conferia-se a limpeza da barra, ligando a esta as duas presilhas

do equipamento, como mostra a figura 34. Se o aparelho não indicasse 0.00 V, o processo de raspagem repetia-se até que esta voltagem fosse conseguida.

A medição realizou-se em quatro pontos distintos das placas, sendo dois na face onde a armadura distava 3 centímetros da superfície e dois na face distante 1 centímetro, como indicado na figura 35. O eletrodo permanecia sobre cada ponto durante todo o teste até que o multímetro exibisse a mesma voltagem (com tolerância de 0.02 V para mais ou para menos) por, no mínimo, 5 minutos, conforme sugerido pela ASTM C 876 – 91. O contato entre o eletrodo e a argamassa deveria estar devidamente umedecido para permitir tal estabilidade nas medições.

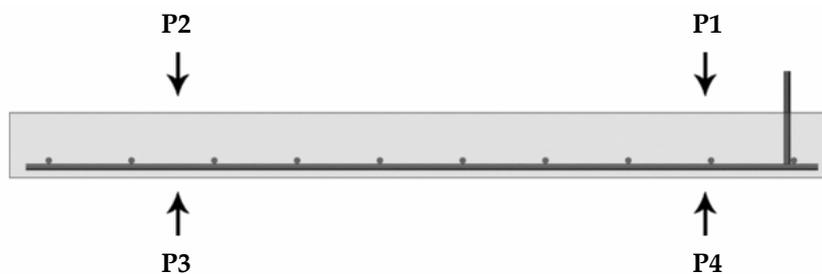


Figura 35 – Pontos de medida do potencial de corrosão.

Os resultados para as idades de ensaio nos diferentes pontos de medição são apresentados na tabela 22 e nos gráficos 7 e 8.

Tabela 22 – Potencial de corrosão das argamassas.

Tipo de Argamassa	Potencial (-mV CSE ¹)							
	28 Dias		91 Dias		135 Dias		180 Dias	
Argamassa com sílica	267	253.6	323.7	293.4	358.5	345.1	296.8	278.9
	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1
	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4
	288.5	279.4	202	216.2	302.5	275	245.6	248.4
Argamassa sem sílica	258.1	248.5	316.8	275.7	339.6	345.5	465.5	467.7
	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1
	P3	P4	P3	P4	P3	P4	P3	P4
	285.5	289	186.8	129.4	280	336	367.7	425.3

¹ Cu/CuSO₄.

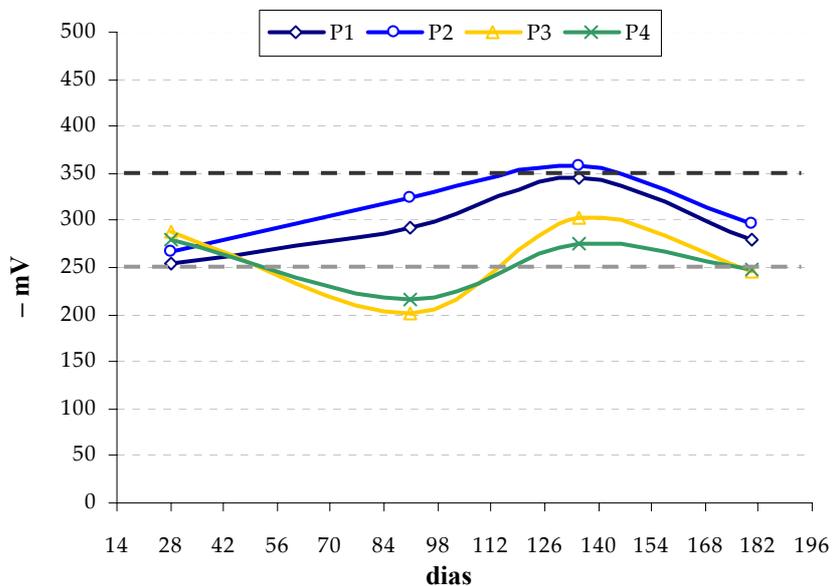


Gráfico 7 – Potencial de corrosão da argamassa com sílica.

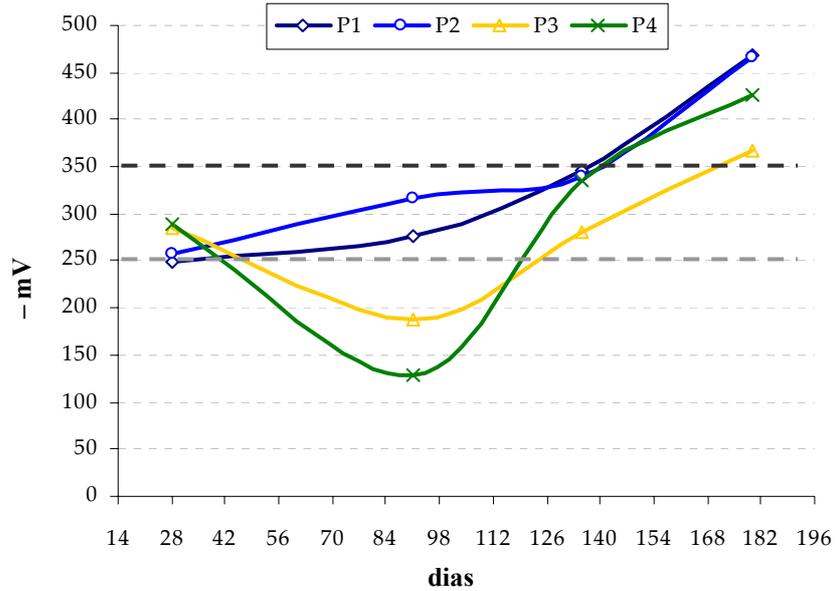


Gráfico 8 – Potencial de corrosão da argamassa sem sílica.

4.5. Difração de raios X

O ensaio de Difração de Raios X (DRX) foi realizado para as idades de 28, 91 e 180 dias, com amostras de argamassas retiradas dos corpos de prova cilíndricos dos testes de resistência à tração por compressão diametral. Com o objetivo de avaliar melhor a influência do meio nas argamassas, foram retiradas duas amostras de cada corpo de prova – uma da argamassa mais externa (até 1 cm da superfície) e outra da parte mais interna (entre 1 e 2.5 cm da superfície).

O ensaio de DRX exige que as amostras sejam peneiradas antes de submetê-las ao equipamento. Em ambos os tipos de argamassa o procedimento consistiu em separar a parte externa e a interna dos corpos de prova, envolver tais partes em tecidos diferentes de algodão e golpeá-las com martelo ou maretá. O algodão serviu para evitar que o material mais fino (e mais importante para o ensaio) escapasse com facilidade além de ser um material inerte, que não alteraria os resultados do ensaio de DRX. O pó teve sua parcela mais grossa descartada com o uso de uma peneira de malha 200, e foi enviado para análise.

Os resultados da intensidade, medida em Unidades Aleatórias (U.A.), pelo ângulo de difração são mostrados nos gráficos 9 a 20.

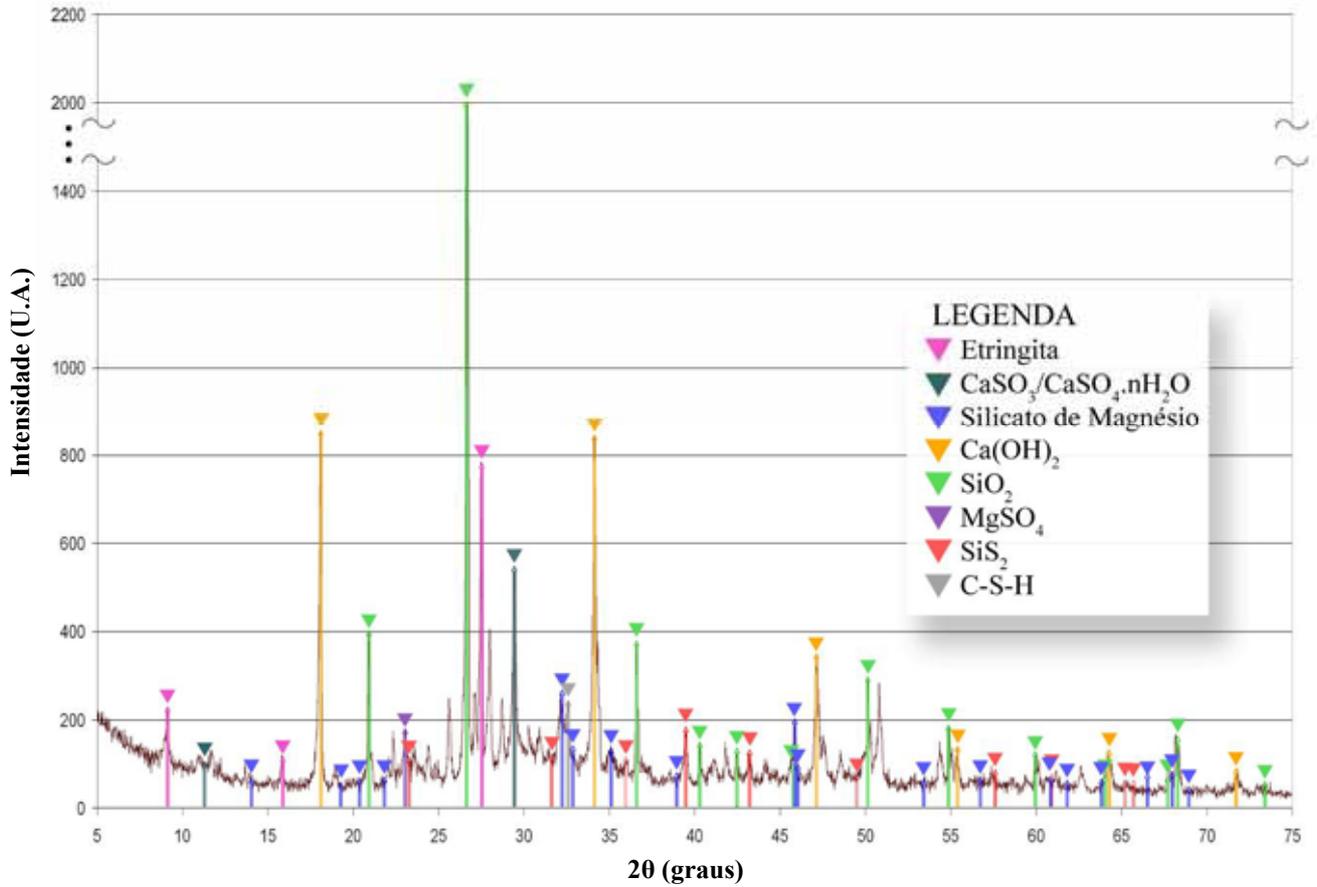


Gráfico 9 – DRX da argamassa interna sem sílica aos 28 dias.

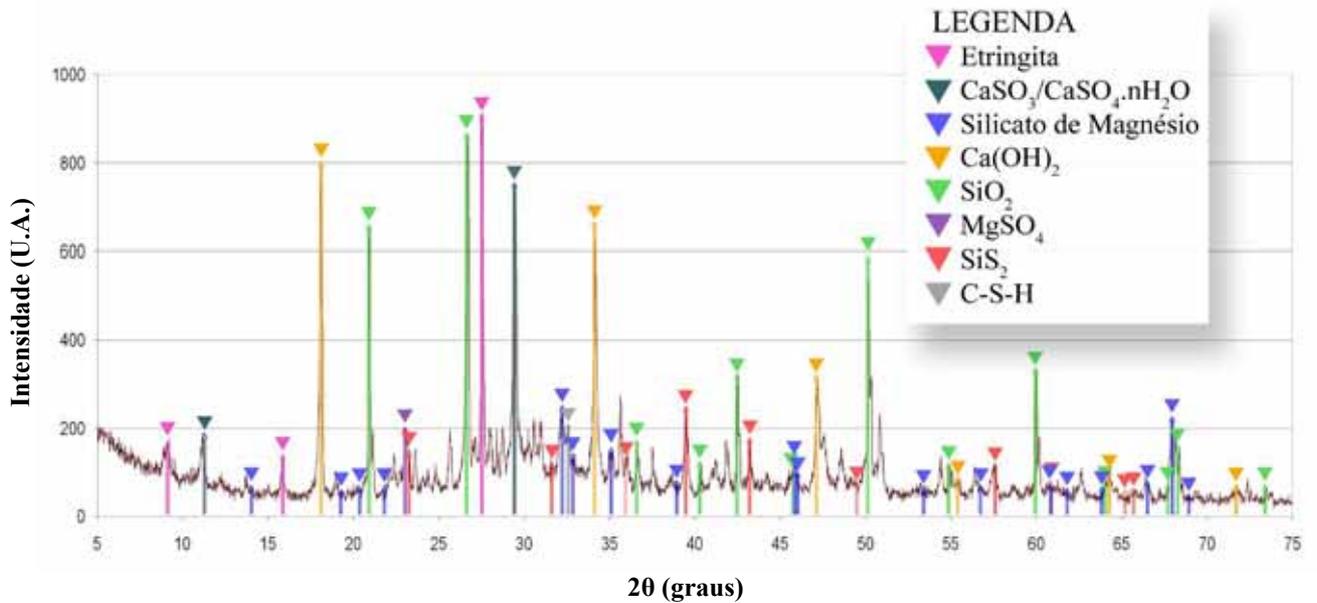


Gráfico 10 – DRX da argamassa superficial sem sílica aos 28 dias.

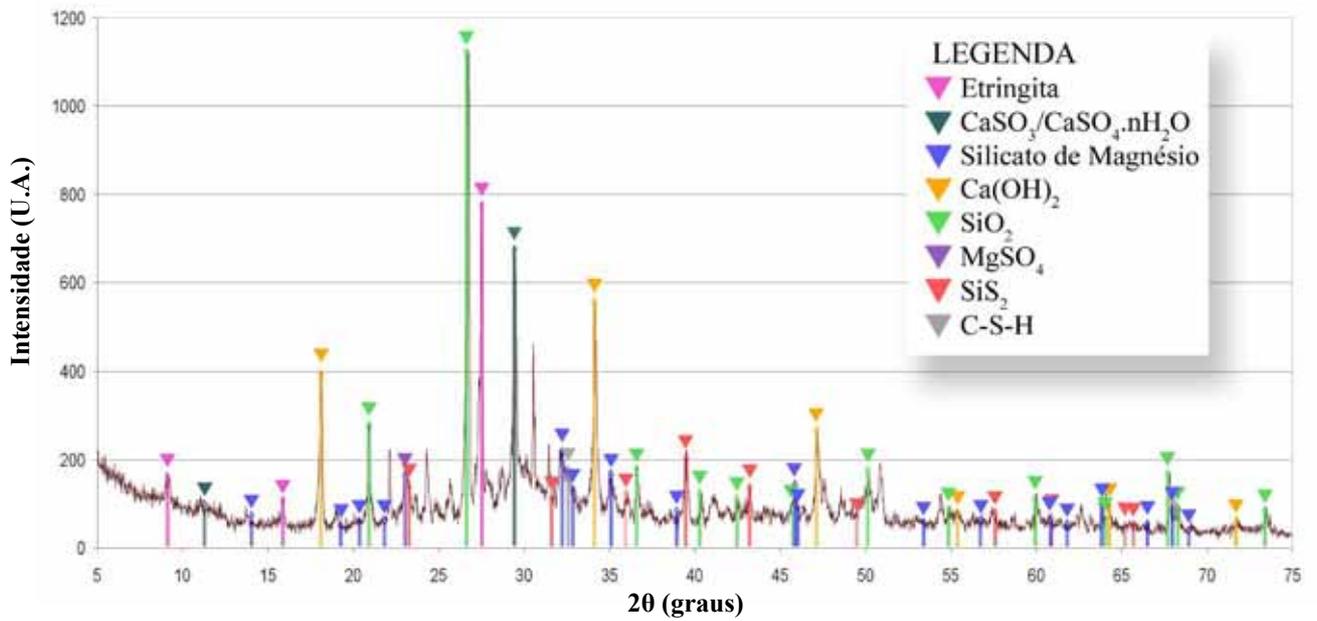


Gráfico 11 – DRX da argamassa interna com sílica aos 28 dias.

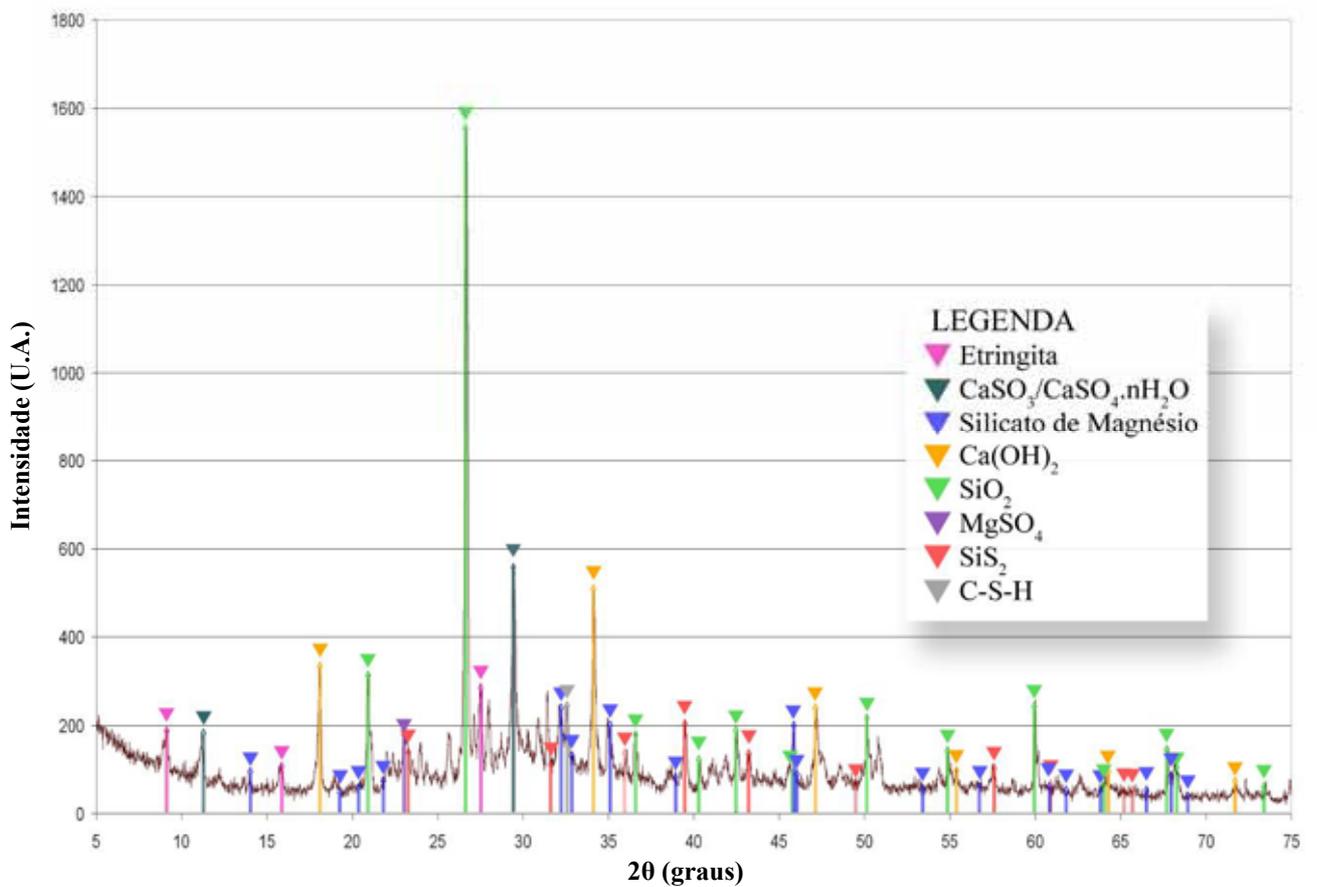


Gráfico 12 – DRX da argamassa superficial com sílica aos 28 dias.

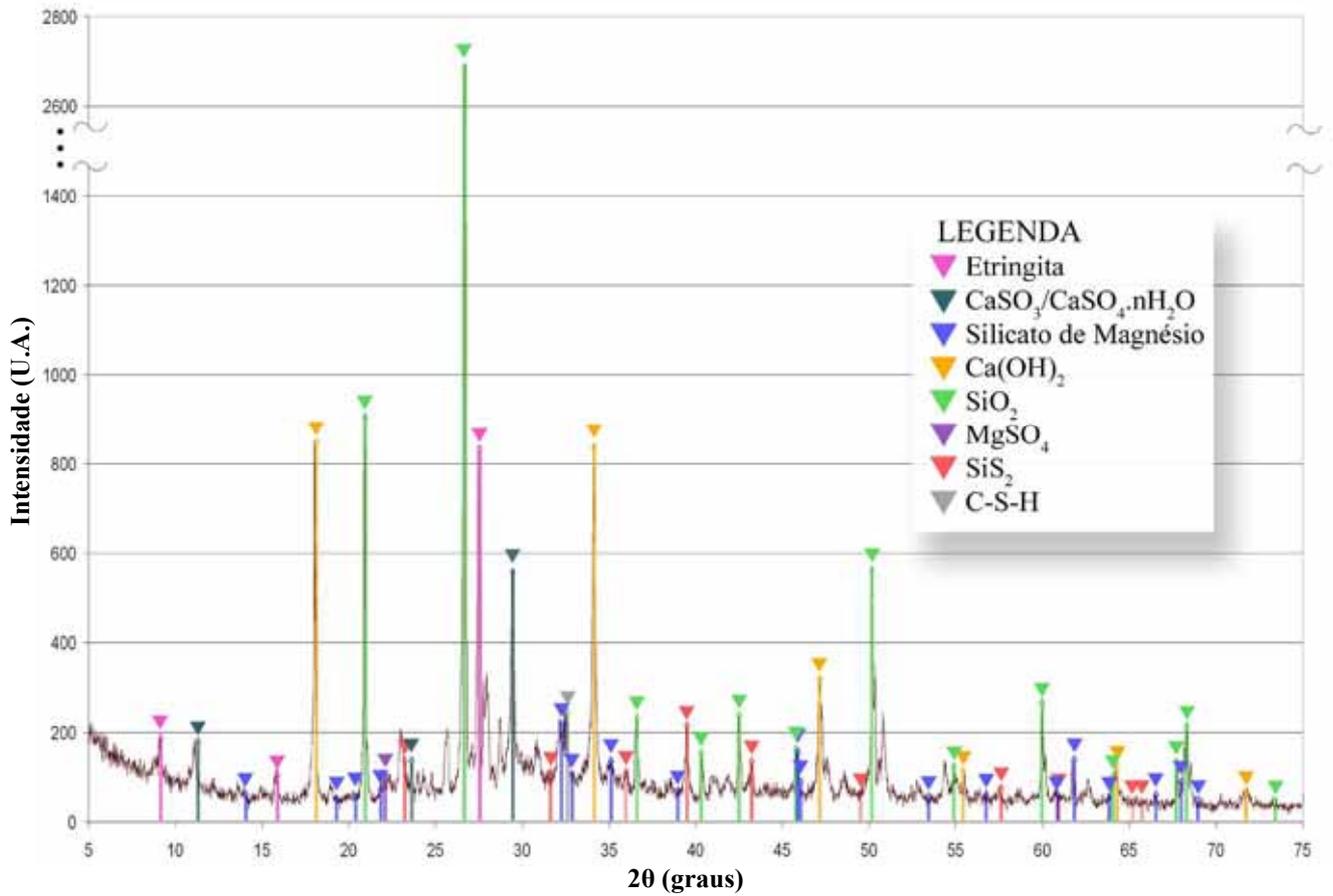


Gráfico 13 – DRX da argamassa interna sem sílica aos 91 dias.

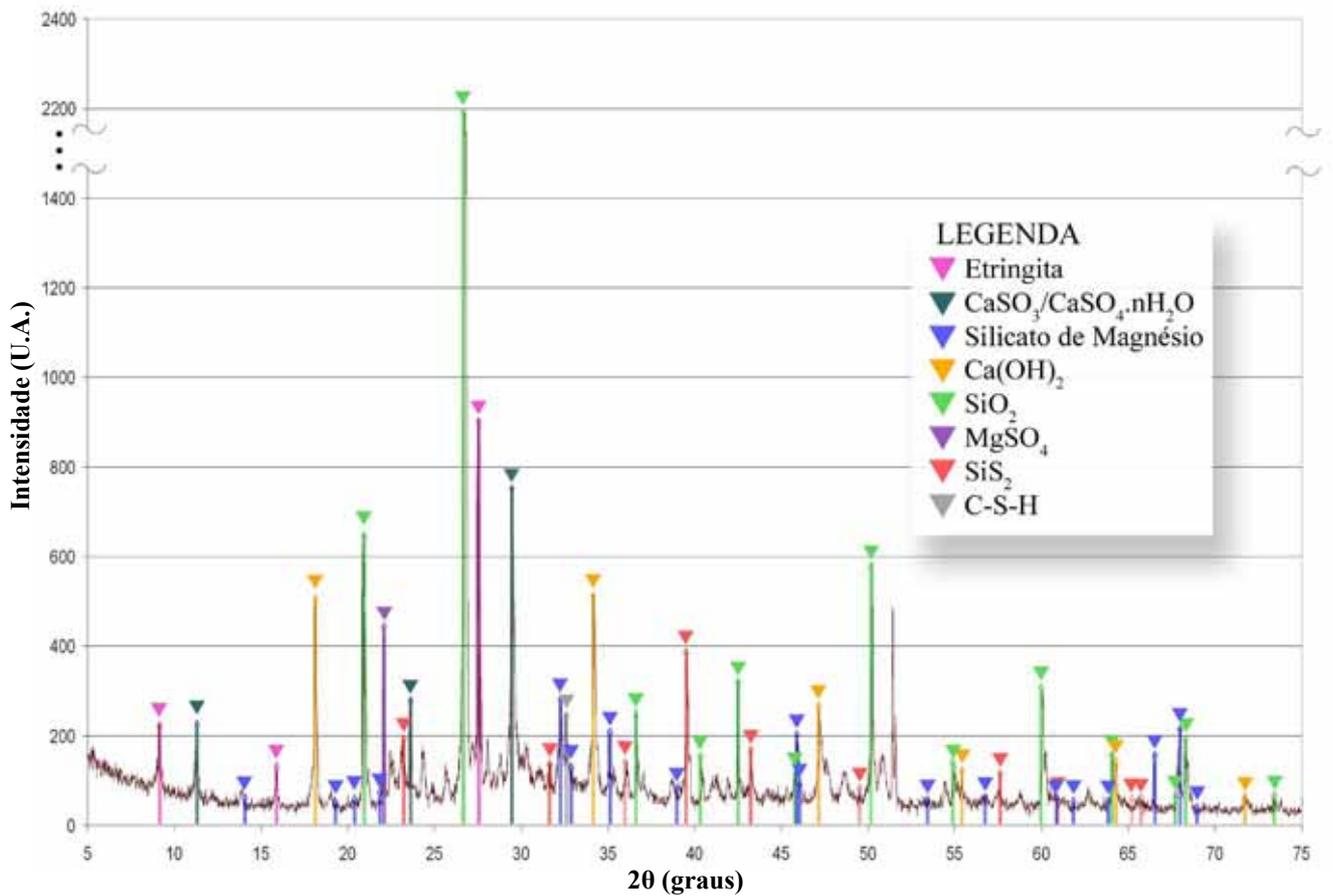


Gráfico 14 – DRX da argamassa superficial sem sílica aos 91 dias.

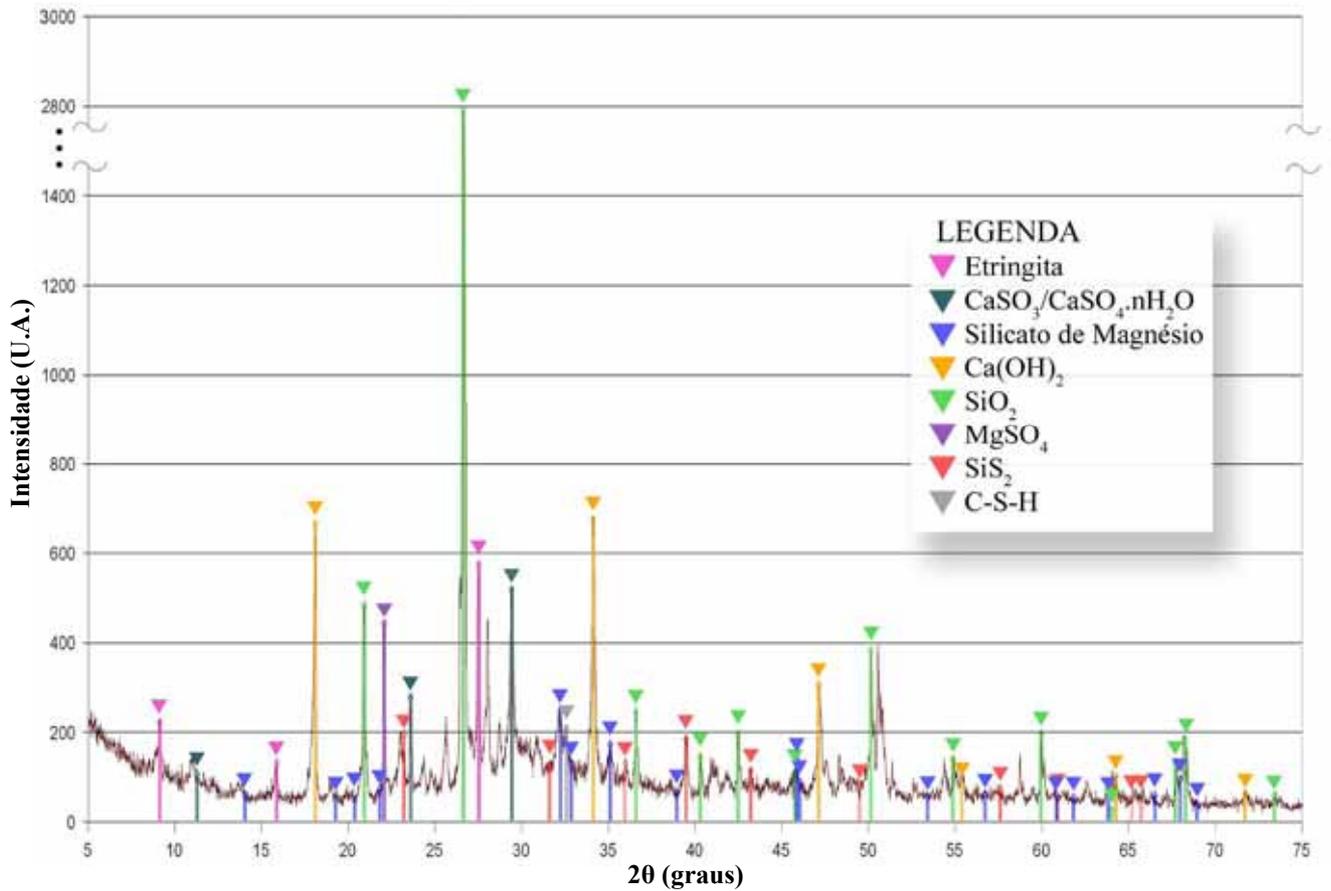


Gráfico 15 – DRX da argamassa interna com sílica aos 91 dias.

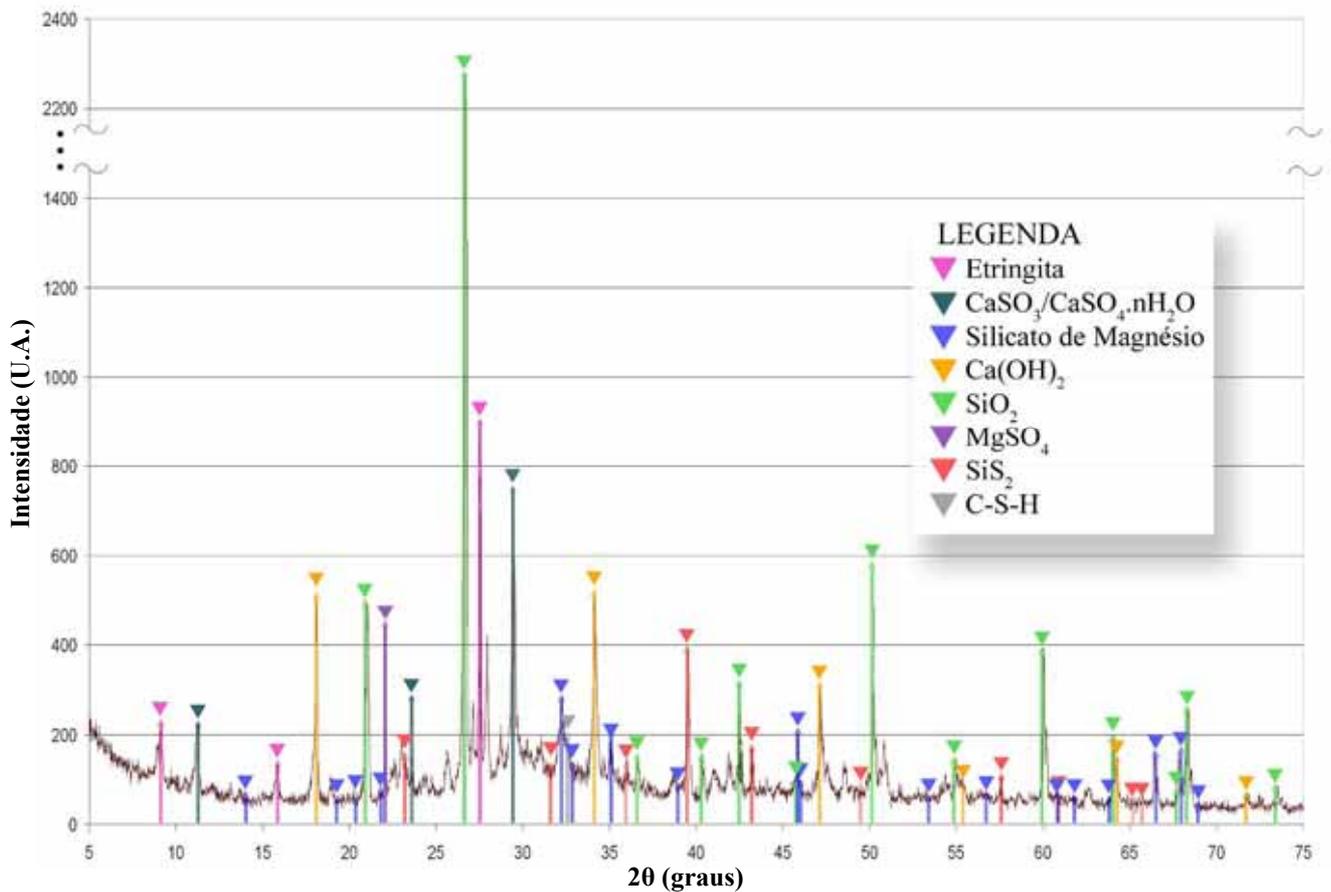


Gráfico 16 – DRX da argamassa superficial com sílica aos 91 dias.

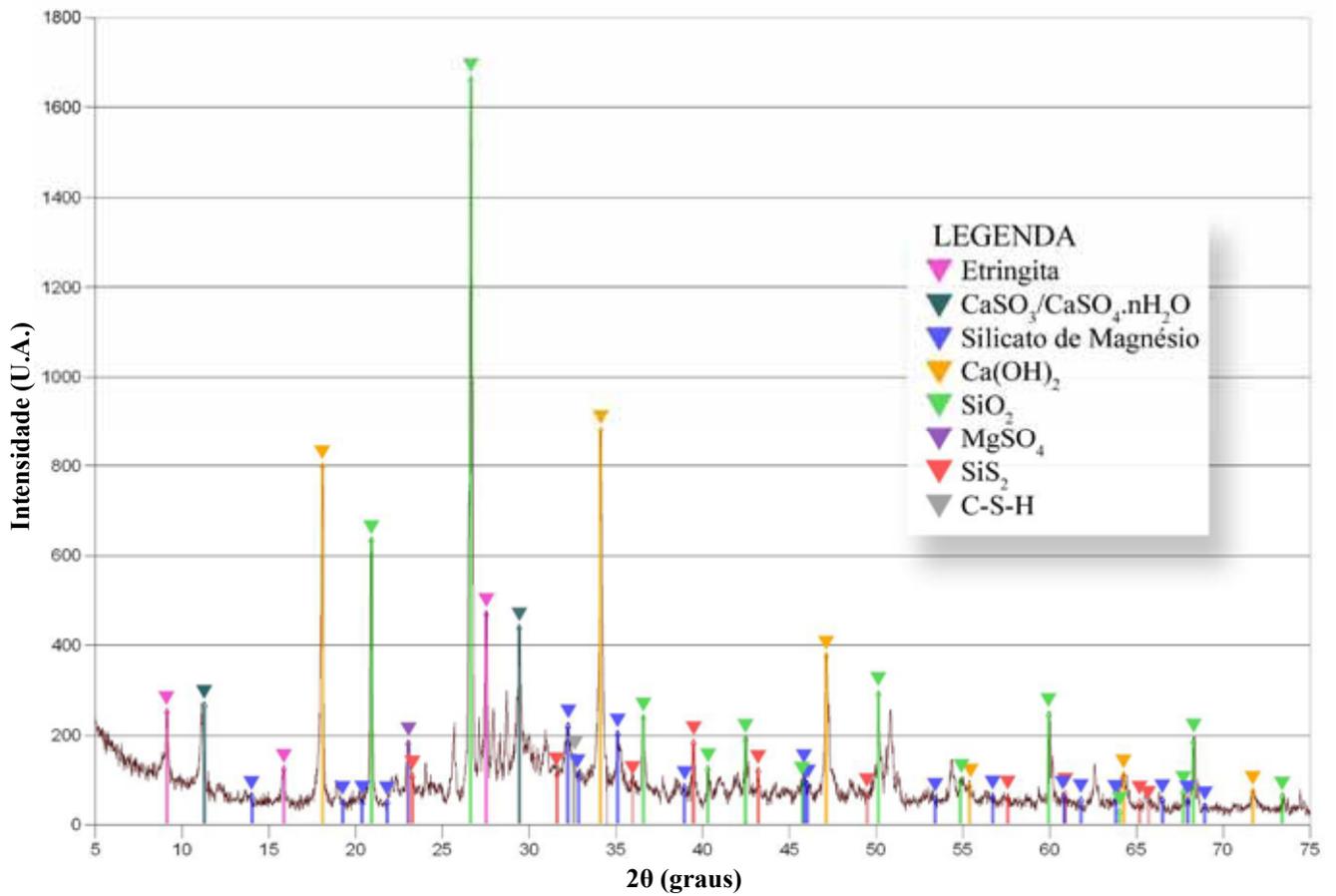


Gráfico 17 – DRX da argamassa interna sem sílica aos 180 dias.

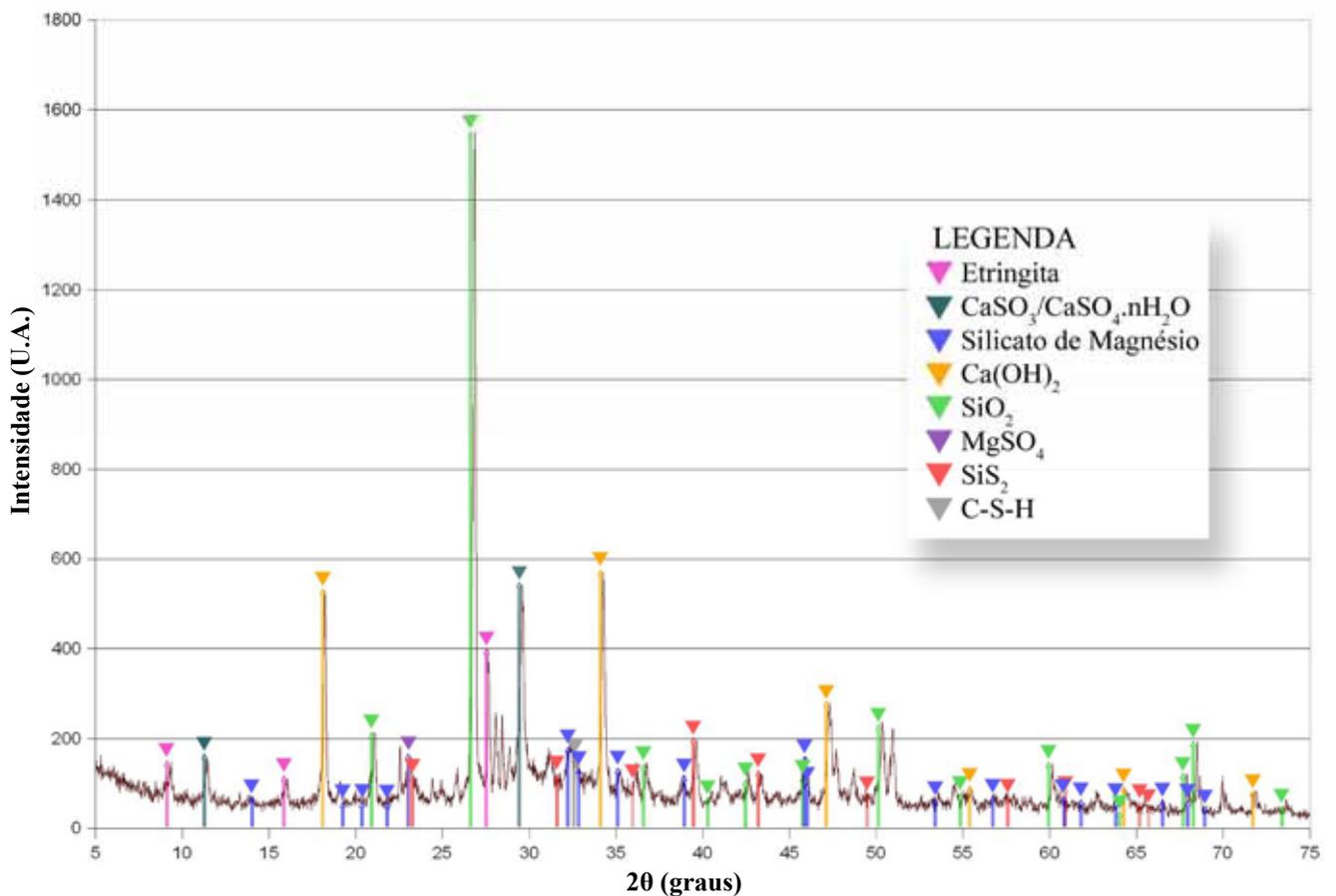


Gráfico 18 – DRX da argamassa superficial sem sílica aos 180 dias.

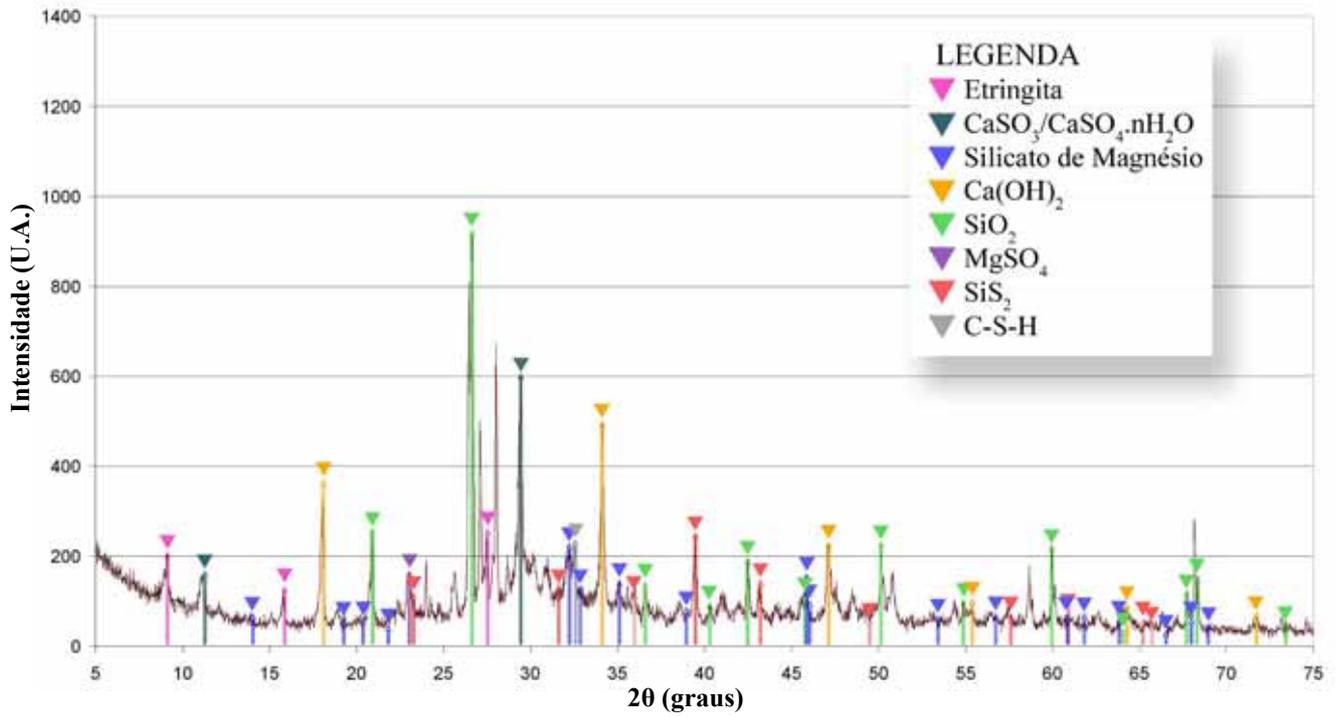


Gráfico 19 – DRX da argamassa interna com sílica aos 180 dias.

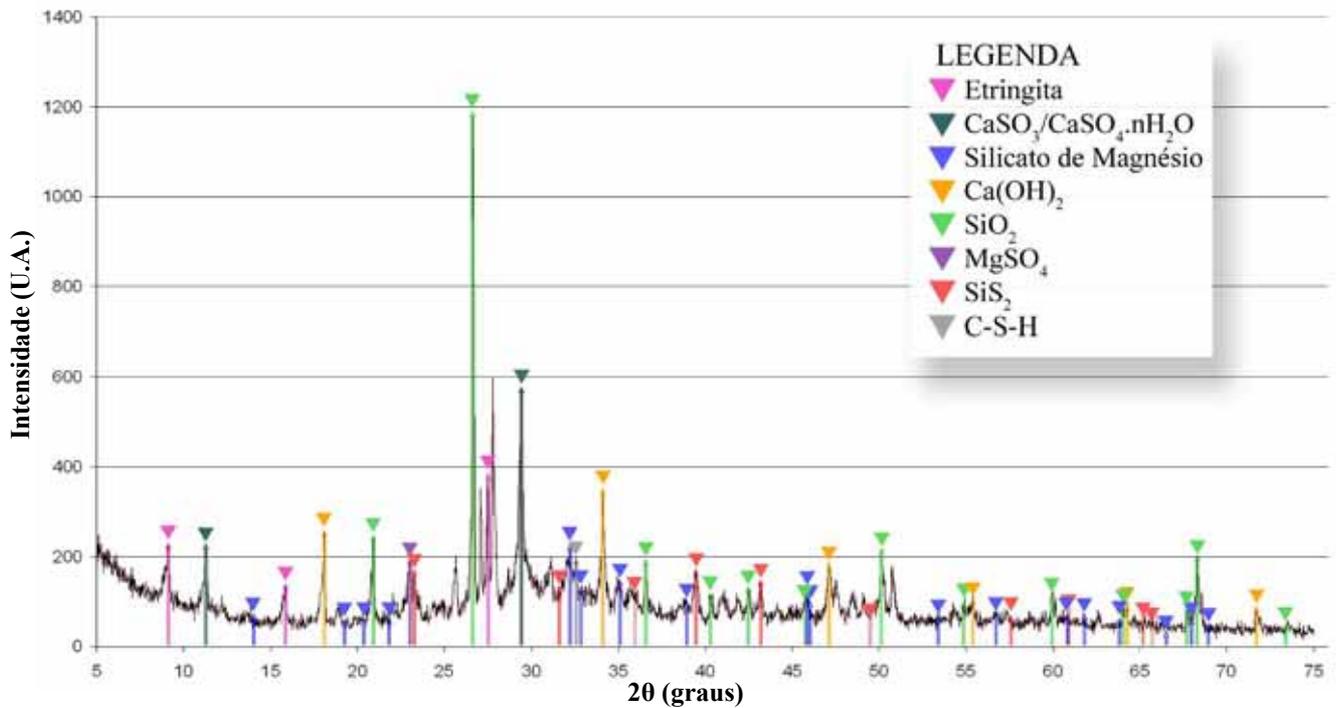


Gráfico 20 – DRX da argamassa superficial com sílica aos 180 dias.



Capítulo 5

Capítulo 5

Análise dos resultados

Esta seção é dedicada à discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior e, a exemplo deste, é dividida em cinco partes, de acordo com os ensaios realizados.

5.1. Resistência à compressão

Os resultados da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos mostram dados que comprovam o observado por autores como LEE, MOON & SWAMY (2005) e, antes deles, COHEN & BENTUR (1988). A redução da resistência em argamassas com sílica é mais sensível se for comparado o valor de tal propriedade entre os 91 e 180 dias; com uma queda de 54.23 MPa para 39.83 MPa – uma perda superior a 15 MPa em quase noventa dias de diferenças entre as medidas e que representa, aproximadamente, 28% do valor da resistência à compressão aos 91 dias.

No caso dos corpos de prova de argamassa sem sílica os resultados foram mais favoráveis. A resistência à compressão desses elementos evoluiu em todas as idades medidas, com exceção de uma pequena queda, insignificante do ponto de vista estatístico, na idade de 135 dias. Até cerca de três meses de idade, a argamassa com sílica mantinha valores de resistência superiores aos da sem sílica, o que estava de acordo com o esperado e relatado pela literatura. Porém, nas duas últimas idades, a situação inverteu-se, com os corpos de prova sem sílica apresentando resistência média superior a 51 MPa.

Este tipo de queda na resistência das argamassa com sílica pode trazer perigosas conseqüências às estruturas. A NBR 6118, de 2003, prescreve que a resistência de cálculo do concreto (f_{cd}) deve ser encontrada obedecendo a seguinte fórmula (equação 13):

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (13)$$

Onde f_{ck} é a resistência característica do material e γ_c o fator de segurança. Para o caso de estruturas de concreto, o valor máximo deste coeficiente é 1.4.

Se paralelos forem traçados entre o fator de segurança indicado pela norma e a variação de resistência da argamassa percebe-se que a queda de resistência praticamente anula o valor máximo do fator de segurança em apenas seis meses, como demonstrado na equação 14.

$$\gamma_c = 1.4 \quad (14)$$

$$R_r = 1 - \frac{f_{ck} - f_{c180}}{f_{ck}} = 1 - \frac{53.77 - 39.04}{53.77} = 72.61\% \quad R_r = \text{resistência residual}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot R_r \Rightarrow f_{cd} = f_{ck} \cdot 1.02$$

Através destas formulações vê-se que, por exemplo, um concreto de 30 MPa, com sílica ativa, prescrito para uma construção foi, na verdade, considerado como possuindo cerca de 21.4 MPa para fins de cálculo dos elementos estruturais. Ora, tal procedimento destina-se a possíveis erros de execução (posição e tamanho correto das fôrmas), do controle de qualidade dos materiais, na proporção da mistura, no adensamento etc. Se essa estrutura estiver sujeita a condições semelhantes de agressividade apresentadas neste trabalho, o concreto de 30 MPa irá possuir uma resistência real em torno de 21.8 MPa, que é pouco superior ao valor adotado no cálculo estrutural. A margem para os possíveis erros relacionados acima é, então, significativamente reduzida.

No entanto, este não é o único fator de segurança recomendado pela NBR 6118 para o cálculo de estruturas. Existem coeficientes para o aço e para as ações que incidem sobre a construção, desde suas primeiras etapas de desenvolvimento até sua utilização final. Contudo, é importante salientar que esta redução foi obtida em apenas seis meses de exposição do material ao ambiente marinho, e, caso tal condição persista

por maiores espaços de tempo, diminuições mais significativas podem ocorrer, comprometendo a integridade estrutural.

Apesar da NBR 6118 se dedicada à elementos de concreto armado, certas considerações podem ser feitas em relação à durabilidade das peças de argamassa. PERSSON (1998) demonstrou que concretos que utilizaram sílica ativa em suas composições mostraram queda de resistência, em idades avançadas, quando comparados a concretos convencionais. Vale ressaltar que, em seus estudos, o mesmo autor expôs as amostras a três ambientes controlados de cura (úmida, selada e ao ar) e não a um meio agressivo como é o caso da atmosfera marinha.

Ainda assim, estas comparações podem ser discutíveis visto que são extrapolações de resultados obtidos com argamassas aplicados em estruturas de concreto armado, feitas dada a inexistência de uma norma específica para este fim. Vale lembrar que a argamassa é parte fundamental de qualquer concreto e sua principal diferença em relação a esse é a ausência de agregados graúdos. Os últimos, em geral, são responsáveis pela estabilidade dimensional e pelo módulo de elasticidade, tendo pouca responsabilidade na resistência da maioria dos concretos convencionais. Talvez, a principal abordagem deste questionamento não seja a possibilidade de tal queda na resistência ocorrer em concretos, mas sim, estimar sua taxa de evolução.

Outro ponto que merece discussão diz respeito ao formato geométrico do elemento em estudo. Como se verá na seção 5.5, uma reação pode ter acontecido envolvendo o C-S-H da pasta endurecida e o sulfato de magnésio vindo do meio externo, e é possível ser essa reação a responsável pela perda de resistência observada. O ataque por sulfato de magnésio é um dos tipos de reação danosa a concretos ou argamassas que compromete a resistência à compressão desses materiais e que não necessita penetrar muito em suas matrizes para reagir com os produtos hidratados do cimento. À medida que evolui, esse tipo de ataque alcança partes mais profundas e afeta a resistência à compressão de tais massas.

O contato entre os compostos hidratados do cimento e o ambiente marinho fez-se pela superfície lateral dos corpos de prova e, quanto maior for essa superfície, maior será a quantidade de material exposto aos agentes danosos do ambiente.

Um exemplo que pode ser feito dessa afirmativa é no caso de pilares. Tipicamente, os pilares apresentam seção retangular ou quadrática pela facilidade de

execução. Para fins de resistência mecânica, a troca de um pilar de seção circular por um de seção quadrada somente poderá ocorrer se as áreas de resistentes forem mantidas iguais. Assim, admitindo um pilar genérico circular de raio “r” e um quadrado de lado “L”, com iguais alturas “h”, cujas áreas são representadas por A_o e A_{\square} , respectivamente, tem-se (equação 15);

$$A_o = A_{\square} \quad (15)$$

$$\pi \cdot r^2 = L^2 \therefore L = r \cdot \sqrt{\pi}$$

$$Sa_o = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h ; Sa_{\square} = 4 \cdot L \cdot h = 4 \cdot r \cdot \sqrt{\pi} \cdot h$$

$$2 \cdot r \cdot h = Sa_o \cdot \frac{1}{\pi} ; 2 \cdot r \cdot h = Sa_{\square} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \Rightarrow$$

$$Sa_o \cdot \frac{1}{\pi} = Sa_{\square} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \therefore Sa_{\square} = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi}}{\pi} \cdot Sa_o$$

$$Sa_{\square} \cong 1.13 \cdot Sa_o$$

Sa_o = área superficial do pilar circular.
 Sa_{\square} = área superficial do pilar quadrado.

Isto demonstra que, num pilar de seção quadrada, a área lateral é cerca de 13% maior que em um pilar de área circular. Essa maior superfície lateral implica em uma maior área de contato com o meio externo e, portanto, uma maior exposição dos produtos hidratados do cimento a compostos potencialmente danosos do ambiente. Ainda pode ser mostrado que, nas mesmas condições citadas, se os agentes agressivos conseguirem penetrar “d” centímetros em relação à superfície dos pilares, o pilar quadrado apresentará uma área resistente intacta menor que a do pilar circular, como mostra a figura 36.

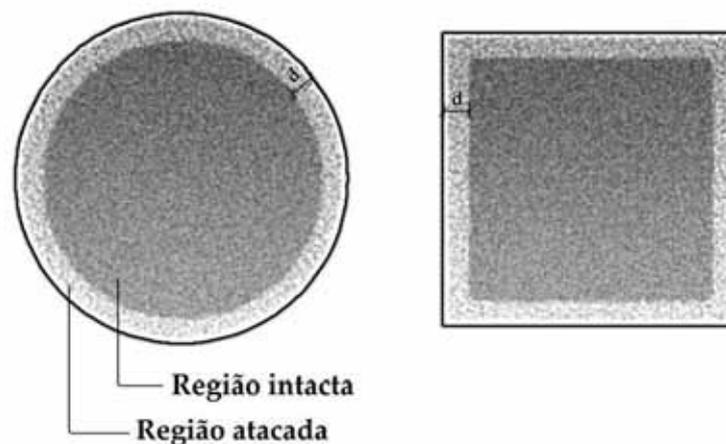


Figura 36 – Área intacta e atacada de diferentes seções transversais.

5.2. Resistência à tração

Uma análise dos resultados dos ensaios de resistência à tração revela um comportamento diferente do visto na seção anterior. Logo nas primeiras idades, a argamassa com sílica apresenta uma resistência superior em relação à argamassa convencional, alcançando uma diferença máxima de 1.8 MPa aos 135 dias de exposição. É possível deduzir que a adição da sílica teve influência positiva à argamassa, apesar de nesta, a resistência à tração apresentar um leve declínio nas idades mais avançadas.

Comparando os dados da resistência à tração com os da resistência à compressão, é possível perceber que a argamassa sem sílica apresentou perda de resistência para os dois ensaios na mesma idade de 135 dias, sendo esta diminuição mais sensível e mais cedo nos testes à tração. Afirmção semelhante pode ser feita à argamassa com sílica ativa – a mesma data marca o início de um decréscimo nos valores de suas propriedades mecânicas, porém com reduções mais acentuadas para a resistência a compressão. Aparentemente, idades próximas aos 4 meses e meio marcam mudanças em ambas as argamassas.

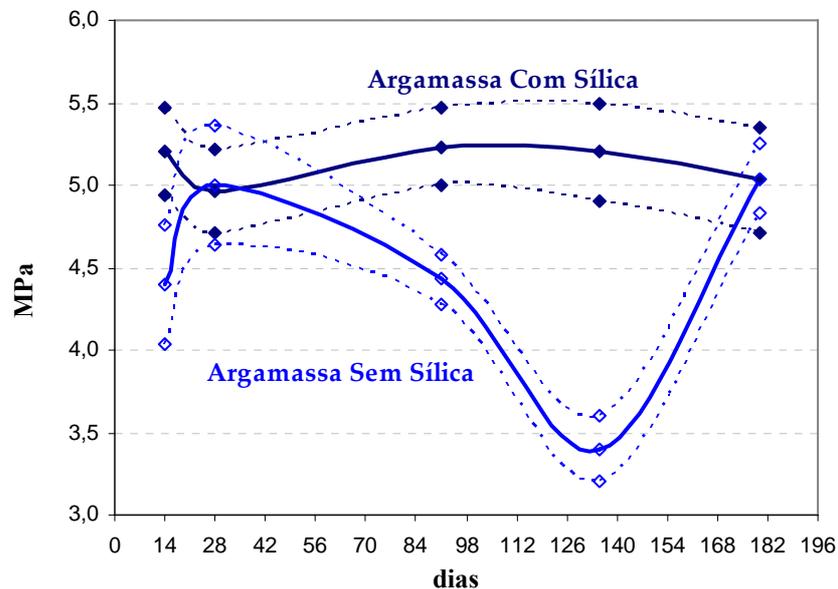


Gráfico 21 – Dispersão dos resultados da resistência à tração.

Ao avaliar as tendências dos valores de um ponto de vista estatístico, observações um pouco diferentes podem ser feitas. O gráfico 21 mostra a provável dispersão de valores baseados no desvio padrão das amostras ensaiadas. É possível que,

na argamassa com sílica, a queda de resistência à tração a partir dos 135 dias não tenha significância estatística. A envoltória de valores pode permitir, por exemplo, que essa argamassa mostre tanto um crescimento quanto uma perda ainda mais acentuada dessa resistência. Este tipo de análise na argamassa sem sílica, no entanto, comprova com clareza a tendência de perder resistência já a partir dos 28 dias de exposição – e de também se recuperar, alcançando valores próximos aos da argamassa com sílica na idade de 180 dias.

A resistência à tração de argamassas e concretos está ligada ao rápido crescimento de “algumas fissuras que se unem e não por [ligação de] numerosas fissuras, como é o caso no estado de tensões de compressão” (CHEN *apud* MEHTA, 1994). Isto significa que uma baixa resistência à tração está mais relacionada ao alinhamento das microfissuras presentes na matriz do que à sua quantidade. Este fato pode explicar o bom comportamento da argamassa sem sílica quando solicitada à compressão.

Outro ponto, talvez mais interessante que sua perda, foi a recuperação da resistência à tração da argamassa convencional a partir dos 135 dias. Sabe-se que é possível a concretos e argamassas curarem-se de fissuras, fechando-as, havendo cimento não hidratado disponível nas proximidades, se a abertura dessas fissuras não for maior que 0.3 mm (MEHTA, 1997). Caso não exista cimento não hidratado disponível, o fechamento da fissura ainda pode ocorrer através da reação entre o hidróxido de cálcio e o gás carbônico, formando carbonato de cálcio, que atua selando os vazios e é insolúvel em água (EDVARSEN, 1999).

A união destes dois cenários ajuda a compreender os resultados obtidos com a argamassa sem sílica – a possível formação de carbonato de cálcio nas fissuras pode explicar o bom comportamento à compressão e um baixo desempenho no ensaio de resistência à tração da argamassa convencional, e a recuperação desta última propriedade mecânica pode ser atribuída à formação de novo material com características cimentícias dentro dos vazios dessa argamassa.

Já na argamassa com sílica, outros mecanismos parecem estar envolvidos, uma vez que seu comportamento é diferente do observado na argamassa sem esta adição mineral. Aparentemente, os produtos das reações da sílica tornaram a argamassa pouco

resistente a solicitações de compressão, mas não tiveram muita influência no comportamento dela quando sujeita a esforços de tração.

5.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade apresentou desenvolvimento como ilustrado no gráfico 22. Percebe-se que desde as primeiras idades até os 91 dias, as duas argamassas mostraram crescimento do valor do módulo de elasticidade. Este aumento aparenta ser maior para a argamassa convencional, porém, o desvio padrão relativamente alto, prejudica uma análise mais específica. Na argamassa com sílica ativa, dentro do intervalo citado, o crescimento do módulo sofre uma variação de sua taxa na idade de 28 dias, reduzindo levemente a derivada desse parâmetro na referida idade.

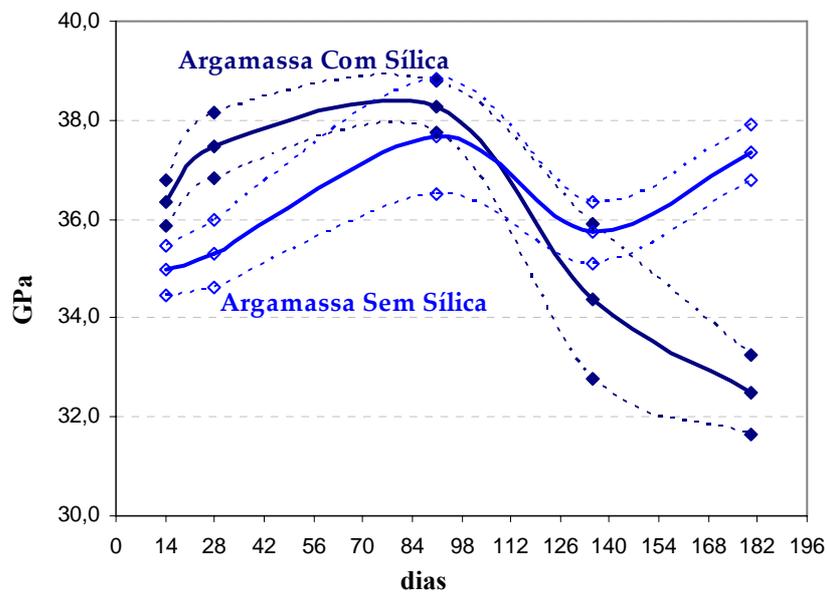


Gráfico 22 – Evolução do módulo de elasticidade.

No intervalo entre 91 e 135 dias não há diferença significativa nos valores do módulo de elasticidade – ambas as argamassas analisadas mostram decréscimo dessa propriedade. Com a envoltória é possível afirmar que a argamassa convencional pode ter apresentado uma queda mais suave nessas idades, de menos que 0.15 até 3.73 GPa, quando comparada à argamassa com sílica. A última, por sua vez, apresentou uma queda mínima de 1.85 GPa e máxima de mais de 6 GPa, de acordo com a variação prevista pelo desvio padrão.

No restante final do gráfico o comportamento é semelhante ao observado para a resistência à compressão das argamassas. Isto é compreensível, uma vez que esses valores do módulo foram encontrados com a formulação prescrita na norma, a qual, por sua vez, utiliza dados do ensaio de compressão como argumento para encontrar o módulo de elasticidade. Parte da envoltória presente no gráfico 22 também foi calculada a partir da resistência à compressão das argamassas. Este procedimento foi realizado sempre que não houvesse resultados do ensaio de módulo de elasticidade.

Aos 180 dias, a argamassa convencional recupera-se da perda apresentada na idade anterior, podendo chegar, na melhor das hipóteses, ao valor teórico de 37.92 GPa. Mesmo que este crescimento não seja tão pronunciado, a argamassa apresentará um mínimo de 36.77 GPa; superior ao maior valor, de acordo com a análise estatística, do módulo aos 28 dias de idade dessa argamassa.

No caso da argamassa com sílica ativa, a idade de 180 dias confirma a sua tendência de diminuição do módulo de elasticidade. O valor final do módulo para esta argamassa está compreendido entre 31.67 e 33.27 GPa, como mostrado no gráfico 21. Este comportamento do material indica que houve uma perda na sua rigidez – isto abaixa a curva tensão x deformação em seu domínio elástico e, se a tensão de ruptura não for comprometida, permite que a argamassa apresente maiores deformações antes de fissurar e romper-se.

5.4. Potencial de corrosão

A análise dos ensaios de potencial de corrosão revela que a argamassa convencional apresentou desempenho inferior à argamassa que recebeu a adição de sílica ativa. Percebe-se que os valores mudam conforme o local de medição e com o tempo, em geral apresentando potenciais mais negativos para os pontos P1 e P2, onde a camada de revestimento possui cerca de 3 centímetros.

Nos primeiros 28 dias, as duas argamassas mostram potenciais dentro da área de incerteza para (que vai desde -250 até -350 mV de acordo com a ASTM C 876 – 91) todos os pontos aferidos. Estes valores, de certa maneira altos, podem ser atribuídos ao modo como as placas de argamassa foram fabricadas; elas não passaram por nenhum processo especial de cura e, com cerca de dois de idade, foram levadas ao ambiente de exposição. Como a pasta ainda estava em processo de hidratação e, portanto, mais

porosa, o contato com uma atmosfera rica em sais e outros compostos pode ter influenciado na composição da água dentro dos poros das argamassas, formando soluções salinas com diferentes graus de saturação e promovendo uma diferença de potencial.

Entre os 91 e 135 dias o comportamento dos dois tipos de argamassas continuou bastante semelhante. A argamassa com sílica apresentou uma leve desvantagem, se for levado em consideração que essa passa do limite de -350 mV no ponto P2 aos 135 dias. Na argamassa sem sílica os pontos de medição mostraram uma tendência não muito diferente, com potencial do ponto P4 próximo aos dos pontos P1 e P2, ficando esses últimos valores pouco abaixo do valor limite mencionado.

Nessas idades pode-se perceber que o potencial tende a aumentar (tornando-se mais negativo) para as duas argamassas. Esta pode ser uma indicação de que, talvez, um processo corrosivo tenha iniciado nas armaduras das placas, visto que nesta região de incerteza, quanto mais próximo o potencial encontrar-se de -350 mV, maior será a probabilidade de alguma corrosão ocorrer.

Aos 180 dias, a argamassa com sílica apresentou uma diminuição do potencial de corrosão (ficando menos negativo) para todas as regiões observadas. Os pontos P1 e P2, mais distantes da armadura, mostraram valores entre -275 e -300 mV, maiores que os pontos P3 e P4, onde o aço está a apenas 1 cm da superfície. Esses últimos pontos exibiram potencial pouco acima do limite inferior de -250 mV.

Os pontos de medição da argamassa sem sílica ultrapassaram a barreira dos -350 mV, que, de acordo com a ASTM C 876 91, representa uma probabilidade superior a 90% de que o aço da armadura esteja sob corrosão no momento do teste.



Figura 37 – Ponto de corrosão em placa com sílica aos 41 dias.

Após os testes de potencial de corrosão, todas as placas foram quebradas para verificar, visualmente, o estado das armaduras e conferir o grau de precisão que as medidas obtiveram ao representar a condição real em que estava o aço.

Para as placas com 28 dias de exposição não havia sinais indicativos de corrosão, nem manchas no exterior das placas de argamassa nem nas armaduras. Porém, aos 41 dias, perceberam-se manchas de corrosão nas placas de argamassa com sílica ativa ainda no local de exposição, como mostra a figura 37.

Essas manchas alaranjadas, típicas do processo corrosivo do aço, estavam presentes em todos os tipos de placa, com ou sem sílica, com mais de 40 dias de idade. Investigações posteriores, realizadas em placas com 90 ou mais dias de exposição (figura 38), mostraram que essas manchas foram resultado da corrosão de alguns arames utilizados para fixar os espaçadores plásticos. Observa-se que a corrosão foi pontual e afetou apenas a região mais próxima à superfície de tais arames, espalhando-se pouco além dessa área, como ilustrado na figura 39.



Figura 38 – Manchas de corrosão em placas com e sem sílica.

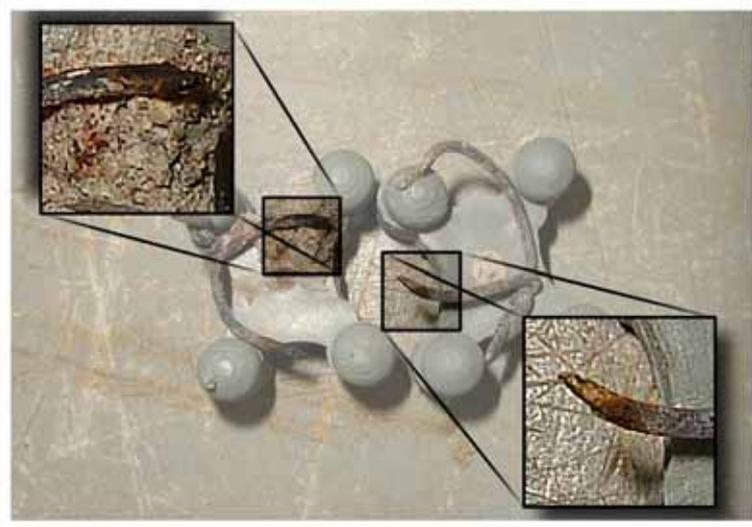


Figura 39 – Corrosão dos arames de fixação dos espaçadores.

Ao analisar as armaduras das argamassas percebeu-se que estas também apresentavam pontos, na maioria das vezes pequenos, de corrosão. Estas manchas somente eram visíveis nas placas com, pelo menos, 135 de exposição ao ambiente marinho. As armaduras das argamassas com sílica apresentaram marcas de corrosão sensivelmente maiores de as observadas nas argamassas comuns (figuras 40 e 41). Isso mostra que, mesmo essa argamassa ultrapassando pouco e somente uma vez o limite de -350 mV, o fato de ter permanecido dentro da zona de incerteza pode significar um estado de corrosão mais avançado, quando comparado à uma argamassa sem sílica que apresente valores de potencial superiores ao limite citado.



Figura 40 – Corrosão nas armaduras de argamassas sem sílica aos 180 de exposição.



Figura 41 – Corrosão nas armaduras de argamassas com sílica aos 180 de exposição.

O fato dos potenciais calculados não refletirem com precisão o estado comparativo de corrosão das placas pode ser explicado por dois cenários. Primeiro, a presença de sílica ativa pode ter modificado a composição da pasta ao ponto de tornar mais agressiva a corrosão do aço mesmo com valores de potencial mais baixos. Segundo os gráficos 6 e 7, que mostram a evolução do potencial de corrosão das argamassas podem não refletir com fidelidade o estado das armaduras. Isto se deve,

principalmente, à alta sensibilidade desse tipo de ensaio à umidade da amostra e à falta de dados entre os intervalos de medição.

DOTTO *et al.* (2004) publicou resultados (gráfico 23) de potencial de corrosão em corpos de prova cilíndricos (9.5 cm de diâmetro por 19 cm de altura) com duas barras de aço introduzidas em seu interior. Pode-se perceber que, ao invés de se comportar como uma curva, os potenciais mensurados mostram características dispersivas, com grande variabilidade de valores ao longo do tempo. É possível que o potencial de corrosão das argamassas apresentasse uma tendência diferente da observada se medições tivessem sido realizadas em menores espaços de tempo, a fim de diminuir as lacunas entre as idades de 28, 91, 135 e 180 dias.

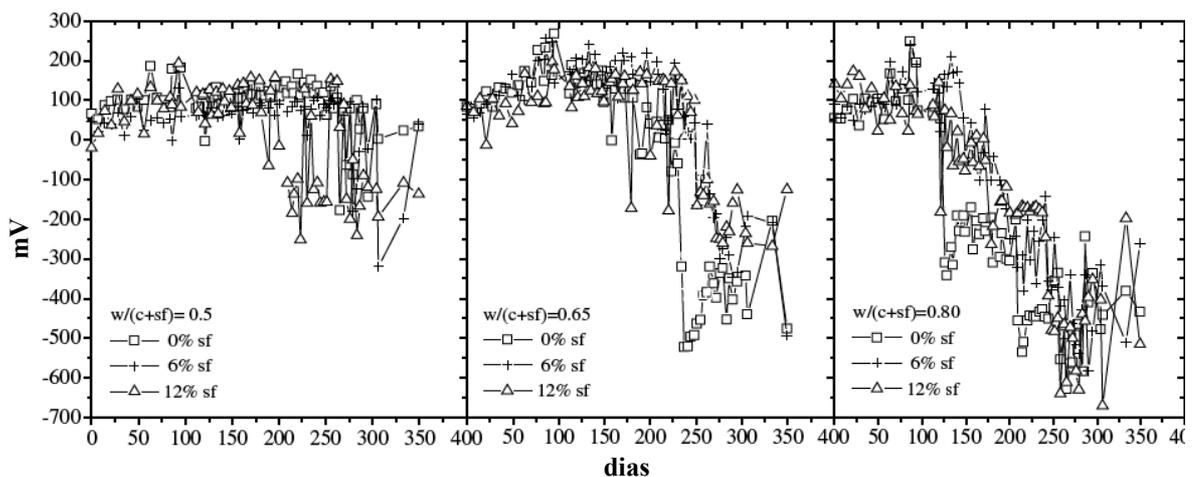


Gráfico 23 – Resultados do ensaio de potencial de corrosão.

Fonte: DOTTO *et al.*, 2004.

5.5. Difração de Raios X

Nas primeiras idades (28 dias), a argamassa com adição de sílica ativa apresentou picos de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) menores à medida que as amostras retiradas se aproximavam da superfície do corpo de prova. Pode-se perceber, também, que o mesmo ocorre para o sulfato/sulfito de cálcio ($\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$) e para a etringita. Percebe-se, na massa exterior da argamassa com sílica, que o dióxido de silício cristalino (SiO_2) oriundo do agregado miúdo foi o pico dominante nos ensaios de DRX. Isto sugere que sua quantidade foi relativamente maior que a dos outros compostos nas amostras examinadas.

É possível observar diversos picos relacionados a ocorrência de silicato de magnésio e sulfeto de silício (SiS_2) em diversos ângulos de refração na argamassa. Sulfato de magnésio (MgSO_4) foi também encontrado nos ensaios, apesar de discutível a presença deste último frente ao pequeno número de picos detectados.

Na argamassa sem sílica também se notaram alterações, aos 28 dias, quando comparadas amostras internas e superficiais dos corpos de prova. Em suas camadas centrais, a argamassa apresentou altas intensidades de hidróxido de cálcio e dióxido de silício, acompanhados por um pico relativamente alto de etringita. Em sua região mais superficial, o ensaio mostra um grande declínio no pico central do SiO_2 , como ilustra o gráfico 10. Apesar de haver certa compensação nos valores desse composto nas proximidades do ângulo de 21° no eixo 2θ , seu valor relativo ficou equiparado aos do $\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$, do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e da etringita. É provável que, nesta idade, as argamassas sem sílica tenham perdido um pouco de massa superficial, representado pela diminuição da intensidade do dióxido de silício.

Comparando os dois tipos de argamassa, nota-se a influência da sílica ativa na intensidade dos picos de hidróxido de cálcio, que são menores em relação àqueles observados na argamassa convencional. Nas regiões mais externas, e em maior contato com o ambiente, a diferença estende-se para a etringita e o sulfito/sulfato de cálcio (gipsita), também maiores na argamassa sem sílica.

Em relação às propriedades mecânicas, fica claro que o consumo de hidróxido de cálcio pela sílica ativa foi o maior responsável pela alta resistência à compressão aos 28 dias. Apesar de constar nos gráficos 9 a 12 um pico relacionado ao C-S-H, não é possível identificá-lo com certeza, uma vez que essa fase é muito amorfa para formar um maior número de picos bem definidos que permitam sua caracterização pela DRX.

Aos 91 dias, o ensaio da argamassa com sílica mostrou um aumento relativo dos índices de hidróxido de cálcio quando comparada à mesma argamassa aos 28 dias, e em pontos iguais de amostragem. Isto pode ser reflexo do fim da reatividade da sílica ativa, permitindo que o C_3S e o C_2S do cimento produzam mais $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Traçando paralelos entre as partes interna e externa, pode-se observar que a tendência de diminuição do hidróxido de cálcio à medida que se vai do núcleo do corpo de prova a sua superfície, é acompanhada, mas de maneira inversa, pelo $\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$, etringita e SiO_2 .

No caso da argamassa sem sílica, na mesma idade, os níveis internos de hidróxido de cálcio e SiO_2 permaneceram altos quando confrontados à mesma argamassa aos 28 dias. A intensidade das outras fases também continuou, praticamente, inalterada, com um crescimento discreto para o pico central de etringita e o lateral de $\text{CaSO}_4/\text{CaSO}_3$. Amostras mais próximas da superfície apresentaram índices de dióxido de silício bem mais elevados, ao mesmo tempo em que os valores de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reduziram se comparados às intensidades aferidas no período anterior.

Comparando as duas argamassas com 91 dias de idade, percebe-se que os gráficos de DRX para ambas são muito semelhantes, com sutis diferenciações nos níveis de hidróxido de cálcio e trissulfoaluminato (maiores para a argamassa sem sílica), e sulfato de magnésio (maiores para a argamassa com sílica, em especial, no interior dos corpos de prova). Além disso, pode-se constatar que os valores de $\text{CaSO}_4/\text{CaSO}_3$ são, em geral, maiores na argamassa com sílica ativa.

A presença de uma maior quantidade de etringita, tanto no núcleo quanto na superfície da argamassa convencional, pode ter influenciado negativamente na sua resistência à tração. Entretanto, tal influência parece ter sido menor no desenvolvimento da resistência à compressão.

Na argamassa com adição de sílica ativa, o aumento dos níveis do sulfato de magnésio coincide com o ponto de máximo nos valores de sua resistência à compressão. Esta aparente contradição pode ser explicada – quando em contato com as fases hidratadas do cimento, o sulfato de magnésio não atacará, de imediato, o C-S-H da pasta. É necessário que o pH da solução diminua a ponto de tornar instável o silicato de cálcio e propenso a reagir com o MgSO_4 , e isto somente ocorrerá após se retirar quantidades significativas de hidróxido de cálcio do sistema cimentício ou quando este composto formar outros produtos (como a gipsita).

Na última idade de ensaio (180 dias), a argamassa com sílica apresentou diminuição de todos os índices detectados em relação à idade anterior (91 dias), sendo um dos mais significativos os valores de SiO_2 , em especial se considerado o ensaio no interior da argamassa. A única exceção foi da fase sulfito/sulfato de cálcio, que mostrou um pequeno aumento em sua intensidade nas regiões internas dos corpos de prova. Com a diminuição das outras fases, esse incremento acarreta uma maior quantidade relativa de $\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$.

No exterior, os níveis de hidróxido de cálcio foram os menores encontrados se comparados às demais amostras e períodos. Com um pico de SiO_2 maior em relação aos demais no interior da argamassa, pode-se concluir que ela é composta, em sua grande parte, de areia.

A sensível redução da resistência à compressão parece indiretamente refletida na diminuição tanto do Ca(OH)_2 quanto da etringita, ou seja, os dados sugerem que é possível ter havido um decréscimo na quantidade absoluta do C-S-H presente na argamassa com sílica – essa fase, como anteriormente citado, é dependente de um alto valor de pH para manter-se estável. Uma menor quantidade de hidróxido de cálcio implica numa diminuição do potencial de hidrogênio da pasta o que torna o silicato de cálcio suscetível a ataques de outras substâncias e à hidrólise.

Uma das substâncias acima mencionada é o sulfato de magnésio que, ao reagir com os produtos de hidratação do cimento destrói o Ca(OH)_2 e o C-S-H, substituindo-os por gipsita e M-S-H. Outro tipo de ataque atribuído aos sulfatos é a formação de etringita pela incorporação de íons sulfato no composto monossulfoaluminato de cálcio hidratado. Apesar de não plenamente esclarecido, sabe-se que o mecanismo de formação de etringita é característico pela fissuração e perda de resistência mecânica da matriz cimentícia. A redução dos níveis de etringita e gipsita indica a possibilidade de já não haver quantidades suficientes de C-S-H e monossulfato para alimentar reações químicas que mantenham elevados índices de $\text{CaSO}_3/\text{CaSO}_4$ e etringita. Estes compostos podem ter sido carregados por lavagem devido à água do mar, por dissolução ou até pelo atrito com partículas sólidas em suspensão.

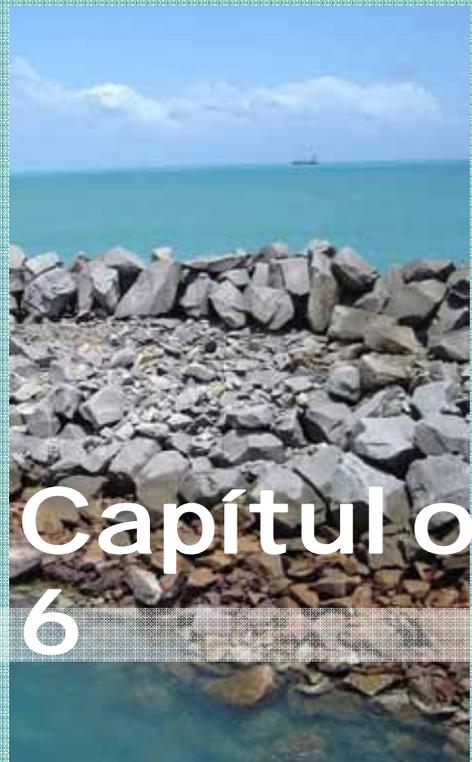
Contudo, estas afirmações podem não se sustentar sem o emprego de ensaios mais específicos, uma vez que outras explicações são possíveis para justificar a queda observada na resistência à compressão nas argamassas com sílica ativa. Fissuras por dilatação térmica e/ou retração autógena, cristalização de sais nos poros e desgaste superficial são alguns exemplos de patologias que podem, também, afetar a resistência à compressão dos elementos de argamassa.

Já as amostras da argamassa sem adição de sílica ativa mantiveram altos índices de Ca(OH)_2 e SiO_2 em todas as partes analisadas dos corpos de prova, se comparadas às amostras anteriores. A partir dos gráficos 17 e 18, observa-se que os níveis de quase todas as fases diminuem, ao passo que se analisam amostras mais próximas da

superfície. Todavia, a redução apontada é menos proeminente que a aferida nas argamassas com sílica (gráficos 19 e 20), nesta última idade. Isto é particularmente verdade para o hidróxido de cálcio no interior da argamassa, que se manteve quase constante durante todos os períodos de ensaio.

Ao contrário da argamassa com sílica, a argamassa convencional manteve uma pasta mais alcalina e, portanto, mas propícia a manter estável o silicato de cálcio hidratado. Nessa mesma comparação, pode-se perceber que os picos de etringita para as amostras sem sílica também se mostraram um pouco maiores – exatamente o inverso do apresentado nas argamassas que usaram tal adição.

Da mesma maneira que a ausência de Ca(OH)_2 pode ter prejudicado a resistência à compressão das argamassas com sílica, é provável que as altas quantidades relativas mostradas nos gráficos 9, 13 e 17 tenham permitido à argamassa sem sílica ativar desenvolver uma matriz mais resistente e apta a manter o C-S-H estável. Também pode-se supor que estes altos níveis possuam origem em (e tornem possíveis) novas reações de hidratação dos grãos de cimento. Ou seja, o hidróxido de cálcio provê estabilidade ao C-S-H que, por sua vez, permite à matriz apresentar maior resistência, durabilidade e estanqueidade, qualidades estas que dificultam a retirada do mesmo hidróxido de cálcio da pasta de cimento endurecida.



Capítulo 6

Capítulo 6

Considerações finais

Esse trabalho avaliou o desempenho de argamassas e a influência da sílica ativa e seu comportamento quando expostas ao ambiente marinho. Como parâmetros de análise, utilizou-se a resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade em corpos de prova cilíndricos e o potencial de corrosão em placas de argamassa armada. Os resultados das propriedades mecânicas e químicas foram, também, observados através dos ensaios de difração de raios X e pelas mudanças de fases que esse método fornece.

Antes de expor os elementos ao ambiente escolhido, foi necessário desenvolver misturas que atendessem a requisitos de trabalhabilidade e tixotropia adequados à aplicação em meios agressivos e em reparos estruturais. Os dois traços de argamassa, preparados neste trabalho, atenderam a tais condições em seu estado plástico, com a diferença que a argamassa com sílica necessitou de cinco vezes mais aditivo superplastificante para apresentar uma manuseabilidade semelhante à da argamassa comum.

Os resultados do ensaio de compressão mostram que a argamassa com sílica ativa desenvolve resistências mais altas que a argamassa convencional nas primeiras idades, quando sujeitas ao ambiente marinho. No entanto, com a contínua exposição ao meio agressivo, os valores começam a se inverter; a argamassa com sílica mostra diminuição em sua capacidade de resistir à compressão, ao mesmo tempo em que a argamassa comum mantém um crescimento quase constante. A vantagem desta última não é consequência de ganhos expressivos nos valores dessa propriedade, mas sim, e principalmente, pela forte perda da resistência à compressão identificada na argamassa com sílica ativa.

Nos testes de tração por compressão diametral os resultados mostraram que, de maneira geral, a argamassa sem sílica sofreu maiores reduções de resistência à tração que a argamassa que fez uso dessa adição, em particular na idade de 135 dias. Entretanto, a perda observada de resistência à tração dessa argamassa foi compensada por um rápido crescimento nesse parâmetro após a idade citada, terminando os 180 de exposição com valores equivalentes aos aferidos para a argamassa com sílica ativa.

Esta última, a exemplo do percebido nos testes à compressão, desenvolveu elevada resistência à tração logo nas primeiras idades, seguido por sutis reduções no valor dessa propriedade a partir dos 91 dias. Por outro lado, a análise do desvio padrão demonstrou que tal tendência de queda não tem significância estatística.

Os ensaios de módulo de elasticidade mostraram-se semelhantes, até certo ponto, à evolução da resistência à compressão das argamassas. Pode-se perceber que os dois tipos de mistura desenvolveram o módulo de maneira equivalente, com curvas quase paralelas até os 91 dias de exposição. A partir dessa idade, as argamassas mostraram diminuição no valor deste parâmetro, sendo esse comportamento mais pronunciado e contínuo nas misturas com sílica. No caso das argamassas convencionais, a queda no módulo foi interrompida aos 135 dias – idade a partir da qual se percebeu uma recuperação que permitiu a essa argamassa exibir níveis de módulo de elasticidade pouco superiores ao alcançado aos 91 dias de exposição.

É possível perceber, a partir dos ensaios físicos, que o ambiente marinho interferiu de modo negativo nas propriedades mecânicas das argamassas, independente da mistura em questão. Um olhar mais cuidadoso permite notar que as idades de 91 e 135 dias são importantes por representarem pontos de mudança na tendência de comportamento das argamassas. Exemplo disso é que as misturas apresentam, em grandeza absoluta, perda de resistência à compressão na idade de 91 dias depois de exibir incrementos sucessivos nas idades anteriores. Aos 135 dias, outra alteração é observada, mas somente para as argamassas comuns, que retomam o crescimento nos valores dessa resistência.

O teste de potencial de corrosão também mostrou comportamento semelhante das duas argamassas até os 135 dias de idade, a partir do qual, a mistura convencional desenvolveu potenciais mais negativos que a argamassa com sílica. Observou-se ainda que, na maioria das idades, os valores dos pontos mais próximos à armadura (P3 e P4)

apresentaram-se menos negativos que os pontos localizados na face de maior espessura de cobertura das placas. Conforme os resultados comentados, esperava-se que, caso existisse um processo corrosivo, as placas de argamassa comum deveriam apresentá-lo de maneira mais extensa e agressiva aos seis meses de exposição, em relação às placas que receberam a adição de sílica.

Ao destruir as placas para delas retirar e examinar o estado das armaduras, concluiu-se que os resultados considerados neste ensaio, a partir das orientações da ASTM C 876-91, não refletiam de modo preciso a real condição do processo corrosivo instalado nos aços da armação. Na verdade, foi detectado que as armaduras das placas da argamassa com sílica ativa apresentaram as maiores marcas de corrosão.

Apesar das contradições apontadas e do entendimento de que a tal interpretação possa ter se originado na insuficiente discretização das curvas de potencial, a realização do ensaio foi importante por indicar a possível necessidade de adaptações na metodologia (como a revisão dos intervalos da Técnica de Magnitude Numérica) quando aplicados a materiais diferentes do concreto armado.

O uso de difração de raios X permitiu avaliar os resultados encontrados sob a ótica das mudanças de fase detectadas por este método nas estruturas dos materiais. Considerando que a altura dos picos está relacionada com a quantidade relativa de material, pode-se notar que as amostras externas de todas as argamassas e em todas as idades apresentaram menores índices de hidróxido de cálcio em relação às amostras retiradas do interior dos elementos. Também se observou, indiretamente, a influência da sílica ativa nos níveis de hidróxido de cálcio, que se mostraram menores comparados aos medidos na argamassa sem esta adição.

O ensaio de DRX mostrou-se uma ferramenta muito útil para o estudo da durabilidade. Apesar de ter sido realizado em argamassas, composta em sua maioria por substâncias amorfas, é possível a esse teste encontrar fases que ajudam a explicar o comportamento observado dos elementos e a relação deste com a estrutura física e química do material.

Para melhor prover o entendimento da durabilidade das estruturas, deve-se ressaltar a importância de avaliar o comportamento do material e sua interação com o ambiente no qual se encontrará inserido. Os dados levantados desta relação são tão representativos quanto maiores forem o tempo de exposição e a fidelidade às

características do meio estudado. Mesmo fornecendo alguns parâmetros a respeito do comportamento das argamassas com e sem sílica ativa, os seis meses de análise adotados no presente trabalho não constituem um período longo de exposição se for considerado o tempo de vida útil que uma estrutura real deve apresentar.

Com isso, as respostas obtidas através desse trabalho estimulam vários outros questionamentos e hipóteses pertinentes ao desempenho de elementos de argamassa, como as razões e processos pelos quais a argamassa com sílica ativa mostrou-se mais sensível à reduções em sua resistência à compressão quando em ambiente marinho; a causa da perda – e subsequente recuperação – da resistência à tração da argamassa convencional; a possível continuidade ou reversão das tendências observadas nas propriedades das argamassas etc.

O emprego de outros ensaios (por exemplo, microscopia eletrônica de varredura e termogravimetria) e/ou metodologias (períodos de exposição maiores, diferentes traços de argamassa, uso de concreto, espessuras mais finas de amostragem para DRX, entre outros) certamente pode contribuir para o melhor entendimento dos fatores que influenciam o desempenho e durabilidade das estruturas.

Finalmente, o conhecimento sobre as implicações do uso dos materiais não pode ser diminuído ou negligenciado – a sílica ativa é um resíduo que, há cerca de 30 anos, não possuía outro destino senão a atmosfera, e agora faz parte de um dos maiores mercados do planeta; o cimento é fruto de um processo complexo que envolve o movimento de massas de terra, queima de combustíveis fósseis e liberação de gases causadores do efeito estufa, tudo numa escala gigantesca para ensacar, todo ano, o equivalente em massa à quase 50 montes Everest.

O desperdício de qualquer um desses materiais (como acontece na deterioração prematura de construções) implica em reflexos negativos na economia, na infraestrutura das cidades e, principalmente, na sustentabilidade ambiental. É imprescindível que se promova o uso racional, adequado e ecológico dos recursos naturais a fim de assegurar um desenvolvimento equilibrado entre a sociedade humana e o planeta que ela habita.



Referências

Referências Bibliográficas

AİTCIN, P. C. (2000). *Concreto de alto desempenho*. São Paulo: Pini.

AKÖZ, F. *et al.* (1995). Effects of sodium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume. *Cement and concrete research*, v. 25, n. 6.

ALEXANDER, M. G.; MAGEE, B. J. (1999). Durability performance of concrete containing condensed silica fume. *Cement and concrete research*, v. 29 n. 6.

AL-AMOUDI, O. S. B.; MASLEHUDDIN, M.; SAADI, M. M. (1995). Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements. *ACI structural journal*, v. 92, n. 1.

ALMEIDA, D. C. (2004). *Estudo do desempenho de técnicas utilizadas em recuperação estrutural*. 121 p. Dissertação (Graduação) – Centro de Tecnologia (CTEC), Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2004.

ANTHONI, J. F. (2006). The chemical composition of seawater. Disponível em <<http://www.seafriends.org.nz>> Acessado em 18 ago. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro.

_____. (2006). *NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento*. Rio de Janeiro.

_____. (1994). *NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto*. Rio de Janeiro.

_____. (1994). *NBR 5739*: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

_____. (1997). *NBR 13956*: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Especificação. Rio de Janeiro.

_____. (1997). *NBR 13957*: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro.

_____. (2002). *NBR 13276*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro.

_____. (1994). *NBR 7222*: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

_____. (2003). *NBR 8522*: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação. Rio de Janeiro.

_____. (2004). *NBR NM 15*: Cimento Portland – Análise química – Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro.

_____. (2004). *NBR NM 16*: Cimento Portland – Análise química – Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro.

_____. (2004). *NBR NM 18*: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro.

_____. (2000). *NBR NM 30*: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro.

_____. (2001). *NBR NM 46*: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometros por lavagem. Rio de Janeiro.

_____. (2002). *NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.

_____. (2003). *NBR NM 65: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro.

_____. (1998). *NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)*. Rio de Janeiro.

_____. (1996). *NBR NM 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro.

_____. (1991). *NBR 11579: Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200)*.

BABU, K. G.; PRAKASH, P. V. S. (1995) Efficiency of silica fume in concrete. *Cement and concrete research*, v. 25, n. 6.

CIRANO, M. Tragédias e desabamentos. *Pernambuco de A/Z*. Disponível em <<http://www.pe-az.com.br/tragedias/desabamento.htm>> Acessado em 12 mai. 2007.

COHEN, M. D.; BENTUR, A. (1988). Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions. *ACI materials journal*, v. 85, n. 3.

DIAMOND, S.; SAHU, S.; THAULOW, N. (2004). Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete. *Cement and concrete research*, v. 34 n. 9.

DOTTO, J. M. R. (2004). Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. *Cement & concrete composites*. v. 26, n. 1.

EDVARSEN, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI materials journal*, v. 96, n. 4.

EL-ENEIM, S. A. A. *et al.* (1995). Electrical conductivity of concrete containing silica fume. *Cement and concrete research*, v. 25, n. 8.

GANJIAN, E.; POUYA H. S. (2004). Effect of magnesium sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone. *Cement and concrete research*, v. 35 n. 7.

GENTIL, V. (1996). *Corrosão*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

HEM, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *U.S. geological survey water-supply paper 2254*. 3ª edição.

HOOTON, R. D. *et al.* (2006) Proportioning and testing concrete for durability. *Concrete international*, v. 28, n. 8.

JOHNSON, S. M. (1973). Deterioro, conservacion y reparacion de estructuras. Madri, Espanha: McGraw-Hill Book Company.

JUSTICE, J. M. (2005). Evaluation of metakaolins for use as supplementary cementitious materials. Tese de mestrado. Georgia institute of technology.

KASSELOURI, V.; KOULOUMBI, N.; THOMOPOULOS, Th. (2001). Performance of silica fume-calcium hydroxide mixture as a repair material. *Cement & concrete composites*, v. 23, n. 1.

KAYALI, O.; ZHU, B. (2005). Corrosion performance of medium-strength and silica fume high strength reinforced concrete in a chloride solution. *Cement & concrete composites*, v. 27, n. 1.

LEE, S. T.; MOON, H. Y.; SWAMY, R. N. (2005). Sulfate attack and the role of silica fume in resisting strength loss. *Cement & concrete composites*, v. 27, n. 1.

Lesson plans: Coastal development. *National Geographic Xpeditions*. Disponível em <<http://www.nationalgeographic.com/xpeditions/lessons/14/g912/seascoastaldev.html>> Acesso em 12 set. 2006.

LILKOV, V.; DIMITROVA, E.; PETROV, O. E. (1997). Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: the first 24 hours. *Cement and concrete research*, v. 27 n. 4.

MAAGE, M.; SELLEVOLD, E. J. (1987). Effect of microsilica on the durability of concrete structures. *Concrete international*, v. 9 n. 12.

MALHOTRA, V. M.; CARETTE, G. G. (1983). Silica fume concrete – Properties, applications, and limitations. *Concrete international*, v. 5 n. 5.

MANGAT, P. S.; KHATIB, J. M. (1995). Influence of fly ash, silica fume, and slag on sulfate resistance of concrete. *ACI materials journal*, v. 92, n. 5.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini.

MEHTA, P. K. (1997). Durability – Critical issues for the future. *Concrete international*, v. 19 n. 7.

MEHTA, P. K. (2006). Durability of concrete – The zigzag course of progress. *ACI special publication*, v. 234.

MERGET, R. *et al.* (2002). Health hazards due to the inhalation of amorphous silica. *Archives of Toxicology*, v. 75, n. 11-12.

NEVILLE, A. M. (1997). *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini.

_____. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and concrete research*, v. 34, n. 8.

PARK, Y. *et al.* (1999). Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment. *Cement and concrete research*, v. 29 n. 9.

PERSSON, B. (1998). Seven-year study on the effect of silica fume in concrete. *Advanced cement based materials*, v. 7 n. 3-4.

REGOURD, M.; MORTUREUX, B.; HORNAIN, H. (1983). Use of condensed silica fume as filler in blended cements. *ACI special publication*, v. 79.

RADJY, F. F. *et al* (1986). A review of experiences with condensed silica-fume concretes and products. *ACI special publication*, v. 91.

REYNOLDS JR., R. C. (1989). Principles of powder diffraction *In*: Bish, D.L., and Post, J.E. *Modern Powder Diffraction. Reviews in Mineralogy*. Vol. 20. Washington, DC: Mineralogical Society of America. Cap. 1, Pp. 3-17.

Servidores e alunos da UERJ fazem protesto nesta quarta (2007). *O Globo on line*. Disponível em <<http://oglobo.globo.com/educacao/mat/2007/01/30/287625833.asp>> Acessado em 15 fev. 2007.

SILICA FUME ASSOCIATION (2005). *Silica fume user's manual*. Vancouver. Disponível em <<http://www.silicafume.org>> Acessado em 17 jul. 2006.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. (1998). *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: Pini.

SOLEYMANI, H. R.; ISMAIL, M. E. (2004). Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of laboratory OPC and HPC concrete specimens. *Cement and concrete research*, v. 34, n. 11.

ST. JOHN, D. A. (1995). The dispersion of silica fume. *In: SCRIVENER, K.L.; YOUNG, J.F. Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems*. Boston: E & FN Spon. Cap. 1, Pp. 58-66.

TÜRKER, F. *et al.* (1997). Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume. *Cement and concrete research*, v. 27, n. 2.

United States Department of Energy (DOE). (1994). Physical and thermodynamic data. *In: DICKSON, A. G.; GOYET, C. Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water*. versão 2. Oak Ridge: ORNL/CDIAC. Cap. 5.

United States Geological Survey (USGS), United Nations Environment Programme (UNEP), GRID Arendal. (2004). Raw materials consumption in the United States. *Maps and Graphics Library*. Disponível em http://maps.grida.no/go/graphic/raw_materials_consumption_in_the_united_states Acessado em 3 mar. 2006.

United States Geological Survey (USGS), United Nations Environment Programme (UNEP), GRID Arendal. (2004). Coastal population and shoreline degradation. *Maps and Graphics Library*. Disponível em http://maps.grida.no/go/graphic/coastal_population_and_shoreline_degradation Acessado em 3 mar. 2006.

WIN, P. P.; WATANABE, M.; MACHIDA, A. (2004). Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete. *Cement and concrete research*, v. 34, n. 7.