

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA COMO  
MATERIAL PARA REPAROS E REFORÇOS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO  
ARMADO**

**ANDREA SCHULER**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA.

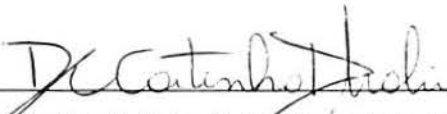
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO

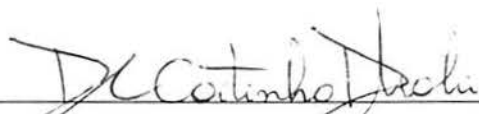
PORTO ALEGRE

JANEIRO, 1998

ESCOLA DE ENGENHARIA  
BIBLIOTECA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada na sua forma final pela orientadora e pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

  
\_\_\_\_\_  
Profª Dr. Denise Coitinho Dal Molin - orientadora

  
\_\_\_\_\_  
Profª Dr. Denise Coitinho Dal Molin  
Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

#### BANCA EXAMINADORA

- Prof. Ronaldo Bastos Duarte - PhD. pela University of Eddinburg/Scotland
- Prof. Vladimir Antônio Paulon - Dr. pela EPUSP/SP
- Prof. Cláudio de Souza Kazmierczak - Dr. pela EPUSP/SP
- Prof. Fernando Piazza Recena - MSc. pelo CPGEC/UFRGS

À minha mãe,  
porque com perseverança se chega onde se quer.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma possam ter contribuído no desenvolvimento deste trabalho, seja pela orientação e ajuda ou pelo simples companheirismo.

Em especial, agradeço aos professores e funcionários da Escola de Engenharia e do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por possibilitarem a realização do mesmo. Aos professores que me incentivaram, meu especial agradecimento.

À Elveco Engenharia, na pessoa do seu sócio-gerente Eng. Victor Elnecave, por desencadear e custear o projeto de pesquisa que originou este trabalho.

À instituições de fomento FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa no Rio Grande do Sul, CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento, pelo suporte financeiro ao longo de todas as fases do projeto.

À CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do RS, na pessoa do Eng. Fernando Recena, que gentilmente cederam espaço para a realização de algumas etapas do trabalho, além do coleguismo.

À professora Denise Dal Molin, pela amizade e incentivo para a pesquisa por novas soluções para a Engenharia.

Aos meus familiares e amigos, por estarem sempre ao meu lado.

Ao André.... pelas alegrias e companheirismo.



## SUMÁRIO

Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	x
Lista de símbolos e abreviações	xi
Resumo	xii
Abstract	xiii

## 1 INTRODUÇÃO

1.1 O contexto e a importância do trabalho	1
1.2 O tema de pesquisa	3
1.3 Objetivos do trabalho	5
1.4 Hipóteses básicas do trabalho	6
1.5 A estrutura do trabalho	6
1.6 As limitações do trabalho	7

## 2. MATERIAIS DE REPARO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO E AS POTENCIALIDADES DAS ARGAMASSAS COM SÍLICA ATIVA

2.1 A deterioração das estruturas de concreto	9
2.2 As funções de um reparo e os tipos de materiais utilizados	11
2.3 Propriedades dos materiais para reparos e critérios de seleção	12
2.4 Materiais para reparos de estruturas de concreto armado conforme os tipos de reparos	16
2.5 Potencialidades das argamassas de cimento Portland como material de reparo	17
2.6 Adições de sílica ativa ao concreto e argamassas	19
2.7 Concretos e argamassas com sílica ativa para reparos - principais indicações	20

## 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL - PARTE 1: CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA

3.1 Materiais utilizados	22
3.1.1 Cimento Portland	22

3.1.2 Areia	24
3.1.3 Silica ativa	25
3.1.4 Aditivos	26
3.1.5 Água de amassamento	26
3.2 Desenvolvimento dos traços de argamassas	26
3.3 Ensaio mecânicos realizados: apresentação e análise	29
3.3.1 Resistência à compressão axial	30
3.3.2 Resistência à tração na compressão diametral	39
3.3.3 Resistência de aderência	43
3.3.4 Módulo de deformação estática	58
3.4 Ensaio relacionados com a durabilidade: apresentação e análise	63
3.4.1 Evolução da profundidade carbonatada	64
3.4.2 Corrosão acelerada por cloretos	70
3.5 Conclusões sobre a primeira parte do programa experimental	83

#### **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL - PARTE 2: ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA EM SITUAÇÕES DE USO**

4.1 Ensaio de tração direta de barras mergulhadas em concreto e/ou argamassa ( <i>pull-out test</i> )	87
4.1.1 Corpos de prova elaborados	88
4.1.2 Materiais utilizados	88
4.1.3 Procedimento de ensaio e preparação dos corpos de prova	89
4.1.4 Resultados obtidos	90
4.1.5 Análise dos resultados	92
4.1.6 Conclusões	93
4.2 Ensaio de flexão de vigas de concreto armado	94
4.2.1 Modelos estruturais	95
4.2.2 Materiais utilizados	98
4.2.3 Confeção dos modelos estruturais	98
4.2.4 Ensaio de flexão simples de vigas bi-apoiadas	99
4.2.5 Ensaio complementares	100
4.2.6 Resultados	101
4.2.7 Análise dos resultados	105
4.2.8 Conclusões	108
4.3 Ensaio de flexão de lajes de concreto armado	109

4.3.1 Modelos Estruturais	109
4.3.2 Materiais utilizados	111
4.3.3 Confeção dos modelos estruturais	111
4.3.4 Ensaio de flexão simples de lajes bi-apoiadas	113
4.3.5 Ensaio complementares	114
4.3.6 Resultados	114
4.3.7 Análise dos resultados	119
4.3.8 Conclusões	122

## **5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPARATIVA**

5.1 Reforço de uma viga de concreto armado	124
5.1.1 Reforço com revestimento de argamassa com adição de 10% de sílica ativa	124
5.1.2 Reforço com revestimento de concreto convencional (com formas)	125
5.1.3 Reforço com chapa colada com adesivo epóxi	126
5.1.4 Análise comparativa	127
5.2 Revestimento e reforço de tanque de concreto armado	128
5.2.1 Revestimento com argamassa com 10% de sílica ativa	129
5.2.2 Revestimento com concreto projetado	130
5.2.3 Análise comparativa	131

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

6.1 Conclusões	133
6.2 Sugestões para futuros trabalhos	134

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>136</b>
-----------------------------------	------------



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Resistência à compressão ( $F_c$ ) versus teor de sílica ativa, para os resultados obtidos com os traços de argamassa, aos 7, 28 e 63 dias de idade.	32
Figura 3.2 Resistência à compressão ( $F_c$ ) versus teor de adição de sílica ativa, para os resultados obtidos com os traços de argamassa, aos 7, 28 e 63 dias de idade.	34
Figura 3.3 Resistência à compressão axial das argamassas, segundo as variáveis que se revelaram significativas, para resultados da primeira determinação.	36
Figura 3.4 Resistência à compressão axial das argamassas, segundo as variáveis que se revelaram significativas, para resultados da segunda determinação.	37
Figura 3.5 Resistência à tração na compressão diametral ( $f_t$ ) versus relação água/aglomerante, conforme teores de adição de sílica ativa, aos 28 dias.	41
Figura 3.6 Resistência à tração na compressão diametral ( $f_t$ ), considerando os níveis das variáveis analisadas, significativas.	42
Figura 3.7 Croqui dos corpos de prova ensaiados.	44
Figura 3.8 Aplicação das argamassas sobre o substrato de concreto.	48
Figura 3.9 Descrição das solicitações do corpo de prova.	49
Figura 3.10 Médias das tensões cisalhantes, segundo idade, teor de microsilica e relação água/aglomerante.	51
Figura 3.11 Tensão cisalhante na junta ( $T_s$ ), considerando os níveis de variáveis significativas.	52
Figura 3.12 Tensão cisalhante na junta, segundo o teor de adição de sílica ativa no traço.	53
Figura 3.13 Foto sobre o ensaio de arrancamento de revestimentos sobre paredes. Equipamento, revestimento com os corpos de prova serrados, pastilhas metálicas para ligação com o equipamento.	55
Figura 3.14 Resistência de aderência à tração versus idade, para os dois traços de argamassa testados.	57
Figura 3.15 Módulo de deformação secante versus teor de sílica ativa, para as duas relações água/aglomerante.	60
Figura 3.16 Módulo de deformação das argamassas ( $E_c$ ), considerando os níveis das variáveis analisadas, significativas.	61
Figura 3.17 Módulo de deformação estático versus relação agregado/aglomerante dos traços estudados, sendo indicados os teores de adição de sílica ativa e relação água/aglomerante dos traços em questão.	62
Figura 3.18 Profundidade carbonatada (mm) versus teor de sílica ativa, para as idades de 10 e 24 meses, e para as duas relações água/aglomerante dos traços avaliados.	66
Figura 3.19 Profundidade carbonatada (mm), segundo as variáveis que se revelaram significativas isoladamente.	67
Figura 3.20 Profundidade carbonatada segundo a interação entre variáveis, que se revelaram significativas.	67
Figura 3.21 Profundidade carbonatada (mm), segundo idade, relação água/aglomerante e teor de sílica ativa.	68
Figura 3.22 Dimensões e características dos corpos de prova ensaiados e esquema final da situação ensaiada.	70
Figura 3.23 Esquema das ligações e condições do ensaio de corrosão acelerada.	73
Figura 3.24 Estado dos corpos de prova após o ensaio de corrosão acelerada	75
Figura 3.25 Perda de massa, segundo os traços estudados. Somente corpos de prova mistos, com argamassa.	76

Figura 3.26 Intensidade de corrente versus tempo.	76
Figura 3.27 Carga total passante, segundo os traços estudados.	77
Figura 3.28 Perdas de massa (%) sofridas pelas barras de armadura, segundo os níveis das variáveis dos traços das argamassas de cobrimento, que se revelaram significativas.	79
Figura 3.29 Carga total passante (Ct), em Coulombs, segundo os níveis das variáveis significativas dos traços de argamassa.	82
Figura 4.1 Croqui do corpo de prova utilizado no ensaio de <i>pull-out</i> , caso dos corpos de prova mistos.	88
Figura 4.2 Tensão média de aderência versus situações ensaiadas.	91
Figura 4.3 Gráfico Tensão de aderência versus escorregamento, para as situações ensaiadas.	91
Figura 4.4 Representação esquemática das vigas testemunho - seção longitudinal e transversal, armaduras longitudinal e transversal.	95
Figura 4.5 Representação esquemática das vigas a serem reforçadas - seção longitudinal e transversal, armaduras longitudinal e transversal.	96
Figura 4.6 Representação esquemática das armaduras longitudinais de reforço e estribos suplementares.	97
Figura 4.7 Representação esquemática da seção transversal dos dois tipos de vigas ensaiadas, testemunhos e reforçadas, após terem sido realizados os trabalhos de reforço.	97
Figura 4.8 Aplicação da argamassa sobre as armaduras de reforço.	99
Figura 4.9 Aspecto de uma das vigas testemunho, após o ensaio.	101
Figura 4.10 Aspecto de uma das vigas reforçadas, após o ensaio.	102
Figura 4.11 Carga versus flecha central para a concepção de reforço (R1) (a), e (R2) (b), em conjunto com os resultados para as vigas testemunho.	107
Figura 4.12 Carga versus flecha central da concepção de reforço (R3) (a), junto com as dos testemunhos, e (b) apresenta as curvas para as quatro concepções ensaiadas conjuntamente.	107
Figura 4.13 Representação esquemática da laje testemunho e a ser reforçada, com suas respectivas armaduras longitudinais e transversais (de montagem).	110
Figura 4.14 Representação esquemática da seção transversal das lajes quando prontas.	111
Figura 4.15 Aplicação da argamassa sobre a laje.	113
Figura 4.16 Distribuição dos deflectômetros na face superior das lajes e posição do carregamento.	114
Figura 4.17 Aspecto da laje reforçada após o ensaio.	115
Figura 4.18 Flechas centrais versus cargas aplicadas, para (a) laje testemunho e (b) reforçada.	120
Figura 4.19 Flecha central experimental versus carga aplicada, laje testemunho e reforçada.	121



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Granulometria e características físicas da areia.	24
Tabela 3.2 Traços das argamassas e consumos de materiais.	29
Tabela 3.3 Resultados do ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos de argamassa. primeira determinação.	31
Tabela 3.4 Resultados do ensaio de compressão axial, segunda determinação.	33
Tabela 3.5 Descrição das variáveis adotadas na análise de variância - ensaio de compressão.	35
Tabela 3.6 Resultados da ANOVA para os resultados da primeira determinação da resistência à compressão das argamassas.	35
Tabela 3.7 Resultados da ANOVA para os resultados da segunda determinação da resistência à compressão das argamassas.	35
Tabela 3.8 Resultados do ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.	40
Tabela 3.9 Resultados da ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral.	41
Tabela 3.10 Resultados do ensaio de compressão-cisalhamento à junta inclinada.	50
Tabela 3.11 Resultados da ANOVA para os resultados da compressão-cisalhamento à junta inclinada, considerando a tensão cisalhante na junta.	52
Tabela 3.12 Resultados do ensaio de arrancamento de revestimentos sobre paredes - determinação da resistência de aderência à tração.	56
Tabela 3.13 Resultados da determinação do módulo de deformação estático, no regime elástico (40% de $f_c$ - resistência à compressão), calculados a partir da curva tensão-deformação.	59
Tabela 3.14 Resultados da ANOVA para os resultados do módulo de deformação secante.	60
Tabela 3.15 Resultados das medições da profundidade carbonatada, aos 10 meses e aos 24 meses de idade.	65
Tabela 3.16 Resultados da ANOVA para os resultados da profundidade carbonatada aos 10 e 24 meses das argamassas.	66
Tabela 3.17 Resultados do ensaio de corrosão acelerada por cloretos e diferença de potencial.	74
Tabela 3.18 Perdas de massa ocorridas nos corpos de prova ensaiados.	75
Tabela 3.19 Carga total passante durante o ensaio de corrosão acelerada.	77
Tabela 3.20 Resultados da ANOVA para as perdas de massa por corrosão acelerada.	78
Tabela 3.21 Resultados da ANOVA para a carga total passante durante o ensaio de corrosão acelerada por cloretos.	82
Tabela 4.1 Resultados do ensaio de <i>pull-out</i> - tensões médias de aderência	91
Tabela 4.2 Resultados do ensaio de flexão de vigas bi-apoiadas.	101
Tabela 4.3 Resultados para as resistências dos materiais	102
Tabela 4.4 Flechas centrais teóricas (mm).	104
Tabela 4.5 Relação entre carga de ruptura (última) teórica e experimental.	105
Tabela 4.6 Relação entre cargas de ruptura das vigas testemunhos com as reforçadas.	106
Tabela 4.7 Resultados do ensaio de flexão da lajes.	115
Tabela 4.8 Flechas centrais calculadas para as lajes.	118
Tabela 4.9 Relação entre carga teórica e experimental.	119
Tabela 4.10 Relação entre laje testemunho e reforçada.	119
Tabela 5.1 Comparação dos custos das três soluções de reforço de viga	127
Tabela 5.2 Comparação dos custos de revestimento e reforço do tanque	131

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Simbologia adotada nas equações e formulário de cálculo (capítulos 4.2 e 4.3)

**a** - distância de apoio até a aplicação da carga uniformemente distribuída (laje) ou concentrada (viga), simétrica (em cm ou m).

**As** - área de armadura longitudinal da seção transversal da laje ou viga, em  $\text{cm}^2$ .

**A0i** - flecha central instantânea no estágio I.

**A0ii** - flecha central instantânea no estágio II.

**b** - largura da laje ou viga.

**B1** e **B2** - coeficientes referentes à conformação superficial das barras de armadura e idade do carregamento, respectivamente. Dados pelo CEB (9).

**d** - altura útil da seção da laje ou viga.

**Ec** - módulo de deformação do concreto. Dado por:  $E_c = 6600 \cdot \text{SQR}(f_c) \cdot 0,9$  MPa.

**Ed** - coeficiente de compensação pela fissuração progressiva. Dado pelo CEB (CEB, 1985).

**fc** - resistência à compressão do concreto. Valor médio encontrado no ensaio de compressão.

**ft** - resistência à tração do concreto. Valor dado por:  $f_t = 0,7 + 0,06 \cdot f_c$  MPa.

**fy** - tensão de escoamento do aço a uma deformação de 0.2%. Dado experimental médio.

**Fmáx** - flecha máxima no centro da laje ou viga devida ao carregamento concentrado nos terços das mesmas, equidistante de **a** dos apoios.

**Fpp** - flecha no centro da laje ou viga devida ao carregamento de peso próprio das mesmas.

**h** - altura da laje ou viga (espessura).

**Ix** - momento de inércia da seção. O índice i ou ii refere-se ao estágio do carregamento (I ou II).

**l** - vão livre da laje ou viga.

**Mf** - momento de fissuração da laje ou viga.

**Mmáx** - momento máximo no centro da laje ou viga devido ao carregamento concentrado aplicado.

**Mppróprio** - momento máximo no centro da laje ou viga devido à carga de peso próprio.

**Mu** - momento resistente último da laje ou viga.

**n** - relação entre os módulos de deformação de aço e do concreto. Dado por:  $n = E_s / E_c$ ,  $E_s = 2.1E5$  MPa.

**P** - carga concentrada aplicada no terço da laje ou viga.

**q** - carga de peso próprio distribuída por área da laje ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) ou extensão da viga ( $\text{kg}/\text{m}$ ).

**x** - posição da linha neutra.

Abreviações adotadas ao longo do trabalho

**a/c** - relação água/aglomerante

**sa** - sílica ativa

**GDL** - graus de liberdade

**MQ** - média quadrática de um fator

**Fcalc** - Valor de F calculado, sendo MQa/MQerro (a - fator)

**F 0,05 (ni, ne)** - valor da distribuição de Fischer, tabelado para 5 % de significância, para ni - número de graus de liberdade do fator e ne - número de graus de liberdade do erro.



## RESUMO

### CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA COMO MATERIAL PARA REPAROS E REFORÇOS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

**Andrea Schuler**

Este trabalho apresenta um estudo sobre a viabilidade técnica e econômica de se utilizar argamassas com adições de sílica ativa em reparos e reforços de estruturas de concreto armado. Considerando as potencialidades das argamassas para estes tipos de serviços e o efeito da sílica ativa sobre as propriedades dos concretos e argamassas, realizou-se amplo programa experimental para se avaliar as propriedades e características das argamassas com sílica ativa. Num primeiro momento, foram desenvolvidos oito traços de argamassa, sendo avaliadas suas propriedades mecânicas e aspectos relacionados com a durabilidade. Num segundo momento, avaliou-se o comportamento à flexão de elementos estruturais reforçados com a técnica proposta, de adotar as argamassas como material de revestimento e cobrimento de armaduras e estruturas de concreto, e outros aspectos relacionados com o comportamento da argamassa quando utilizada como material de reparo. Avaliou-se os custos de se executar duas situações de reparo, comparando-se os custos de se executar com a argamassa e com outras técnicas indicadas para a mesma situação. Os resultados demonstraram que o uso de argamassas com adições de sílica ativa é viável em reparos e reforços de estruturas de concreto armado, podendo apresentar vantagens tanto técnicas como econômicas, conforme a situação de aplicação. Em especial, destacou-se que o efeito das adições de sílica ativa nem sempre é tão presente nas propriedades mecânicas, mas quanto a aspectos relacionados com a durabilidade sua contribuição é significativa para o desempenho das argamassas.



## ABSTRACT

### SILICA FUME MORTARS CHARACTERIZATION AS A REPAIR MATERIAL FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

**Andrea Schuler**

This work presents a study about the technical and economic feasibility of use silica fume mortars in repairs to reinforced concrete structures. Considering the potential of the mortars for this kind of work and the effect of silica fume in concretes and mortars, an experimental program was conducted to evaluate the characteristics and properties of silica fume mortars. In a first part, eight silica fume mortars proportionings were developed, and their mechanical properties and durability aspects were studied. In a second part, the behaviour of structural elements repaired with silica fume mortar was investigated, submitted to flexural load, and other aspects of the in-situ behaviour of the mortar was evaluated. The costs of two real cases of application of the silica fume mortar in repair of reinforced concrete elements was evaluated, comparing with other solutions to the same situation. The results showed that it's possible to use silica fume mortars in repair of reinforced concrete structures, in some cases with advantage both technically and economically over other solutions. Specially, was detected that the effect of silica fume admixtures in mortars sometimes were not so significant in mechanical properties, but on aspects related to durability their contribution is important.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O CONTEXTO E A IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Apesar do setor da Construção Civil ser um dos mais importantes na economia do país e do mundo, não é de hoje que se reconhece a precariedade e o atraso tecnológico do setor no Brasil com relação aos materiais, técnicas e métodos que utiliza, mesmo que se disponha de tecnologias avançadas em algumas áreas. Isto explica, em grande parte, a baixa produtividade do setor, bem como a má qualidade dos produtos e os desperdícios de toda natureza. Em razão disto, muitos esforços têm sido empreendidos nos últimos anos com o intuito de mudar este quadro. Estes esforços compreendem tanto ações na área organizacional e gerencial, como na área técnica e metodológica. Assim, pode-se observar hoje o desenvolvimento de técnicas e métodos para o gerenciamento da Construção Civil, em busca de maior qualidade e produtividade para o setor, como também o desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas, que resultem em soluções mais econômicas, de maior desempenho e adequadas à realidade nacional.

Em determinadas atividades da Engenharia Civil, ocorre que muitas das técnicas e materiais utilizados em obras correntes são oriundos exclusivamente de fornecedores externos ou são desenvolvidos totalmente no exterior. Isto acarreta freqüentemente na inadaptabilidade de tais técnicas e materiais às nossas condições, gerando soluções inadequadas ou até fadadas ao fracasso, ou, na melhor das hipóteses, acarreta em custos muito altos pela importação de insumos e pessoal especializado. Desta forma, torna-se necessária a reavaliação de certos materiais e técnicas atualmente utilizados, ao mesmo tempo em que se deve buscar o desenvolvimento de tecnologias próprias ou atualizar as práticas correntes em relação ao que está sendo desenvolvido em outros países. Assim, obter-se-á não apenas o melhor desempenho dos serviços de Engenharia realizados como também acrescentar-se-á aprimoramento e desenvolvimento tecnológico para o setor no nosso país.

A área da Engenharia Civil que se ocupa com a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado representa mais ou menos esta situação. Atualmente dispõem-se de diversas técnicas para o reparo e reforço de estruturas que se aplicam às variadas situações de estruturas danificadas (CÁNOVAS, 1988; HELENE, 1992; MAILVAGANAM e DEANS, 1992a). Mas muitas destas técnicas são sofisticadas e acarretam num custo muito elevado, por necessitarem de materiais e equipamentos especiais e mão-de-obra especializada, além de apresentarem desempenho pouco satisfatório se não aplicadas adequadamente e nos casos em que são recomendadas (WARNER, 1984). Adicionalmente, muitas técnicas são utilizadas indiscriminadamente sem que qualquer avaliação inicial de seu desempenho e aplicabilidade seja feita (HELENE, 1992; MAILVAGANAM e DEANS, 1992a; YUAN e MAROSSZEKY, 1991; McDONALD, 1991; TANKUT e ERSOY, 1991; MIRZA, 1991a; CHAN et al., 1991; KHAYAT e BALLIVY, 1996). As informações técnicas disponíveis muitas vezes restringem-se às informações dadas pelos fabricantes.

Esta situação não seria preocupante se não fosse importante tal área da Engenharia Civil. Nos últimos anos, é assunto inclusive de manchetes de jornais o estado precário de diversas obras de arte e de infra-estrutura. Por todo o país, é crescente o surgimento de casos de estruturas danificadas, mesmo



em construções mais novas, com menos de 10 anos de existência, frutos da má execução ou subestimação dos agentes degradantes e solicitações (ARANHA, 1994). A própria falta de manutenção das construções compromete sua vida-útil. Esta situação verifica-se também em outros países. Nos EUA, por exemplo, há uma estimativa de que são necessários US\$ 200 bilhões para recuperar todas as pontes e viadutos do país que apresentam algum grau de deterioração - em torno de 253.000 casos, sendo acrescentados anualmente 35 mil novos casos (MEHTA, 1993).

A existência de poucas estimativas atuais para o Brasil não afasta as preocupações, uma vez que os casos de estruturas em deterioração e sob iminência de colapso até são freqüentes e do conhecimento de toda a sociedade. No trabalho de ARANHA (1994), um bom panorama das condições das estruturas na região amazônica é apresentado. NINCE (1996) realizou um levantamento semelhante sobre a deterioração das estruturas na região Centro-Oeste, e revela o importante dado de que 75% dos casos investigados, que apresentavam algum comprometimento na estrutura, tinham menos de 10 anos de idade. Este mesmo levantamento revela que os elementos mais atingidos foram vigas e lajes, em 57,3% e 41,1% dos casos, respectivamente. As ocorrências mais comuns foram fissuras (39,8%), corrosão de armaduras (18,0%), flechas excessivas (16,6%) e armaduras expostas (14,6%), casos que comprometem diretamente o desempenho e a segurança das estruturas, e que requerem uma intervenção para restabelecer suas características originais. No nordeste do Brasil, ANDRADE e DAL MOLIN (1996) destacam a grande incidência de corrosão das armaduras nas estruturas daquela região (61% dos casos investigados). Em 1989, DAL MOLIN (1989) já havia destacado as patologias que mais atingiam as estruturas no Rio Grande do Sul, relacionadas principalmente a fissuras, consideradas graves quando geradas pela corrosão das armaduras e sobrecargas. Confirma também que os elementos mais atingidos são vigas e lajes.

Obviamente, sendo mais crítico o caso das obras públicas comprometidas, pois atingem um grande número de pessoas, estas também representam uma boa parte dos casos de estruturas danificadas que existem atualmente (ARANHA, 1994). A carência no fornecimento de recursos para a manutenção e recuperação das mesmas por parte das instâncias governamentais agrava a situação e ressaltam a necessidade de se desenvolverem técnicas mais acessíveis de recuperação, do ponto de vista técnico e econômico.

Este trabalho insere-se neste contexto ao concentrar-se no estudo de um material para a execução de reforços e reparos em estruturas de concreto armado. Seguindo a tendência de desenvolver técnicas mais acessíveis e econômicas, propõe-se a utilização de uma argamassa de cimento Portland e areia com adições de sílica ativa para o revestimento de elementos de concreto ou cobrimento de armaduras que são agregadas à estrutura construída ou que apresentam-se expostas. Pressupõe-se que tal aplicação seja feita manualmente, com uma colher de pedreiro e operário habituado ao serviço de revestimento e acabamento de paredes e elementos estruturais, de forma a facilitar em muito os trabalhos de intervenção nas obras. O motivo para a adoção da adição de sílica ativa baseia-se nos numerosos e excelentes resultados obtidos com o concreto que recebe esta adição, que tem muitas de suas propriedades modificadas favoravelmente pela mesma (ACI, 1987; GJORV, 1988; FIP, 1988; MAAGE e SELLEVOLD, 1987; MALHOTRA, 1988; MALHOTRA et al., 1992; WOLF, 1991; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; MALHOTRA et al, 1994).

A busca por novas alternativas por si só contribui para o desenvolvimento tecnológico do setor da Construção Civil, uma vez que novas tecnologias são geradas e as existentes são postas à prova, ao ser analisado o seu desempenho frente umas às outras. Este trabalho justifica-se também por este



motivo, principalmente porque ele é fruto de um amplo programa de pesquisa que foi desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em conjunto com a FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Rio Grande do Sul, e a empresa Elveco Engenharia Ltda. Buscando atender as necessidades desta empresa, prestadora de serviços na área de recuperações de estruturas, foi elaborado um programa de pesquisa que gerasse uma nova técnica de reforço e reparo de estruturas de concreto armado, adaptada às condições locais e com significativas vantagens de desempenho, custo e aplicação. Assim sendo, a utilização de uma argamassa com adições de sílica ativa foi proposta e o programa foi desencadeado, sendo que seu desenvolvimento foi marcado por uma intensa troca de informações entre os pesquisadores e a empresa ao longo de todas as suas etapas. A empresa, interessada principal e efetiva usuária da técnica em estudo, pode alcançar com isso mais uma alternativa para a realização de suas atividades, só que com um profundo respaldo técnico e científico; portanto, uma vantagem competitiva neste setor.

## 1.2 O TEMA DE PESQUISA

Inicialmente, cabe esclarecer que no campo de recuperações de estruturas de concreto armado costuma-se fazer a distinção entre dois tipos de intervenções nas estruturas. Uma estrutura pode sofrer um **reparo**, a reconstituição de suas capacidades e características iniciais, que se alteraram em função de algum agente que ocasionou um dano ou má construção. Ou uma estrutura pode necessitar de um **reforço**, quando é necessário acrescentar capacidade resistente à mesma, pelo comprometimento de suas partes ou modificação no uso da estrutura (PERKINS, 1986). Ambos tipos de serviços freqüentemente se confundem e ocorrem simultaneamente, como no caso de uma estrutura que perdeu parte de sua capacidade pela corrosão de armaduras que ficaram expostas, sendo necessário reconstituir a armadura comprometida e, por segurança, muitas vezes acrescentar armaduras a mais, além da reconstituição da seção de concreto com algum material resistente que proteja a estrutura contra os agentes agressivos que provocaram a corrosão.

Este é apenas um exemplo para demonstrar que materiais de reparos e reforços muitas vezes são os mesmos, porém, é preciso considerar que em algumas situações um material de reparo nem sempre precisa apresentar o mesmo desempenho mecânico de um material de reforço, mas um material de reforço quase sempre deve apresentar características de durabilidade como um material de reparo. Na literatura estrangeira, em geral, estes materiais são tratados como simplesmente materiais de reparo (*repair materials*), sem fazer distinção entre os que se aplicam ao incremento de capacidade ou ao restabelecimento do desempenho. Neste trabalho, por simplificação, o material a ser estudado será referido como material de **reparo**, mesmo que em alguns estudos se enfocará sua utilização em reforços. Supõem-se que ele se aplicará satisfatoriamente em ambas situações.

Muitas técnicas de reparo e reforço existentes apresentam desvantagens conforme a aplicação que será dada (HELENE, 1992). Por exemplo, a utilização de concreto projetado, além de requerer equipamento específico, torna-se quase inviável quando se trata de pequenas extensões a serem cobertas ou no interior de edificações habitadas. A agregação de perfis metálicos apresenta o inconveniente de deixá-los expostos, comprometendo o aspecto visual e necessitando de tratamento especial de proteção contra agentes corrosivos. O uso de resinas à base de epóxi, que possuem custo



elevado, pode encarecer em muito um reforço com a colagem de chapas ou reconcretagem simples, além de terem comprometidas suas propriedades no caso de um incêndio na obra reforçada. A rigor, nenhuma técnica é perfeita, apenas apresentam mais ou menos vantagens conforme são empregadas, mas dentro de certos limitantes como custo e facilidade de execução, algumas técnicas podem concentrar mais vantagens em relação às outras, uma vez assegurada sua eficiência.

O objeto de estudo deste trabalho coloca-se como uma alternativa para a execução de reparos (e reforços) em estruturas de concreto armado. A princípio, a idéia de se propor o uso de uma argamassa, com certas propriedades especiais, mas que pode ser aplicada manualmente e por um operário comum da Construção Civil, apresenta de antemão algumas vantagens em relação a algumas técnicas existentes, pois não apenas sua aplicação é facilitada em muitos casos, como a sua própria obtenção torna-se acessível, se for desenvolvida com materiais encontrados na região.

A sílica ativa é um subproduto industrial, oriundo de indústrias de ferro-silício e silício metálico, cujo lançamento na atmosfera causa danos ao meio ambiente. A "fumaça" desprendida na fundição destes produtos é composta de microscópicos grãos de sílica amorfa, que podem ser coletados através de filtros especiais. Em muitos países, é absolutamente proibido seu lançamento na atmosfera. O pó pode ser então processado, para condensá-lo em partículas maiores, ou ser diretamente utilizado como adição mineral ao concreto (WOLF, 1991).

Por apresentar atividade pozolânica, a sílica ativa começou a ser estudada como adição ao concreto já na década de 50 (SELLEVOLD e NILSEN, 1987). Seu efeito de microfíler também impulsionou seu uso, uma vez que possui grãos 100 vezes menores do que os do cimento. Concretos com adições de sílica ativa passaram a ser intensamente estudados desde então, tanto na Europa como EUA e Japão. Sua utilização passou a ser efetiva nestes países há mais de 20 anos (LOLAND, 1981; SELLEVOLD e NILSEN, 1987). No Brasil, no entanto, sua utilização em maior escala ainda é recente (AMARAL F<sup>o</sup>, 1988). Desde 1990, a sílica ativa é coletada e distribuída comercialmente no Brasil, possuindo custo relativamente baixo quando comparado a outros materiais especiais para concreto, na faixa de US\$ 0.35 o quilo, que atualmente corresponde aproximadamente a três vezes o preço do cimento Portland comum.

Os principais efeitos da adição de sílica ativa nas propriedades do concreto concentram-se no aumento da resistência mecânica e na redução da permeabilidade a agentes agressivos, pelo refinamento da microestrutura que ocorre devido à atividade pozolânica e de microfíler da sílica ativa (ACI, 1987; FIP, 1988; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; MALHOTRA et al., 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996). Por estes motivos, a sílica ativa está quase sempre presente em concretos de alto desempenho, onde não somente altas resistências mecânicas são esperadas, mas principalmente uma boa resistência à degradação pelos mais variados agentes é fundamental (MEHTA, 1996; GOWRIPALAN e PILLAR, 1996; MALHOTRA, 1996; KHAYAT e BALLIVY, 1996; LANGLEY e LEAMAN, 1996; GJORV, 1994; HOFF, 1994). Sendo assim, e considerando-se que um material de reparo (ou reforço) deve ter resistências mecânicas adequadas e proporcionar a proteção necessária às peças de concreto, a adição de sílica ativa em argamassas surge como uma solução para melhorar suas propriedades de tal forma a torná-las aptas a serem utilizadas como material de revestimento ou preenchimento em elementos de concreto armado. Em comparação às argamassas convencionais, utilizadas como revestimento, a formulação de uma argamassa com sílica ativa poderia alcançar o desempenho que um material para estas utilizações específicas deve ter. Por exemplo, supõe-se que a aderência ao concreto e a



capacidade de proteção às armaduras obtidas com a argamassa com a adição de sílica ativa sejam superiores às das argamassas sem adição.

Algumas referências específicas sobre argamassas com adições de sílica ativa para reparos são encontradas na bibliografia especializada. Referências sobre materiais de reparo em geral apresentam a argamassa entre demais soluções como em MIRZA (1991a), ou mencionam soluções que se baseiam em composições à base de cimento e sílica ativa (KHAYAT e BALLIVY, 1996; GILBRIDE et al, 1996, MORGAN, 1994). Nestes casos, a sílica ativa é adicionada justamente para incrementar certas propriedades das argamassas e concretos. No Brasil, já são relatadas algumas utilizações de argamassas com sílica ativa em reparos estruturais, como apresentado por TARALLO Jr. et al. (1994) e CARNEIRO et al. (1996).

O estudo de novas aplicações para a sílica ativa é por si só razão suficiente para um programa de pesquisa. Os benefícios obtidos com a utilização deste material na Construção Civil incentivam pesquisas no mundo todo para ampliar seu uso. Em termos de Brasil, tais estudos acrescentam avanço tecnológico e científico e incrementam a qualidade e produtividade dos serviços de engenharia, além de difundirem seu uso. Este trabalho de pesquisa busca não só contribuir para o conhecimento das propriedades de argamassas com adições de sílica ativa, mas também representa a introdução de uma nova alternativa de técnica de reparo (e reforço), a princípio promissora para o setor.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal desta pesquisa é estudar e avaliar a viabilidade técnica da utilização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparo de estruturas de concreto armado. O desenvolvimento de traços adequados à aplicação manual da argamassa, com materiais acessíveis na região de Porto Alegre e estado, que apresentem propriedades e características adequadas ao uso previsto, é objetivo inicial do programa de pesquisa que será apresentado, onde se buscará analisar uma série de propriedades e finalmente o comportamento do material em estudo na situação que se está propondo.

Especificamente, busca-se desenvolver traços de argamassa com diversos teores de adições de sílica ativa, para então avaliar as resistências mecânicas, sua aderência a substratos de concreto endurecido, seu comportamento frente ao fenômeno da carbonatação e corrosão acelerada e seu módulo de deformação, para que se caracterize o material com relação a propriedades que são importantes num material de reparo, e que se determine traços e teores de adição mais adequados. A partir daí busca-se avaliar o desempenho da argamassa quando empregada em situações que representem o uso em reparos ou reforços de estruturas de concreto armado, no caso, ensaios com simulações de elementos reforçados, comparando-se seções mistas de concreto e argamassa com seções íntegras de concreto. Com este programa experimental, buscar-se-á chegar a uma conclusão sobre a viabilidade da técnica, quer seja em aspectos específicos ou gerais.

Secundariamente, buscar-se-á uma análise breve da viabilidade econômica da técnica proposta, em comparação com o custo de outras técnicas que podem ser utilizadas em uma mesma situação de reparo ou reforço. Espera-se ainda proporcionar uma boa contribuição ao estudo das adições de sílica

ativa em concretos e argamassas e à validação de sistemas para reparos, pela geração de dados experimentais que possam ser tomados como referências para futuros trabalhos.

#### 1.4 HIPÓTESES BÁSICAS DO TRABALHO

A hipótese básica deste projeto é de que é viável tecnicamente a utilização de argamassas com adições de sílica ativa em reparos (e reforços) de estruturas de concreto armado. Considerando a facilidade de preparação e aplicação do material como revestimento de armaduras de reforço ou da própria estrutura, espera-se que ele desempenhe adequadamente suas funções, ao integrar-se à estrutura existente e garantir o funcionamento em conjunto das armaduras de reforço com a mesma, ao mesmo tempo em que assegura durabilidade e vida-útil adequada ao reparo executado e à estrutura como um todo. Acredita-se que a adição de sílica ativa à argamassa produza efeitos benéficos e vantajosos, ou que pelo menos sejam adequados e suficientes ao que se espera da argamassa como material de reparo. Espera-se ainda que a técnica em estudo revele-se economicamente viável quando comparada com as demais em um determinado caso.

#### 1.5 A ESTRUTURA DO TRABALHO

A fim de concretizar os objetivos deste trabalho de pesquisa e validar suas hipóteses, elaborou-se um programa de trabalho que incluiu extensa revisão bibliográfica, realização de ensaios e experimentos, análise estatística de dados e consultas a especialistas e pesquisas afins.

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico, que é apresentado no **capítulo 2**, onde buscou-se reunir dados sobre materiais e técnicas que são destinados à execução de reparos de estruturas de concreto armado. Destacando-se quais requisitos eles devem ter para se caracterizarem como soluções em tais finalidades, buscou-se levantar fundamentos para o programa experimental a ser desenvolvido. Uma ênfase foi dada às soluções que envolvem argamassas como material de preenchimento e revestimento, discutindo-se algumas potencialidades das mesmas para estes serviços. Também buscou-se levantar dados sobre os efeitos de adições de sílica ativa em concretos e argamassas, para fundamentar a escolha desta adição e basear seu emprego nas argamassas que são estudadas.

O programa experimental que foi elaborado a partir das informações levantadas, que constitui a parte principal deste trabalho, é apresentado subdividido em dois capítulos, 3 e 4. No **capítulo 3** são apresentados os traços de argamassa que foram desenvolvidos e os ensaios que foram realizados para caracterizar as propriedades dos mesmos, cujos materiais e proporcionamento também são descritos. No **capítulo 4** são apresentados os ensaios que foram desenvolvidos para avaliar o comportamento da argamassa nas condições de uso, através de simulações em elementos de concreto. Nestes dois capítulos, cada ensaio que foi realizado é descrito e analisado por completo individualmente, apresentando resultados e análise estatística de cada um separadamente. Ao final do capítulo 3 são



feitas algumas considerações gerais sobre o conjunto de ensaios, de forma a definir qual(is) traço(s) apresentou melhor desempenho geral nos ensaios. O(s) traço(s) considerado mais adequado(s), tanto do ponto de vista das propriedades como de aspectos de facilidade de obtenção e efetividade na aplicação, é utilizado nos ensaios de simulação de uso em elementos, apresentados no capítulo 4.

No **capítulo 5** é feita uma breve análise econômica da solução que está sendo avaliada. Através de uma análise comparativa de custos para se realizar o reforço ou reparo de algumas peças de concreto armado com a técnica que utiliza a argamassa como material de revestimento e cobrimento para o concreto e armaduras, em relação a outras técnicas, buscou-se apontar as vantagens e desvantagens da técnica em estudo com base em aspectos econômicos e de acessibilidade.

No **capítulo 6** são apresentadas as conclusões e considerações finais sobre o conjunto de estudos realizados, buscando-se chegar a um consenso sobre a viabilidade da utilização da argamassas com adições de sílica ativa em reparos ou reforços, apontando suas potencialidades e limitações. São apresentadas também as lacunas que permaneceram com relação ao desempenho do material ou técnica, a título de sugestões para trabalhos futuros.

## 1.6 AS LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A avaliação de uma técnica de reparo ou reforço envolve o estudo de uma série de propriedades, não apenas exclusivas dos materiais que são utilizados mas principalmente quando estão sob as condições de utilização. Assim, mais do que conhecer as propriedades da argamassa com sílica ativa, também é necessário conhecer seu comportamento na situação em que será utilizada, isto é, como revestimento de superfícies de concreto endurecido, com ou sem armaduras.

Por limitações de tempo e recursos, não é possível abordar no escopo de um único trabalho de pesquisa as diversas propriedades que caracterizam uma argamassa para reparos ou reforços. Assim, buscou-se avaliar apenas algumas propriedades intrínsecas das argamassas, que caracterizem seu comportamento como um material que será utilizado basicamente como revestimento, e alguns aspectos do comportamento da argamassa quando em uso na sua finalidade. Avalia-se também algumas propriedades da argamassa quando em contato com superfícies de concreto endurecido. Das muitas outras propriedades e características de uma argamassa que são relevantes para a situação em que será utilizada, como será visto no capítulo 2, pode-se citar algumas consideradas importantes, mas que são mencionadas a título de sugestões para complementação deste trabalho e investigações futuras:

- a) retração por secagem;
- b) coeficiente de expansão térmica;
- c) resistência de aderência a diferentes condições de substratos e sob diferentes solicitações (métodos de ensaio diferentes);
- d) comportamento dinâmico da argamassa e durabilidade da aderência;



e) durabilidade da argamassa, considerando sua resistência e capacidade de proteção a agentes agressivos. Neste trabalho somente a evolução do fenômeno da carbonatação e desempenho frente à corrosão acelerada de armaduras serão avaliados, fazendo-se menção ao trabalho de KULAKOWSKI (1994), que avaliou as argamassas com adições de sílica ativa frente à penetração de cloretos. Diversos outros aspectos que definem a durabilidade de uma argamassa para reparos ou reforços, como permeabilidade, porosidade, difusibilidade e resistividade, não serão abordados.

Como para este estudo foram definidos certos teores de adição e duas relações água/aglomerante, os resultados limitam-se aos mesmos, assim como também às proporções cimento:agregado adotadas. Uma mudança nestas dosagens podem implicar em resultados diferentes, apesar de na maioria dos casos ser possível estabelecer correlações entre estas variáveis de traço e as respostas nas propriedades.

## 2 MATERIAIS DE REPARO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO E AS POTENCIALIDADES DAS ARGAMASSAS COM SÍLICA ATIVA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os materiais de reparo e reforços e o uso de adições de sílica ativa em concretos e argamassas. Inicialmente, serão abordados alguns aspectos da deterioração das estruturas de concreto e os tipos de reparos ou reforços que são necessários para recuperá-las. A seguir, destaca-se que propriedades e características gerais os materiais devem apresentar para tais aplicações, apresentando-se também os principais critérios de seleção destes materiais, conforme a situação de aplicação. Apresenta-se os principais tipos e classes de materiais existentes para reparos e reforços, destacando-se as aplicações das argamassas entre eles. Finalmente, expõem-se as razões para o uso de adições de sílica ativa em argamassas e concretos, ressaltando-se seus efeitos nos mesmos, e por que as adições são indicadas em argamassas e concretos para reparos e reforços.

### 2.1 A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

A durabilidade de uma estrutura de concreto pode ser definida como a capacidade dela resistir à ação do tempo e agentes degradantes satisfatoriamente, conforme as condições de uso e ambientais onde ela se encontra, durante um período de tempo determinado. Relaciona-se com o conceito de vida útil de uma estrutura, período em que ela deve apresentar desempenho adequado de suas capacidades, mesmo com todas as condições que se apresentarem.

Os fatores que podem afetar a durabilidade de uma estrutura de concreto originam-se nas etapas que envolvem a concepção e execução de uma estrutura, cujas conseqüências farão com que a mesma não tenha um desempenho satisfatório frente aos agentes degradantes compatível com a vida útil esperada. MAILVAGANAM (1992c) destaca que estes fatores podem estar ligados à etapa de **projeto** da estrutura, com a consideração incorreta das condições de uso, desenho que não favorece a dissipação de certas solicitações, etc. Podem se originar na etapa de **execução**, com a manipulação inadequada de materiais, aplicação em desacordo com a técnica ou método recomendados, etc. Podem originar-se também nas **características dos materiais** empregados, que podem vir com defeitos ou fora das especificações determinadas. Por último, podem originar-se durante a utilização da estrutura, quando as **condições de exposição** possam extrapolar as previsões iniciais consideradas ou caracterizam-se pela falta de manutenção adequada. Como conseqüências destes fatores os agentes degradantes podem passar a atuar com uma intensidade além da considerada, podendo comprometer a durabilidade da estrutura, por conseqüência seu desempenho.

Os principais agentes ou ações que desencadeiam a degradação das estruturas de concreto relacionam-se a ações de natureza física (mecânica), eletromagnética, térmica, química e biológica (MAILVAGANAM, 1992d). Estes agentes se traduzem em algumas ações bem conhecidas para as estruturas de concreto. Destaca-se as seguintes ações degradantes, conforme sua natureza, e que

características do concreto estão em questão quando as mesmas atuam, com base em MAILVAGANAM (1992d), ALLEN (1987e), ROPER e BAWEJA (1994):

<i>natureza</i>	<i>ações/agentes degradantes</i>	<i>propriedades em questão</i>
física	gelo/degelo mov. térmicas retração por secagem fluência abrasão erosão fogo ondas de choque	resistências elasticidade coef. expansão térmica porosidade relação a/c tipo de agregados
química	ácidos sulfatos água pura água do mar sais carbonatação agregados reativos	porosidade permeabilidade relação a/c tipo de cimento e adições
eletroquímica	corrosão das armaduras	porosidade, permeabilidade, relação a/c tipo de cimento e adições
biológicas	microorganismos fungos	porosidade

A estas ações pode-se somar a presença de defeitos no concreto, oriundos do seu proporcionamento e execução.

Sem dúvida, os problemas decorrentes destes agentes que mais afetam as estruturas, em geral, referem-se a fissuras, perda de capacidade portante pela corrosão das armaduras (que também gera fissuras) e deterioração da massa do concreto. Os vários levantamentos sobre as patologias existentes nas obras (DAL MOLIN, 1989; ARANHA, 1994; NINCE, 1996; ANDRADE e DAL MOLIN, 1996) confirmam isto e ALLEN (1987e) termina por afirmar que as razões mais frequentes para se



reparar ou reforçar uma estrutura é o comprometimento de suas capacidades pela corrosão das armaduras, pois estes casos constituem-se em geral nos mais graves (PERKINS, 1986). LAMBE e HUMPHREY (1990) também colocam a corrosão das armaduras como o caso de deterioração de estruturas de concreto armado mais freqüente.

## 2.2 AS FUNÇÕES DE UM REPARO E OS TIPOS DE MATERIAIS UTILIZADOS

Adotando-se o termo **reparo** para designar as intervenções sobre uma estrutura, conforme estabelecido na seção 1.2, pode-se estabelecer que a função de um reparo é de restituir ou incrementar a durabilidade, as resistências, a função e a aparência das estruturas de concreto, segundo ALLEN (1987b). PRUDÊNCIO (1989) coloca, mais especificamente, que os reparos (ou recuperações) se destinam a parar a corrosão das armaduras, reconstituir a seção das peças, fechar fissuras, regenerar superfícies e restaurar a estética das estruturas de concreto. Em geral, os casos mais freqüentes da necessidade de reparos nas estruturas referem-se à restituição da durabilidade das mesmas (ALLEN, 1987e), que em decorrência da ação de algum agente de deterioração, além do que foi previsto inicialmente, acaba sendo reduzida dentro do período de vida útil esperado.

Assim, e considerando os efeitos dos agentes de degradação mais freqüentes nas estruturas, pode-se destacar alguns tipos de materiais para reparos, destinados a cumprir as funções assinaladas. Os tipos de materiais para reparos podem ser, segundo ALLEN e EDWARDS (1987), MAILVAGANAM e DEANS (1992a) e MAILVAGANAM et al. (1992a e b):

- materiais para reconstituição de seção ou preenchimento
- materiais de revestimento
- materiais para injeção de fissuras
- materiais adesivos (para pontes de aderência)
- materiais selantes e impermeabilizantes
- materiais para acabamento e proteção superficial

Muitas vezes um reparo envolve a conjugação de dois materiais de reparo ou mais, criando os sistemas de reparos. Um material para reparo por si só pode não solucionar um problema numa estrutura. Um sistema de reparo, que envolve desde a preparação da estrutura para receber os materiais de reparo até o acabamento estético da estrutura reparada é que constitui a solução completa para restabelecer ou incrementar o desempenho de uma estrutura.

Os materiais que se destinam a estas finalidades destacadas, dentro dos materiais utilizados na construção civil como um todo, compreendem concretos, grautes, argamassas, resinas, polímeros, adesivos, películas e pinturas (OLIVEIRA, 1989; ALLEN e EDWARDS, 1992). Na composição destes tipos de materiais enumera-se os componentes que mais comumente são utilizados nos reparos ou sistemas de reparo, segundo PERKINS (1986), MAILVAGANAM e HEMMINGS (1992), MAILVAGANAM e DEANS (1992a e b), MAILVAGANAM et al (1992) e ALLEN (1987a):

- cimento Portland: internacionalmente os tipos mais adotados são os comuns, sem adições, e os de alta resistência inicial (ARI). Os que apresentam resistência ao ataque de sulfatos são adotados quando há este agente degradante.

- armaduras: em geral os mesmos produtos utilizados como armaduras para concreto são utilizados nos reparos das mesmas. mas, em alguns casos, com poucas ocorrências, adotam-se aços galvanizados ou inoxidáveis. Os aços comuns para armaduras têm sido utilizados às vezes revestidos com resinas epóxi ou outras películas protetoras (FIGUEIREDO, 1994), como uma proteção extra contra a corrosão.

- agregados: os mesmos agregados utilizados nos concretos e argamassas são adotados nestas formulações quando aplicadas em reparos. Em certas formulações, industrializadas às vezes, agregados artificiais ou selecionados são utilizados.

- aditivos e adições: para concretos e argamassas a serem utilizados em reparos normalmente adicionam-se substâncias que modificam as características dos mesmos, segundo alguma necessidade específica. São aditivos aceleradores de pega, retardadores de pega, incorporadores de ar, expansores, plastificantes ou superplastificantes, adições minerais. Das adições minerais mais citadas destaca-se a cinza volante, pozolanas naturais, escória de alto forno, sílica ativa e, mais recentemente, cinza de casca de arroz.

- resinas (selantes) orgânicas: base epóxi, poliéster, PVA, poliuretanos, acrílicas.

- emulsões de polímeros orgânicos: estireno-butadieno (látex), acrílicas, PVA.

- membranas: asfálticas, butílicas, PVC, polietilenos.

- fibras: vidro, plástico, nylon, aço.

- produtos específicos: mastiques, termoplásticos, termorigidos.

Formulações e sistemas são criados com estes materiais para comporem soluções de reparo para as estruturas de concreto. Conforme as características e propriedades que estes materiais apresentam, são definidas as aplicações mais adequadas para cada um deles.

### **2.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PARA REPAROS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO**

Uma vez que a função de um reparo é a de restituir ou incrementar as qualidades de uma estrutura de concreto armado, os materiais que se destinam a isso devem ter certas características para que isto possa ser satisfeito, e com a duração esperada. Assim, dada as características do concreto e das estruturas que dele são feitas, pode-se estabelecer certos princípios para que um material de reparo seja adequado para desempenhar sua função em conjunto com a estrutura. WARNER (1984) e MAILVAGANAM e DEANS (1992a) destacam alguns aspectos que as propriedades dos materiais de reparo devem atender:



- estabilidade dimensional: é importante que um material de reparo que se liga à estrutura não sofra movimentações que levem à perda da aderência. A aderência dos materiais de reparo ao substrato de concreto é talvez o aspecto mais importante no desempenho dos mesmos, sendo que deve ser levada em consideração também a durabilidade da mesma ao longo da vida útil da estrutura reparada (PIGEON e SAUCIER, 1994a). Somente um material plenamente aderido à estrutura atua monoliticamente com a mesma. Assim, a retração do material de reparo passa a ser um aspecto definitivo no seu desempenho como tal. Materiais de reparo devem apresentar baixa retração e manter a aderência durante toda a vida útil da estrutura reparada. Materiais à base de cimento Portland tendem a apresentar retração por secagem, portanto nestes materiais é imprescindível controlar a retração pela adoção de baixas relações água/aglomerante e, em certos casos, usando aditivos expansores de retração compensada.

- coeficiente de expansão térmica: pelos mesmos motivos assinalados com relação à aderência e sua durabilidade, os materiais de reparo devem apresentar coeficientes de expansão térmica semelhantes ao do concreto, para que perante as variações térmicas ambientais não ocorram movimentações diferenciadas que tensionem a interface de ligação e comprometam a aderência.

- módulo de deformação: sob certos carregamentos, materiais com módulo de deformação muito diferente do concreto podem se deformar com intensidades diferentes, levando ao rompimento do material ou da ligação. Em geral, os materiais de reparo devem ter baixo módulo de deformação, para que suportem as deformações de origem térmica e por retração, permitindo que movimentações ocorram sem tensionar a interface ou se descolar do substrato. O módulo de deformação dos materiais de reparo deve ser compatível com o do concreto.

- permeabilidade: ter certa permeabilidade ao vapor d'água é importante em materiais de reparo que serão utilizados em estruturas sujeitas a variações de umidade, sob pena da umidade do concreto ficar represada na interface de ligação entre os mesmos e por conseqüência comprometer a aderência. Já a permeabilidade a líquidos e outras substâncias agressivas pode não ser desejada, quando ela permitir o acesso dos mesmos às armaduras e à própria massa do concreto.

- compatibilidade química com as armaduras e outros materiais: para manter as armaduras existentes ou novas armaduras passivadas, é desejável que os materiais de reparo tenham um pH alto e que sejam capazes de mantê-lo assim. Quando certos acabamentos à estrutura reparada são desejados, o material de reparo deve ser compatível quimicamente com os mesmos e permitir sua aplicação.

- propriedades elétricas: principalmente em reparos localizados de corrosão de armaduras, a resistividade do material de reparo não deve ser muito superior da do concreto, pois a corrente de corrosão se concentrará nas áreas adjacentes ao reparo, levando à uma corrosão mais intensa ainda o restante das armaduras.

- aplicabilidade: os materiais de reparo devem apresentar características de aplicação adequadas às condições existentes na estrutura a ser reparada. Isto significa que o material deve ser adequado à aplicação sobre o substrato nas condições em que ele se apresenta, sob temperaturas ambientais que ocorrem ou que podem ser obtidas no local, assim como com as condições de ventilação existentes, quando se tratam de materiais que emanam gases e solventes. O material deve ser ainda adequado ao emprego em diversas direções, seja na posição horizontal ou vertical, por exemplo. O tempo de maturação do material de reparo deve ser adequado às exigências de utilização



da estrutura reparada. Sua aplicação deve ser possível quando há a presença de substâncias químicas no ambiente, tráfego, vibrações e variações de temperatura também. Aderência às armaduras pode ser importante quando o material entra em contato direto com as mesmas. O tempo de vida útil do material deve também ser levado em conta quando se especifica a durabilidade do reparo. Por fim, o aspecto estético do material pode ser importante quando a estrutura tem um desempenho visual importante. A camada mínima de material que deve existir para que ele tenha possa desempenhar suas funções deve ser compatível com o espaço existente para receber o material de reparo.

LAMBE e HUMPHREY (1990), junto com outros autores, destacam alguns aspectos mais específicos como decisivos no desempenho de um material destinado ao reparo de estruturas: adesão e aderência ao substrato de concreto, bem como durabilidade da aderência (PIGEON e SAUCIER, 1994); retração a curto e longo prazo; dilatação térmica; resistência à penetração de íons cloreto e gás carbônico; passivação das armaduras; resistências à compressão e flexão; facilidade de aplicação; durabilidade aos mais variados agentes degradantes.

Outros aspectos importantes dos materiais para reparo podem ser destacados ainda, como o custo, a disponibilidade, a necessidade de equipamentos para aplicá-los, a especialização da mão de obra necessária, mas estes não se relacionam diretamente com as propriedades dos mesmos. Tais aspectos passam a ser importantes ao se selecionar um material para a execução de um reparo, quando estes detalhes podem influenciar definitivamente uma escolha.

MAILVAGANAM e DEANS (1992a) sugerem então algumas etapas para a seleção e escolha de um determinado material ou sistema de reparo. Através delas, chega-se a todos os requisitos que um material ou sistema deve apresentar para desempenhar satisfatoriamente sua função, que pode ser muito variável em decorrência de que as condições de cada obra são quase que únicas e particulares. Os materiais de reparo em geral se aplicam a várias situações de reparo, como poderá ser visto mais adiante neste capítulo, e a escolha certa de um determinado material ou sistema somente será alcançada quando forem conhecidos a fundo todos os aspectos que envolvem sua aplicação, desempenho e durabilidade.

1º definir as condições de uso da estrutura avariada, com vistas a identificar os agentes degradantes que mais atuaram e pré-selecionar materiais resistentes aos mesmos.

2º determinar as características de aplicabilidade do material ou sistema sob as condições existentes, descartando aqueles que não puderem ser aplicados por falta de espaço físico, condições ambientais inadequadas, características da estrutura incompatíveis com o tipo de aplicação requerida.

3º considerar a necessidade de equipamentos e sua disponibilidade, além da existência de acesso dos mesmos ao local do reparo.

4º fazer considerações práticas sobre os riscos envolvidos, a relação durabilidade x custo, se reparar ou substituir, se existem experiências semelhantes anteriores, se a intervenção não leva ao desatendimento de normas e padrões, se a solução pronta não representa uma agressão ao meio ambiente.

5º verificar as características e a durabilidade do material ou sistema. Observar propriedades que devem ser controladas ou atendidas para que o material tenha o desempenho desejado. Verificar a manutenção destas características ao longo do tempo. Realizar ensaios, se necessário, ou verificar o



comportamento do material em aplicações existentes. Levantar detalhes para a correta aplicação do material.

Se ao levar-se em conta todos estes aspectos, um determinado material apresentar características que satisfazem plenamente ou pelo menos com vantagens as exigências decorrentes dos mesmos, têm-se uma solução em potencial para o reparo necessário.

## **2.4 MATERIAIS PARA REPAROS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, CONFORME OS TIPOS DE REPAROS**

Considerando as características que um material de reparo deve apresentar, e os tipos de materiais desejáveis para os muitos casos de deterioração que assolam as estruturas de concreto armado, pode-se destacar uma série de materiais que normalmente são empregados na recuperação das estruturas. Conforme o tipo de reparo necessário, os materiais ou sistemas mais utilizados são destacados a seguir, indicando-se alguns aspectos que os justificam:

### **a) Materiais para preenchimento ou reconstituição de seção:**

- concretos e argamassas de cimento Portland: estes materiais são, em geral, os mais usados para reparos desta natureza e outras também (PERKINS, 1986; HELENE, 1992). Seu uso justifica-se principalmente por apresentarem características semelhantes ao concreto da estrutura avariada ou por poderem ser dosados para tal. Em situações de reparos, normalmente estes materiais são acompanhados de adições para o incremento de alguma de suas propriedades.

- argamassas e concretos poliméricos: subdividem-se em dois grupos: os que levam cimento Portland como aglomerante, recebendo emulsões de látex e epóxi para melhorar suas propriedades de coesão, resistência, aderência e permeabilidade; e os compostos sem cimento Portland, que levam resinas como aglomerante. No primeiro grupo encontram-se as argamassas poliméricas compostas por areia, cimento Portland e até 20% de adição de emulsões de estireno-butadieno, PVA, acrílicas e epoxídicas. No segundo, encontram-se as formulações a base de resinas epóxi, resinas fenolformaldeído, resinas poliéster, estervinílicas, furânicas e acrílicas. Estas formulações podem conter ou não agregados, fileres minerais, e em geral devem ser ativadas por um agente catalisador.

- composições de pega rápida: cimento aluminoso, fosfato magnésio. Com estes materiais são feitas composições que adquirem as resistências desejadas rapidamente.

- grautes: composições extremamente fluidas a base de cimento Portland ou polímeros, com ou sem agregados, fileres e fibras. As mesmas resinas que são utilizadas nas argamassas poliméricas podem ser usadas nos grautes, que se diferenciam basicamente pela fluidez, o que os faz apropriados para o preenchimento de cavidades.

**b) Materiais adesivos:** juntamente com os materiais para preenchimento ou reconstituição de seções são empregados materiais cuja função é garantir melhor ligação entre o concreto existente e o material de reparo. São emulsões a base de látex (estireno-butadieno, PVA, acrílico) e epóxi. São chamados de primers também, principalmente quando atuam também na proteção do substrato.



**c) Materiais para revestimento:**

- membranas ou pinturas betuminosas, de poliéster e vinil éster, epóxi, uretano, neoprene, epoxi-alcitrão, acrílico. Combinadas com fibras, mantas, agregados.

- camadas de argamassa ou concreto: de cimento Portland, com adições e aditivos, ou poliméricos.

- concreto (ou argamassa) projetado: executado por via seca ou úmida, com adições. Indicado para grandes áreas a serem revestidas.

**d) Materiais selantes e impermeabilizantes:**

- selantes ou películas: pinturas a base de látex, butil, acrílico, polisulfito, uretano, silicone, epoxi, óleos. Podem ter cargas minerais ou não. Apresentam-se com diferentes flexibilidades, a serem selecionados conforme a aplicação.

- impermeabilizantes: produtos que impedem a passagem de água ou a repelem, em geral. Podem ser hidrofugantes (siliconatos, resinas de silicone, silanos e siloxanos (RAMOS, 1991; KAZMIERCZAK, 1991), ou formadores de película e membranas, sendo a base dos mesmos citados no item anterior. Incluem-se também os produtos de base asfáltica e cimento Portland.

**e) Materiais para injeção de fissuras:**

- grautes, natas e resinas: a base de cimento Portland, epóxi, látex. Devem ter consistência fluida a líquida, que permita a injeção em pequenas aberturas.

**f) Materiais para acabamento e proteção superficial:**

- endurecedores de superfície: substâncias líquidas ou pulverulentas que promovem o tamponamento de poros e endurecimento da superfície do concreto, recém aplicado ou existente. Agem em geral por silicatação da camada superficial. Metassilicato de sódio ou potássio, tetrafluoreto de silício, fluorsilicato de magnésio ou zinco.

- tintas e vernizes: a base de PVA, acrílico, epóxi, vinil, uretana, borracha clorada. Para protegerem a superfície do concreto, dar acabamento e também proteger contra a penetração de agentes degradantes.

Nos materiais de reparo podem-se acrescentar ainda os produtos para a proteção da armadura, como as pinturas anti-corrosivas e primers de proteção catódica, além de aditivos e pigmentos que são inibidores da corrosão. Para proteção das armaduras existem ainda os sistemas de proteção catódica, que não caracterizam um material propriamente dito.

## **2.5 POTENCIALIDADES DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND COMO MATERIAL DE REPARO**

Considerando os diversos tipos de materiais de reparo e os casos de deterioração que mais atacam as estruturas de concreto armado, observa-se que as argamassas de cimento Portland possuem diversas aplicações neste campo. Diversos autores destacam as potencialidades das

argamassas como um material de reparo, principalmente para situações que envolvem a reconstituição da seção das peças, revestimento do concreto e das armaduras (novas ou existentes) e proteção à estrutura.

MAILVAGANAM e DEANS (1992b) indicam argamassas de cimento Portland para várias situações de reparo. Para casos como lascamento do concreto, seja pela corrosão das armaduras ou outro agente, existência de ninhos de segregação no concreto, estruturas fissuradas que podem receber reparo rígido, abrasão ou erosão de superfícies, infiltrações e permeabilidade, etc. LAMB (1989) destaca as argamassas como um material geralmente bem aceito para as mais variadas situações de reparo em estruturas deterioradas pela corrosão das armaduras ou outro agente. Considera principalmente os sistemas que envolvem a aplicação manual das argamassas, em reparos onde a espessura total das diversas camadas de revestimento não ultrapassa 10 cm (PERKINS, 1986). Mesmo para áreas de grande extensão, considera que pelas características de baixo custo, facilidade de aplicação e propriedades compatíveis com as do concreto, as argamassas são em geral uma boa opção para muitos casos de reparos.

Dos aspectos que geralmente são destacados em relação às argamassas de cimento Portland, coloca-se alguns:

- aderência a substratos de concreto endurecido: a boa aderência que pode existir entre a argamassa e o concreto é um aspecto muito destacado, que elimina em certos casos até a aplicação de primers adesivos (LAMB, 1989; PIGEON e SAUCIER, 1994; MIRZA, 1991a). Em relação a outras argamassas e materiais de reparo, as argamassas de cimento Portland alcançam boa aderência, superiores às demais, às vezes (MIRZA, 1991b). Para que esta aderência seja alcançada, PERKINS (1986) ressalta a importância do preparo do substrato. O apicoamento ou jateamento da superfície estão entre os métodos que mais contribuem para a aderência (OLIVEIRA, 1989). Em relação ao grau de saturação do concreto para receber a argamassa, não há um consenso na literatura. LAMB (1989) destaca a necessidade do substrato estar úmido. FIGUEIREDO (1989) destaca que para argamassas mais fluidas (grautes) a aderência é melhor no substrato seco. PIGEON e SAUCIER (1994), após vários estudos (PIGEON e SAUCIER, 1991) e levando em consideração a durabilidade da aderência após ciclos acelerados de envelhecimento, concluem que é difícil obter conclusões exatas sobre as condições do substrato, mas que tudo indica que uma condição de parcialmente saturado é a melhor opção para se alcançar uma boa e durável aderência ao concreto. ALLEN (1987d), PERKINS (1986) e MAILVAGANAM e DEANS (1992b) citam o uso de adições para melhorar as propriedades das argamassas, entre elas a aderência, e também a adoção de baixas relações água/aglomerante. A trabalhabilidade adequada das argamassas também destaca-se como um aspecto importante para se obter boa aderência.

- deformações: a deformabilidade das argamassas é semelhante ou compatível com a do concreto, portanto a durabilidade da aderência tem mais possibilidade de ser mantida, a curto e longo prazo (LAMB, 1989, MAILVAGANAM e DEANS, 1992b). O coeficiente de expansão térmica é praticamente o mesmo, e o módulo de deformação pode ser muito semelhante ou pelo menos dentro de limites adequados (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b). A fluência também deve ser semelhante (PIGEON e SAUCIER, 1994).

- a adesão inicial da argamassa e sua tixotropia são outros aspectos importantes destacados, o que possibilita sua aplicação mesmo em superfícies verticais e tetos. A adesão pode ser incrementada



com o uso de adições (ALLEN, 1987d), se for o caso, mas sua consistência pouco fluida e não rugosa adequa-se muito bem à aplicação superficial (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b).

- alcalinidade: semelhante à alcalinidade do concreto, garantem a passivação das armaduras. Quanto à carbonatação, podem desenvolver baixas frentes se tiverem pouca porosidade, adotando-se baixas relações água/aglomerante e adições que proporcionem um refinamento dos poros (ANDRES, 1989; WOLF e DAL MOLIN, 1989; HELENE et al., 1995; BAUER, 1996). Se proporcionadas com cimento Portland ARI (CPV), menos carbonatação. BIER et al. (1987), citados por ROPER e BAWEJA (1994), destacam que a alcalinidade de um concreto pode ser restabelecida aplicando-se uma camada de argamassa sobre ele.

- baixo custo, disponibilidade e experiência já adquirida são aspectos que tomam o uso de argamassas de cimento Portland bastante atrativo (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b e LAMB, 1989)

As ressalvas e cuidados que devem ser tomados quanto ao seu uso concentram-se principalmente com relação à retração por secagem. A água em excesso que pode ser adicionada para obtenção de trabalhabilidade adequada pode gerar retrações que levem à falência da aderência (MAILVAGANAM e DEANS, 1992a; PIGEON e SAUCIER, 1994). Para tanto, medidas como o uso de baixas relações água/aglomerante e aditivos expansores (de retração compensada) pode contornar a ocorrência deste problema (PIGEON e SAUCIER, 1994; ALLEN, 1987d; PERKINS, 1986; MAILVAGANAM e DEANS, 1992b).

Valores indicados para as propriedades de argamassas de cimento Portland destinadas ao uso em reparos são encontrados na literatura. Estes valores, no entanto, devem ser vistos com cautela se tomados como parâmetros para definir as propriedades de uma argamassa de reparo, pois cada caso de reparo tem suas exigências particulares e a elas é que a argamassa deve satisfazer.

MAILVAGANAM e DEANS (1992b) relatam faixas de valores em que em geral as argamassas utilizadas se enquadram:

- resistência à compressão em um dia: de 5,55 a 26,72 MPa
- resistência à compressão aos 28 dias: de 34,25 a 79,46 MPa
- resistência na flexão: de 6,30 a 8,91 MPa
- resistência de aderência: 1,85 a 3,43 MPa
- expansão aos 28 dias: 0,01 a 0,10 %

CHAN et al. (1991) recomendam que argamassas para reparos em concretos com resistência de 12 a 31 MPa apresentem:

- resistência à compressão aos 28 dias: 30 a 60 MPa
- módulo de deformação: 15 a 25 GPa

PERKINS (1986) indica algumas características para os traços de argamassas (e concretos) recomendados:

- relação a/c < 0,40

Traços da ordem de 1: 3 (cimento: agregados)

O uso de cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) também é recomendado, pelas altas resistências obtidas com pouca idade e por desenvolverem menor carbonatação, conforme os autores já citados anteriormente e MAILVAGANAM e DEANS (1992b).

## 2.6 ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA AO CONCRETO E ARGAMASSAS

A sílica ativa, ou sílica fume (fumaça de sílica), é um subproduto industrial, produzido em indústrias que utilizam fornos elétricos à arco voltaico para a produção de silício metálico e ligas de ferro silício. Durante a produção destes materiais pelo aquecimento das matérias-primas, processam-se reações químicas e se tem como uma das conseqüências o desprendimento da sílica ativa, como uma "fumaça" de sílica, que pode ser devidamente coletada em filtros especiais. Sendo uma "fumaça", apresenta-se como um pó muito fino, com coloração que vai do cinza escuro até quase o branco, dependendo da composição e dosagem das matérias-primas. Este pó muito fino são grãos esféricos de sílica na forma amorfa, basicamente compostos por óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (SELLEVOLD e NILSEN, 1987; MALHOTRA e MEHTA, 1996; MALHOTRA et al., 1994; FIP, 1988; MALHOTRA, 1988).

Estas características da sílica ativa lhe conferem duas ações básicas quando observada à luz da química dos cimentos e tecnologia de concretos. A primeira destas ações é referente à própria forma física da sílica ativa, que apresentando-se como pequenos grãos esféricos com dimensões médias que são da ordem de 100 vezes menores que os grãos de cimento, faz com que ela atue como um microfíler quando adicionada às formulações a base de cimento (concreto ou argamassa). O efeito resultante é uma maior densificação e continuidade da pasta de cimento e por conseqüência do concreto ou argamassa, o que acaba influenciando diversas propriedades destes materiais, tanto no estado fresco como endurecido (SELLEVOLD e NILSEN, 1987; MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Outra ação que a sílica ativa desempenha ao ser combinada com o cimento Portland deve-se à sua composição química e estrutura, óxido de silício quase puro, na forma amorfa. Isto garante a reatividade química da sílica ativa na presença de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e água, gerando compostos do tipo C-S-H, silicatos de cálcio hidratados, compostos resistentes semelhantes que resultam na hidratação do cimento Portland. Ao se processarem as reações de hidratação do cimento são gerados compostos C-S-H e hidróxido de cálcio, que em presença da sílica ativa também reage e forma compostos tipo C-S-H. É a atividade pozolânica da sílica ativa, que é tida como altamente reativa (MALHOTRA e MEHTA, 1996; GJORV, 1988).

Já é sabido que estas duas ações básicas da sílica ativa produzem efeitos sobre diversas propriedades macroscópicas do concreto e na sua microestrutura, tanto no estado fresco como no endurecido. Grande parte destes efeitos são bem conhecidos e comprovados experimentalmente, apenas poucos aspectos não são absolutamente esclarecidos.

No estado fresco, pode-se citar que a sílica ativa produz mudanças significativas na consistência, ocorrendo um aumento na coesão da pasta de cimento pelo efeito de microfíler da sílica



ativa. Tal efeito também age comprovadamente sobre a exsudação, pela deposição das partículas da sílica ativa nos canais que propiciam o escoamento d'água. É esperado também que haja uma diminuição da segregação no concreto com adições de sílica ativa (MALHOTRA et al., 1994; MALHOTRA E MEHTA, 1996).

No estado endurecido um dos efeitos mais notável que se atribui à sílica ativa é o aumento da resistência do concreto. A adição da sílica ativa em um concreto produz acréscimos na resistência à compressão, que são maiores ou menores, dependendo da relação água/aglomerante adotada. Isto se deve principalmente às mudanças ocorridas na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados. A sílica ativa propicia um refinamento dos poros e cristais que se desenvolvem principalmente nesta região, considerada como ponto fraco na microestrutura do concreto, tornando esta zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento muito mais densa e resistente. Logo, torna toda a massa do concreto mais contínua e densa, e por conseqüência mais resistente. Esta ação da sílica ativa se faz presente principalmente nos primeiros 28 dias de idade (MALHOTRA et al., 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996). Igualmente a concretos sem adições, concretos com adições de sílica ativa podem sofrer o fenômeno da retração.

O mesmo refinamento dos poros ocasionado pela adição de sílica ativa ao concreto pode ser percebido também ao se avaliar a porosidade total da massa de concreto, onde se percebe que há uma diminuição da porosidade, mas que se reflete principalmente no tamanho dos poros, que ficam menores, e portanto influencia na penetração e difusão de agentes agressivos. Desta forma, este efeito caracteriza outra influência significativa da adição da sílica ativa em concretos, que é o aumento da durabilidade dos concretos através da redução à permeabilidade e difusibilidade de agentes agressivos ao concreto (massa ou armado) como água, CO<sub>2</sub>, íons cloreto e sulfato (MALHOTRA et al., 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996; BERKE et al., 1991; ANQI et al., 1991; WOLSIEFER, 1991; SELLEVOLD e NIELSEN, 1987; FIP, 1988; ROPER e BAWEJA, 1994; GJORV, 1994).

Por estas razões sucintas apresentadas e outras mais encontradas na bibliografia passou-se a considerar que adições de sílica ativa em argamassas produziram efeitos semelhantes e portanto as tornariam mais adequadas para reparos e reforços do que as argamassas comuns de cimento e areia, particularmente se possuírem maior resistência e durabilidade.

## **2.7 CONCRETOS E ARGAMASSAS COM SÍLICA ATIVA PARA REPAROS - PRINCIPAIS INDICAÇÕES**

Pelos efeitos que a adição de sílica ativa produz em composições contendo cimento Portland, discutidos no capítulo anterior, algumas referências ao uso de adições de sílica ativa em argamassas, em concreto e argamassas para reparos, podem ser encontradas na literatura. Estas indicações todas se baseiam no fato de que a adição de sílica ativa pode melhorar em muito as características destes materiais, principalmente quanto à durabilidade.

PAILLERE et al. (1991) destaca o uso de adições de sílica ativa em argamassas principalmente para reduzir sua porosidade. Alerta, no entanto, de que estas argamassas necessitam ser cuidadosamente curadas, para alcançarem a plenitude de suas capacidades.

MAILVAGANAM e DEANS (1992b) coloca que a adição de sílica ativa é vital para as composições a serem utilizadas em reparos de estruturas de concreto armado, especialmente onde se quer alta resistência e baixa porosidade e permeabilidade.

Em concretos projetados, MORGAN (1994) coloca que a adição de sílica ativa é fundamental para se obter um bom desempenho destes revestimentos, pois aumenta a adesão e coesão, diminuindo a reflexão (rebound) e permitindo a obtenção de maiores espessuras. Também permite obter maiores resistências mecânicas e resistência ao ataque químico de agentes agressivos. Se considerarmos a aplicação de argamassas por projeção manual ou mecânica, estas mesmas vantagens pode ser obtidas.

A adição de sílica ativa ao concreto é capaz de melhorar sua aderência a concretos endurecidos, segundo SELLEVOLD e NILSEN (1987), além de melhorar a resistência à abrasão e erosão. GJORV et al. (1990) destaca que a aderência do concreto ao aço é influenciada positivamente pela adição de sílica ativa. Este mesmo autor (GJORV, 1994) destaca a redução na permeabilidade a íons agressivos que ocorre, e declara que em concretos de alto desempenho é imprescindível o uso de uma adição como esta.

Nas referências sobre o uso de argamassas com adições de sílica ativa em reparos, a adição foi feita principalmente para adquirir melhores resistências e aderência, e maior proteção a agentes agressivos. TARALLO JR. et al. (1994) e CARNEIRO et al. (1996) utilizaram argamassa com 10% de adição de sílica ativa em reparos de vertedouros de barragens, obtendo o sucesso esperado. GOULART NETO et al. (1996) também citam o uso de argamassas com sílica ativa para reparos.

MIRZA (1991a) estudou argamassa com adições de 6% de sílica ativa em conjunto com outras argamassas para reparos. Avaliou a resistência de aderência, permeabilidade a água, módulo de deformação, resistência a abrasão e erosão e compatibilidade térmica com o concreto. Concluiu que a argamassa apresenta um bom desempenho frente a estas solicitações, o que a coloca como uma boa alternativa para reparos. O desempenho obtido foi superior ao de algumas argamassas poliméricas. Foi alcançada uma resistência de aderência ao cisalhamento com compressão (ASTM C 882 - ASTM, 1991) de 12,7 MPa.

Com base nestas referências, e considerando as possibilidades de utilização das argamassas como material de reparo, considerou-se que argamassas com adições de sílica ativa teriam um bom potencial para estes serviços, principalmente pelos efeitos benéficos da sílica ativa em várias das suas propriedades.



### **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL - PARTE 1: CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASAS COM ADIÇÕES DE SÍLICA ATIVA**

#### **3.1 MATERIAIS UTILIZADOS**

Partindo-se dos objetivos iniciais da pesquisa, de desenvolver traços de argamassa com cimento Portland, areia da região e sílica ativa, que sejam de fácil obtenção e que apresentem características adequadas para o uso em reparos e reforços de elementos de concreto armado, selecionou-se estes materiais de forma a atender estes requisitos, considerando ainda a capacidade de manter constância nas características dos mesmos, quando provenientes de lotes diferentes. Como o programa experimental que foi desenvolvido era bastante amplo, buscou-se selecionar materiais cuja proveniência mantivesse um certo padrão nas características dos mesmos, pois seria inviável realizar todo o programa experimental com materiais provenientes de um mesmo lote. Dentro de um mesmo ensaio, no entanto, teve-se o cuidado de se utilizar os materiais de um mesmo lote, para não haver distorções e variações em consequência da origem dos materiais. Apresenta-se a seguir os materiais selecionados, suas características e as justificativas de escolha de cada um. Estes materiais passaram a ser adotados em toda a pesquisa que foi desenvolvida, e as características que aqui se apresentam servem como especificação para a seleção de materiais em futuras aplicações.

##### **3.1.1 Cimento Portland**

Adotou-se o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) como material aglomerante na argamassa em estudo. Esta escolha levou em consideração que em reforços e reparos estruturais são necessários materiais que passem a desempenhar suas capacidades mecânicas tão logo sejam aplicados, pois muitas vezes a estrutura avariada corre risco de colapso ou a intervenção causa transtornos que comprometem seriamente as atividades dos usuários. O cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI) desenvolve grande parte de sua resistência logo nos primeiros dias de idade de aplicação do que os demais tipos de cimento Portland classificados em nosso país, atingindo, em 7 dias, a mesma resistência de um cimento Portland comum (CPI) aos 28 dias de idade. Além disso, dadas as condições locais de disponibilidade de tipos de cimento, o cimento Portland ARI é o único tipo de cimento disponível que não possui adições em sua composição (NBR 5733, no máx. 5% (ABNT, 1991)), o que, em se tratando de uma argamassa que receberá adições minerais, é benéfico para avaliar somente o efeito da adição que se adotará. Ao longo de todo o programa experimental utilizou-se o cimento Portland CPV-ARI da marca Eldorado, o qual possui as seguintes características (em conformidade com as especificações da ABNT (1991) NBR 5733), determinadas segundo a normalização existente, pela CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do RS:

<b>a) Análise química:</b>	%
- perda ao fogo (NBR 5743)	2,46
- dióxido de silício total - SiO <sub>2</sub> (NBR 9203)	19,67
- óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (NBR 9203)	5,01
- óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (NBR 9203)	2,62
- óxido de cálcio total - CaO (NBR 9203)	64,02
- óxido de magnésio - MgO (NBR 9203)	1,38
- anidrido sulfúrico - SO <sub>3</sub> (NBR 5745)	3,11
- óxido de sódio - Na <sub>2</sub> O (NBR 5747)	0,03
- óxido de potássio - K <sub>2</sub> O (NBR 5747)	0,84
- enxofre - S (NBR 5746)	-
- resíduo insolúvel (NBR 5744)	0,56
- óxido de cálcio livre (NBR 7227)	1,48
- equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	0,58
<b>b) Composição potencial:</b>	%
- silicato tricálcico - C <sub>3</sub> S	58,83
- silicato dicálcico - C <sub>2</sub> S	12,01
- aluminato tricálcico - C <sub>3</sub> A	8,84
- ferro-aluminato tetracálcico - C <sub>4</sub> AF	7,97
- sulfato de cálcio - CaSO <sub>4</sub>	5,29
<b>c) Módulos:</b>	
- hidráulico	2,26
- sílica	2,58
- alumina	1,91
<b>d) Análise física:</b>	
- finura - índice de finura (NBR 11579)	0,3%
- finura - área específica (NBR 7224)	0,441m <sup>2</sup> /g
- massa específica (NBR 6474)	3,14 g/cm <sup>3</sup>
- água de pasta de consistência normal	28,5%
- tempos de pega (NBR 11581)	
início	2h45min
fim	-



- resistência à compressão (NBR 7215)

1 dia	23,3 MPa
3 dias	38,6 MPa
7 dias	44,0 MPa

A adoção deste cimento em particular também baseou-se na constância que têm apresentado nas suas características, ao longo de diversas análises que têm sido feitas nos trabalhos de pesquisa desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no seu Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

### 3.1.2 Areia

Uma vez que um dos objetivos da pesquisa era o de desenvolver uma argamassa que fosse de fácil proporcionamento e que se adequasse aos serviços de reparo e reforço, utilizou-se como agregado a areia de uso corrente nas obras de construção da região. A areia é proveniente do estuário do Rio Guaíba, comercialmente classificada como areia média ou regular.

Sua granulometria e características compreendem, conforme determinação pelas normas NBR 7217/87, NBR 9776/87 e NBR 9777/87 (ABNT, 1987), os dados contidos na Tabela 3.1:

**Tabela 3.1** Granulometria e características físicas da areia.

Peneiras ABNT abertura (mm)	% média retida	% média acumulada
4.80	0	0
2.40	11.6	11.6
1.20	23.8	35.4
0.60	25.6	61.0
0.30	32.7	93.7
0.15	2.1	95.8
< 0.15	4.2	100

Dimensão máx. característica: 2.40mm
Módulo de finura: 2.98
Massa unitária: 1.51 kg/dm <sup>3</sup>
Graduação: 3 (média)

Cabe ressaltar que a composição granulométrica das areias é muito variável, mesmo provendo de um mesmo fornecedor. Isto pode acarretar em mudanças principalmente na trabalhabilidade das argamassas. Ao longo da realização do programa experimental utilizou-se areia de diferentes lotes, possivelmente com granulometrias um pouco diferentes. As características aqui apresentadas correspondem às características do primeiro lote utilizado, que foi usado no desenvolvimento dos traços das argamassas e primeiros ensaios de caracterização das propriedades das mesmas. A adoção de areia provenientes de lotes diferentes e com granulometrias um pouco diferenciadas, no entanto, não chegou a influenciar as características das argamassas ao longo da realização dos diversos ensaios do programa experimental deste trabalho. Contudo, se areias com granulometrias muito diferentes forem

usadas para proporcionar as argamassas que foram estudadas, possivelmente ocorrerão mudanças nas suas características, principalmente de trabalhabilidade e coesão no estado fresco.

### 3.1.3 Sílica ativa

Existem diversas "marcas" de sílica ativa no mundo e diversas formas de comercialização. A sílica ativa densificada e a em pó, ensacadas, ou dentro de formulações contendo outros tipos de aditivos para concreto são as mais difundidas. No Brasil, onde a sílica ativa começou a ser produzida para fins comerciais e de pesquisa a partir de 1988, o produto é disponível na forma de pó e densificada e dentro de formulações de aditivos para concreto, porém algumas empresas apenas comercializam o produto importado de outros países. Dentro das marcas comercializadas no Brasil, utilizou-se uma sílica ativa produzida no país, em fábrica de silício metálico localizada em Tucuruí, Pará. O produto é comercializado puro, em pó, não densificado, e é de fácil obtenção em qualquer parte do país.

O produto possui as seguintes características físicas e químicas, determinadas pela CIENTEC - Fundação de Ciência e Tecnologia do RS:

#### a) Características químicas:

óxido	teor %
SiO <sub>2</sub>	95,000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,040
CaO	0,170
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,060
TiO <sub>2</sub>	0,011
MgO	0,412
Na <sub>2</sub> O	0,511
K <sub>2</sub> O	0,488

#### b) Características físicas:

umidade: 0,80%

peso específico: 2,20 g/cm<sup>3</sup>

superfície específica: 16,20 m<sup>2</sup>/g

tamanho médio das partículas: 0,16 µm



### 3.1.4 Aditivos

Nos traços de argamassa onde a relação água/aglomerante seria baixa previu-se a utilização de um aditivo superplastificante para a obtenção da trabalhabilidade adequada. O aditivo selecionado foi à base de condensado de formaldeído naftaleno sulfonado, sendo de fabricação nacional. Apresenta densidade média de 1,18 g/cm<sup>3</sup>. A escolha de um aditivo em particular não deve ser considerada como determinante do desempenho do material em estudo, apenas implica em que os teores de aditivo utilizados nesta pesquisa valem quando for utilizado este aditivo em particular. Outros aditivos, de mesma base, podem ser perfeitamente adotados, apenas deve ser ajustado o teor ideal de aditivo para se obter as mesmas características de trabalhabilidade.

### 3.1.5 Água de amassamento

Utilizou-se a água disponível na rede local de abastecimento de água potável.

## 3.2 DESENVOLVIMENTO DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA

Uma vez que uma argamassa pode ser dosada com diversas proporções de cimento, areia, água e adições, estabeleceu-se algumas variáveis na composição dos traços de argamassa a serem estudados e assim obter o desempenho e as propriedades avaliadas em função destas variáveis de dosagem. Além disso, considerou-se a extensão da pesquisa, em termos de tempo e recursos, como limitante no número de traços a serem estudados.

Considerou-se como variáveis dos traços de argamassa a relação água/aglomerante e o teor de adição de sílica ativa. A relação aglomerante/agregado não foi considerada como variável mas sim como parâmetro de constituição dos traços, pois uma vez estabelecida a relação para um determinado traço, esta passou a ser fixa ao longo de todo o estudo.

Definiu-se duas relações água/aglomerante para a dosagem das argamassas. Esta relação, nesta pesquisa entendida como  $(\text{água} + \text{fração líquida do aditivo}) / (\text{cimento} + \text{sílica ativa})$ , é o principal determinante da resistência mecânica de concretos e argamassas. Tendo-se várias referências sobre este efeito, a escolha de duas relações água/aglomerante diferentes para a composição dos traços de estudo foi feita para se obter argamassas com diferentes características de resistência e microestrutura. Escolheu-se, mais precisamente, uma relação água/aglomerante mais baixa, de 0,35, para se proporcionar argamassas de resistências mais altas (acima de 50 MPa), e uma relação água/aglomerante mais alta, de 0,55, para se proporcionar argamassas de resistências médias (de 30 a 45 MPa). Não julgou-se necessário a adoção de outras relações água/aglomerante pois as variações nas propriedades da argamassa, em função desta variável, poderiam não ser significativas e estas duas relações caracterizam bem dois padrões de argamassas, uma que se aproxima às relações água/aglomerante obtidas nas dosagens em obras correntes e outra que caracteriza uma argamassa

especial destinada a serviços específicos, com a adoção de aditivos. Além disso, considerou-se os limites de tempo e recursos da pesquisa.

Estudos realizados em concretos com adições de sílica ativa demonstraram que teores de adições acima de 20% não proporcionam muitas vantagens na melhoria das propriedades do concreto (MONTEIRO, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 1993), sendo que até podem alterar significativamente a alcalinidade do mesmo, se a partir de 30%, podendo comprometer sua capacidade de passivação de armaduras (GJORV, 1988; FIP, 1988). Teores mais baixos, como de 5 a 15%, são apontados como mais eficientes em proporcionar melhorias nas propriedades do material (MONTEIRO, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 1993).

Desta forma, para conhecer-se o efeito da adição da sílica ativa nas propriedades das argamassas adotou-se teores que se limitam ao intervalo de 0 a 20%. Considerando-se também que a adoção de muitos teores de adições poderia ocasionar resultados pouco relevantes no que diz respeito ao efeito de diferentes teores no comportamento das argamassas, definiu-se apenas quatro teores de adição de sílica ativa para a composição dos traços, sendo eles de 0%, 5%, 10% e 20%. Por razões de disponibilidade de tempo e recursos resolveu-se não adotar o teor de 15% de adição, até por que a pesquisa teve um caráter um tanto quanto exploratório e portanto não caberia um detalhamento muito intenso. O teor de 20% foi adotado, mesmo sabendo-se que poderia ser excessivo, justamente para conhecer-se o comportamento da argamassa com um teor mais elevado de adição.

Assim sendo definidas as variáveis dos traços, estabeleceu-se oito traços de estudo:

a/c 0,35 - 0% sa	a/c 0,55 - 0% sa
a/c 0,35 - 5% sa	a/c 0,55 - 5% sa
a/c 0,35 - 10% sa	a/c 0,55 - 10% sa
a/c 0,35 - 20% sa	a/c 0,55 - 20% sa

Entenda-se **a/c** como relação água/aglomerante e % **sa** a porcentagem de sílica ativa em relação à massa de cimento, em massa também.

A definição da dosagem de agregados e conseqüente consumo de cimento de cada traço foi efetuada experimentalmente em laboratório. O critério de definição da relação aglomerante/agregado baseou-se na trabalhabilidade da argamassa, avaliada segundo a opinião de um operário da construção civil habituado aos serviços de preparo e aplicação de argamassas para revestimentos e pela medição da consistência em mesas "flow" (abatimento de corpo de prova tronco-cônico em mesa para índice de consistência - NBR 7215 (ABNT, 1991).

O procedimento adotado na dosagem de cada traço consistiu em:

- a)** pegar uma certa quantidade de cimento (por volta de 1 kg);
- b)** pesar a quantidade de água a ser colocada em função da relação água/aglomerante;
- c)** pesar a quantidade de sílica ativa a ser colocada conforme os teores estabelecidos;
- d)** promover a mistura do cimento, da sílica ativa e de certa quantidade conhecida de areia, adicionando a seguir a água;
- e)** adicionar mais areia para alcançar a consistência adequada, buscando-se diminuir o consumo de cimento.



Nos traços de relação água/aglomerante 0,35 foi necessário adicionar o aditivo superplastificante. Este era colocado junto com a água, numa proporção crescente a partir de 1% em relação à massa de cimento, até a obtenção do teor ideal que garante a trabalhabilidade adequada. Adotou-se que 60% da massa do aditivo era considerada como sendo água, em função de ensaios anteriores que historicamente revelam esta composição, portanto a cada adição era necessário corrigir as massas de cimento e sílica ativa para se manter a relação água/aglomerante.

A trabalhabilidade ideal era indicada pelo operador, que com sua experiência julgava se a argamassa era adequada ao lançamento manual com desempenadeira e se era capaz de aderir a uma superfície com rugosidade característica das superfícies dos elementos de construção civil, em qualquer posição. Por mais subjetivo que possa parecer este critério de definição, ressalta-se que um dos objetivos principais da pesquisa era o de desenvolver uma argamassa em laboratório mas que fosse perfeitamente reproduzível em obra, apresentando características de trabalhabilidade que agradassem aos operários que a aplicarão como revestimento ou preenchimento.

Todavia, para caracterizar quantitativamente esta trabalhabilidade adequada, realizou-se a medição do índice de consistência dos traços quando estabelecidos, procurando-se controlar o mesmo dentro dos limites de  $250 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ . Esta medição seguiu os prescritos da norma NBR 7215 (ABNT, 1991), no que se refere aos equipamentos e procedimento para a determinação do índice de consistência normal de argamassas para ensaios de cimento Portland. Este índice, no entanto, nem sempre caracteriza uma argamassa como mais ou menos "trabalhável", pois a trabalhabilidade de uma argamassa não relaciona-se exclusivamente com a sua consistência. Os resultados obtidos para os índices de consistência das argamassas constam na seção 3.3.1, que apresenta o ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos de argamassa, uma vez que estes índices foram determinados duas vezes, num primeiro momento quando desenvolveu-se os traços e efetuou-se uma moldagem de corpos de prova para este ensaio e novamente quando repetiu-se o ensaio.

Os traços definidos com os procedimentos e critérios apontados são os seguintes, considerando as relações água/aglomerante e os teores de adição de sílica ativa já estabelecidos previamente:

1: 1,8 - a/c 0,35 - 0% sa	1: 3 - a/c 0,55 - 0% sa
1: 1,7 - a/c 0,35 - 5% sa	1: 3 - a/c 0,55 - 5% sa
1: 1,7 - a/c 0,35 - 10% sa	1: 3 - a/c 0,55 - 10% sa
1: 1,6 - a/c 0,35 - 20% sa	1: 2,62 - a/c 0,55 - 20% sa

Entende-se **cimento: agregado**(areia), em massa. **a/c** e **% sa** já mencionados. O teor de aditivo adotado para os traços com relação água/aglomerante 0,35 ficou em torno de 3%, neste proporcionamento. Em outras misturas, quando adotou-se o mesmo aditivo mas proveniente de um outro lote, o teor de aditivo era novamente acertado, pois mesmo sendo o mesmo produto seu efeito pode variar.

Estes traços podem então ser apresentados em função do consumo por metro cúbico de argamassa, que constam na tabela 3.2:

**Tabela 3.2** Traços das argamassas e consumos de materiais.

Traço em massa	Consumo de materiais, em kg/m <sup>3</sup>				
	Cimento	Areia	Silica ativa	Aditivo	Água
1:1.8 a/c 0.35 0% sa	<b>739.2</b>	1330.6	-	22.2	245.4
1:1.7 a/c 0.35 5% sa	<b>747.6</b>	1270.9	37.4	22.4	261.4
1:1.7 a/c 0.35 10% sa	<b>735.1</b>	1249.7	73.5	22.1	269.7
1:1.6 a/c 0.35 20% sa	<b>731.1</b>	1169.8	146.2	21.9	294.0
1:3 a/c 0.55 0% sa	<b>497.7</b>	1493.2	-	-	273.7
1:3 a/c 0.55 5% sa	<b>492.2</b>	1476.5	24.6	-	284.2
1:3 a/c 0.55 10% sa	<b>486.7</b>	1460.1	48.7	-	294.5
1:2.62 a/c 0.55 20% sa	<b>511.4</b>	1339.8	102.3	-	337.5

Obs.: valores aproximados, considerando as seguintes massas específicas:

cimento: 3,14 kg/ dm<sup>3</sup>

areia: 2,63 kg/dm<sup>3</sup>

silica ativa: 2,20 kg/ dm<sup>3</sup>

água: 1 kg/dm<sup>3</sup>

A realização de todo o programa experimental foi feita com estes traços de argamassa e com os materiais caracterizados na seção anterior, salvo quando é feita alguma observação a respeito. Nas seções seguintes os traços serão referenciados somente pela sua relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa, sem mencionar-se a relação cimento:agregado e o teor de aditivo.

Quando para a realização de algum ensaio utilizou-se concreto, o traço adotado será referenciado na descrição do ensaio, mencionando-se também os materiais adotados. Para simplificar o proporcionamento destes concretos, utilizou-se normalmente o mesmo cimento, areia e aditivo que se adotou nas argamassas.

### 3.3 ENSAIOS MECÂNICOS REALIZADOS: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE

Uma vez que propriedades mecânicas adequadas é pré-requisito para uma argamassa ser utilizada em reparos e reforços, avaliou-se o desempenho das argamassas com adições de sílica ativa desenvolvidas frente a diversas solicitações mecânicas. Foram realizados ensaios para se avaliar quantitativamente a resistência à compressão axial, resistência à tração na compressão diametral, resistência de aderência e o módulo de deformação estático das argamassas, bem como o efeito das variáveis da composição das mesmas sobre as propriedades.

Sendo assim, os resultados dos ensaios foram analisados estatisticamente para se detectar a influência do traço da argamassa nas propriedades avaliadas, em termos da relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa. Com isto, buscou-se determinar tanto a magnitude das propriedades das argamassas como os fatores que regem as mesmas, com vistas a encontrar traços ótimos que concentrem o melhor desempenho geral.



### 3.3.1. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial das argamassas em estudo foi avaliada através do ensaio de corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5cm e altura de 10cm, realizado seguindo-se basicamente os procedimentos constantes na norma NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação de resistência à compressão (ABNT, 1991).

A caracterização da resistência à compressão das argamassas foi realizada em dois momentos, proporcionando-se duas determinações desta propriedade. Numa primeira determinação, exploratória, foi adotado um procedimento mais simples, excluindo-se alguns cuidados prescritos na norma e sem aleatorizar os corpos de prova. Na segunda determinação adotou-se rigorosamente os procedimentos da norma, e os corpos de prova que compunham uma determinação de resistência eram aleatorizados. Nas duas determinações buscou-se avaliar os efeitos dos constituintes dos traços na propriedade e também se avaliou se as mudanças no procedimento de mistura e moldagem afetavam a propriedade.

A resistência à compressão foi avaliada nas idades de 7, 28 e 63 dias, em ambas determinações. Isto permitiu verificar também o crescimento da resistência ao longo do tempo. Determinou-se ainda a consistência das argamassas através do índice de consistência, a fim de caracterizar de forma quantitativa a trabalhabilidade das mesmas. Os resultados destes índices obtidos são apresentados juntamente com os resultados do ensaio de compressão axial.

#### 3.3.1.1 Primeira determinação

##### 3.3.1.1.1 Procedimento de ensaio

A primeira determinação da resistência à compressão dos traços de argamassa desenvolvidos teve um caráter bastante exploratório, no que diz respeito à mistura, moldagem e planejamento do experimento. A inexistência de normas específicas para a avaliação da resistência de argamassas na época em que se realizou esta determinação fez com que se considerasse os procedimentos da norma NBR 7215 (ABNT, 1991). Considerou-se também algumas práticas adotadas na determinação da resistência à compressão de concretos.

Em relação ao número de corpos de prova a adotar, a norma NBR 7215 recomenda quatro corpos de prova para caracterizar a resistência de uma argamassa normal executada com determinado tipo de cimento, porém, a prática em ensaios de resistência de concretos estabelece um mínimo de três corpos de prova para a caracterização da resistência de um concreto. Desconhecendo-se a variabilidade do ensaio com as argamassas em estudo, e considerando aspectos econômicos, adotou-se o número de três corpos de prova para cada determinação nesta primeira caracterização da resistência dos oito traços de argamassa em estudo.

A mistura manual das argamassas foi adotada nesta determinação porque seus traços foram determinados fazendo-se a mistura manual dos constituintes até que se atingia a consistência e trabalhabilidade adequada. Assim sendo, manteve-se o procedimento de mistura ao se preparar este primeiro ensaio com as argamassas em estudo.

Supôs-se que eventuais efeitos por ocasião de moldagem seriam minimizados se fosse adotado rigorosamente o mesmo operador e procedimento, e resolveu-se moldar o número total de corpos de

prova dos traços de uma só vez. Assim, numa única etapa de moldagem, eram preparados os 9 corpos de prova de cada traço, a serem ensaiados nas três idades estipuladas.

Após a moldagem os corpos de prova eram deixados em ambiente de laboratório durante 24 horas, protegidos com filmes plásticos, quando então eram deformados e novamente deixados em ambiente de laboratório, até as datas de ensaio. A eliminação de qualquer procedimento de cura se deveu também ao fato de se considerar as condições de obra, quando muito frequentemente nenhum procedimento de cura é aplicado às argamassas e concretos.

### 3.3.1.1.2 Resultados da 1ª determinação da resistência à compressão

Os resultados obtidos para a resistência à compressão axial das argamassas constam na Tabela 3.3, que apresenta também a média dos três resultados de cada idade, o desvio-padrão, o coeficiente de variação da resistência à compressão e os índices de consistência de cada traço.

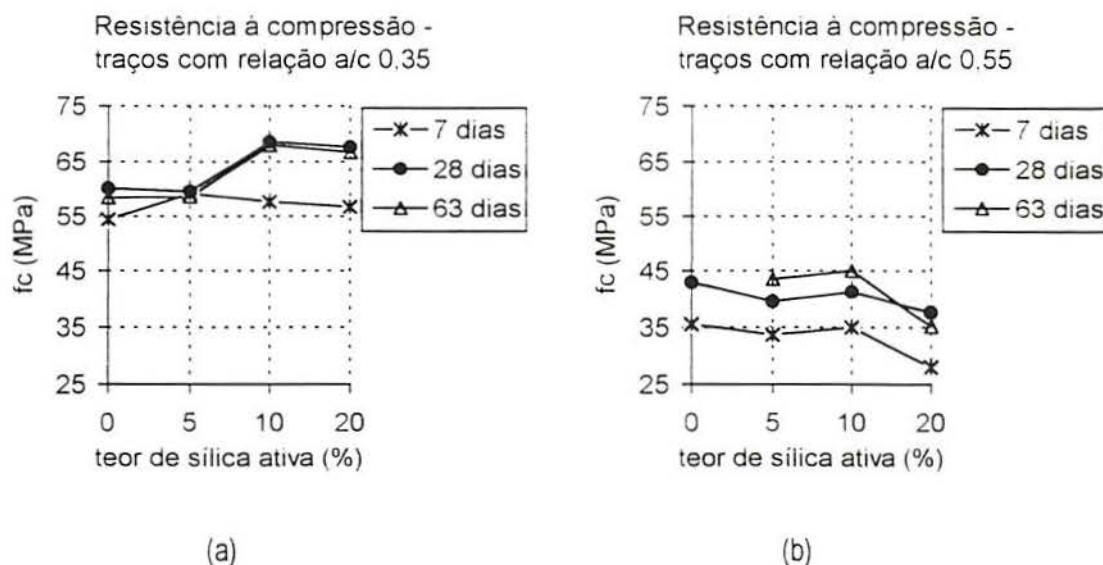
**Tabela 3.3** Resultados do ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos de argamassa, primeira determinação.

Traços	Índice de consistência (mm)	Resistência a compressão axial (em MPa)					
		7 dias de idade		28 dias de idade		63 dias de idade	
1: 1,8 a/c 0,35 0% sa	274,0	52,9	média: <b>54,3</b>	57,6	média: <b>60,1</b>	57,6	média: <b>58,4</b>
		55,8	s: 1,5	62,9	s: 2,7	53,3	s: 5,5
		54,2	CV: 2,68%	59,7	CV: 4,44%	64,3	CV: 9,49%
1: 1,7 a/c 0,35 5% sa	280,0	60,1	média: <b>59,1</b>	59,7	média: <b>59,5</b>	59,8	média: <b>58,6</b>
		59,5	s: 1,2	64,6	s: 5,2	68,8	s: 10,9
		57,8	CV: 2,02%	54,2	CV: 8,74%	47,1	CV: 18,62%
1: 1,7 a/c 0,35 10% sa	273,3	51,7	média: <b>57,6</b>	73,6	média: <b>68,5</b>	54,2	média: <b>67,9</b>
		61,1	s: 5,2	64,0	s: 4,8	74,6	s: 11,9
		60,1	CV: 8,96%	68,0	CV: 7,04%	75,0	CV: 17,51%
1: 1,6 a/c 0,35 20% sa	271,7	49,2	média: <b>56,6</b>	71,3	média: <b>67,5</b>	78,9	média: <b>66,6</b>
		57,8	s: 6,8	73,5	s: 8,5	54,4	s: 17,3
		62,7	CV: 12,08%	57,8	CV: 12,59%	-	CV: 25,99%
1: 3 a/c 0,55 0% sa	266,3	40,7	média: <b>35,7</b>	40,5	média: <b>43,0</b>	-	sem result.
		36,9	s: 5,4	44,2	s: 2,2	-	-
		30,0	CV: 15,12%	44,4	CV: 5,10%	-	-
1: 3 a/c 0,55 5% sa	263,7	32,7	média: <b>33,6</b>	37,6	média: <b>39,6</b>	42,4	média: <b>43,6</b>
		35,3	s: 1,5	41,6	s: 2,0	44,2	s: 1,0
		32,9	CV: 4,30%	39,5	CV: 5,06%	44,2	CV: 2,38%
1: 3 a/c 0,55 10% sa	254,3	34,3	média: <b>35,1</b>	42,7	média: <b>41,3</b>	42,0	média: <b>45,1</b>
		36,9	s: 1,6	39,9	s: 1,4	47,1	s: 2,7
		34,1	CV: 4,45%	41,3	CV: 3,39%	46,2	CV: 6,04%
1: 2,62 a/c 0,55 20% sa	240,7	26,1	média: <b>28,0</b>	35,9	média: <b>37,7</b>	34,1	média: <b>35,3</b>
		27,3	s: 2,4	39,0	s: 1,6	35,6	s: 1,0
		30,7	CV: 8,51%	38,1	CV: 4,23%	36,0	CV: 2,96%

Obs.: s: desvio-padrão, CV: coeficiente de variação. Valores que faltam foram perdidos ou invalidados por defeitos nos corpos de prova.

As médias dos resultados obtidos são apresentadas nos gráficos da Figura 3.1.





**Figura 3.1** Resistência à compressão ( $f_c$ ) versus teor de sílica ativa, para os resultados obtidos com os traços de argamassa, aos 7, 28 e 63 dias de idade.

(a) apresenta os resultados para os traços de relação água/aglomerante 0,35 e (b) apresenta os resultados para os traços de relação água/aglomerante 0,55.

### 3.3.1.2 Segunda determinação

#### 3.3.1.2.1 Procedimento de ensaio

A segunda determinação da resistência à compressão das argamassas diferenciou-se da primeira na maneira de efetuar a moldagem dos corpos de prova, no tipo de mistura e no procedimento de cura. Enquanto na primeira determinação cada traço de argamassa foi preparado de uma única vez, com mistura manual, sendo moldados todos os corpos de prova necessários para as rupturas futuras, na segunda determinação efetuou-se várias misturas para um mesmo traço e adotou-se mistura mecânica. Os corpos de prova foram deixados em câmara úmida até as datas de ensaio.

Mantendo-se o número de três corpos de prova para a determinação da resistência em cada idade, executou-se então três moldagens distintas para a confecção do número total de corpos de prova de cada traço, sendo destinado um corpo de prova de cada moldagem para cada determinação da resistência, nas diferentes idades. Todo o procedimento de mistura, adensamento, cura e ensaio dos corpos de provas seguiu o prescrito na norma NBR 7215 (ABNT, 1991), inclusive a determinação do índice de consistência das argamassas. Adaptou-se apenas os tempos de mistura no misturador mecânico, que compreendeu um minuto na velocidade baixa, contados a partir da colocação da água na mistura de cimento, areia e sílica ativa, um minuto de repouso e mais um minuto de mistura em velocidade alta.

Estes procedimentos possibilitaram dispersar algum efeito relacionado com o preparo da argamassa. Na determinação anterior, algum efeito pode ter comprometido todos os resultados de um determinado traço. Como se desconhece a totalidade dos fatores que podem influenciar esta propriedade das argamassas em estudo, a adoção destes dois procedimentos buscou esclarecer alguns deles, particularmente relacionados com a etapa de confecção e mistura.

### 3.3.1.2.2 Resultados para a 2ª determinação da resistência à compressão

Os resultados obtidos para o ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos nesta segunda determinação são apresentados na Tabela 3.4.

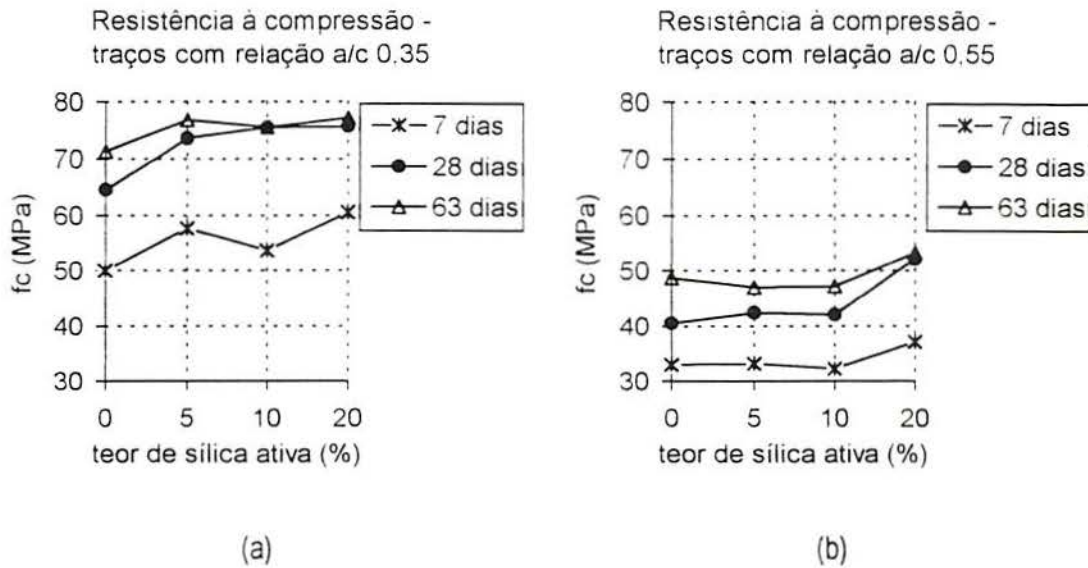
**Tabela 3.4** Resultados do ensaio de compressão axial, segunda determinação.

Traços	Índice de consistência (mm)	Resistência à compressão axial (em MPa)					
		7 dias de idade		28 dias de idade		63 dias de idade	
1: 1.8 a/c 0.35 0% sa	226.7	51.5	média: <b>50.0</b>	67.0	média: <b>64.5</b>	71.3	média: <b>71.3</b>
		49.1	s: 1.3	69.0	s: 6.1	71.3	s: 0.0
		49.5	CV: 2.57%	57.5	CV: 9.53%	-	CV: 0.00%
1: 1.7 a/c 0.35 5% sa	233.3	58.9	média: <b>57.6</b>	74.3	média: <b>73.5</b>	73.9	média: <b>76.9</b>
		59.5	s: 2.7	78.0	s: 4.9	80.6	s: 3.4
		54.5	CV: 4.74%	68.2	CV: 6.73%	76.1	CV: 4.44%
1: 1.7 a/c 0.35 10% sa	224.0	58.9	média: <b>53.7</b>	75.5	média: <b>75.5</b>	74.3	média: <b>75.4</b>
		51.7	s: 4.5	72.9	s: 2.6	69.6	s: 6.5
		50.5	CV: 8.46%	78.0	CV: 3.38%	82.4	CV: 8.58%
1: 1.6 a/c 0.35 20% sa	197.7	57.9	média: <b>60.5</b>	75.9	média: <b>75.7</b>	74.7	média: <b>77.1</b>
		60.3	s: 2.6	74.3	s: 1.3	77.2	s: 2.4
		63.2	CV: 4.39%	76.9	CV: 1.73%	79.4	CV: 3.05%
1: 3 a/c 0.55 0% sa	242.3	37.2	média: <b>33.0</b>	42.0	média: <b>40.5</b>	53.5	média: <b>48.7</b>
		31.0	s: 3.6	39.0	s: 1.5	48.5	s: 4.8
		30.8	CV: 11.03%	40.6	CV: 3.70%	44.0	CV: 9.76%
1: 3 a/c 0.55 5% sa	236.7	31.0	média: <b>33.2</b>	43.8	média: <b>42.5</b>	47.3	média: <b>47.0</b>
		34.1	s: 1.9	43.4	s: 2.0	48.7	s: 1.9
		34.6	CV: 5.87%	40.2	CV: 4.65%	45.0	CV: 3.97%
1: 3 a/c 0.55 10% sa	232.7	37.2	média: <b>32.2</b>	38.4	média: <b>42.2</b>	49.3	média: <b>47.2</b>
		24.8	s: 6.5	44.0	s: 3.3	47.7	s: 2.4
		34.6	CV: 20.31%	44.2	CV: 7.80%	44.6	CV: 5.06%
1: 2.62 a/c 0.55 20% sa	225.0	37.2	média: <b>37.1</b>	53.7	média: <b>52.1</b>	57.7	média: <b>53.3</b>
		37.2	s: 0,1	52.9	s: 2,1	56,7	s: 6,7
		37,0	CV: 0,31%	49,7	CV: 4,06%	45,6	CV: 12,59%

Obs.: s: desvio-padrão, CV: coeficiente de variação. Valores que faltam foram perdidos ou invalidados por defeitos nos corpos de prova.

A Figura 3.2 apresenta a média dos valores obtidos em gráficos segundo o teor de adição de sílica ativa, para cada idade e relação água/aglomerante.





**Figura 3.2** Resistência à compressão ( $f_c$ ) versus teor de adição de sílica ativa, para os resultados obtidos com os traços de argamassa, aos 7, 28 e 63 dias de idade.

(a) apresenta os resultados para os traços de relação água/aglomerante 0,35 e (b) apresenta os resultados para os traços de relação água/aglomerante 0,55.

### 3.3.1.3 Análise dos resultados das duas determinações

Procedeu-se a uma análise estatística dos resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas, nas duas determinações, para se avaliar o efeito das variáveis no desempenho da propriedade. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) (NANNI e RIBEIRO, 1992), que permite comparar grupos de valores considerando a variabilidade das médias entre os grupos e variabilidades das observações dentro dos grupos, baseando-se na distribuição de Fischer (F), com um determinado nível de significância, para verificar a significância dos fatores. Se a relação entre a média quadrada dos valores para um fator (MQ) e a média quadrada do erro (MQ do erro), o  $F_{calc}$ , for maior do que o valor de  $F(n_i, n_e)$  tabelado para o nível de significância considerado, a hipótese de que o efeito deste valor não é significativo deve ser rejeitada.  $n_i$  é o número de graus de liberdade do fator (GDL) e  $n_e$  é o número de graus de liberdade do erro.

Ao longo de todos os ensaios que envolveram os traços de argamassas com as duas relações água/aglomerante e diferentes teores de adição de sílica ativa, realizou-se esta análise.

As variáveis consideradas para a análise da resistência à compressão, que são os fatores que agem sobre a propriedade em questão, são apresentadas na Tabela 3.5, com os respectivos níveis, classificação e tipo. Nos demais ensaios repetem-se estas variáveis, porém variando-se às vezes o número de níveis.

**Tabela 3.5** Descrição das variáveis adotadas na análise de variância - ensaio de compressão.

Variável	Descrição	Dependência	N° de níveis	Tipo	Níveis
Fc	resistência à compressão	dependente	3	aleatório	cp1. cp2. cp3
a/c	relação água/ aglomerante	independente	2	fixo	0,35 - 0,55
sa	teor de sílica ativa	independente	4	fixo	0%, 5%, 10% e 20%
Idade	idade do ensaio	independente	3*	fixo	7, 28 e 63

\* Na primeira determinação, apenas duas idades foram consideradas, 7 e 28 dias, uma vez que aos 63 dias foram perdidos os dados referentes a um traço, portanto, não foi possível executar a análise considerando esta idade.

As variáveis independentes foram consideradas como efeitos sobre a variável dependente. Foram analisadas as interações entre os efeitos também.

A tabela de resultados da ANOVA para cada determinação é representada nas Tabelas 3.6 e 3.7.

**Tabela 3.6** Resultados da ANOVA para os resultados da **primeira** determinação da resistência à compressão das argamassas.

Variável	GDL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub> *	Significância
a/c	1	6702,414	413,1236	4,15	<b>significativo</b>
sa	3	23,931	1,4750	2,91	não signif.
Idade	1	607,763	37,4613	4,15	<b>significativo</b>
a/c+sa	3	68,201	4,2037	2,91	<b>significativo</b>
a/c+idade	1	0,163	0,0101	4,15	não signif.
sa+idade	3	28,345	1,7471	2,91	não signif.
∑ todos	3	14,149	0,8721	2,91	não signif.
erro	32	16,22375	-	-	-

\* F tabelado para o nível de 5% de significância. F(ni, ne), sendo ni = número de graus de liberdade do efeito e ne = número de graus de liberdade do erro.

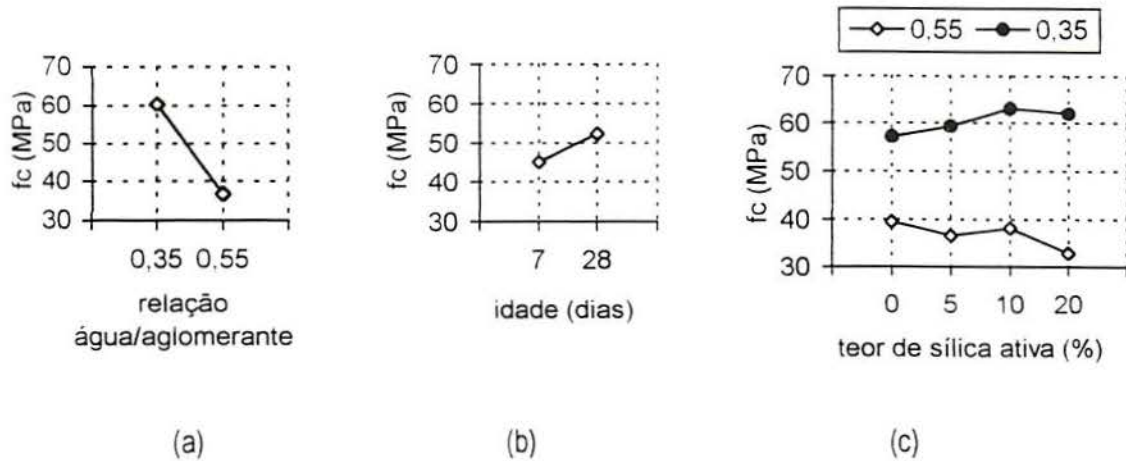
**Tabela 3.7** Resultados da ANOVA para os resultados da **segunda** determinação da resistência à compressão das argamassas.

Fator	GDL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub> *	Significância
A/c	1	11205,59	813,2654	4,04	<b>significativo</b>
Sa	3	187,98	13,6428	2,80	<b>significativo</b>
Idade	2	1980,99	143,7739	3,19	<b>significativo</b>
A/c+Ms	3	51,02	3,7027	2,80	<b>significativo</b>
A/c+idade	2	65,34	4,7421	3,19	<b>significativo</b>
Ms+idade	6	12,82	0,9303	2,30	não signif.
∑ todos	6	8,68	0,6298	2,30	não signif.
erro	47	13,77851	-	-	-

\* F tabelado para o nível de significância de 5%. F(ni, ne), sendo ni = número de graus de liberdade do efeito e ne = número de graus de liberdade do erro.

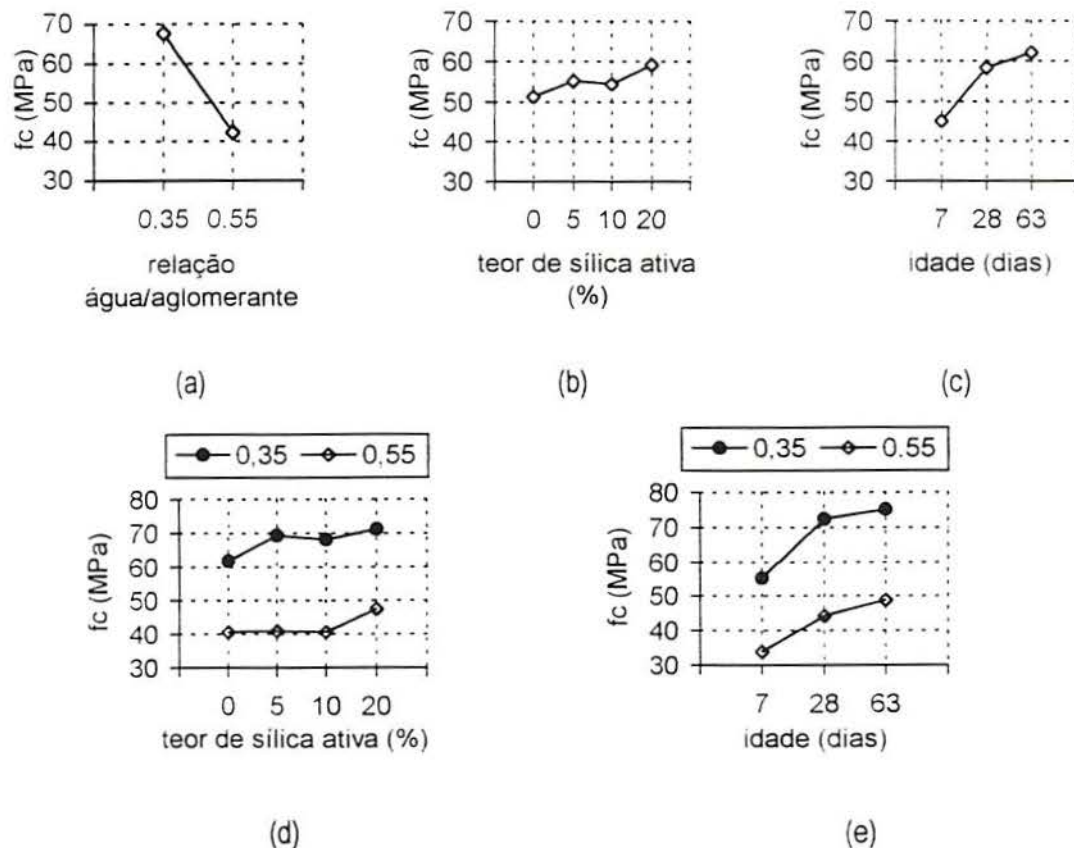


O comportamento da resistência à compressão das argamassas, segundo as variáveis que se revelaram significativas, é apresentado sob a forma de gráficos nas Figuras 3.3 (primeira determinação) e 3.4 (segunda determinação).



**Figura 3.3** Resistência à compressão axial das argamassas, segundo as variáveis que se revelaram significativas, para resultados da **primeira determinação**.

(a) apresenta o comportamento da resistência segundo a relação água/aglomerante dos traços, (b) apresenta a variação da resistência segundo a idade e (c) apresenta o comportamento da resistência segundo o teor de sílica ativa, para as duas relações água/aglomerante distintas (interação entre a/c e sa).



**Figura 3.4** Resistência à compressão axial das argamassas, segundo as variáveis que se revelaram significativas, para os resultados da **segunda determinação**.

(a) apresenta o comportamento da resistência segundo a relação água/aglomerante dos traços, (b) segundo o teor de sílica ativa, (c) segundo a idade, (d) a interação entre os teores de sílica ativa e as duas relações água/aglomerante e (e) a interação entre a idade e as duas relações água/aglomerante.

A partir dos resultados das ANOVA geradas, pode-se perceber, antes de se avaliar os efeitos propriamente ditos, que a adoção de procedimentos um pouco diferentes no preparo das argamassas influenciou na determinação da propriedade avaliada. Tanto que o efeito de uma mesma variável foi diferente em cada determinação, em termos de sua significância ou não sobre a propriedade. Logo, uma consideração que *a priori* deve ser feita ao se avaliar os resultados desta propriedade e de outras mais é que a maneira de como foram preparados os corpos de prova poderá influenciar definitivamente os resultados, mesmo que sejam simples mudanças no procedimento de ensaio. Do mesmo modo, se considerarmos que numa aplicação prática a argamassa poderá ser preparada de diversas formas, também suas propriedades quando em uso serão diferentes.

A variável que teve seu efeito mais afetado pela alteração do procedimento foi o teor de adição de sílica ativa. Na primeira determinação este efeito apareceu como não significativo na determinação da resistência à compressão das argamassas. Em parte, a variabilidade dos resultados pode ter dispersado um efeito mais significativo da adição na propriedade, pois em alguns casos a variabilidade foi de até 25%. A mistura manual das argamassas pode ter introduzido variações conforme a energia



empregada pelo operador. Além disso, este procedimento de mistura pode não ter garantido uma boa dispersão da sílica ativa, de maneira que seu efeito de microfíler e ação pozolânica não se manifestaram significativamente nas propriedades do material. Em argamassas, compostas somente por cimento e agregado miúdo, o efeito da sílica ativa pode realmente não ser muito efetivo, pois se no concreto ela atua principalmente na zona de transição pasta-agregado, que é o elo fraco da resistência do concreto (MONTEIRO e MEHTA, 1986), nas argamassas esta zona de transição limita-se ao entorno dos agregados miúdos, e portanto o efeito da adição restringe-se a estas pequenas regiões. Se são introduzidos fatores que levam a variações maiores nos resultados ou deficiências na dispersão da sílica ativa, o efeito não se manifesta.

Esta observação é particularmente válida para os traços com relação água/aglomerante 0,55, pois nos traços de relação 0,35 adota-se um superplastificante, que age como agente dispersante das partículas de sílica ativa. Verificam-se estes fatos ao comparar-se o efeito da sílica ativa conforme a relação água/aglomerante para as duas determinações. Na primeira determinação observa-se um forte decréscimo da resistência ao se adotar 20% de adição, enquanto que na segunda determinação a adição de 20% provoca o maior crescimento da resistência, para a relação 0,55. A simples mistura uniforme e enérgica conseguiu dispersar melhor a sílica ativa, de maneira que seus efeitos benéficos ocorreram, além de minimizar as variabilidades nos resultados. Mesmo que com menor destaque em relação às outras variáveis, na segunda determinação o efeito da adição é significativo sobre o desempenho da propriedade.

Destaca-se também que os acréscimos obtidos na resistência com 5 e 10% de adição não foram muito importantes em relação aos traços sem sílica ativa, nas duas determinações. Em alguns casos, houve até pequeno decréscimo. Comparando-se com os ganhos que podem ser obtidos no concreto, que podem chegar até mais de 30% dependendo da relação água/aglomerante (MALHOTRA, 1984), aqui se obteve acréscimos de 5 a 14%, principalmente nos traços de relação água/aglomerante 0,35. Este resultado também confere com as referências da literatura, onde em geral os maiores acréscimos na resistência à compressão de concretos são obtidos em traços de baixa relação água/aglomerante (MALHOTRA, 1984).

Outro aspecto que influencia o efeito da sílica ativa sobre a resistência à compressão é o tipo de cura adotado. Têm sido relatado que concretos com sílica ativa podem não desenvolver resistências maiores se não forem submetidos ao processo de cura úmida (RAMIRES, 1993; CARETTE e MALHOTRA, 1993), principalmente os de relação água/aglomerante mais elevada. No presente ensaio foi adotada cura úmida apenas na segunda determinação, sendo que na primeira os corpos de prova ficaram em ambiente de laboratório, sem nenhum cuidado. Isto pode ter contribuído para o não desenvolvimento de resistências maiores nas argamassas com sílica ativa, principalmente de relação água/aglomerante 0,55, na primeira determinação.

Na primeira determinação obteve-se pequenos decréscimos na resistência entre 28 e 63 dias de idade das argamassas, para os traços de relação água/aglomerante 0,35. Analisando-se estatisticamente os resultados nestas duas idades, por meio de comparação de médias (NANNI e RIBEIRO, 1992), detecta-se que estes decréscimos não são significativos, sendo atribuídos à simples variabilidade dos resultados, em média de 13%. Nesta determinação ainda obteve-se um decréscimo da resistência entre os 28 e 63 dias para o traço 0,55 e 20% de adição. Mesmo maior e com menos variação nos resultados, este decréscimo revelou-se estatisticamente não significativo, pela comparação de médias. Ressalta-se que, pelo fato dos corpos de prova terem sido moldados a partir de



uma única mistura nesta determinação, não se pode descartar algum interveniente relacionado à mistura e proporcionamento das argamassas.

Pelas referências encontradas na revisão da literatura, constante no capítulo 2, observa-se que as resistências obtidas para as argamassas são adequadas às recomendações para argamassas de reparo, segundo CHAN et al. (1991) e MAILVAGANAM e DEANS (1992b). Destaca-se ainda que com a mistura mecânica (segunda determinação) as magnitudes das resistências foram superiores do que com a manual, o que reforça a necessidade de uma boa mistura do material.

### **3.3.2 Resistência à tração na compressão diametral**

O ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de argamassa foi realizado para determinar a resistência à tração na compressão diametral das argamassas em estudo. O ensaio seguiu as recomendações constantes na norma NBR 7222 (ABNT, 1982).

A mistura das argamassas foi manual, à semelhança da primeira determinação da resistência à compressão (seção 3.3.1).

Após a moldagem dos corpos de prova estes foram deixados por 24 horas em ambiente de laboratório, cobertos com filme plástico para evitar evaporação da água de amassamento. Então foram desformados, identificados e mantidos em ambiente de laboratório até completarem as idades de ensaio.

O ensaio foi realizado aos 7 e 28 dias de idade. Para cada determinação foram preparados cinco corpos de prova de argamassa, para cada um dos oito traços estudados. Este número de cinco corpos de prova para cada determinação foi adotado considerando dados anteriores a respeito deste ensaio, que demonstraram haver uma certa variabilidade inerente ao ensaio e que um número maior de corpos de prova se faz necessário.

Quanto à realização do ensaio propriamente dito, a norma prescreve que sejam utilizadas tiras de madeira como pontos de aplicação da carga aos corpos de prova, de dimensões que dependem do tamanho do corpo de prova. No caso, sendo corpos de prova de  $\varnothing 5 \times 10$  cm, as tiras possuíam dimensões de  $5\text{mm} \pm 1\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 1\text{mm}$ . Os ensaios aos 7 dias de idade dos corpos de prova com relação água/aglomerante 0,55 foram realizados com estas tiras de madeira, mas, observou-se que devido à magnitude das cargas aplicadas as mesmas se deformavam por esmagamento. Desta forma, nos ensaios seguintes passou-se a usar duas tiras de aço doce como transmissores da carga diametral, nas mesmas dimensões. Devido a esta modificação nas condições de ensaio, os resultados obtidos para a resistência à tração das argamassas aos 7 dias de idade foram desconsiderados na análise estatística dos resultados, que analisará apenas os resultados obtidos para os 28 dias de idade, que possuem uniformidade de condições de execução.

#### **3.3.2.1 Resultados**

Os resultados obtidos no ensaio estão descritos na Tabela 3.8, que apresenta as resistências à tração na compressão diametral dos corpos de prova ensaiados, com observações a respeito das configurações de ruptura.



**Tabela 3.8** Resultados do ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Traço	Resistência à tração na compressão diametral, em MPa									
	7 dias de idade					28 dias de idade				
0.35 0% sa	3.06	4.84	3.88	2.80	2.93	4.43	4.94	4.53	4.53	4.35
	m: 3.50 s: 0.85 C.V.: 24.53%					(*4) m: <b>4.56</b> s: 0.23 C.V.: 4.97%				
a/c 0.35 5% sa	4.78	2.99 *1	3.31	3.82	3.69	4.33	3.69 *2	3.82 *2	4.46	4.62
	m: 3.90 s: 0.62 C.V.: 15.97%					m: <b>4.47</b> s: 0.14 C.V.: 3.21%				
a/c 0.35 10% sa	3.82	3.76 *1	3.69 *1	4.04	3.95	5.25	4.58	5.51	4.90	-
	m: 3.94 s: 0.11 C.V.: 2.84%					m: <b>5.06</b> s: 0.40 C.V.: 7.95%				
a/c 0.35 20% sa	4.39	4.17	4.33	3.44	4.07	5.60	5.76	4.65	5.25	5.09
	m: 4.08 s: 0.38 C.V.: 9.33%					m: <b>5.27</b> s: 0.44 C.V.: 8.33%				
a/c 0.55 0% sa	3.06	2.55	3.18	4.17	2.99	2,04 *1	3,08	2,04 *3	2,83	2,98
	m: 3.19 s: 0.60 C.V.: 18,76%					m: <b>2,96</b> s: 0.13 C.V.: 4,31%				
a/c 0.55 5% sa	2,87	2,71	3,46	2,99	3,18	3,06	2,62	3,21	3,43	3,60
	m: 3,04 s: 0,29 C.V.: 9,58%					m: <b>3,18</b> s: 0,38 C.V.: 11,81%				
a/c 0.55 10% sa	3,35	2,98	3,37	3,03	2,17	2,87	2,85	3,12	3,06	2,92
	m: 2,98 s: 0,49 C.V.: 16,43%					m: <b>2,96</b> s: 0,12 C.V.: 4,03%				
a/c 0.55 20% sa	2,67	3,25	2,17 *2	2,23	2,55	3,82	4,46	3,59	3,85	2,55 *1
	m: 2,67 s: 0,43 C.V.: 15,92%					(*4) m: <b>3,93</b> s: 0,37 C.V.: 9,42%				

Observações da tabela 3.8:

\*1 - Ruptura diametral e transversal de uma das metades.



\*2 - Ruptura transversal e diametral apenas da metade do corpo de prova.



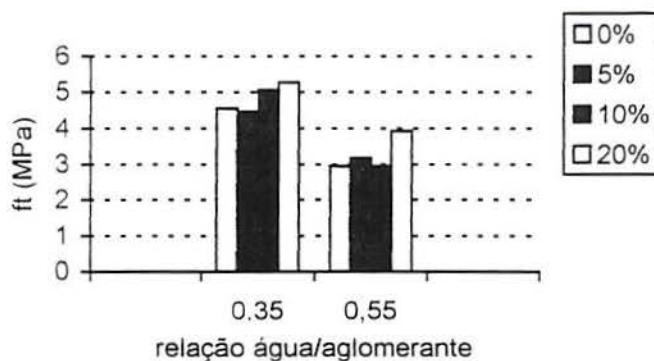
\*3 - Ruptura diametral e transversal do corpo de prova.



\*4 - Ensaio realizado aos 30 dias de idade.

Para fins de aceitação dos resultados, desprezou-se todos os resultados que tiveram alguma configuração de ruptura diferente da diametral. Portanto, os valores que são assinalados com as observações 1, 2 e 3 foram desconsiderados para efeito do cálculo das médias e análise estatística, que será apresentada na seção 3.3.2.2.

A Figura 3.5 apresenta as médias das resistências à tração aos 28 dias, na forma de um gráfico:



**Figura 3.5** Resistência à tração na compressão diametral (ft) versus relação água/aglomerante, conforme teores de adição de sílica ativa, aos 28 dias.

### 3.3.2.2 Análise dos resultados

Procedeu-se à análise estatística dos resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de idade. Foi efetuada uma análise de variância (ANOVA), conforme descrito no capítulo 3.3.1, considerando como variáveis as duas relações água/aglomerante e os quatro teores de sílica ativa.

A tabela de resultados da ANOVA, que resume os efeitos das variáveis consideradas e sua significância sobre a variável dependente, é apresentada na Tabela 3.9.

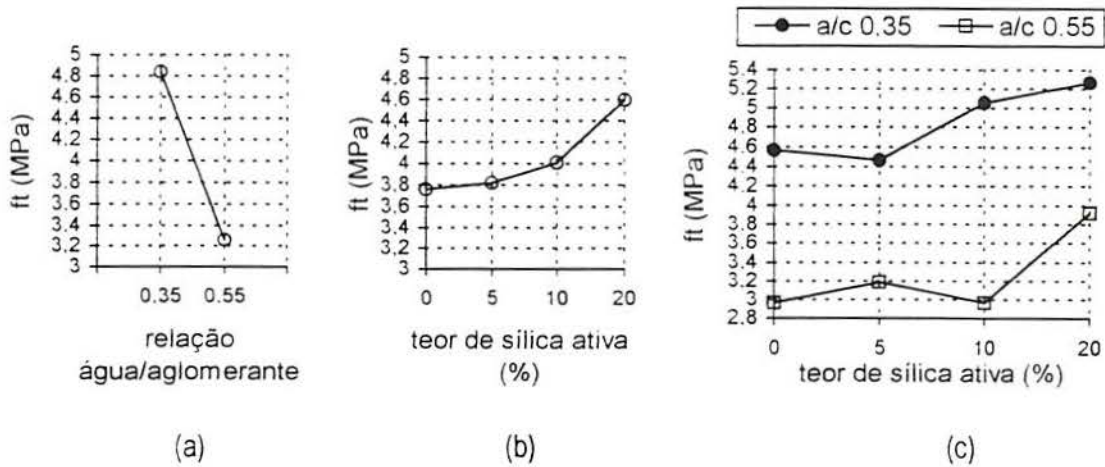
**Tabela 3.9** Resultados da ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral.

Variável	GDL	MQ	$F_{calc}$	$F_{0,05}^*$	Significância
A/c	1	20,30509	205,4747	4,23	<b>significativo</b>
Sa	3	1,22925	12,4393	2,98	<b>significativo</b>
A/c + Sa	3	0,29564	2,9917	2,98	<b>significativo</b>
Erro	26	0,09882	-	-	-

\* F tabelado para o nível de significância de 5%.  $F(n_i, n_e)$ , sendo  $n_i$  = número de graus de liberdade do efeito e  $n_e$  = número de graus de liberdade do erro.

A Figura 3.6 apresenta o comportamento da resistência à tração em função das variáveis analisadas, e que se revelaram significativas na análise estatística.





**Figura 3.6** Resistência à tração na compressão diametral ( $f_t$ ), considerando os níveis das variáveis analisadas, significativas.

- (a) apresenta os níveis considerando-se a variável água/aglomerante isoladamente. (b) a variável teor de sílica ativa isolado e (c) apresenta a interação entre estas duas variáveis.

Da Figura 3.6 observa-se que a resistência à tração diminui com o aumento da relação água/aglomerante (em (a)), como já era esperado, e aumenta com o aumento do teor de sílica ativa (em (b)). Mas este aumento não é uniforme, e depende da relação água/aglomerante. Em (c) observa-se comportamentos diferenciados para a resistência à tração, conforme a relação água/aglomerante, à medida que se aumenta o teor de adição.

Para a relação água/aglomerante mais baixa (0,35), a resistência à tração sofreu um pequeno decréscimo (< 4%) quando se adicionou 5% de sílica ativa: apresentou um crescimento da ordem de 11% em relação aos valores do traço sem adição para as argamassas com 10% de adição de sílica ativa, e cresceu mais 5% ao se passar para o teor de 20% de adição, ficando 16% maior a resistência, quando comparada com os valores obtidos para o traço sem adição. Dai conclui-se que para a relação água/aglomerante 0,35 efetivos acréscimos na resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova de argamassa são obtidos quando se adiciona pelo menos 10% de sílica ativa.

Para a relação mais alta, de 0,55, o comportamento da resistência à tração conforme o teor de adição de sílica ativa é diferenciado. Sem adição, com 5% ou com 10% de adição poucas diferenças são notadas na propriedade. Ao se passar para 20% de adição de sílica ativa obtém-se um acréscimo de 33% na resistência à tração, em relação aos valores do traço sem adição. O que se pode concluir neste caso é que somente um teor mais elevado de adição é capaz de produzir acréscimos significativos nesta propriedade e com esta relação água/aglomerante. Mas não se pode descartar o fato de que alguma diferença pode ocorrer a teores abaixo de 20%, pois os resultados apresentados para os traços sem adição, com 5% e com 10% de adição tiveram variabilidades acentuadas, o que pode ter mascarado alguma diferença mais significativa em relação a estes teores de adição.

A princípio, o efeito das adições de sílica ativa sobre a resistência à tração de concretos é semelhante ao obtido na resistência a compressão (MALHOTRA e MEHTA, 1996), sendo somente mais sensível a variações em função do procedimento de cura. DAL MOLIN (1995), ao revisar sobre o tema, coloca que não há um consenso na literatura de que a adição de sílica ativa aos concretos faz a resistência à tração aumentar numa proporção diferente da resistência à compressão, sendo a relação entre as resistências à tração e compressão praticamente a mesma para concretos com e sem sílica ativa. Para argamassas, segundo BUCHER (1989), o aumento na resistência à compressão obtido pela agregação de adições minerais implica num aumento simultâneo das outras resistências mecânicas. Assim sendo, mesmo com pequenas variações, o comportamento da resistência à tração das argamassas foi bastante similar ao da resistência à compressão, como esperado. Em especial, destaca-se a similaridade entre o comportamento da resistência à tração, segundo o teor de adição de sílica ativa e relação água/aglomerante (Figura 3.6c), com a mesma observação do comportamento da resistência à compressão (Figura 3.4d).

Os melhores resultados obtidos para as traços com 20% de adição podem confirmar o efeito sobre o refinamento de poros e cristais que a sílica ativa produz, que acarretam numa maior aderência entre a pasta e os agregados (MALHOTRA e MEHTA, 1996). Aqui, com as argamassas, submetidas à tração por compressão diametral, evidenciou-se tal efeito crescente com o teor de adição.

A magnitude dos valores encontrados revela uma relação entre resistência à tração e compressão inferior aos 10% atribuídos aos concretos em geral (NEVILLE, 1982; ABNT NBR 6118, 1980). Na média, a relação entre as resistências à tração e compressão das argamassas ficou em 6,7% e 7,3% para os traços com relação água/aglomerante 0,35 e 0,55, respectivamente.

Os valores encontrados na literatura para a resistência à tração das argamassas referem-se a resultados do ensaio de tração na flexão, portanto diferentes da sollicitação que foi ensaiada neste trabalho. Todavia, os valores encontrados servem de referência para outras propriedades das argamassas que estão relacionadas com a resistência à tração, como a resistência de aderência e suscetibilidade à fissuração por retração.

### 3.3.3 Resistência de aderência

A resistência de aderência entre uma argamassa e um substrato pode ser avaliada sob diferentes aspectos: tração pura, cisalhamento, torção e/ou combinação entre sollicitações. Sendo uma propriedade importante em um material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado, avaliou-se neste trabalho a resistência de aderência das argamassas em estudo sob duas situações: cisalhamento com compressão e tração direta. Os dois ensaios escolhidos, compressão-cisalhamento à junta inclinada e arrancamento de revestimentos sobre paredes, representam apenas algumas sollicitações que as argamassas de reparo ou reforço podem sofrer. Mesmo assim, seus resultados podem indicar perfeitamente como se comporta a aderência entre as argamassas e os substratos de concreto endurecido.



### 3.3.3.1 Ensaio de compressão-cisalhamento à junta inclinada

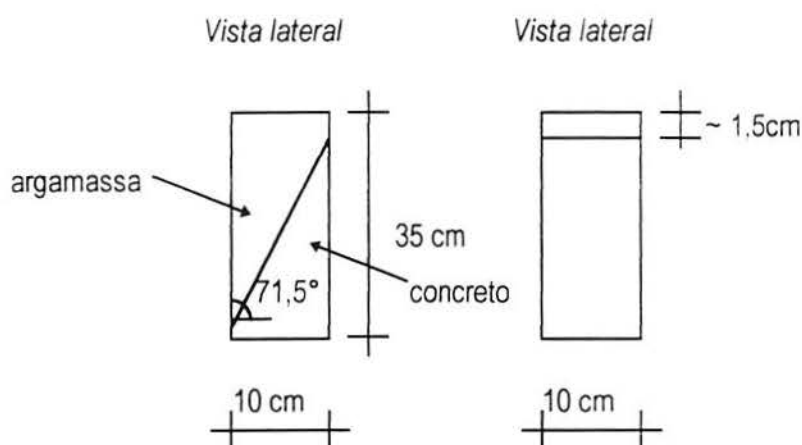
Este ensaio foi baseado nos ensaios propostos por CLÍMACO (1991) para a avaliação da aderência entre o concreto endurecido e algum material de reparo. Segundo ele, o estado de tensões que se desenvolve na junta representa uma situação bastante próxima das solicitações que um elemento reparado ou reforçado sofre, pois nem sempre a ligação entre os dois materiais é solicitada a um único tipo de esforço isoladamente. O ensaio também é semelhante ao método das normas ASTM C 882-91 e 1042-91 (ASTM, 1991), destinadas à avaliação da aderência de resinas epoxi e emulsões de látex para pontes de aderência entre concreto ou argamassa novos e concreto endurecido.

O ensaio consiste basicamente em confeccionar corpos de prova prismáticos de concreto, que são cortados ao meio em um determinado ângulo. A superfície cortada é preparada de acordo com o caso, e recebe o material de reparo a ser analisado, reconstituindo novamente a seção. Nestes corpos de prova mistos é aplicada uma carga de compressão sobre a seção transversal do prisma, que se decompõe na superfície de ligação entre os dois materiais em uma parcela de esforço de cisalhamento e em outra de compressão. É possível então determinar qual a resistência da ligação ao cisalhamento puro, se conhecidas as outras resistências dos materiais. A comparação direta entre o esforço de compressão aplicado no corpo de prova misto e no que é íntegro de concreto também possibilita uma avaliação da qualidade da solução.

Este ensaio permite que sejam avaliadas muitas variáveis: o material de reparo, o preparo da superfície do concreto endurecido, o próprio concreto, o estado de tensões (variando-se o ângulo), condições de aplicação e cura, etc. Neste estudo a variável estudada foi o material de reparo, ou seja, os diferentes traços de argamassa. Manteve-se fixas as demais variáveis que poderiam influenciar as propriedades em estudo. Descreve-se a seguir os detalhes e etapas do ensaio realizado.

#### 3.3.3.1.1 Corpos de prova

As dimensões e o ângulo de corte adotados para os corpos de prova produzidos são demonstrados na Figura 3.7:



**Figura 3.7** Croqui dos corpos de prova ensaiados.

Foram confeccionados 5 corpos de prova para cada determinação, para os oito traços de argamassas estudados. Foram realizadas três determinações: aos 3, 7 e 28 dias de idade.

### 3.3.3.1.2 Concretagem da metade-base de concreto

Foram concretados 72 corpos de prova prismáticos inteiramente de concreto, com as dimensões apresentadas na Figura 3.7. Estes corpos de prova foram serrados após sua cura, conforme o ângulo apresentado, para então serem submetidos às etapas de preparação do substrato e aplicação das argamassas. O traço do concreto utilizado na confecção destes prismas foi escolhido de forma a proporcionar um concreto de alta resistência, ou pelo menos com uma resistência semelhante às das argamassas, porque neste ensaio desejou-se que as rupturas ocorressem na interface argamassa/concreto ou na própria argamassa, sem que o material-substrato, o concreto, fosse solicitado até sua ruptura. Este mesmo cuidado foi observado por MASUERO (1993), que também baseou seus ensaios no trabalho de CLÍMACO (1990). O concreto adotado deveria ter uma resistência por volta de 60MPa pelo menos.

Esta decisão implicou na introdução de algumas limitações para o ensaio: a aderência não seria avaliada com relação à qualidade do concreto, fator que pode muito influenciar na aderência, pois determina a porosidade e resistência mecânica do concreto, duas características diretamente relacionadas com o desempenho da ligação. Há o fato também de que um concreto com esta resistência foge das características de concretos usualmente utilizados nas obras correntes. Estes fatores, no entanto, não podem ser todos abordados num único ensaio, e, de momento, desejou-se avaliar apenas a aderência de diversas argamassas sobre um substrato padrão, que suportasse os esforços até a ruptura da ligação sem ruir.

O traço utilizado para o concreto adotado foi de 1: 0,94: 2,56 - a/c 0,36, com adição de aditivo superplastificante à base de formaldeído naftaleno sulfonado. Usou-se areia média do Rio Guaíba, brita basáltica  $\varnothing$ máx. 19 mm e cimento Portland CPV - ARI. A mistura foi efetuada em betoneira de eixo inclinado. O teor de aditivo inicial era de 1% sobre a massa do cimento, sendo que no momento da mistura eram feitos os ajustes necessários para se obter o abatimento mínimo de 5 cm. Considerando-se que 60% da massa do aditivo adicionado equivalia à água, efetuou-se então as correções necessárias para se manter constante a relação água/aglomerante.

Dado o elevado número de corpos de prova, foram necessárias três etapas de concretagem, cada uma delas com quatro betonadas. De cada betonada era extraído um corpo de prova cilíndrico de  $\varnothing$ 9,5 cm x 19,5 cm, moldado com duas camadas de 15 golpes, para determinação da resistência à compressão do concreto aos 28 dias. Os corpos de prova prismáticos eram moldados com duas camadas, sendo aplicados 30 golpes em cada. A haste utilizada para o adensamento segue especificação da norma NBR 5738 (ABNT, 1984).

Após a concretagem, os corpos de prova foram deixados 24 horas em laboratório, protegidos por filmes plásticos para evitar evaporação excessiva. A seguir, foram desformados e colocados em câmara úmida.

O abatimento médio verificado nas concretagens foi de 7 cm  $\pm$  2cm. Tais variações foram devidas aos ajustes nos teores de adição do superplastificante, que ficaram em torno de 1,5%.



A verificação aos 28 dias da resistência à compressão dos concretos produzidos revelou algumas diferenças entre etapas de concretagem, mas não se considerou tal fato como comprometedor dos resultados do ensaio, pois as resistências eram da mesma ordem de grandeza, e portanto as características dos concretos eram bastante similares no que tange à sua porosidade. De qualquer forma, os corpos de prova foram distribuídos aleatoriamente na etapa de aplicação das argamassas, ficando então este fator eliminado ou disperso. A resistência média à compressão dos corpos de prova cilíndricos dos concretos produzidos, aos 28 dias de idade, ficou em 62,9 MPa, com desvio-padrão de 6,64 MPa e coeficiente de variação de 10,57%.

### 3.3.3.1.3 Corte dos corpos de prova de concreto e preparo da superfície

Ao longo das duas primeiras semanas após a concretagem dos corpos de prova prismáticos de concreto, estes foram retirados da câmara úmida e foram serrados conforme o ângulo escolhido com uma serra circular diamantada, refrigerada à água. Após o corte, os corpos de prova foram limpos e levados de volta à câmara úmida, até completarem 28 dias de idade.

Após este período de 28 dias, ao serem retirados da câmara úmida os corpos de prova foram deixados no laboratório e submetidos ao tratamento da superfície de interface com as argamassas. Este tratamento consistiu no apicoamento manual com ponteira fina, até a criação de uma superfície rugosa, sem grandes extensões lisas. Este tratamento foi escolhido em função dos trabalhos de BASS et al. (1989) sobre a capacidade de transmissão de esforços de cisalhamento em interfaces entre concretos novos e velhos. Estes autores avaliaram tratamentos que incluíam um jateamento intenso com areia, de forma a deixar o agregado exposto e com rugosidades de 3 mm de profundidade, um apicoamento manual com ponteira que proporcionasse rugosidades de não mais de 6 mm, e dentes cortados com serra de profundidade de 25 mm. Apesar deles terem concluído que o jateamento intenso de areia proporcionava as melhores condições para a transmissão dos esforços de cisalhamento, acreditou-se que o que é necessário para uma boa aderência ao cisalhamento é a ausência de áreas lisas, seja isto obtido com apicoamento manual ou jateamento. No presente caso, o fato do concreto ter altas resistências fez com que se rejeitasse a utilização do jateamento de areia, pois o mesmo poderia não ser efetivo e ser muito dispendioso. Adotou-se, então, o apicoamento manual e cuidadoso das superfícies, procurando eliminar toda a superfície lisa que houvesse.

Tal tratamento, na prática, constituiu tarefa não tão fácil. A elevada resistência do concreto dificultava seu apicoamento, e teve-se que apicoar principalmente a argamassa e a nata, já que os agregados graúdos atingidos pelo corte nem sempre podiam ser removidos, pois poderiam provocar sulcos de mais de 5 mm. A parte mais fina do corpo de prova quebrava-se facilmente, havendo diversos corpos de prova que necessitaram ser reconstituídos com a colagem de suas partes com uma resina epóxi adequada. A rugosidade deveria ser o mais uniforme possível, sem grandes sulcos ou áreas completamente lisas.

Mesmo com todas estas dificuldades e detalhes que poderiam influir no ensaio, a aleatorização adotada para a distribuição dos corpos de prova procurou eliminar ou dispersar os possíveis efeitos. Os corpos de prova que tiveram partes quebradas e coladas com resina epóxi comportaram-se perfeitamente bem no ensaio, uma vez que a resistência da resina é bastante elevada e em nenhum caso houve ruptura nos pontos colados, até porque eram apenas pontas do concreto que ficaram assim

danificadas. Teve-se o cuidado de, ao colar-se as partes, não deixar nenhuma saliência de resina na superfície da interface.

A preparação da superfície do concreto concluiu-se com a escovação vigorosa com uma escova de cerdas de aço e limpeza com jato d'água. Na ocasião da aplicação das argamassas, as superfícies eram novamente limpas com escova, caso necessário, e recebiam um jato d'água novamente. Este procedimento ocorria pelo menos duas horas antes da aplicação das argamassas, pois desejava-se uma superfície úmida apenas, não saturada. Esta condição foi adotada baseando-se nos comentários de CLÍMACO (1990), e IOPPI (1995), de maneira que nem a superfície deveria absorver água das argamassas, comprometendo a hidratação junto à superfície do concreto, e nem deveria estar saturada ao ponto de não permitir a penetração de nata e partículas cimentantes nos poros do concreto.

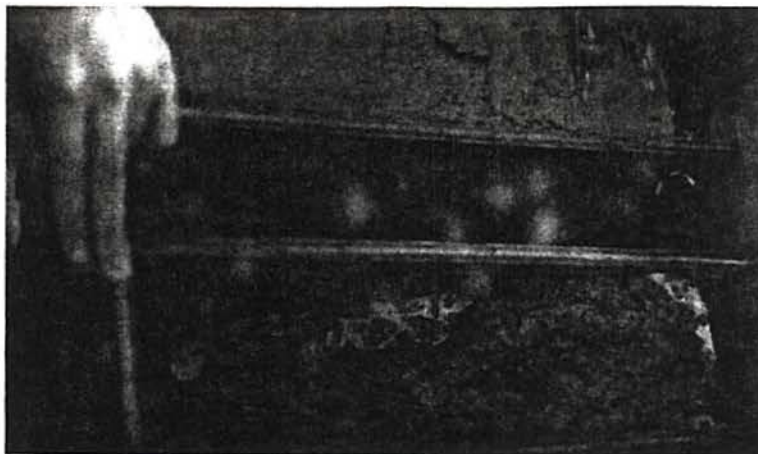
#### 3.3.3.1.4 Aplicação das argamassas

Para cada um dos oito diferentes traços de argamassa em estudo foram preparados 15 corpos de prova, sendo 5 para cada idade de rompimento. A aplicação das argamassas foi executada de forma parcialmente aleatória, de maneira que em cada determinação tinha-se corpos de prova preparados em pelo menos duas moldagens distintas, ou seja, de forma que dos 5 corpos de prova a serem rompidos com uma determinada idade, pelo menos 2 tivessem sido moldados em uma etapa e três em outra. Desta forma, um eventual efeito relacionado com uma etapa de moldagem poderia ser identificado ou eliminado.

O fato das argamassas terem sido aplicadas em duas ou três etapas de moldagem também deveu-se a fatores operacionais: limitação do número de formas de corpos de prova disponíveis, capacidade de produção em um dia (tempo necessário para a preparação e aplicação), volume de materiais a serem preparados e aplicados, etc. Em função destes fatores, e considerando o número total de corpos de prova a serem moldados (120), a moldagem dos mesmos foi feita em 7 etapas, sendo que em cada etapa eram moldados 12 ou 18 corpos de prova, de pelo menos dois ou três traços diferentes.

As argamassas foram misturadas em betoneira mecânica de eixo vertical. O lançamento das argamassas dentro das formas dos corpos de prova, já com as metades de concreto recolocadas, foi feito manualmente com colher de pedreiro, por operário habituado a executar serviços de aplicação de revestimentos com argamassas. O mesmo laboratorista executou todos os corpos de prova. Nenhum procedimento de adensamento foi adotado, uma vez que desejava-se simular as condições de aplicação de um revestimento. A argamassa era lançada às colheradas, até que o corpo de prova ficava completo, e então regularizava-se a superfície com o auxílio de uma régua de madeira. O acabamento final da superfície do corpo de prova era dado com uma desempenadeira de madeira. Na Figura 3.8 pode-se observar a aplicação da argamassa em um dos corpos de prova.





**Figura 3.8** Aplicação das argamassas sobre o substrato de concreto.

Após a aplicação das argamassas os corpos de prova foram deixados em laboratório, cobertos por filmes plásticos, durante 24 horas. Foram então desformados e deixados novamente em ambiente de laboratório. Considerou-se que em situações usuais nenhum ou precário processo de cura é aplicado, e portanto adotou-se esta condição para se aproximar da situação real.

Quando as argamassas completavam 3, 7 e 28 dias de idade, os corpos de prova eram rompidos.

#### **3.3.3.1.5** Procedimento para a ruptura

A ruptura dos corpos de prova consistiu em submeter os prismas de concreto e argamassa a esforços de compressão, aplicados através de prensa hidráulica sobre as duas faces menores do prisma, ou seja, perpendicular à seção transversal do corpo de prova, até a ruptura por descolamento entre as partes ou fissuração e esmagamento do corpo de prova. Basicamente, seguiu-se o mesmo procedimento utilizado no ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto (NBR 5739, ABNT, 1974), com diferença apenas com relação às características dos corpos de prova e capeamento adotado.

A prensa utilizada tinha capacidade de 60 toneladas e carregamento com velocidade controlável.

Tendo em vista que a uniformidade e o paralelismo das faces que recebem as cargas são fundamentais para o resultado do ensaio, adotou-se capeamento com argamassa (traço 1:2, a/c 0,40) toda vez em que alguma das faces apresentava irregularidades excessivas (maiores de 2mm) ou quando as faces não eram completamente paralelas. Neste caso, considerou-se necessária a regularização para tornar as faces paralelas quando pela medição com um nível de bolha eram ultrapassados ao mínimo os limites marcados. Mesmo sendo o apoio do pistão da prensa rotulado e capaz de absorver diferenças no paralelismo das faces, tomou-se esta medida para reduzir ao mínimo as imperfeições dos corpos de prova.

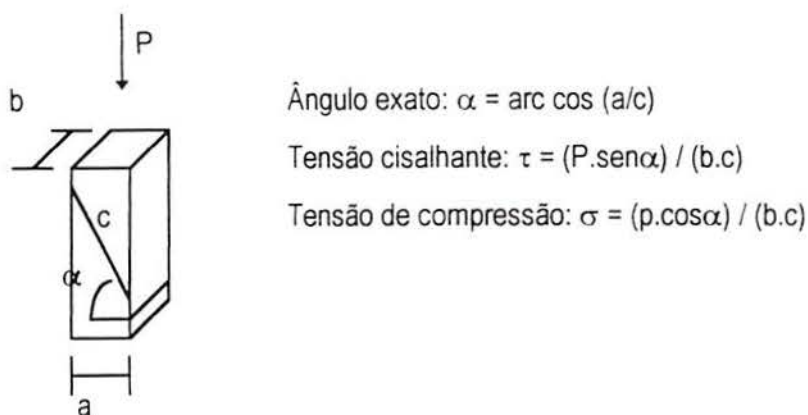
No momento do ensaio, ao colocar-se o corpo de prova na prensa, utilizou-se um capeamento com couro bovino para absorver as pequenas imperfeições da superfície de concreto e argamassa, numa tentativa também de não introduzir restrições laterais ao corpo de prova junto às superfícies de contato.

Como resultado do ensaio considerou-se a carga máxima atingida pela prensa durante a compressão do corpo de prova. Eram registradas as características da ruptura (descolamento, fissuração, rompimento de partes, etc.) e as dimensões reais dos corpos de prova, para fins de determinação exata do ângulo de inclinação das interfaces, uma vez que o corte dos corpos de prova não era preciso.

### 3.3.3.1.6 Resultados obtidos

O resultado direto do ensaio constituiu na carga máxima (de ruptura) atingida na compressão do corpo de prova. Este valor, no entanto, pode ser interpretado de duas formas: primeiro, decompondo-se esta força em duas componentes que incidem sobre a interface concreto/argamassa, sendo uma de cisalhamento (tangente) e outra de compressão (ortogonal); segundo, dividindo-se esta força pela seção transversal do corpo de prova (área de aplicação), obtendo-se a tensão de compressão do corpo de prova como um todo. A primeira interpretação dada ao resultado do ensaio permite comparar as tensões de cisalhamento que se desenvolvem nas interfaces concreto/argamassa para os diferentes traços empregados, portanto a tensão de aderência ao cisalhamento entre as duas partes, considerando um determinado estado de tensões nesta interface, que era o mesmo para todos os corpos de prova. A segunda interpretação permite que se compare a resistência à compressão do corpo de prova misto com a resistência à compressão de corpos de prova integros de concreto, desde que estejam disponíveis dados da resistência à compressão de corpos de prova integros executados de mesmas formas e características dos mistos. No presente ensaio foi dada ênfase à interpretação das resistências de aderência ao cisalhamento que se desenvolvia nas interfaces das diferentes argamassas, uma vez que os dados a respeito da resistência à compressão de prismas de concreto foram insuficientes para proporcionar uma análise mais profunda.

O cálculo das componentes de força sobre a interface e respectivas tensões seguiu o seguinte formulário, conforme a Figura 3.9:



**Figura 3.9** Descrição das solicitações do corpo de prova do ensaio de compressão-cisalhamento.



Na Tabela 3.10 são apresentadas as tensões cisalhantes assim calculadas, apresentando-se o local das rupturas, a média, desvio padrão e coeficiente de variação de cada determinação. As observações no local da ruptura são apresentadas após a tabela.

**Tabela 3.10** Resultados do ensaio de compressão-cisalhamento à junta inclinada.

Traços	Tensão cisalhante na junta - local de ruptura, média, desvio padrão e coef. var. (CV)								
	3 dias			7 dias			28 dias		
	$\tau$ (MPa)	local	Média	$\tau$ (MPa)	local	Média	$\tau$ (MPa)	local	Média
a/c 0,35 0% sa	7.60	junta	<b>7,53</b>	10.54	*4	<b>5,56</b>	9.82	junta	<b>7,21</b>
	7.67	junta		7.41	junta		7.34	junta	
	9.62	junta	s: 1.46	6.82	junta	s: 1.92	7.28	junta	s: 1.68
	5.50	junta	CV:	3.22	junta	CV:	5.30	junta	CV:
	7.28	junta	19.44%	4.78	junta	34.60%	6.30	junta	23.33%
a/c 0,35 5% sa	5.97	junta	<b>5,74</b>	8.34	junta *2	<b>7,27</b>	7.54	junta	<b>8,19</b>
	6.62	junta *1		7.63	junta *2		9.97	junta	
	5.55	junta	s: 0.71	6.16	junta	s: 1.58	6.69	junta	s: 1.84
	5.91	junta	CV:	9.04	junta	CV:	6.43	junta	CV:
	4.67	junta	12.42%	5.19	junta	21.71%	10.33	junta	22.44%
a/c 0,35 10% sa	6.17	junta *2	<b>6,03</b>	8.25	junta *1	<b>7,66</b>	7.80	junta	<b>9,16</b>
	5.73	junta		9.12	junta		8.02	junta	
	7.52	junta	s: 0.94	-	*3	s: 1.82	6.92	junta	s: 2.25
	5.79	junta	CV:	5.62	junta *5	CV:	12.17	junta *7	CV:
	4.96	junta	15.57%	-	*3	23.78%	10.91	junta	24.58%
a/c 0,35 20% sa	6.59	junta	<b>5,34</b>	7.42	junta	<b>6,60</b>	3.97	junta	<b>6,66</b>
	4.13	junta		7.07	junta		9.44	junta	
	4.73	junta	s: 1.02	5.86	junta	s: 0.86	5.16	junta *6	s: 2.24
	6.16	junta	CV:	5.49	junta	CV:	8.31	junta	CV:
	5.09	junta	19.04%	7.14	junta	13.05%	6.44	junta	33.54%
a/c 0,55 0% sa	5.01	junta	<b>5,18</b>	5.86	junta *1	<b>5,72</b>	5.74	junta	<b>5,67</b>
	5.36	junta		6.29	junta		6.62	junta	
	4.59	junta	s: 0.39	4.50	junta	s: 1.38	4.70	junta	s: 1.05
	5.54	junta	CV:	7.64	junta	CV:	6.79	junta *2	CV:
	5.42	junta *2	7.45%	4.29	junta	24.06%	4.52	junta	18.54%
a/c 0,55 5% sa	-	*3	<b>4,72</b>	4.32	junta	<b>5,05</b>	6.73	junta	<b>5,68</b>
	5.99	junta		5.51	junta		7.68	junta	
	4.74	junta	s: 1.28	4.39	junta	s: 0.64	3.39	junta	s: 1.63
	5.17	junta *2	CV:	5.38	junta	CV:	5.21	junta	CV:
	2.96	junta *2	27.14%	5.66	junta	12.76%	5.39	junta	28.73%
a/c 0,55 10% sa	5.02	junta	<b>4,92</b>	8.23	junta *2	<b>5,91</b>	9.28	junta	<b>6,79</b>
	5.16	junta		7.60	junta		5.70	junta	
	4.74	junta	s: 0.17	5.50	junta	s: 1.94	6.00	junta	s: 1.80
	4.91	junta *1	CV:	3.79	junta	CV:	4.94	junta	CV:
	4.79	junta	3.47%	4.44	junta	32.83%	8.03	junta	26.52%
a/c 0,55 20% sa	5.27	junta	<b>5,23</b>	4.13	junta *2	<b>4,63</b>	8.16	junta	<b>6,51</b>
	6.71	junta		4.80	junta		6.40	junta *7	
	5.05	junta	s: 0.97	3.79	junta	s: 0.67	4.63	junta	s: 1.37
	5.09	junta	CV:	5.46	junta	CV:	5.90	junta	CV:
	4.01	junta	18.48%	4.96	junta	14.42%	7.45	junta	21.07%

Observações:

\*1 fissuração na metade de concreto

\*2 argamassa rompeu no descolamento

\*3 ruptura parcial na junta (valor ignorado - impossível determinar)

\*4 ruptura do concreto e da argamassa, no descolamento (valor ignorado - configuração de ruptura diferente das demais)

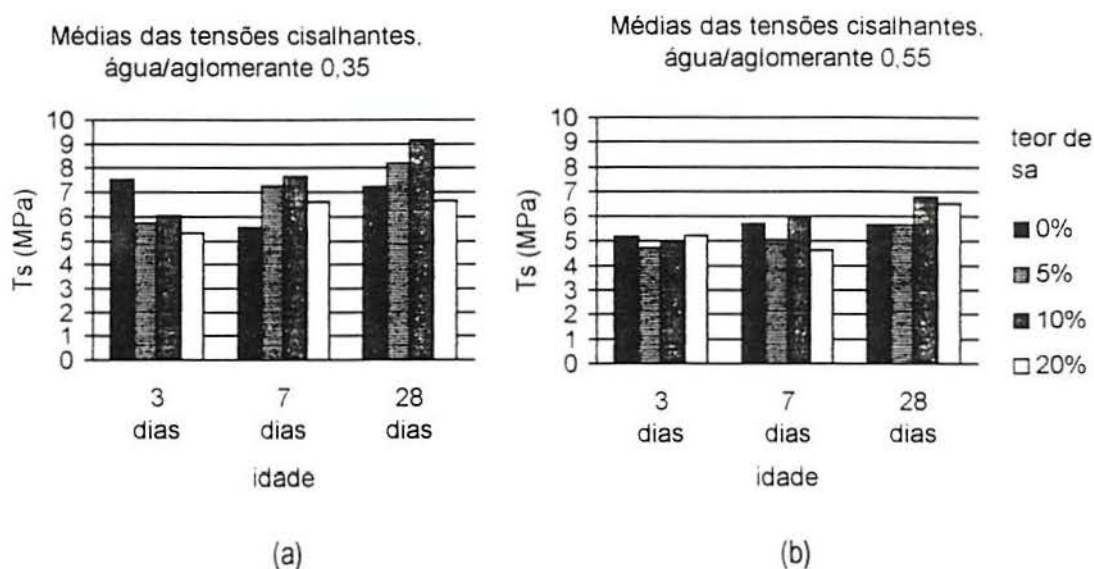
\*5 concreto rompeu no descolamento

\*6 capeamento fragmentou-se

\*7 fissuração na metade de argamassa

s = desvio-padrão. C.V. = coeficiente de variação.

As médias dos resultados obtidos são apresentadas nos gráficos da Figura 3.10:



**Figura 3.10** Médias das tensões cisalhantes ( $T_s$ ), segundo idade, teor de microsilica e relação água/aglomerante, sendo (a) para 0,35 e (b) para 0,55.

### 3.3.3.1.7 Análise dos resultados

As tensões cisalhantes de ruptura na interface argamassa/concreto foram consideradas como resultado principal deste ensaio. Desta forma, avaliou-se estes resultados estatisticamente, considerando as variáveis relacionadas com os traços diferentes de argamassa, envolvidos no experimento. Utilizou-se análise de variância (ANOVA), considerando como variáveis a relação água/aglomerante, o teor de sílica ativa e a idade.

Foram desconsiderados valores cuja configuração de ruptura não correspondia à junta perfeita, ou seja, quando a ruptura não ocorria perfeitamente na junta entre a argamassa e o concreto endurecido, conforme indicado na Tabela 3.10.

A tabela de resultados da ANOVA é apresentada na Tabela 3.11.

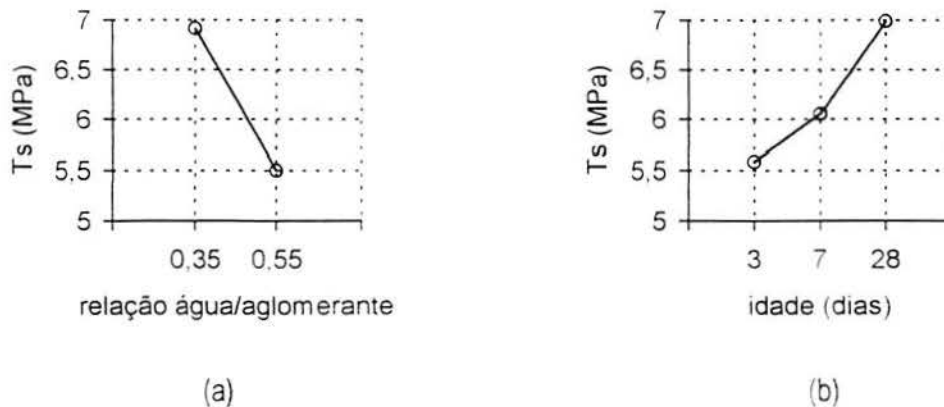


**Tabela 3.11** Resultados da ANOVA para os resultados da compressão-cisalhamento à junta inclinada, considerando a tensão cisalhante na junta.

Fator	GDL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub> *	Significância
a/c	1	57.14621	28.41105	3.95	<b>significativo</b>
sa	3	4.19958	2.08788	2.71	não signif.
Idade	2	19.98109	9.93388	3.10	<b>significativo</b>
a/c+aa	3	2.04709	1.01774	2.71	não signif.
a/c+idade	2	0.60486	0.30071	3.10	não signif.
sa+idade	6	3.00826	1.49560	2.20	não signif.
∑ todos	6	2.82053	1.40226	2.20	não signif.
erro	92	2.011408	-	-	-

\* F tabelado para o nível de 5% de significância. F(n<sub>i</sub>, n<sub>e</sub>), sendo n<sub>i</sub> = número de graus de liberdade do efeito e n<sub>e</sub> = número de graus de liberdade do erro.

A Figura 3.11 apresenta o comportamento da tensão cisalhante na junta segundo as variáveis que se revelaram significativas- idade e relação água/aglomerante.



**Figura 3.11** Tensão cisalhante na junta (Ts), considerando os níveis de variáveis significativas.

(a) apresenta os níveis da variável relação água/aglomerante e (b) a variável idade.

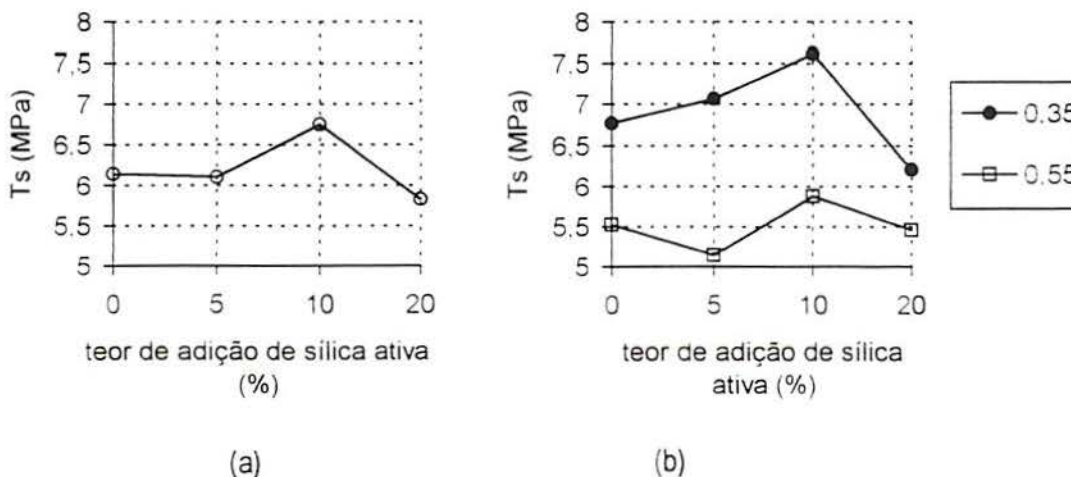
Estes resultados permitem concluir que a resistência de aderência, nestas condições de tensões, depende principalmente da relação água/aglomerante da argamassa utilizada, diretamente relacionada com a resistência à compressão e tração das mesmas, além da idade.

O fato da variável teor de adição de sílica ativa ter se revelado não significativa indica que a aderência nesta situação pode depender mais de outros fatores (como aplicação e condições do substrato), além da resistência da argamassa, do que do teor de adição no traço de argamassa empregado. E mais, dado que no presente ensaio obteve-se variações muito grandes (> 25%) nos resultados, qualquer efeito pode ter sido mascarado. Como a adição de sílica ativa em argamassas nem sempre produz acréscimos significativos na sua resistência à compressão, por exemplo, como já visto na seção 3.3.1 deste trabalho, pode-se concluir que sutis diferenças nas características da argamassa

não representaram mudanças na sua aderência a substratos de concreto, frente a esforços de cisalhamento com compressão.

Na literatura são encontradas referências de que concretos com adições de sílica ativa apresentam um melhor desempenho na aderência a concretos endurecidos, como SELLEVOLD e NILSEN (1987) e MALHOTRA e MEHTA (1996). PIGEON e SAUCIER (1994) destacam que o que ocorre na interface entre um concreto endurecido e uma argamassa ou concreto fresco que é aplicado, assemelha-se com o que se passa na interface pasta/agregado. Há uma tendência a formar cristais grandes e frágeis de hidróxido de cálcio na interface entre pasta endurecida e pasta fresca. Os efeitos da sílica ativa em melhorar a aderência estaria ligado ao refinamento dos poros e cristais que sua ação pozolânica e de microfíler provocam. No caso das argamassas estudadas, não se evidenciou este fenômeno com a devida significância, ainda mais que a resistência de aderência relaciona-se também com outros aspectos, provavelmente mais decisivos, como as condições do substrato.

Todavia, conforme pode ser visualizado na Figura 3.12, o desempenho desta propriedade segundo os teores de adição de microssilica revela um comportamento semelhante ao verificado em outras propriedades que são avaliadas neste trabalho. Embora não comprovado estatisticamente, observa-se uma melhora no desempenho da aderência com 10% de adição e uma queda no desempenho com 20% de adição, sem verificar-se muitas diferenças entre 5% de adição e sem adição.



**Figura 3.12** Tensão cisalhante na junta, segundo o teor de adição de sílica ativa no traço.

(a) representa a variável isolada e (b) representa as tensões conforme o teor de adição e a relação água/aglomerante do traço.

Como será observado em outros ensaios, os traços com 20% de adição de sílica ativa apresentaram-se demasiadamente coesos, de maneira que dificultam as atividades de moldagem e aplicação, acarretando num mau desempenho em diversas propriedades. Especificamente em se tratando de aderência, uma das condições principais para que ela seja efetiva, que é a capacidade da argamassa em espalhar-se sobre o substrato e engastar-se nas reentrâncias (GALLEGOS, 1995 e SELMO, 1995 apud IOPPI, 1995), é dificultada pela coesão excessiva destes traços com 20%.



A pouca diferença ou até decréscimo obtido entre os traços sem sílica ativa e com 5% de adição indicam que até este teor poucas mudanças são proporcionadas pela adição nas características das argamassas. Com 10% de adição, passa a se obter acréscimos de até 20% e 27%, para as relações água/aglomerante 0,55 e 0,35, respectivamente. É um ganho importante, mas não significativo pela variabilidade dos resultados que se pode obter.

Quanto à magnitude dos valores obtidos, não há recomendações específicas para este tipo de material de reparo, a não ser MAILVAGNAM e DEANS (1992b), que destacam um limite de 1,85 a 3,42 MPa para as resistências de aderência de concretos e argamassas de cimento Portland para reparos. Porém, estes autores não destacam sob que condições de solitação deve ser esta aderência, se à tração direta ou cisalhamento com compressão.

Existem referências sobre valores mínimos aceitáveis para a propriedade em relação a resinas epóxi e pontes de aderência a base de látex, sob condições de ensaio semelhantes (ASTM C882-91, 1991 e ASTM C 1042-91, 1991). Na ASTM C 1059-91 (1991) são especificados valores de resistência mínimos de 2,74 MPa e 8,56 MPa para pontes de aderência a base de látex, redispersáveis ou não redispersáveis, respectivamente. Na ASTM C 881-91 (1991) são fixadas resistências de aderência de 6,9 MPa a 10,3 MPa para resinas epóxi a serem utilizadas como pontes de ligação entre concreto fresco e endurecido. Os métodos de ensaio que monitoram estas resistências adotam corpos de prova cilíndricos, com juntas a 60°. Nestas condições, os resultados obtidos para a resistência de aderência devem superiores aos de corpos de prova com junta a um ângulo maior que este, pelo fato de que a componente de compressão na junta é muito maior. Sendo assim, dado que os valores obtidos para as argamassas ficaram na média entre 5,67 MPa e 9,16 MPa, conclui-se que elas devem atender satisfatoriamente estes limites estabelecidos. Portanto, pode-se considerar as argamassas estudadas como adequadas à utilização em reparos sobre substratos de concreto endurecido, do ponto de vista da aderência ao cisalhamento com compressão.

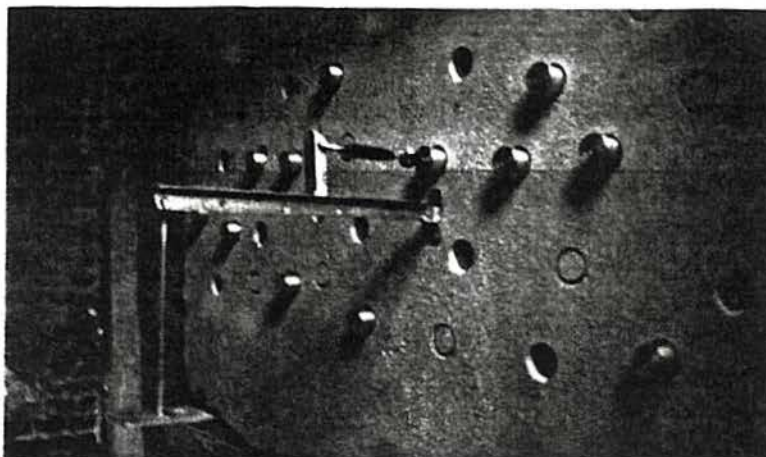
### **3.3.3.2 Ensaio de arrancamento de revestimentos sobre paredes**

Este ensaio foi realizado para determinação da resistência de aderência à tração das argamassas, quando aplicadas sob a forma de um revestimento sobre paredes de concreto endurecido.

#### **3.3.3.2.1 Ensaio realizado**

O ensaio seguiu os procedimentos do projeto de norma P.N. 2:102.17-003 "Revestimento de argamassas inorgânicas de paredes e tetos - Determinação da resistência de aderência à tração", do Comitê Brasileiro de Construção Civil (CB-02, 1995) da ABNT. Esta metodologia é semelhante ao ME-10 do IPT (1981), (IOPPI, 1995).

O aparelho utilizado para a aplicação de carga seguiu detalhamento constante no documento do convênio Encol/Epusp - Projeto EP/EN-1, onde a metodologia de ensaio apresentada é semelhante à do projeto de norma. Trata-se de um "braço" de alavanca confeccionado com perfis metálicos, onde a carga que é colocada em seu extremo se traduz num esforço de tração no ponto onde liga-se ao corpo de prova. Os corpos de prova adotados foram de seção circular, com diâmetro de 5 cm. A Figura 3.13 apresenta foto com o equipamento utilizado instalado para a realização de uma determinação.



**Figura 3.13** Foto sobre o ensaio de arrancamento de revestimentos sobre paredes. Equipamento, revestimento com os corpos de prova serrados, pastilhas metálicas para ligação com o equipamento.

Por ser um ensaio ainda em fase de normalização, e por saber-se que seus resultados podem ser muito variáveis (IOPPI, 1995), o ensaio foi realizado apenas preliminarmente com dois traços de argamassa, de relação água/aglomerante 0,55 com 10% de sílica ativa e sem sílica ativa. A escolha destes traços deveu-se ao fato deles apresentarem características de preparo e aplicação semelhante aos traços de argamassas para revestimentos normais, diferenciando-se apenas pela adição de sílica ativa.

O ensaio foi realizado numa obra corrente de edificação residencial em Porto Alegre, onde havia uma grande extensão de cortinas de concreto armado. Justamente para se ter um substrato com as características usuais das estruturas de concreto, optou-se por realizar os revestimentos sobre esta superfície. A parede foi apicoada manualmente utilizando-se ponteira metálica e marreta, de forma que fosse eliminada a camada lisa superficial composta basicamente de nata de cimento. Procurou-se deixar o agregado graúdo à mostra, mas sem que irregularidades com profundidades superiores a 8mm ocorressem.

Aplicou-se lado a lado dois panos de argamassa com área de aproximadamente 1m x 1m, um contendo 10% de sílica ativa e o outro não. Como a dosagem e mistura das argamassas foram realizadas na obra, os traços finais ficaram um pouco diferentes dos adotados em laboratório, em função da umidade da areia e relação peso/volume. A aplicação foi manual, com colher de pedreiro; o desempenho da superfície foi com régua metálica e desempenadeira de madeira; e o operário utilizado neste trabalho era habituado a realizar este tipo de serviço.

Os traços finais das argamassas aplicadas foram os seguintes, considerando a existência de um teor de umidade na areia utilizada na obra de 2,51%:

\*Argamassa sem sílica ativa:

1: 3,04 - a/c = 0,60



\*Argamassa com sílica ativa:

1: 3,04 - a/c = 0,59 10% de sílica ativa, em relação à massa de cimento.

O ensaio de arrancamento foi realizado aos 4, 7 e 21 dias de idade da argamassa, sendo que preparou-se de 6 a 8 corpos de prova para cada idade, para os dois traços aplicados. A preparação dos corpos de prova compreendeu corte do revestimento endurecido com serra copo diamantada e refrigeração a água e colagem das pastilhas de alumínio com adesivo de base epóxi. As velocidades de carregamento seguiram as recomendações do projeto de norma (até 80 segundos).

### 3.3.3.2 Resultados obtidos para a resistência de aderência à tração

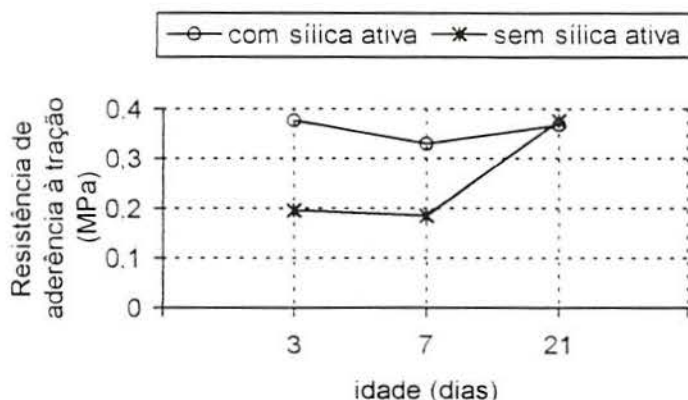
Os resultados obtidos nos arrancamentos dos corpos de prova, já calculados em termos da tensão na interface de ruptura, constam na Tabela 3.12, onde se apresentam apenas os resultados obtidos nos corpos de prova que romperam efetivamente na interface argamassa/concreto durante o ensaio, com as respectivas médias e variabilidades:

**Tabela 3.12:** Resultados do ensaio de arrancamento de revestimentos sobre paredes - determinação da resistência de aderência à tração.

Traço	Argamassa sem sílica ativa			Argamassa com sílica ativa		
	4 dias	7 dias	21 dias	4 dias	7 dias	21 dias
Tensão de ruptura (MPa)	0,1799	0,1585	0,4497	0,4519	0,2316	0,4497
	0,2069	0,2560	0,3535	0,3278	0,2316	0,4023
	0,1329	0,0859	0,2804	0,4051	0,4519	0,4260
	0,3274	0,2388	0,3535	0,1681	0,1634	0,2804
	0,1293	-	0,4494	+0,4519	0,4519	0,2804
	-	-	-	+0,4519	+0,4519	0,3779
	-	-	-	-	-	0,4497
	-	-	-	-	-	0,2804
Média (MPa)	<b>0,1953</b>	<b>0,1848</b>	<b>0,3773</b>	<b>0,3761</b>	<b>0,3304</b>	<b>0,3684</b>
desvio (MPa)	0,0807	0,0784	0,0724	0,1128	0,1354	0,0765
CV (%)	41,34	42,45	19,19	30,00	40,99	20,78

Foram desprezadas as rupturas que ocorreram ao se colocar o equipamento de arrancamento, por atribuir-se tal falta de aderência a danos ocorridos durante a serragem dos corpos de prova. Todas as rupturas ocorreram na interface argamassa/concreto e portanto a tensão de ruptura pode ser considerada como a resistência de aderência à tração da argamassa ao substrato em questão. Em alguns casos a carga disponível foi insuficiente para provocar a ruptura, sendo a resistência de aderência considerada neste caso como superior ao valor máximo colocado, indicada com o sinal + na Tabela 3.12. Para fins de cálculo da média, considerou-se o valor máximo de resistência medido para estes casos.

As médias dos resultados podem ser observadas na forma de um gráfico na Figura 3.14.



**Figura 3.14** Resistência de aderência à tração versus idade, para os dois traços de argamassa testados.

### 3.3.3.2.3 Análise dos resultados

A princípio, considerar os resultados deste ensaio apenas em termos da média das resistências obtidas não é aconselhável, se levarmos em conta o que deve ser o desempenho de um revestimento quanto à sua aderência ao substrato. Um revestimento terá um mau desempenho se apresentar regiões de altíssima aderência intercaladas com regiões de baixa aderência. Portanto, para se ter uma melhor apreciação da resistência de aderência de um revestimento de argamassa deve-se levar em consideração o conjunto de resultados individuais, comparando-os com o que é recomendado pelas normas existentes sobre desempenho de revestimentos.

No presente caso, sendo as argamassas em estudo destinadas à aplicação em reparos e reforços de estruturas de concreto armado, deve-se esperar delas um comportamento quanto à aderência à tração no mínimo semelhante ao recomendado para revestimentos de paredes e tetos em geral, para que se garanta seu desempenho como material de revestimento em peças de concreto.

O projeto de norma 02:102.17-001 "Revestimento de paredes e tetos em argamassas inorgânicas - Especificação" (CB-02 ABNT, 1995) sugere valores mínimos para a resistência de aderência à tração de revestimentos de tetos e paredes em geral. A resistência deve ser superior de 0,15 a 0,30 MPa, conforme o acabamento e local de aplicação do revestimento. O DTU 26.1 da normalização francesa do CSTB (1978) especifica que o valor médio da resistência de aderência à tração em determinada amostra de revestimento deve ser igual ou superior a 0,30 MPa, sendo que nenhum dos valores obtidos deve ser inferior a 0,20 MPa. No presente caso, aos 21 dias de idade ambos revestimentos de argamassa satisfizeram estas duas normas. Nas primeiras idades, a argamassa com adição de sílica ativa teve um desempenho superior ao da argamassa sem adição, que apresentou média dos resultados abaixo de 0,20 MPa.

Ao se analisar os resultados do ensaio estatisticamente, através de uma análise de variância (ANOVA) entre os resultados dos dois revestimentos, para as três idades, verificou-se uma diferença significativa quanto ao desempenho dos mesmos. O traço da argamassa influenciou significativamente no comportamento da aderência, principalmente porque a propriedade teve um crescimento com a idade de maneira distinta entre os dois traços estudados.



O fato de que, aos 21 dias de idade, a média dos valores obtidos para a argamassa com sílica ativa, foi ligeiramente inferior à obtida para a argamassa sem a adição, leva, no entanto, à conclusão de que a longo prazo o desempenho da resistência de aderência à tração de argamassa com ou sem adição de sílica ativa seja o mesmo. Analisando-se estatisticamente os resultados dos dois traços nesta idade, através de comparação de médias (NANNI e RIBEIRO, 1992), verifica-se que não há diferença estatística entre estes dois grupos de resultados, que tiveram variabilidades satisfatórias (< 25%). Mesmo com referências de que adições no concreto melhoram a aderência ao concreto velho (SELLEVOLD e NILSEN 1987; MALHOTRA e MEHTA, 1996), não se obteve o mesmo resultado com as argamassas.

Portanto, pelo presente ensaio, de acordo com as condições em que ele foi realizado, somente pode-se concluir que a princípio a resistência de aderência dos dois traços de argamassa estudados tem a mesma magnitude aos 21 dias de idade. Nas primeiras idades a argamassa com sílica ativa apresentou um desempenho superior ao da argamassa sem adição, que pode ser atribuído à reatividade inicial da sílica ativa que leva a maiores ganhos de resistência nas primeiras idades (MALHOTRA e MEHTA, 1996), à maior coesão que a argamassa com sílica ativa apresenta no estado fresco e ao maior teor de pasta, características que de alguma forma garantiram maior ligação entre a argamassa e o substrato de concreto endurecido. Como a aderência de um revestimento de argamassa sobre um substrato de concreto é puramente mecânica, segundo GALLEGOS(1995), *apud* IOPPI (1995) e demais autores citados por ele, a ligação proporcionada pela argamassa com sílica ativa deve ter desenvolvido resistências superiores às da argamassa sem a adição, no início da hidratação da pasta de cimento. Se considerarmos que em situações de reparos ou reforços de estruturas obter aderência adequada já nas primeiras idades é desejável, adição de sílica ativa numa argamassa pode ser justificável sob este aspecto.

Os resultados aqui apresentados e comentados são apenas dados preliminares sobre esta propriedade, pois os ensaios não foram preparados sistematicamente e a validade do ensaio ainda não é de todo comprovada.

### 3.3.4 Módulo de deformação estática

O módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação das argamassas em estudo foi determinado seguindo-se o procedimento adaptado da NBR 8522/84 - "Concreto-Determinação do Módulo de Deformação estática e Diagrama Tensão-Deformação" (ABNT, 1984), considerando o tipo de carregamento III. Foi determinado o módulo de elasticidade secante, calculado a 40% de  $f_c$  (resistência à compressão de ruptura das argamassas), considerando o intervalo de deformações obtido entre  $50.10E-6\mu\text{m/m}$  e  $E_{40\%f_c}$  (deformação na tensão de 40% de  $f_c$ ), e tensões de  $f_{50,10E-6}$  e  $f_{40\%f_c}$ , de acordo com ASTM C-469 (ASTM, 1994).

Foram ensaiados três corpos de prova para cada traço de argamassa, sendo os corpos de prova moldados conforme NBR 7215 (ABNT,1991). A confecção destes corpos de prova foi feita na ocasião da preparação dos corpos de prova da segunda determinação da resistência à compressão das argamassas, já apresentada na seção 3.3.1, sendo que o módulo foi determinado nos corpos de prova com 63 dias de idade.

A medição das deformações longitudinais foi feita por meio de extensômetros elétricos (*strain gages*), sendo colocados dois em cada corpo de prova, diametralmente opostos. A colagem dos extensômetros foi feita com resina de base éster de cianocriato (*super-bonder*).

Os incrementos de carga foram estipulados a partir da resistência à compressão obtida para as argamassas na 1ª determinação, capítulo 3.3.1, aproximando-se a valores compatíveis com a escala da prensa utilizada, com capacidade para 60 toneladas.

Como resultado do ensaio considerou-se as deformações obtidas a cada incremento de carga, sendo que com a média das duas leituras gerou-se o diagrama tensão-deformação de cada corpo de prova ensaiado. A partir dos diagramas determinou-se os pontos na curva correspondentes à deformação de  $50.10E-6\mu\text{m/m}$  e à tensão de 40% da tensão de ruptura ocorrida. Calculou-se a inclinação da reta que passava por estes dois pontos como sendo o módulo de deformação estático das argamassas.

### 3.3.4.1 Resultados obtidos

A partir dos diagramas tensão-deformação da média das duas leituras foram calculados os módulos de deformação estáticos para cada corpo de prova ensaiado, que são apresentados na Tabela 3.13, juntamente com a média para cada traço, desvio-padrão e coeficiente de variação (C.V.).

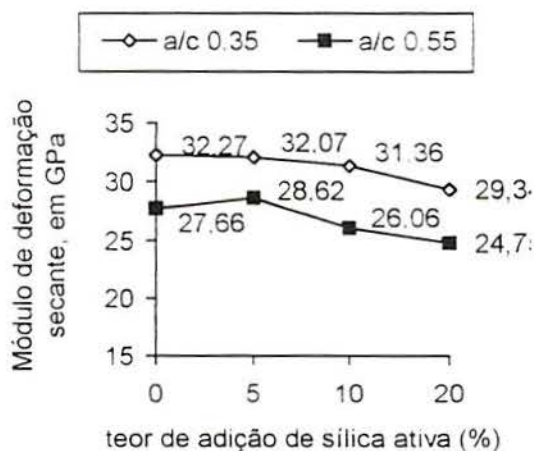
**Tabela 3.13** Resultados da determinação do módulo de deformação estático, no regime elástico (40% de  $f_c$  - resistência à compressão), calculados a partir da curva tensão-deformação.

Traço	Módulo de deformação estático, a 40% de $f_c$ , em GPa					
	CP1	CP2	CP3	Média	Desvio-padrão	C.V.(%)
1: 1,8 a/c 0,35 0% sa	32,49	32,04	*	<b>32,27</b>	0,32	0,99
1: 1,7 a/c 0,35 5% sa	32,44	33,09	30,68	<b>32,07</b>	1,25	3,89
1: 1,7 a/c 0,35 10% sa	30,70	32,41	30,96	<b>31,36</b>	0,92	2,94
1: 1,6 a/c 0,35 20% sa	30,08	29,02	28,91	<b>29,34</b>	0,65	2,20
1: 3 a/c 0,55 0% sa	25,74	29,99	27,26	<b>27,66</b>	2,15	7,78
1: 3 a/c 0,55 5% sa	28,22	26,29	31,35	<b>28,62</b>	2,55	8,92
1: 3 a/c 0,55 10% sa	27,87	26,70	23,61	<b>26,06</b>	2,20	8,45
1: 2,62 a/c 0,55 20% sa	23,92	26,88	23,45	<b>24,75</b>	1,86	7,51

\* Obs.: corpo de prova descartado.

A Figura 3.15 apresenta gráfico com as médias dos módulos de deformação obtidos, para os traços com relação água/aglomerante de 0,35 e 0,55.





**Figura 3.15** Módulo de deformação secante versus teor de sílica ativa, para as duas relações água/aglomerante.

### 3.3.4.2 Análise dos resultados

Procedeu-se a uma análise estatística dos resultados obtidos para o módulo de deformação das argamassas, para se avaliar o efeito das variáveis no desempenho da propriedade. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA), considerando como variáveis a relação água/aglomerante e os teores de sílica ativa.

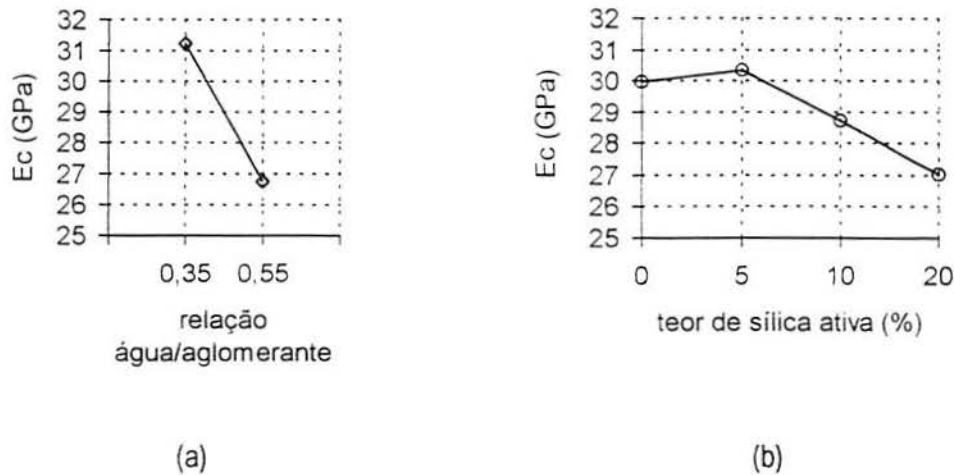
A tabela de resultados da ANOVA é apresentada na Tabela 3.14.

**Tabela 3.14** Resultados da ANOVA para os resultados do módulo de deformação secante.

Fator	GLD	MQ	$F_{calc}$	$F_{0.05}^*$	Significância
a/c	1	113.5285	38.12698	4.54	<b>significativo</b>
sa	3	12.9235	4.34018	3.29	<b>significativo</b>
a/c+sa	3	0.8755	0.29403	3.29	não signif.
erro	15	2.977643	-	-	-

\* F tabelado para o nível de significância de 5%.  $F(n_i, n_e)$ , sendo  $n_i$  = número de graus de liberdade do efeito e  $n_e$  = número de graus de liberdade do erro.

A Figura 3.16 apresenta os gráficos que representam o comportamento do módulo de deformação de acordo com as variáveis que resultaram significativas na análise.



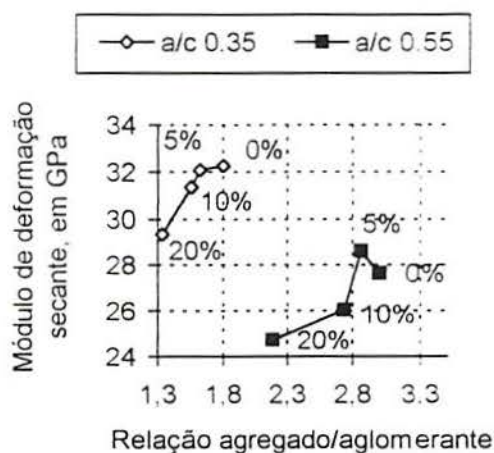
**Figura 3.16** Módulo de deformação das argamassas ( $E_c$ ), considerando os níveis das variáveis analisadas, significativas.

- (a) apresenta os valores agrupados para os níveis da variável água/aglomerante,  
 (b) apresenta os valores agrupados para os níveis da variável teor de adição de sílica ativa.

Como esperado, a relação água/aglomerante revelou-se significativa, pois ela relaciona-se diretamente com a resistência à compressão das argamassas. Segundo NEVILLE (1982), o módulo de deformação secante do concreto é tanto maior quanto maior for sua resistência, que por sua vez será tanto maior quanto menor for a relação água/aglomerante de sua composição. No caso de argamassas, valem as mesmas considerações. O módulo de deformação tanto de um concreto como de uma argamassa relaciona-se com o módulo de deformação da pasta de cimento e com o módulo de deformação dos agregados. O módulo de deformação da pasta será tanto maior quanto maior for sua resistência, ou seja, quanto menor for a relação água/aglomerante desta pasta, conseqüentemente menor porosidade também (NEVILLE, 1982 e MEHTA e MONTEIRO, 1993). Neste caso então, para as duas relações água/aglomerante estudadas, foi significativa a diferença nas características das pastas sobre os módulos de deformação das argamassas, principalmente porque em argamassas a relação pasta/agregado é muito maior do que em concretos.

O fato do teor de adição de sílica ativa ter se revelado significativo implica numa interpretação que também deve ser feita em termos das características das pastas e dos agregados. O módulo de deformação das argamassas foi quase sempre menor quanto maior o teor de adição. Mas isto não deve ser interpretado em termos de que a sílica ativa reduz o módulo de deformação das argamassas. Nos traços em estudo a sílica ativa foi introduzida como adição, e não substituição ao cimento. Assim sendo, os traços estudados apresentam relações agregado/aglomerante diferentes, por sua vez relações pasta/agregado diferentes, para uma mesma relação água/aglomerante. A Figura 3.17 apresenta o gráfico módulo de deformação versus relação agregado/aglomerante, para os valores médios obtidos.





**Figura 3.17** Módulo de deformação estático *versus* relação agregado/aglomerante dos traços estudados, sendo indicados os teores de adição de sílica ativa e relação água/aglomerante dos traços em questão.

Com base nesta figura, pode-se dizer que o que é significativo sobre a propriedade do módulo de deformação é a relação agregado/aglomerante, e não especificamente o teor de adição de sílica ativa. As pastas de cimento e sílica ativa, uma vez mantida a relação água/aglomerante constante, devem apresentar módulos e resistências semelhantes. O agregado utilizado era o mesmo para todas as misturas. Portanto, confirmando as observações de BUCHER (1989), o módulo acabou sendo tanto maior quanto maior a relação agregado/aglomerante. Para os traços em questão, têm-se as seguintes relações agregado/aglomerante:

1: 3 a/c 0,55 - 0% sa → <b>3,00</b>	1: 1,8 a/c 0,35 - 0% sa → <b>1,80</b>
1: 3 a/c 0,55 - 5% sa → <b>2,86</b>	1: 1,7 a/c 0,35 - 5% sa → <b>1,62</b>
1: 3 a/c 0,55 - 10% sa → <b>2,73</b>	1: 1,7 a/c 0,35 - 10% sa → <b>1,55</b>
1: 2,62 a/c 0,55 - 20% sa → <b>2,18</b>	1: 1,6 a/c 0,35 - 20% sa → <b>1,33</b>

Observa-se, no entanto, que o módulo de deformação da argamassa com relação água/aglomerante 0,55 e 5% de sílica ativa foi maior do que a de traço sem sílica ativa, apesar da relação agregado/aglomerante reduzir em 4,67%. Neste caso, deve ter prevalecido o efeito de que pastas com maior porosidade terão módulos de deformação menores (e resistências menores também) (BUCHER, 1989), o que facilmente é explicado pelo efeito de refinamento dos poros que a adição de sílica ativa provoca em pastas, argamassas e concretos (MEHTA e MONTEIRO, 1993). Pela pequena diferença nas relações agregado/aglomerante entre estes dois traços, as características das pastas determinaram o módulo de deformação destas argamassas.

Nos traços com relação água/aglomerante 0,35 observou-se quase a mesma magnitude de módulos de deformação para os traços com 5% de adição e sem adição, fato que também explica-se

considerando as características das pastas. Para esta relação água/aglomerante, a porosidade de pastas com 5% de adição de sílica ativa deve ser muito semelhante à de pastas sem adição, de maneira que se as argamassas possuem teor de agregados próximos, pouca diferença pode ser evidenciada nos módulos de deformação destes traços. Neste caso, um efeito compensa o outro. Somente quando houverem diferenças maiores nos teores de agregado das argamassas é que se percebe a predominância deste efeito sobre o módulo de deformação. Senão, prevalecem as características das pastas.

O efeito da adições de sílica ativa no módulo de deformação do concreto propicia pequenos mas significativos acréscimos (DAL MOLIN, 1995). Aqui, em função do que foi exposto, não pode-se afirmar o mesmo para argamassas.

O módulo de deformação é um aspecto importante para os materiais de reparo, no sentido de que não pode ser muito diferente do módulo do concreto, e nem muito elevado, pois deve ser capaz de absorver certas movimentações da base sem tensionar a região de interface e descolar-se (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b; WARNER, 1984). Assim sendo, dado que para concretos com resistência variando de 20 a 60 MPa apresentam módulos variando de 25 a 36 GPa, segundo NEVILLE (1982), os módulos de deformação das argamassas, que variaram de 25 a 32 GPa, são compatíveis.

CHAN et al. (1991) recomendam módulo de deformação para argamassas de reparo no intervalo de 15 a 25 GPa, considerando substratos de concreto com resistências de 12 a 31 MPa. As argamassas com relação água/aglomerante de 0,55 apresentaram módulos próximos a este limite.

EMBERSON e MAYS (1996), estudando a distribuição de tensões em vigas reparadas com argamassas submetidas à flexão, ressaltam a necessidade de um material de reparo apresentar módulo não muito inferior ao do concreto, quando aplicado na zona de compressão de uma viga, e nem muito superior ao do concreto, quando aplicado na zona de tração. Recomendam que a princípio qualquer material de reparo destinado à reconstituição de seções deve ter módulo de deformação elástico no intervalo de  $\pm 10$  GPa em relação ao módulo do concreto. As argamassas aqui estudadas enquadram-se neste intervalo, ao se considerar os valores dos módulos de deformação calculados a partir da recomendação da NBR 6118 (ABNT, 1980), e tendo os concretos produzidos na região de Porto Alegre, RS, resistências de projeto variando de 15 a 25 MPa.

### **3.4 ENSAIOS RELACIONADOS COM A DURABILIDADE: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE**

As características de um material de reparo frente aos agentes degradantes das estruturas de concreto armado é um aspecto tão importante quanto suas propriedades mecânicas. Os aspectos que em geral são destacados com relação à durabilidade do material e da estrutura são a resistência à difusão do dióxido de carbono e de íons cloreto, capacidade de passivação química das armaduras e durabilidade frente às intempéries e solicitações do local de aplicação (LAMBE e HUMPHREY, 1990). Em geral, o desempenho dos materiais de reparo frente a estes aspectos relacionam-se diretamente com a porosidade e permeabilidade. Assim, a avaliação do desempenho de materiais de reparo passam quase sempre por ensaios que de alguma forma indicam estas características, quer seja verificando



especificamente o comportamento frente aos agentes degradantes ou realizando medidas diretas das mesmas.

O desempenho quanto à durabilidade das argamassas em estudo, como material que se destina ao cobrimento de armaduras e revestimento de concretos endurecidos, foi avaliado sob dois aspectos: evolução do fenômeno da carbonatação e suscetibilidade à penetração de íons cloretos e consequente corrosão de armaduras. Ambos aspectos são indicativos indiretos da porosidade e permeabilidade das argamassas, uma vez que os fenômenos envolvidos ocorrem a nível da microestrutura das mesmas. Também ambos aspectos influem sobre o desempenho das argamassas no combate à corrosão das armaduras, um dos problemas mais sérios que assolam as estruturas de concreto armado (PERKINS, 1986; LAMBE e HUMPHREY, 1990).

Os dois ensaios que foram realizados, acompanhamento da profundidade carbonatada e corrosão acelerada por íons cloreto e diferença de potencial, buscaram revelar o comportamento das argamassas frente aos fenômenos envolvidos, de maneira a dar indicações do desempenho das mesmas como material para reparos e reforços.

### 3.4.1 Evolução da profundidade carbonatada

A evolução do fenômeno da carbonatação foi avaliada nas argamassas através de medições da frente de carbonatação em corpos de prova recém fraturados. Considerando que a camada carbonatada de um concreto ou argamassa apresenta potenciais de hidrogênio da ordem de nove ou menos, utilizou-se como indicador químico do pH solução de fenolftaleína, que ao ser aspergida na superfície de um corpo de prova recém fraturado apresenta-se na cor vermelho carmim quando o pH é superior a 10, e incolor abaixo de 8,3 (BASSET et al.(1981) *apud* KAZMIERCZAK (1995)).

Mesmo que a determinação da profundidade carbonatada por meio de indicadores químicos não seja tão precisa, pois evidencia-se apenas a zona em que o pH alterou-se dentro do intervalo de mudança de cor do indicador químico, este método é de execução simples e rápida e considerou-se o mesmo adequado aos propósitos da pesquisa. Conforme KAZMIERCZAK (1995), em ensaios de carbonatação não acelerados a camada parcialmente carbonatada pode apresentar-se às vezes bastante extensa, mascarando a real extensão do fenômeno quando ele é avaliado por meio de indicadores químicos. Nesta pesquisa buscou-se avaliar o desempenho das argamassas em termos comparativos, analisando-se os resultados somente entre si e com relação a resultados obtidos com o mesmo método de determinação. Portanto, mesmo que a evolução da carbonatação nas argamassas seja indicada apenas indiretamente ou aproximadamente pela medição efetuada, consegue-se uma avaliação de como o fenômeno é influenciado pelas variáveis dos traços de argamassa estudados, e assim, orientações de como é o desempenho das argamassas com adições em relação a concretos e argamassas sem adições.

A profundidade carbonatada nas argamassas foi medida em corpos de prova cilíndricos de argamassa, para os oito traços estudados, com dimensões de  $\varnothing 5 \times 10$  cm, moldados em 4 camadas que receberam 30 golpes de soquete, conforme NBR 7215 (ABNT, 1991). Os corpos de prova foram moldados na mesma ocasião da segunda determinação da resistência à compressão axial das argamassas, item 3.3.1.2. A profundidade carbonatada foi medida aos 10 e aos 24 meses de idade.

Os corpos de prova sempre foram deixados em ambiente de laboratório, sem nenhum processo de cura após a desmoldagem, realizada 24 horas após a moldagem. Tomou-se três medidas por corpo de prova, sendo que cada medida era a média dos dois valores tirados num mesmo diâmetro. O resultado considerado para cada corpo de prova avaliado é a média das três medidas. As medições foram efetuadas com paquímetro.

### 3.4.1.1 Resultados das medições da profundidade carbonatada

Os resultados medidos aos 10 e 24 meses de idade das argamassas são apresentados na Tabela 3.15, sendo apresentadas as médias das profundidades medidas em cada corpo de prova, e a média da profundidade por traço, com as respectivas variabilidades.

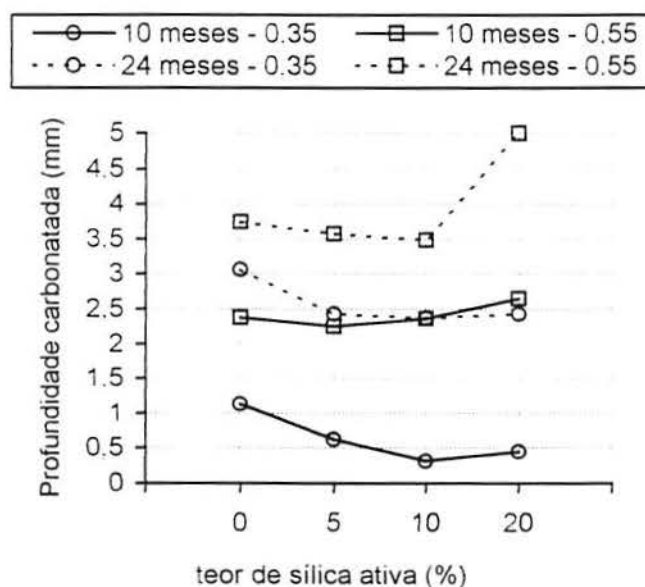
**Tabela 3.15** Resultados das medições da profundidade carbonatada, aos 10 e 24 meses de idade.

Traço	Prof. carbonatada. 10 meses (mm)				Prof. carbonatada. 24 meses (mm)			
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	CP 1	CP 2	CP 3	Média
a/c 0,35 0% sa	1.3	1.0	1.1	1,1	2.6	3.3	3.3	3,1
	s: 0.2 CV: 13.47%				s: 0.4 CV: 13.18%			
a/c 0,35 5% sa	0.8	0.6	0.5	0,6	2.5	2.4	2.4	2,4
	s: 0.2 CV: 24.12%				s: 0.1 CV: 2.37%			
a/c 0,35 10% sa	0.4	0.2	0.3	0,3	2.4	2.3	2.4	2,4
	s: 0.1 CV: 33.33%				s: 0.1 CV: 2.44%			
a/c 0,35 20% sa	0,3	0,5	0,6	0,5	2,4	2,4	2,4	2,4
	s: 0.2 CV: 32.73%				s: 0.0 CV: 0.00%			
a/c 0,55 0% sa	2.5	2.2	2.4	2,4	3.5	4.1	3.6	3,7
	s: 0.2 CV: 6.45%				s: 0.3 CV: 8.61%			
a/c 0,55 5% sa	1.8	2.3	2.6	2,2	3.6	3.3	3.8	3,6
	s: 0.4 CV: 18.09%				s: 0.3 CV: 7.06%			
a/c 0,55 10% sa	2.1	2.7	-	2,4	3.4	3.5	-	3,5
	s: 0.4 CV: 17.68%				s: 0.1 CV: 2.05%			
a/c 0,55 20% sa	2.4	2.5	3.1	2,7	5.0	4.8	5.2	5,0
	s: 0.4 CV: 14.20%				s: 0.2 CV: 4.00%			

Obs.: s: desvio padrão e CV: coeficiente de variação.

A Figura 3.18 apresenta as médias dos resultados de cada traço na forma de um gráfico, para as duas idades analisadas.





**Figura 3.18** Profundidade carbonatada (mm) versus teor de sílica ativa, para as idades de 10 e 24 meses, e para as duas relações água/aglomerante dos traços avaliados.

### 3.4.1.2 Análise dos resultados

Procedeu-se a uma análise estatística dos resultados obtidos para a profundidade carbonatada aos 10 meses e aos 24 meses de idade das argamassas, para se avaliar o efeito das variáveis dos traços no desempenho da propriedade. Utilizou-se a análise de variância (ANOVA), considerando-se como variáveis a relação água/aglomerante e o teor de adição de sílica ativa, além da idade.

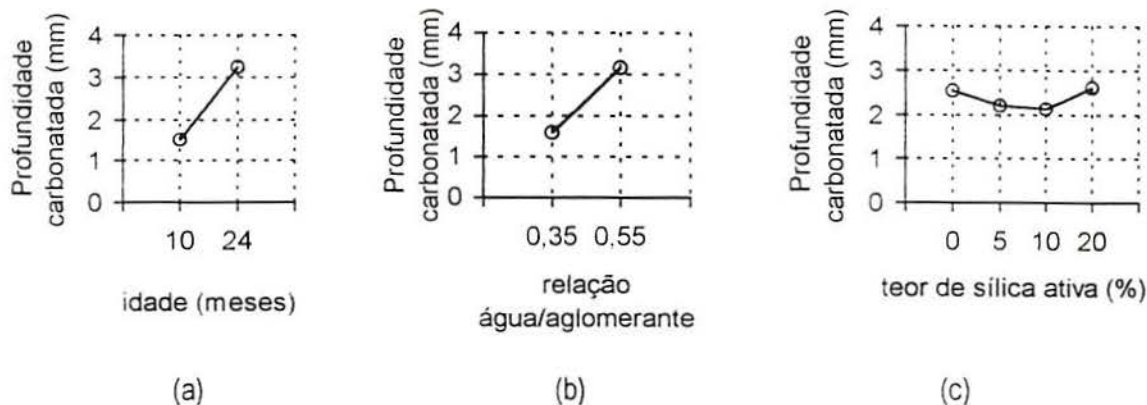
Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 3.16.

**Tabela 3.16** Resultados da ANOVA para os resultados da profundidade carbonatada aos 10 e 24 meses das argamassas.

Variável	GLD	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub> *	Significância
Idade	1	34,89361	567,2170	4,17	<b>significativo</b>
a/c	1	27,56618	448,1050	4,17	<b>significativo</b>
sa	3	0,64201	10,4362	2,92	<b>significativo</b>
Idade+a/c	1	0,36171	5,8798	4,17	<b>significativo</b>
Idade+sa	3	0,21662	3,5212	2,92	<b>significativo</b>
a/c+sa	3	1,20355	19,5644	2,92	<b>significativo</b>
Σ todos	3	0,21529	3,4996	2,92	<b>significativo</b>
erro	30	0,061517	-	-	-

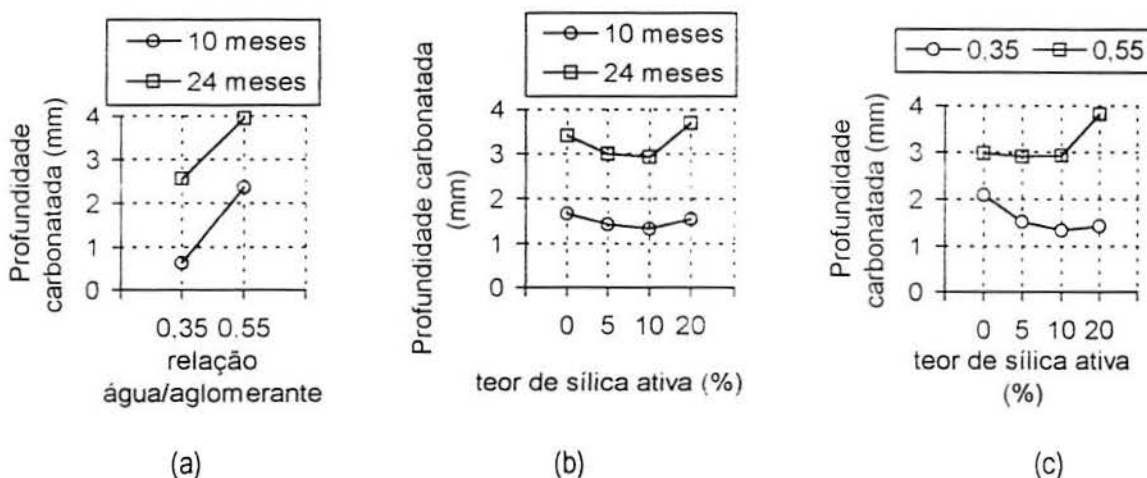
\* F tabelado para o nível de 5% de significância, F(ni, ne), sendo ni = número de graus de liberdade do efeito e ne = número de graus de liberdade do erro.

As Figuras 3.19 e 3.20 apresentam o comportamento da profundidade carbonatada das argamassas segundo as variáveis consideradas na análise, e que se revelaram significativas no desempenho do fenômeno.



**Figura 3.19** Profundidade carbonatada (mm), segundo as variáveis que se revelaram significativas isoladamente.

(a) apresenta a variação da profundidade carbonatada segundo a idade da medição, (b) apresenta variação segundo a relação água/aglomerante dos traços e (c) apresenta a variação segundo o teor de adição de sílica ativa nos traços.



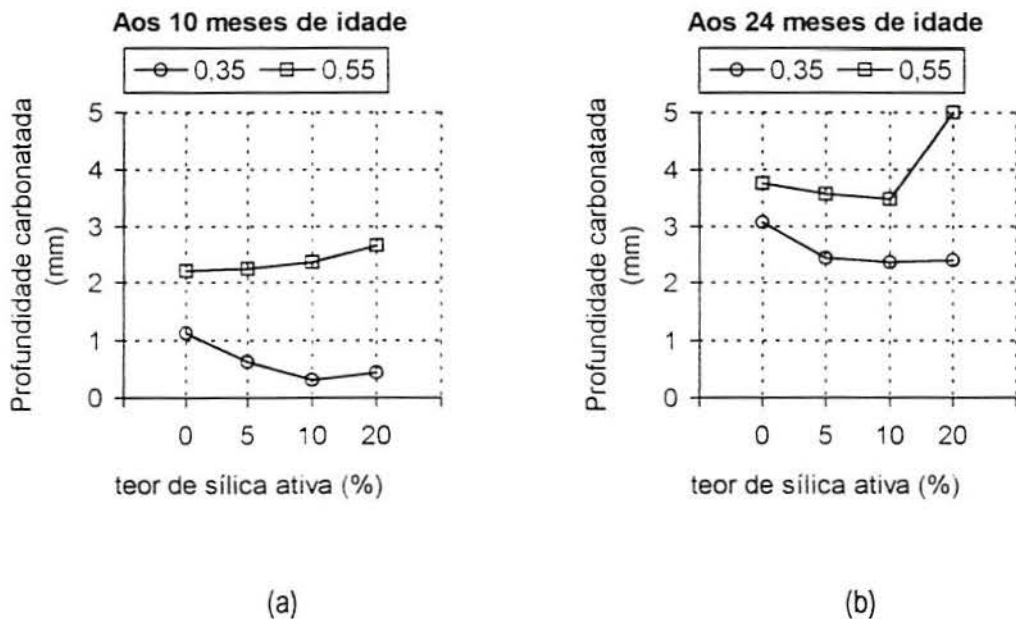
**Figura 3.20** Profundidade carbonatada segundo a interação entre variáveis, que se revelaram significativas.

(a) apresenta a variação do fenômeno segundo as duas relações água/aglomerante, para as duas idades avaliadas, (b) apresenta a variação segundo os quatro teores de adição de sílica ativa dos traços, também para as duas idades e (c) apresenta a variação do fenômeno segundo os quatro teores de adição, mas para as duas relações água/aglomerante distintamente.



A interação entre as três variáveis - idade, relação água/aglomerante e teor de adição - também revelou-se significativa, ou seja, o comportamento da profundidade carbonatada aos 10 meses de idade, para as duas relações água/aglomerante e quatro teores de adição, foi absolutamente distinto do comportamento aos 24 meses.

Isto fez com que se avaliasse separadamente os resultados das duas idades. Procedeu-se à mesma análise de variância, porém considerando como variáveis apenas a relação água/aglomerante e o teor de adição de sílica ativa. Aos 10 meses de idade, somente a relação água/aglomerante dos traços revelou-se significativa sobre a evolução da profundidade carbonatada. As pequenas profundidades medidas, muito variáveis, principalmente nos traços de relação água/aglomerante 0,35, fizeram com que o efeito do teor de adição de sílica ativa pouco se manifestasse na evolução do fenômeno da carbonatação. Já aos 24 meses de idade, tanto a relação água/aglomerante como o teor de adição dos traços revelaram-se efeitos significativos sobre a profundidade carbonatada atingida. A interação entre estas duas variáveis também foi significativa, ou seja, para cada relação água/aglomerante a profundidade carbonatada apresentou uma evolução distinta para os diferentes teores de adição de sílica ativa. A Figura 3.21 apresenta o comportamento da profundidade carbonatada para as duas idades, apresentada separadamente para cada uma das relações água/aglomerante dos traços.



**Figura 3.21** Profundidade carbonatada (mm), segundo idade, relação água/aglomerante e teor de sílica ativa.

(a) apresenta o fenômeno para a idade de 10 meses, segundo os teores de adição de sílica ativa dos traços, para cada relação água/aglomerante. (b) apresenta o mesmo gráfico, para 24 meses de idade.

Enquanto que aos 10 meses a profundidade carbonatada para os traços com relação água/aglomerante 0,55 apresentou um leve crescimento com o aumento do teor de adição de 5 para 10% e de 10 para 20%, aos 24 meses apresentou decréscimos até 10% e um aumento considerável ao

se passar para 20%. Como a carbonatação está intimamente ligada à porosidade das argamassas, é justificável um decréscimo na evolução do fenômeno para os traços com adições de sílica ativa, pelo refinamento dos poros que ela produz e conseqüente menor difusão de CO<sub>2</sub> pelo material (BAUER, 1996). Aos 10 meses, como não foi significativo o efeito da sílica tiva no fenômeno da carbonatação, não pode-se dizer que entre 0, 5 e 10% houve diferença relevante na profundidade. Mas já se destaca um aumento para o traço com 20%, que aos 24 meses é bem significativo.

Este ocorrido levanta uma polêmica que ainda não foi absolutamente esclarecida no meio científico. Sabe-se que as adições pozolânicas consomem o hidróxido de cálcio, um dos álcalis que garantem o pH alto do concreto e argamassas. A sílica ativa, pela sua alta reatividade, vai consumindo o hidróxido de cálcio à medida em que ele vai sendo gerado pelas reações de hidratação do cimento (MALHOTRA et al, 1994), fato que muitos pesquisadores crêem que influi na redução no pH do material, principalmente se forem adicionados teores mais altos destas adições. Por outro lado, não é comprovado que adições de até 20% de sílica ativa alterem significativamente o pH de concretos. Somente com teores de 30% ou mais é que o pH pode baixar de 13, mas não fica inferior a 12 (SELLEVOLD e NILSEN, 1987). Como a profundidade carbonatada é medida por indicadores de pH, se há pouca reserva alcalina no concreto ou argamassa a carbonatação evoluiria mais rápido por que consumiria o pouco hidróxido de cálcio disponível.

Na literatura, no entanto, sempre é feito referência ao fato de que as adições de sílica ativa, nos teores usuais (até 15%) contribui para a redução da profundidade carbonatada, por que diminui a porosidade e permeabilidade dos concretos ou argamassas (SELLEVOLD e NILSEN, 1987; MALHOTRA et al., 1994; MALHOTRA e MEHTA, 1996; GJORV, 1994; ANQI et al., 1991).

O resultado aqui encontrado para o traço de relação água/aglomerante 0,55 com 20% de adição contradiz a corrente de que a redução na porosidade e permeabilidade prevalece ao efeito de consumir hidróxido de cálcio demais. No entanto, se neste traço, por dificuldades de mistura e moldagem, acaba-se tendo um material poroso demais, ou com aglomerações de grãos de sílica ativa que nem chegam a reagir, pode ter-se desenvolvido uma maior profundidade carbonatada, ou pelo menos uma região com um pH inferior a 8,3.

Estes resultados só permitem concluir que para argamassas com relações água/aglomerante mais altas, 20% de teor de adição de sílica ativa não é aconselhável do ponto de vista da carbonatação que podem desenvolver.

As magnitudes dos valores obtidos para as demais profundidades carbonatadas condizem com valores recomendados para concretos e argamassas para reparos. PERKINS (1986) considera que um material apresenta bom desempenho frente à carbonatação se em 5 anos não apresentar profundidades maiores do que de 5 a 10 mm. Aos dois anos, para os traços com relação água/aglomerante 0,35 e 0,55 com 0, 5 e 10%, as profundidades obtidas não foram maiores do que 4 mm. Considerando que a evolução do fenômeno é decrescente com o passar do tempo, acredita-se que as argamassas atendam estes limites após mais 3 anos.



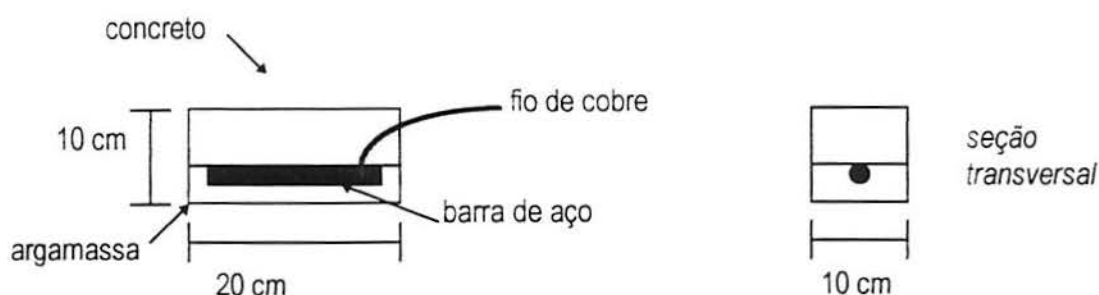
### 3.4.2 Corrosão acelerada por cloretos

O ensaio de corrosão acelerada por cloretos foi realizado buscando-se uma avaliação comparativa das argamassas como material que recobre armaduras e as protege dos mecanismos que desencadeiam a corrosão. O ensaio seguiu os princípios da ASTM C 1202 (ASTM, 1991), sendo que os corpos de prova e os procedimentos do ensaio foram modificados para possibilitarem a avaliação da situação de um reparo, ou seja, foram compostos por parte de concreto, sobre a qual foram depositadas as barras de aço, e foram completados então com as argamassas em estudo. CAMPAGNOLO et al. (1997) vêm realizando este ensaio em seus estudos no LEME - Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A seguir descreve-se todas as etapas e resultados do ensaio.

#### 3.4.2.1 Corpos de prova

Neste ensaio foram avaliados os traços de argamassa com relação a/c 0.55, com 0, 5 e 10% de sílica ativa e a/c 0,35 com 0, 5 e 10% de sílica ativa, além do concreto base. Foram preparados 18 corpos de prova mistos de concreto e argamassa, sendo destinados três exemplares para cada um dos seis traços de argamassas avaliados, e mais 3 corpos de prova testemunhos inteiramente de concreto. Os traços com 20% de adição não foram estudados em virtude do baixo desempenho atingido em certas propriedades analisadas, como por exemplo a resistência de aderência ao cisalhamento com compressão e carbonatação. Além disso, teores acima de 15 a 20% em geral não são recomendados em todas as referências sobre o uso de adições de sílica ativa (MONTEIRO, 1993).

Na Figura 3.22 apresenta-se croqui esquemático dos corpos de prova adaptados para este ensaio.



**Figura 3.22** Dimensões e características dos corpos de prova e esquema final da situação ensaiada - ensaio de corrosão acelerada.

### 3.4.2.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram os seguintes:

a) Barras: foram utilizadas barras de aço para construção tipo CA 50, no diâmetro de 12,5mm. Possuíam comprimento de 15 cm;

b) Condutores: foram utilizados fios de cobre como condutores da corrente elétrica. A porção de fio que conectava-se às barras era composta por 12 cm de fio de cobre desencapado, fortemente enrolado a um dos extremos das barras, para proporcionar o devido contato elétrico. Por ser o cobre menos eletronegativo do que o aço, isto poderia ocasionar corrosão localizada nesta região de contato com a barra. Porém, como todos os corpos de prova foram preparados de maneira semelhante, e o ensaio foi conduzido de forma comparativa, este interveniente no fenômeno da corrosão das barras ficou disperso nos resultados que foram considerados.

c) Concreto: adotou-se concreto com traço:

1: 2,28: 3,42 a/c = 0,58 - teor de argamassa de 49%

O concreto foi preparado com os mesmos materiais utilizados nas argamassas (cimento Portland CPV-ARI, areia média do Rio Guaíba) e brita basáltica  $\varnothing$  máx. 19 mm. A mistura foi em betoneira de eixo inclinado, em duas etapas. O abatimento médio obtido foi de 15 cm. Sua resistência à compressão aos 28 dias apresentou o seguinte valor médio: 18,78 MPa, sendo o desvio padrão entre quatro corpos de prova de 1,99 MPa, coeficiente de variação de 10,58%;

d) Argamassa: os traços ensaiados foram os seguintes, dentro dos oito traços em estudo neste trabalho:

1: 3 a/c 0,55 com 0% sa	1: 1,8 a/c 0,35 com 0% sa
1: 3 a/c 0,55 com 5% sa	1: 1,7 a/c 0,35 com 5% sa
1: 3 a/c 0,55 com 10% sa	1: 1,7 a/c 0,35 com 10% sa

### 3.4.2.3 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova prismáticos do ensaio foram inicialmente concretados até pouco mais da metade de sua altura, à exceção dos testemunhos, para posteriormente serem apicoados superficialmente, receberem a barra de aço e o cobrimento de argamassa. O fio de cobre que se conectaria à barra foi disposto nesta etapa de forma a penetrar pela lateral do corpo de prova e sair na face superior, num ponto próximo onde se localizaria um dos extremos da barra.

Os corpos de prova testemunhos de concreto foram concretados inteiramente com concreto, sendo que as barras foram dispostas a 2 cm das faces dos corpos de prova, para terem o mesmo cobrimento que nos corpos de prova mistos. Todos os procedimentos de limpeza e preparação das barras que foram adotados nos corpos de prova mistos foram já executados nos testemunhos, cuja descrição é feita mais adiante.

Após 24 horas da concretagem, quando foram mantidos protegidos por filme plástico, os corpos de prova foram desformados e deixados no ambiente de laboratório, até as etapas seguintes de preparação. Igualmente neste ensaio não foram adotados procedimentos de cura.



Após 8 meses da concretagem, os corpos de prova incompletos de concreto tiveram a camada superficial de uma de suas faces apicoada, a fim de criar uma superfície rugosa e com o agregado exposto para propiciar uma melhor aderência à argamassa. Este apicoamento buscou garantir condições semelhantes a um substrato numa situação real de aplicação da argamassa. Teve-se o cuidado de manter a altura do corpo de prova de forma a obter um cobrimento de 2 cm de argamassa sobre a barra, que seria depositada sobre esta superfície de concreto.

Todas as barras possuíam as mesmas dimensões e tiveram sua massa inicial registrada, após serem limpas com escova de cerdas de nylon. O fio de cobre desencapado, com comprimento de 12 cm, era fortemente enrolado junto a uma das extremidades da barra, deixando-a conectada eletricamente e mantendo-a fixa junto à superfície do concreto. Alguns destes fios, que estavam incorporados no concreto, foram acidentalmente rompidos durante o apicoamento da superfície, e tiveram que ser emendados. Algumas barras apresentavam maior oxidação na sua superfície que as demais, e sua colocação foi distribuída aleatoriamente nos corpos de prova de diferentes traços. Infelizmente, foram perdidos os pesos iniciais das barras colocadas nos corpos de prova testemunhos de concreto, o que inviabilizou a interpretação dos resultados do ensaio em termos da perda de massa para estes corpos de prova.

Antes de receber o cobrimento de argamassa, a superfície dos corpos de prova com as barras era limpa com escova, para remoção de pó e partículas soltas. Na ocasião da aplicação da argamassa a superfície de concreto era previamente umedecida alguns minutos antes, mas sem molhar a barra. Os corpos de prova eram então recolocados nas formas para receber o preenchimento final com as argamassas em estudo.

As argamassas foram misturadas manualmente pelo pedreiro, seguindo as proporções dos traços em estudo. A aplicação da argamassa era manual também, com colher de pedreiro, sendo que procurou-se lançar a argamassa sobre a superfície, como se estivesse fazendo um revestimento. Após atingir o volume total do corpo de prova, alisava-se a superfície com colher e desempenadeira de madeira para dar o acabamento da superfície. Estes procedimentos foram adotados para reproduzirem as condições de uma obra corrente.

Os corpos de prova mistos eram então deixados em ambiente de laboratório, sendo que nas primeiras 24 horas foram protegidos por filme plástico para não sofrerem evaporação excessiva. Após 24 horas, eram desformados e deixados ao ar no laboratório, sem procedimentos de cura, até o momento do ensaio.

#### **3.4.2.4 Ensaio de corrosão acelerada por cloretos e diferença de potencial**

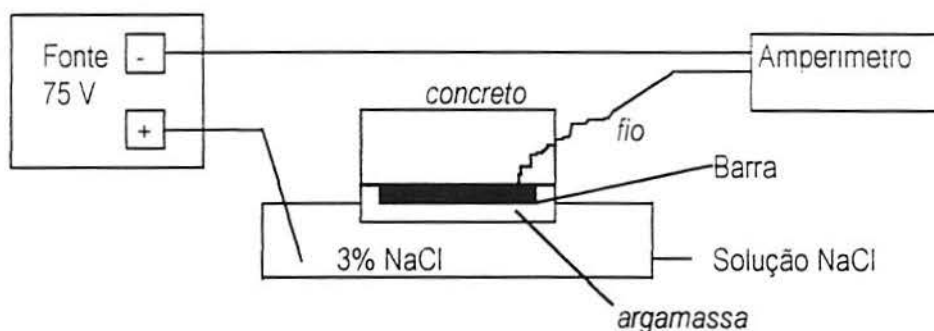
Resumidamente, este ensaio consistiu em colocar a face com cobrimento de argamassa do corpo de prova em contato com uma solução de água e cloreto de sódio a 3%, e aplicar uma diferença de potencial entre a solução e a barra mergulhada na argamassa (ou concreto), de maneira a criar uma pilha eletroquímica que leve à movimentação de íons agressivos ao aço. Este procedimento é uma adaptação da ASTM C 1202 - *Test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration* (ASTM, 1992), seguindo-se seus princípios de acelerar a movimentação dos íons cloreto através do material em estudo pela imposição de um campo elétrico (KULAKOWSKI, 1994). No presente ensaio investiga-se a difusão dos cloretos pelo cobrimento de argamassa ou concreto, através da corrosão que é desencadeada nas barras, pela ação dos cloretos que chegam até elas, e pela

corrente, que relaciona-se com a maior ou menor movimentação dos ions cloretos pela argamassa ou concreto. Parte-se do pressuposto que a carga total que passa durante o ensaio, pelo cobrimento de argamassa ou concreto, relaciona-se com quantidade de ions cloretos que penetraram no material (KULAKOWSKI (1994), citando WITHING (1981)). Mesmo com as ressalvas e criticas existentes com relação a este ensaio, já levantadas e discutidas por KULAKOWSKI (1994), principalmente quanto à elevada tensão que se aplica (60 volts ou mais, no caso do ensaio aqui realizado), julgou-se adequada a realização deste ensaio dentro do escopo da pesquisa realizada. Os trabalhos que vêm sendo desenvolvidos por CAMPAGNOLO et al. (1997) seguem exatamente os procedimentos realizados neste trabalho, sendo que o histórico de resultados obtidos por eles atestam a validade e praticidade do ensaio.

O ensaio simula um processo de corrosão eletroquímica de armaduras, desencadeada por ions cloreto, e seus resultados foram interpretados somente em termos comparativos, sem avaliar-se quantitativamente os valores de carga e corrente passantes. As perdas de massa ocasionadas pela geração de produtos de corrosão são interpretadas também em termos comparativos.

Assim sendo, os corpos de prova a serem ensaiados foram colocados dentro de um recipiente plástico, com a face de argamassa voltada para baixo, onde era despejada uma solução de água e cloreto de sódio (sal de cozinha) a 35 g/l. Esta concentração é semelhante à encontrada na água do mar em nossa costa. A profundidade submersa do corpo de prova era da ordem de 2 cm, sem que este nível de solução tocasse na interface argamassa/concreto do corpo de prova.

O fio que se conectava à barra de aço mergulhada no corpo de prova foi ligado a uma fonte elétrica de corrente contínua, a uma tensão de 75 volts, e o outro pólo da fonte foi posto em contato com a solução, através de um fio de cobre com parte de sua extremidade desencapada. A disposição dos corpos de prova e ligações é apresentada esquematicamente na Figura 3.23.



**Figura 3.23** Esquema das ligações e condições do ensaio de corrosão acelerada.

Este sistema foi mantido em ação durante 8 horas, sendo que a cada hora foram medidas as intensidades de corrente que passavam pelos corpos de prova e a tensão da fonte. Ao longo deste período foram observados sinais físicos nos corpos de prova, como fissuras, produtos de corrosão, manchas, etc.

Ao final do ensaio o corpo de prova foi rompido de forma a possibilitar a retirada da barra de aço e visualizar os caminhos dos produtos de corrosão formados. As barras de aço passavam então por processo de limpeza, segundo ASTM G1 (ASTM, 1990), que constituía em deixá-las de repouso numa



solução de tetramina hexametileno, ácido clorídrico e água destilada, durante 45 minutos. A seguir foram lavadas em água corrente com o auxílio de uma escova de nylon, para remover incrustações remanescentes. Após a secagem em estufa, as barras foram pesadas, para fins de determinação da perda de massa ocorrida pela formação de produtos de corrosão. Mesmo que este processo de limpeza muitas vezes não remova totalmente os produtos de corrosão formados, como no interior dos pites, considerou-se o mesmo adequado para determinar as perdas ocorridas nesta investigação, pois os resultados foram interpretados comparativamente entre si.

O ensaio foi realizado em três baterias, devido às capacidades dos equipamentos disponíveis. A idade das argamassa na data do ensaio era de 3 meses, e o concreto 9 meses.

### 3.4.2.5 Resultados do ensaio de corrosão acelerada

Como resultados do ensaio considerou-se as medições da intensidade de corrente ao longo do período de ensaio, para fins de cálculo da carga total passante, e as massas finais das barras, para cálculo das perdas de massa ocorridas. São apresentadas na Tabela 3.17 as medições da corrente registradas durante o ensaio.

**Tabela 3.17** Resultados do ensaio de corrosão acelerada por cloretos e diferença de potencial.

Traço	C.P.	Intensidade de corrente, em ampères (A)								
		inic.	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h
1: 1,8	1	0,18	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09
a/c 0,35	2	0,18	0,16	0,14	0,11	0,10	0,11	0,12	0,11	0,09
0% sa	3	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
1: 1,7	1	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10
a/c 0,35	2	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
5% sa	3	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
1: 1,7	1	0,03	0,10	0,15	0,18	0,20	0,20	0,18	0,17	0,19
a/c 0,35	2	0,03	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,16	0,14	0,14
10% sa	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1: 3	1	0,21	0,60	0,72	0,87	1,00*	1,36	1,29	1,38	1,49
a/c 0,55	2	0,20	0,46	0,52	0,65	0,83	0,90	0,98*	0,95	1,10
0% sa	3	0,24	0,69	0,80	1,17	1,51*	1,71	1,89	1,82	2,19
1: 3	1	0,07	0,16	0,18	0,24	0,25	0,31	0,35	0,40	0,44
a/c 0,55	2	0,08	0,11	0,14	0,24	0,27	0,33	0,35	0,38	0,39
5% sa	3	0,08	0,22	0,25	0,30	0,31	0,34	0,35	0,35	0,39
1: 3	1	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,11	0,14	0,18
a/c 0,55	2	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12	0,14	0,17
10% sa	3	0,04	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09
testemun.	1	0,03	0,31	0,53	0,97	1,29	1,28	1,25*	1,04	0,96
concreto	2	0,70	0,91	0,98	1,14	1,45	0,68	0,71	0,81	0,96
	3	0,03	0,19	0,27	0,72	0,85	1,13	1,11*	1,02	1,31

\* Constatada fissura na argamassa ou concreto nesta medição, com expulsão de produtos de corrosão.

Na Figura 3.24 apresenta-se o estado dos corpos de prova após o ensaio.



**Figura 3.24** Estado dos corpos de prova após o ensaio de corrosão acelerada.

São mostrados um dos corpos de prova testemunho de concreto, um dos mistos com argamassa sem sílica ativa e a/c 0.55 e um dos com 5% de sílica ativa e a/c 0.55. Na indicação dos corpos de prova leia-se **ms** como sílica ativa.

As perdas de massa ocorridas nas barras foram calculadas em termos percentuais com relação às massas iniciais. Na Tabela 3.18 são apresentadas as perdas de massa calculadas, com as respectivas médias e variabilidades.

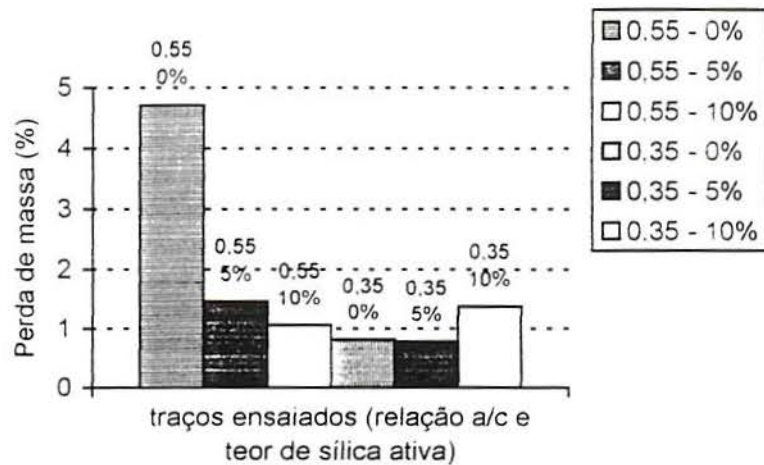
**Tabela 3.18** Perdas de massa ocorridas nos corpos de prova ensaiados.

Traço	Perdas de massa relativas, em %					
	CP 1	CP 2	CP 3	Média	Desvio	C.V. %
a/c 0.35 0% sa	0.70	1.07*	0.70	<b>0.82</b>	0.214	25.95
a/c 0.35 5% sa	0.70	0.94*	0.70	<b>0.78</b>	0.139	17.76
a/c 0.35 10% sa	1.36	1.40*	-	<b>1.38</b>	0.028	2.05
a/c 0.55 0% sa	4.53	3.96	5.63	<b>4.71</b>	0.849	18.04
a/c 0.55 5% sa	1.41	1.27	1.72	<b>1.47</b>	0.230	15.70
a/c 0.55 10% sa	1.08*	1.02	1.07*	<b>1.06</b>	0.032	3.04

Obs.: Como já mencionado anteriormente, não foram calculadas as perdas de massa das barras dos corpos de prova testemunhos de concreto, por terem sido perdidos as massas iniciais das mesmas. O \* indica os corpos de prova cuja barra estava um pouco mais oxidada originalmente. Mesmo que estas perdas de massa possam estar ligeiramente aumentadas devido a isso, observa-se que seus valores não diferem em muito das demais observações nos traços.

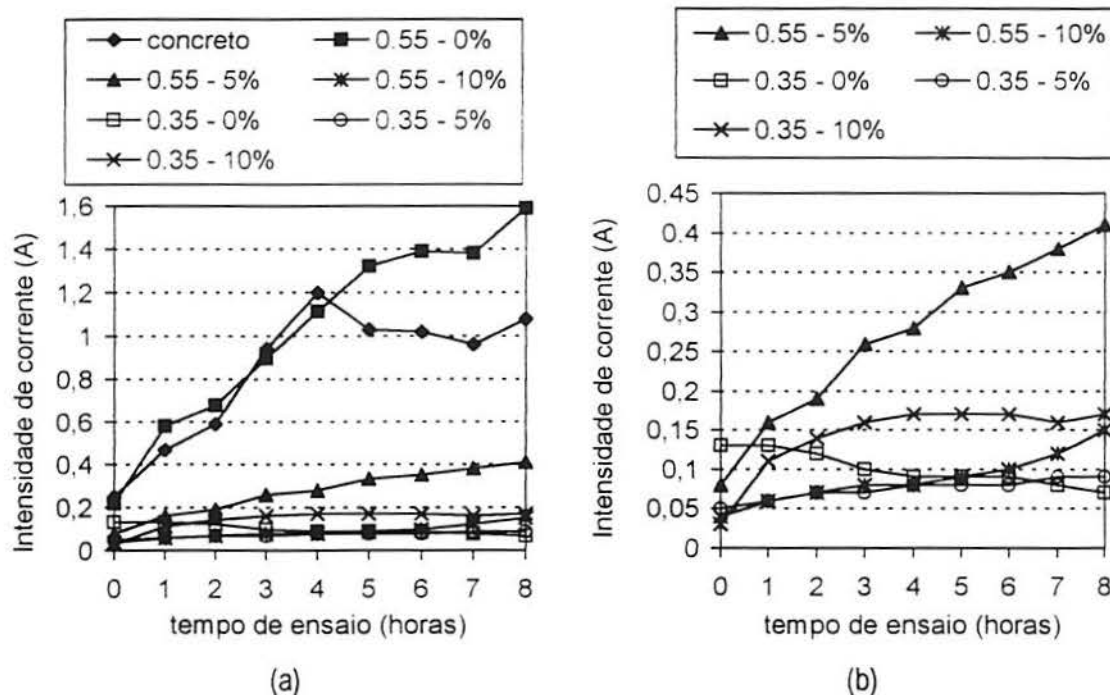
A Figura 3.25 apresenta as perdas de massa na forma de um gráfico.





**Figura 3.25** Perda de massa, segundo os traços estudados. Somente corpos de prova mistos, com argamassa.

A partir do traçado da curva Intensidade de corrente versus tempo, calculou-se a carga total que atravessou o corpo de prova durante o ensaio, em Coulombs, pelo produto da corrente pelo tempo, ao longo do período de ensaio (área sob a curva). A Figura 3.26 apresenta os gráficos Intensidade de corrente versus tempo, para a média das medições efetuadas com cada traço, sendo que um deles apresenta todos os traços ensaiados, inclusive o testemunho de concreto, e outro apresenta apenas os com mais baixas intensidades de corrente, em escala ampliada.



**Figura 3.26** Intensidade de corrente versus tempo.

(a) apresenta todos os traços, inclusive o testemunho de concreto. (b) apresenta somente os traços com menores intensidades de corrente, em escala ampliada (região inferior de (a)).

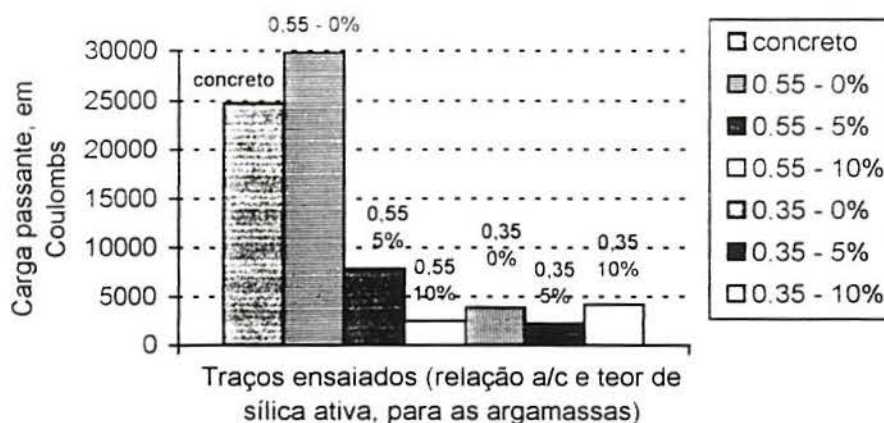
As cargas passantes calculadas são apresentadas na Tabela 3.19, com as respectivas médias e variabilidades.

**Tabela 3.19** Carga total passante durante o ensaio de corrosão acelerada.

Traço	Carga total passante, em Coulombs		
	CP1	CP2	CP3
concreto	25794	27036	21456
	média= <b>24762</b> s= 2929,7 C.V.= 11,83%		
a/c 0,55 0% sa	29052	21384	38898
	média= <b>29778</b> s= 8779,5 C.V.= 29,48%		
a/c 0,55 5% sa	7722	7398	8478
	média= <b>7866</b> s= 554,2 C.V.=7,05%		
a/c 0,55 10% sa	2682	2790	1926
	média= <b>2466</b> s= 470,8 C.V. 19,09%		
a/c 0,35 0% sa	4122	3546	1062*
	média= <b>3834</b> s= 407,3 C.V.=10,62%		
a/c 0,35 5% sa	2286	2106	2250
	média= <b>2214</b> s= 95,2 C.V.= 4,30%		
a/c 0,35 10% sa	4644	3654	-
	média= <b>4149</b> s= 700,0 C.V.= 16,87%		

Obs.: \* valor desconsiderado na média por ser espúrio, mas considerado na análise estatística. s: desvio-padrão, C.V.: coeficiente de variação.

A Figura 3.27 apresenta as médias das cargas passantes na forma de gráfico, segundo os traços estudados.



**Figura 3.27** Carga total passante, segundo os traços estudados.

### 3.4.2.6 Análise dos resultados

Para fins de interpretação dos resultados do ensaio, procedeu-se ao tratamento estatístico das perdas de massa e das cargas passantes obtidas, em função das variáveis que caracterizavam as soluções ensaiadas. Em ambos os casos considerou-se como variáveis as características dos traços de



argamassa, quanto à relação água/aglomerante e teor de adição de sílica ativa. Na análise das perdas de massa avaliou-se somente os resultados existentes para as argamassas, buscando-se identificar quais características dos traços das argamassas influenciaram ou não os resultados. Na análise da corrente e carga passante buscou-se também identificar características dos traços de argamassa que influenciaram os resultados, mas levou-se em consideração também o desempenho do testemunho de concreto, em comparação com o desempenho das argamassas.

#### 3.4.2.6.1 Análise das perdas de massa

Procedeu-se a uma análise estatística de variância (ANOVA) das perdas de massa ocorridas conforme as soluções ensaiadas, considerando somente os resultados para os corpos de prova mistos.

Para esta análise, considerou-se como variáveis independentes do experimento as duas relações água/aglomerante e os três teores de adição de sílica ativa dos traços estudados. As variáveis independentes foram consideradas como efeitos sobre a variável dependente, perda de massa. Analisou-se também a interação dos efeitos.

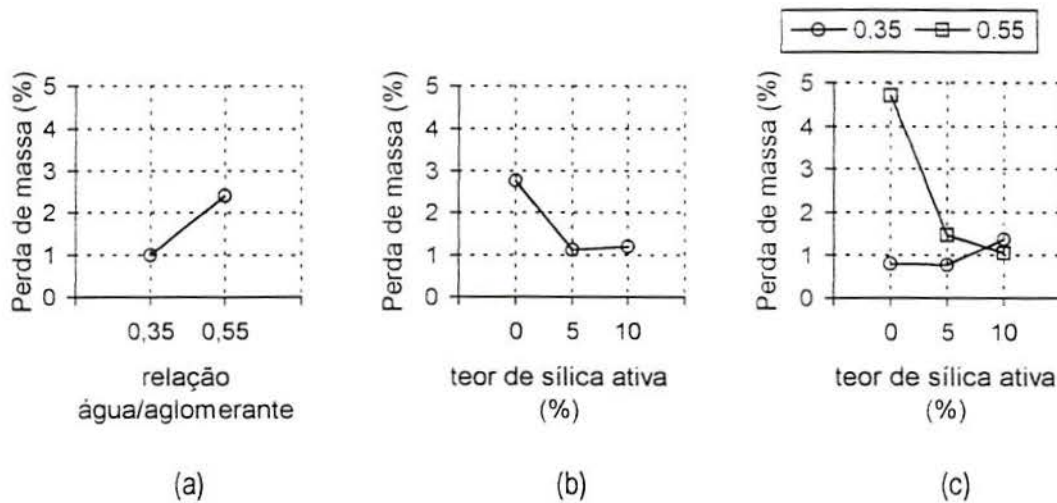
A Tabela 3.20 apresenta os resultados da ANOVA, que resume os efeitos das variáveis consideradas e sua significância sobre a variável dependente.

**Tabela 3.20** Resultados da ANOVA para as perdas de massa por corrosão acelerada.

Variável	GDL	MQ	$F_{calc}$	$F_{0,05}^*$	Significância
a/c	1	8.323466	54.50322	4.84	<b>significativo</b>
sa	2	4.945748	32.38544	3.98	<b>significativo</b>
a/c + sa	2	6.747748	44.18519	3.98	<b>significativo</b>
Erro	11	0.152715	-	-	-

\* F tabelado para o nível de significância de 5%.  $F(n_i, n_e)$ , sendo  $n_i$  = número de graus de liberdade do efeito e  $n_e$  = número de graus de liberdade do erro.

A Figura 3.28 apresenta o desempenho das argamassas em termos das perdas de massa sofridas, segundo as variáveis que se revelaram significativas na determinação das mesmas.



**Figura 3.28** Perdas de massa (%) sofridas pelas barras de armadura, segundo os níveis das variáveis dos traços das argamassas de cobrimento, que se revelaram significativas.

(a) apresenta a variação das perdas de massa sofridas segundo a relação água/aglomerante dos traços, (b) segundo o teor de sílica ativa dos traços e (c) apresenta as perdas de massa segundo a interação entre o teor de sílica ativa e as duas relações água/aglomerante dos traços estudados.

Observa-se que as duas variáveis, relação água/aglomerante e adição de sílica ativa, foram significativas na determinação da evolução do fenômeno da corrosão, e, conseqüentemente, das perdas de massa ocorridas. E, mais, que o efeito do teor de adição em uma das relações água/aglomerante foi diferenciado do efeito na outra. Isto leva a crer que a adição de sílica ativa numa argamassa pode realmente modificar sua microestrutura, de tal forma que a torna menos permeável à penetração de agentes agressivos às armaduras. A diferença da ordem de até 5 vezes entre a perda de massa que ocorreu nos corpos de prova com a argamassa sem adição e relação água/aglomerante 0,55, um traço não muito diferente dos produzidos como revestimento nas obras correntes, com relação aos demais corpos de prova, é um indicativo muito forte do efeito benéfico da adição em argamassas, se as mesmas são destinadas a proteger armaduras.

A porosidade e permeabilidade do concreto será sempre tanto menor quanto menor for a relação água/aglomerante de seu traço (LIMA, 1989). O mesmo se verifica nas argamassas. A microestrutura de um concreto ou argamassa é definida pelo tipo de aglomerante utilizado e a quantidade de água que foi acrescentada para hidratá-los. Quanto mais água, além da necessária para hidratar o aglomerante, mais poros em excesso que se convertem em acessos para agentes agressivos às armaduras e degradantes do concreto ou argamassa.

Os traços com a/c 0,55 e 10% de adição, 0,35 com 0% e 5% apresentaram praticamente as mesmas perdas de massa. Sendo assim, pode-se concluir que uma argamassa com relação água/aglomerante de 0,55 e teor de areia da ordem de 3 pode ter características de durabilidade semelhante a de argamassas com baixas relações água/aglomerante, pela simples adição de sílica ativa. O efeito de microfiller e ação pozolânica da sílica ativa contribuíram significativamente no refinamento da microestrutura da argamassa, de tal maneira que seu desempenho perante um dos



agentes agressivos mais importante para as estruturas de concreto armado é significativamente beneficiado. A baixa porosidade e permeabilidade destes traços de argamassa confere-lhes um desempenho superior aos demais traços de argamassas.

Com 5% de adição de sílica ativa, para a relação água/aglomerante de 0,55, já se observa um melhor desempenho em barrar a evolução do fenômeno da corrosão. Talvez a quantidade de sílica ativa que reage com os produtos de hidratação do cimento ainda não seja suficiente para refinar e reduzir os poros da argamassa, de tal maneira que ela seja uma eficiente barreira contra a penetração de cloretos. Dos diversos estudos sobre o uso de adições de sílica ativa em concretos, observa-se que em geral os teores ótimos de adição variam de 8 a 12% (MONTEIRO (1993) é um deles). MALHOTRA e MEHTA (1996) destacam que para concretos com relação água/aglomerante mais alta é essencial adicionar até 10% de sílica ativa para se obter baixas permeabilidades aos cloretos. Para concretos, 5% de adição pode ser, às vezes, insuficiente para incrementar suas propriedades de tal forma que compense seu uso.

A argamassa com 10% de adição e relação água/aglomerante 0,35 apresentou perdas de massa mais elevadas que os traços com 0% e 5%, contrariando o resultado decrescente das perdas de massa conforme se aumentou o teor de adição, para os traços de relação água/aglomerante mais alta. Isto contraria também uma tendência que as argamassas apresentam ao se avaliar sua permeabilidade a cloretos, feita por KULAKOWSKI (1994). Nos seus resultados, mesmo para relações água/aglomerante mais baixas, a penetração de cloretos foi decrescente com o aumento do teor de adição de sílica ativa. A explicação para o resultado aqui encontrado é de que fatores de produção dos corpos de prova possam ter influenciado os resultados. As argamassas com relação água/aglomerante mais baixa possuem elevado consumo de cimento e apresentam-se muito coesas, à medida em que se adiciona a sílica ativa. Desta forma, à semelhança do que se observou no ensaio de compressão-cisalhamento à junta inclinada (seção 3.3.3.1), nos traços com 20% de sílica ativa, a coesão da argamassa pode ter prejudicado a ligação com o concreto, criando um caminho preferencial para os íons penetrarem e atacarem as armaduras. Como as laterais dos corpos de prova não foram isoladas, pelas juntas entre o concreto e a argamassa pode ter ocorrido uma maior penetração e difusão dos íons cloreto. Mesmo considerando que todos os corpos de prova possuíam esta junta, e a solução salina molhava apenas a camada abaixo da junta, pode ter ocorrido tal efeito. No manuseio das argamassas e no ensaio de compressão-cisalhamento observou-se que os traços com 20% de adição e 0,35 de relação água/aglomerante se apresentaram muito coesos e prejudicaram o desenvolvimento de uma boa aderência ao serem lançados sobre superfícies de concreto.

#### **3.4.2.6.2** Análise da corrente e carga passante

Considerando-se que a evolução da intensidade da corrente durante o ensaio relaciona-se com a evolução da penetração e difusão dos íons cloreto pelo material de revestimento das barras, pode-se efetuar uma análise qualitativa do desempenho dos materiais de revestimento a partir do traçado das curvas Intensidade de corrente com o tempo. Esta análise pode ser complementada analisando-se o somatório dos produtos corrente versus tempo, ao longo do período de ensaio, que resulta na carga total passante, um dado preciso, passível de análise quantitativa.

Como já foi dito, pelas condições em que o ensaio foi realizado, os resultados de carga passante não foram relacionados com os valores tabelados na ASTM C1202 (ASTM, 1992), que



estabelecem maior ou menor permeabilidade a cloretos conforme a carga passante, pois não se seguiu absolutamente os procedimentos do ensaio. Mas se avaliou os valores de carga passante entre si, buscando-se identificar que variáveis dos traços de argamassa influenciaram este aspecto, e como o testemunho de concreto comportou-se em comparação com os corpos de prova com as argamassas.

Na Figura 3.26 já apresentada, são ilustrados os gráficos Intensidade de corrente versus tempo para as soluções ensaiadas, sendo que cada linha representa a média dos valores medidos nos corpos de prova de cada traço empregado, inclusive da solução composta somente por concreto. Nestes gráficos pode-se perceber um comportamento bastante diferenciado para o concreto e a argamassa sem sílica ativa, na relação água/aglomerante 0,55, em relação aos demais traços de argamassa. De início, isto dá um indicativo de como deve ter sido a perda de massa nas barras mergulhadas no concreto puro, que não tiveram seus pesos iniciais registrados. A magnitude da intensidade de corrente ocorrida com os corpos de prova de concreto é muito próxima da ocorrida com a solução que empregava a argamassa sem sílica ativa na relação 0,55, e, portanto, pode-se prever que as magnitudes das perdas de massa que ocorreram nas barras dentro do concreto sejam também semelhantes às ocorridas nas barras dentro da argamassa. Esta suposição também reforça-se com o fato das demais intensidades de corrente terem uma evolução que pode ser relacionada às perdas de massa que ocorreram nos diferentes traços. Pela ordem, a segunda maior perda de massa ocorreu no traço de relação 0,55 e 5% de adição, e a terceira na relação 0,35 com 10% de adição. Nos gráficos, percebe-se que as linhas que representam a intensidade de corrente destes dois traços posicionam-se nesta mesma ordem. E os demais traços, que tiveram perdas de massa semelhantes, concentram-se numa mesma magnitude de evolução das intensidades de corrente ao longo do tempo.

Ao se avaliar estatisticamente as cargas passantes, pode-se identificar a significância das características do material de revestimento na evolução do fenômeno de movimentação dos íons.

Realizou-se uma análise comparativa de médias (NANNI e RIBEIRO, 1992) para identificar diferenças significativas entre os resultados de carga total passante das sete soluções ensaiadas. Buscou-se identificar primeiramente a existência de diferenças significativas entre as sete soluções, o que foi positivo. Após, dada a semelhança de resultados entre os testemunhos de concreto e a solução com argamassa sem sílica ativa, relação água/aglomerante 0,55, buscou-se identificar a existência de diferença significativa entre estas duas soluções. A análise revelou que os dois grupos de resultados não eram diferentes entre si, portanto, a penetração e difusão de íons cloreto através do concreto utilizado e da argamassa sem sílica ativa, relação a/c 0,55, quando interpretada em termos da carga total passante, não apresentou diferenças significativas.

Para confirmar as observações já feitas sobre a evolução da corrente ao longo do ensaio, avaliou-se a diferença entre os resultados dos testemunhos de concreto e argamassa sem sílica ativa, a/c 0,55, com relação aos resultados dos demais traços de argamassa. Esta diferença resultou positiva, ou seja, evidenciou-se um comportamento estatisticamente diferente entre o grupo de resultados para o testemunho de concreto e a argamassa sem sílica ativa, a/c 0,55, e o grupo das demais argamassas, quanto à carga que passou ao longo do ensaio realizado.

Para identificar diferenças entre os traços de argamassa que foram testados, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) dos resultados de carga passante, considerando as variáveis dos componentes dos traços.



Como variáveis independentes adotou-se as duas relações água/aglomerante e os três teores de sílica ativa, considerados como efeitos sobre a variável dependente, carga passante. Analisou-se a interação dos efeitos também.

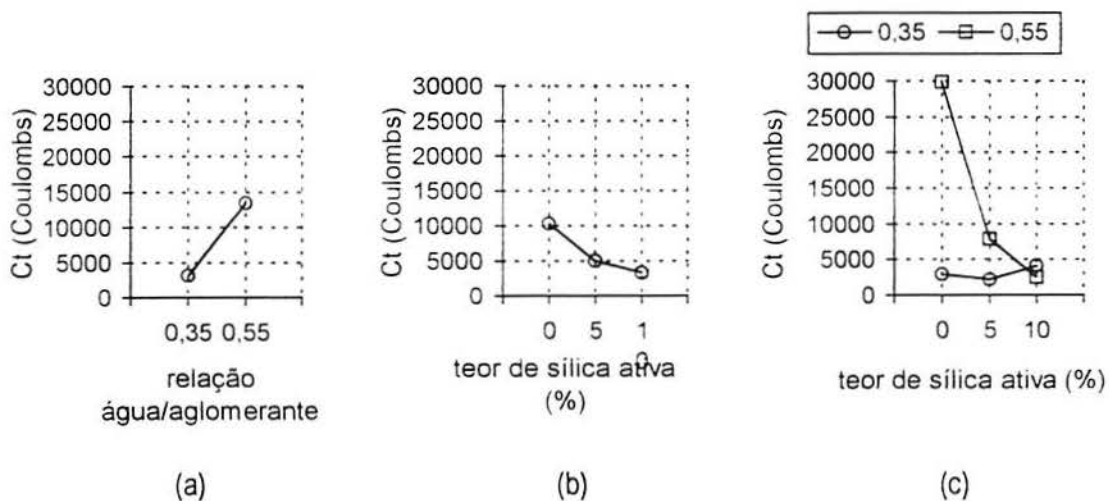
A Tabela 3.21 apresenta os resultados da ANOVA, que resume os efeitos das variáveis consideradas e sua significância sobre a variável dependente.

**Tabela 3.21** Resultados da ANOVA para a carga total passante durante o ensaio de corrosão acelerada por cloretos.

Variável	GDL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>0,05</sub> *	Significância
a/c	1	438886E3	29,98324	4,84	<b>significativo</b>
sa	2	285152E3	19,48063	3,98	<b>significativo</b>
a/c + sa	2	306774E3	20,95774	3,98	<b>significativo</b>
Erro	11	146377E2	-	-	-

\* F tabelado para o nível de significância de 5%. F(ni,ne), sendo ni= número de graus de liberdade do efeito e ne= número de graus de liberdade do erro.

A Figura 3.29 apresenta o comportamento das argamassas em termos das cargas totais passantes durante o ensaio, segundo as variáveis que se revelaram significativas na determinação das mesmas.



**Figura 3.29** Carga total passante (Ct), em Coulombs, segundo os níveis das variáveis significativas dos traços de argamassa.

(a) apresenta este resultado segundo os níveis da variável relação água/aglomerante, (b) segundo os níveis da variável teor de adição de sílica ativa e (c) apresenta a interação entre estas duas variáveis.

Uma primeira observação que pode ser feita é que os resultados para a carga passante no ensaio apresentaram o mesmo comportamento observado para as perdas de massa. A mesma

tendência de diminuição do fenômeno da corrosão, avaliada indiretamente pela carga passante relacionada à movimentação dos íons cloreto, à medida em que se reduz a relação água/aglomerante e se aumenta o teor de adição de sílica ativa, foi observada nesta análise. Repetiu-se também uma piora do desempenho para o traço com 10% de adição e relação água/aglomerante 0,35, cujas razões atribuí-se aos mesmos motivos já apresentados na seção anterior. Apenas os resultados dos traços com 5% de adição tiveram as cargas passantes um pouco superiores em relação aos com 10%, ao se considerar o efeito das adições em separado. Nas perdas de massa, o efeito isolado da adição de sílica ativa para o teor de 5% foi praticamente o mesmo para o teor de 10%.

Estes resultados indicam que as perdas de massa que uma barra pode sofrer pela corrosão desencadeada por cloretos relaciona-se diretamente com a carga passante durante o período de exposição. Neste ensaio, salvo pequenas variações, assim ocorreu. Isto reforça o fato de que em ensaios acelerados de penetração de cloretos os resultados obtidos são uma indicação direta de como se comportariam os materiais em proteger as armaduras. No presente ensaio, a carga passante durante o ensaio foi diretamente proporcional às perdas de massa sofridas pelas barras de armadura, devido ao desenvolvimento da corrosão desencadeada pelos íons de cloreto que chegaram até as barras e iniciaram o fenômeno. Mesmo com as ressalvas de que este método de ensaio não reproduz de todo as condições em que ocorre a corrosão nas estruturas, a comparação entre soluções ensaiadas e resultados obtidos permite que se cheguem a estas observações.

Sendo assim, pode-se esperar que para os testemunhos de concreto as perdas de massa tenham sido semelhantes às ocorridas nos corpos de prova com argamassa sem sílica ativa, a/c 0,55. Pode-se concluir que em relação às argamassas comuns e os concretos usualmente utilizados nas obras ( $f_{ck} < 20$  MPa, como adotado neste ensaio), as argamassas com sílica ativa ou com relação água/aglomerante da ordem de 0,35 são significativamente superiores em termos de proteção contra a corrosão de armaduras desencadeadas por cloretos. Esta observação pode ser reforçada com base em outras investigações feitas a respeito do fenômeno da corrosão e penetração de agentes agressivos, como no trabalho de KULAKOWSKI (1994), que investigou traços de argamassas semelhantes aos deste ensaio, frente à penetração de cloretos, e vários autores que destacam os benefícios das adições de sílica ativa em barrar a penetração dos cloretos no concreto (MALHOTRA e MEHTA, 1996; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; GJORV, 1994; ANQI et al., 1991). Há fortes indicativos de que adições de sílica ativa em argamassas, principalmente para relações água/aglomerante mais elevadas, contribuam significativamente na melhora de seu desempenho como material de proteção das armaduras.

### **3.5 CONCLUSÕES SOBRE A PRIMEIRA PARTE DO PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Nesta primeira parte do programa experimental pode-se identificar o comportamento de diversas propriedades das argamassas com adições de sílica ativa. Foram avaliadas tanto propriedades mecânicas como aspectos relacionados com o desempenho das mesmas frente aos agentes degradantes das estruturas de concreto armado. A partir dos ensaios realizados, pode-se destacar alguns efeitos das adições de sílica ativa nas argamassas e sua aptidão para ser utilizada em reparos.



- a) Em todas as propriedades avaliadas, que contemplaram as argamassas com as duas relações água/aglomerante, o efeito das mesmas foi significativo sobre as propriedades em estudo.
- b) Tanto a resistência à compressão como à tração das argamassas são influenciadas pela adição de sílica ativa, porém os efeitos não são uniformes. Na resistência à compressão a adição de sílica ativa pode proporcionar acréscimos de 5 a 14% em relação aos traços sem adição. Porém, se não é feita uma boa mistura das argamassas, este efeito pode ser dispersado e não produzir acréscimos significativos na propriedade. Na resistência à tração na compressão diametral, o efeito da adição de sílica ativa produziu acréscimos mais ou menos crescentes com o teor de adição, mais significativos na relação água/aglomerante 0,55 com 20% de adição. Em ambas propriedades o efeito da adição é diferenciado para as duas relações água/aglomerante.
- c) A relação entre a resistência à compressão e tração das argamassas ficou um pouco abaixo do encontrado para concretos. A relação ficou em 6,7% para os traços com relação água/aglomerante 0,35 e 7,3% para 0,55.
- d) A magnitude dos valores encontrados para a resistência à compressão e tração é adequada para argamassas a serem utilizadas em reparos de estruturas de concreto armado. Os valores mais elevados encontrados para os traços com relação água/aglomerante 0,35 podem ser excessivos se considerarmos que os concretos usuais apresentam resistências de 15 a 20 MPa.
- e) O efeito da adição de sílica ativa não foi significativo sobre a resistência de aderência ao cisalhamento com compressão. Mesmo apresentando valores compatíveis aos exigíveis para materiais destinados a pontes de aderência, os pequenos acréscimos obtidos com a adição de sílica ativa foram insignificantes em incrementar o desempenho das argamassas nesta solicitação de aderência. Os traços com 20% de adição revelaram-se demasiadamente coesos, prejudicando em muito o desempenho da aderência.
- f) A adição de 10% de sílica ativa na argamassa com relação água/aglomerante 0,55 demonstrou-se significativa em aumentar a resistência de aderência à tração sobre substratos de concreto endurecido, principalmente nas primeiras idades. Aos 21 dias de idade, não verificou-se mais diferenças significativas entre a argamassa com ou sem sílica ativa. Os valores obtidos para esta solicitação foram superiores aos especificados para revestimentos de paredes e tetos em geral.
- g) O módulo de deformação estático das argamassas foi influenciado mais pela relação agregado/aglomerante dos traços, uma vez que esta propriedade é mais fortemente regida por esta relação. Para relações agregado/aglomerante semelhantes, a adição de 5 % de sílica ativa produziu pequenos acréscimos no módulo de deformação. Os valores encontrados são adequados ao emprego como material de reparo, principalmente os relativos aos traços com relação água/aglomerante 0,55.
- h) A profundidade carbonatada que se desenvolve nas argamassas foi influenciada pela adição de sílica ativa. Até 10% de adição há um pequeno decréscimo na evolução do fenômeno, para ambas relações água/aglomerante, num período de até 24 meses. Com 20% de adição o fenômeno é intensificado na argamassa com relação 0,55 e mantém-se mais ou menos estável na de 0,35, comparando-se com os traços sem adição e com 5 e 10%. Os valores encontrados são a princípio bastante baixos e atestam o emprego das argamassas com até 10% de adição como material passivador das armaduras.
- i) O efeito da adição de sílica ativa é determinante no desempenho das argamassas frente à penetração de cloretos e passagem de corrente elétrica, num processo acelerado de corrosão de armaduras.



Principalmente para os traços com relação água/aglomerante 0,55, a adição de 10% de sílica ativa produziu uma redução da ordem de 5 vezes na perda de massa das armaduras corroídas. Para os traços de relação 0,35 o efeito da adição é pouco destacado. As cargas passantes durante o ensaio acelerado relacionaram-se diretamente com as perdas de massa ocorridas, confirmando novamente o melhor desempenho da argamassa com 10% de adição e relação 0,55, que apresentou carga passante 12 vezes menor do que em relação à argamassa sem adição. O desempenho da argamassa sem sílica ativa desta mesma relação foi semelhante ao do concreto testemunho, que possuía traço semelhante aos dos concretos usuais.

Com base nestes resultados pode-se selecionar alguns traços que concentram o melhor desempenho geral nas propriedades avaliadas. Estes traços selecionados, ao se levar em conta considerações práticas de aplicação e custo, podem ser reduzidos a um ou dois traços ótimos.

Em primeiro lugar, as argamassas com relação água/aglomerante 0,35 demonstraram um bom desempenho em todas as propriedades avaliadas, a não ser considerando-se que elevadas resistências e módulos de deformação não são desejáveis conforme a situação de emprego das mesmas. O efeito da adição de sílica ativa nestes traços nem sempre é muito destacado, algumas vezes nem se faz presente com teores de 5 e 10%. Com 20% de adição, além de se saber que, em geral, não são recomendados teores acima de 15% (MALHOTRA e MEHTA, 1996), certas propriedades são prejudicadas pela elevada coesão deste traço, o que leva a se rejeitar o mesmo para aplicação em reparos sobre superfícies de concreto endurecido.

Por questões de custo, a adição de sílica ativa talvez nem se justifique nestes traços de relação água/aglomerante 0,35, que além do mais apresentam elevado consumo de cimento ( $> 700 \text{ kg/m}^3$ ). Este aspecto, em particular, também leva à rejeição destes traços conforme a aplicação, pois o alto consumo de cimento gera um calor de hidratação muito intenso, tornando a argamassa mais suscetível à fissuração inicial pela dessecação da superfície, apesar da baixa relação água/aglomerante. Aplicações práticas que foram realizadas com estes traços demonstraram que eles tendem a fissurar nas primeiras 24 horas após a aplicação. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1993), a intensidade da retração por secagem está relacionada também ao conteúdo de cimento, pois a retração se dá pela perda da água adsorvida às partículas de C-S-H. Portanto, se um concreto ou argamassa possuir elevado teor de pasta, está sujeito a uma retração significativa mesmo que possua baixo conteúdo de água.

O mau desempenho das argamassas com 20% de adição na resistência de aderência ao cisalhamento com compressão reforça a rejeição dos traços com este teor de adição. Sendo a aderência uma propriedade importante para materiais de reparo, descarta-se a possibilidade de utilização deste teor de adição em argamassas. Além disso, conforme a primeira determinação da resistência à compressão, se não há uma mistura eficiente da argamassa este teor pode também levar a um mau desempenho nesta propriedade. Por questões de custos, este teor de adição é logicamente o mais oneroso.

Os traços com relação água/aglomerante 0,55 apresentam-se como os mais indicados para muitas situações de reparo em que as argamassas possam ser empregadas. Assemelham-se às características das argamassas convencionais de revestimento, no proporcionamento e trabalhabilidade. Pelos resultados obtidos, em muitas propriedades o teor de adição não produz acréscimos significativos no desempenho das propriedades mecânicas, principalmente. Mas o elevado desempenho dos traços



com adição de 5 e 10% nas propriedades relacionadas com a durabilidade fazem o uso das mesmas ser imprescindível em argamassas para reparos de estruturas degradadas pelos mais variados agentes.

Entre 5 e 10% de adição, não se obtém uma diferença destacável na resistência à compressão, na tração por compressão diametral e na evolução da carbonatação. Na resistência de aderência ao cisalhamento com compressão obtém-se média dos valores para o traço com 10% superior ao com 5%. O módulo de deformação é menor para o traço com 10%, pela menor relação agregado/aglomerante. Na perda de massa e carga passante pelo ensaio acelerado de corrosão, o desempenho do traço com 10% de adição é superior ao com 5%. Por estas razões, adota-se o traço com 10% de sílica ativa e relação água/aglomerante 0,55 como o que mais reúne aspectos favoráveis ao emprego em reparos de estruturas de concreto armado. Mesmo com um maior consumo de sílica ativa, este traço ainda é o que possui melhor trabalhabilidade e o teor de adição encaixa-se nos teores recomendados na literatura.

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL - PARTE 2: ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA ARGAMASSA EM SITUAÇÕES DE USO**

Neste capítulo são apresentados os ensaios que avaliaram o comportamento da argamassa com adição de sílica ativa, selecionada no capítulo anterior (item 3.5), sob condições diretamente relacionadas com as solicitações de uso da mesma. Assim, apresenta-se o ensaio de tração de barras mergulhadas na argamassa com adição, ainda em comparação com a argamassa sem adição, quando as barras estavam totalmente envoltas por argamassa ou parcialmente em contato com uma superfície de concreto endurecido. Apresenta-se também os ensaios de flexão em elementos de verdadeira grandeza, reparados com a argamassa com a adição. Estes ensaios foram conduzidos com vigas e lajes, e a técnica empregada para o reparo dos elementos consistiu em usar a argamassa como material de consolidação e revestimento de novas armaduras agregadas às peças.

Com esta parte do programa experimental buscou-se consolidar o desempenho da argamassa como material de reparo para estruturas de concreto armado, principalmente comparando-se o desempenho dos exemplares reparados (ou que simulam determinada solicitação numa peça reparada) com o de elementos íntegros, e assim obter correlações que permitam estipular o desempenho mecânico de peças reparadas.

### **4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA DE BARRAS MERGULHADAS EM CONCRETO E/OU ARGAMASSA (*PULL-OUT TEST*)**

A fim de avaliar a aderência de barras de aço à argamassa em estudo, seja isoladamente ou na situação que se propõe, como material de reparo ou reforço, realizou-se o ensaio de tração direta de barras de aço mergulhadas em corpos de prova de argamassa, de concreto e mistos, o *Pull-out Test*, conforme ASTM C234-91a (ASTM, 1991).

Este ensaio permite avaliar a resistência de aderência que o concreto ou a argamassa desenvolvem sobre um trecho limitado da superfície de uma barra de aço, podendo ser calculada a tensão de aderência na superfície de contato a cada estado de carregamento, até a ruptura da ligação. Como simula apenas uma situação de solicitação da aderência entre barras e concreto/argamassa, a tração direta, este ensaio é especialmente recomendado para estudos comparativos, onde deseja-se avaliar única e exclusivamente a resistência de aderência desenvolvida entre o aço e os materiais em questão (VIEIRA, 1995).

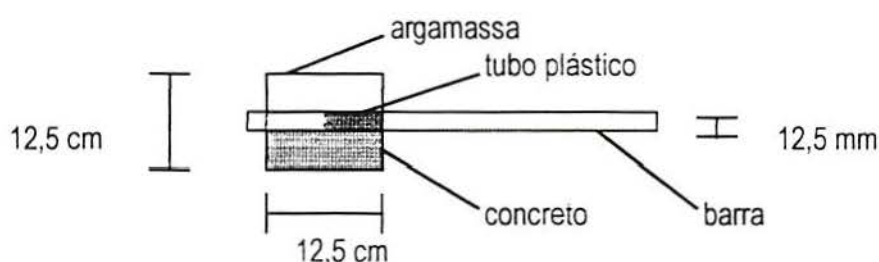
Assim sendo, com a realização deste ensaio buscou-se avaliar comparativamente a aderência de barras de aço à argamassa selecionada, com relação água/aglomerante 0,55 com 10% de sílica ativa, à argamassa de mesma relação água/aglomerante, mas sem adição, ao concreto e em uma situação mista, onde parte da barra fica mergulhada nas argamassas e parte fica apenas em contato com uma superfície de concreto endurecido e apicoado. Esta situação mista foi especialmente concebida para se simular as condições de barras de aço que são agregadas a uma estrutura existente,



no caso de um reforço, sem que se empregue qualquer adesivo ou ancoragens especiais.

#### 4.1.1 Corpos de prova elaborados

A realização do ensaio consistiu basicamente em preparar corpos de prova prismáticos de concreto e/ou argamassa, com seção transversal de 12,5 x 12,5 cm e comprimento de 10 diâmetros da barra adotada. No presente estudo, adotou-se barra de diâmetro 12,5 mm, que era posicionada no centro do corpo de prova, ficando com as extremidades projetadas para fora do mesmo. Um tubo plástico de comprimento 5 diâmetros era colocado envolvendo a barra na porção inicial do corpo de prova, para limitar a área de ancoragem a apenas a metade do comprimento do mesmo. Como o dispositivo de arrancamento apoia-se nesta face e gera esforços que interferem na aderência, é avaliada a aderência apenas na porção oposta a esta face. A Figura 4.1 apresenta um croqui do corpo de prova.



**Figura 4.1** Croqui do corpo de prova utilizado no ensaio de *pull-out*, caso dos corpos de prova mistos.

Para cada material ou situação a ser avaliada foram preparados 3 corpos de prova. Avaliou-se a resistência de aderência ao aço em corpos de prova elaborados conforme as seguintes situações:

- corpos de prova integros de argamassa com 10% de adição de sílica ativa,  $a/c$  0,55;
- corpos de prova integros de argamassa sem sílica ativa,  $a/c$  0,55;
- corpos de prova integros de concreto,  $f_{cj}$  34 MPa;
- corpos de prova mistos de concreto,  $f_{cj}$  34 MPa, e argamassa com 10% de sílica ativa ( $a/c$  0,55);
- corpos de prova mistos de concreto,  $f_{cj}$  34 MPa, e argamassa sem sílica ativa ( $a/c$  0,55).

#### 4.1.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados possuíam as mesmas características e procedências dos utilizados durante toda a pesquisa. Especificamente, foram adotados os seguintes materiais, com os respectivos

traços e resistências à compressão na data do ensaio:

**Concreto:** traço 1: 2,94: 4,1 a/c 0,61 1,5% de aditivo superplastificante.

Constituintes: areia média do Rio Guaíba, brita basáltica de diâmetro máximo 19 mm. cimento Portland CP V - ARI, aditivo superplastificante de base formaldeído naftaleno sulfonado.

Mistura em betoneira de eixo vertical, com abatimento de 4 cm (*slump*).

Resistência à compressão aos 28 dias de 38,9 MPa.

Obs.: a adoção de um concreto com tal resistência foi feita buscando-se diminuir a diferença entre o mesmo e as argamassas, do ponto de vista de resistência, que é um fator que influi na aderência às barras de aço (RIBEIRO, 1985).

**Argamassa com sílica ativa:** traço 1: 3 a/c 0,55 10% de sílica ativa

Mistura em betoneira de eixo vertical.

Resistência à compressão aos 21 dias de 48,6 MPa.

**Argamassa sem sílica ativa:** traço 1: 3 a/c 0,55

Mistura em betoneira de eixo vertical.

Resistência à compressão aos 21 dias de 38,0 MPa.

**Aço CA 50 - A,** diâmetro 12,5 mm, nervurado.

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados formas cúbicas de compensado de madeira. O tubo utilizado para isolar a primeira metade da região imersa era de PVC, com comprimento de 5 diâmetros da barra, ou seja, aproximadamente 6,25 cm. As entradas do tubo eram seladas para não permitir a entrada de concreto ou argamassa.

#### 4.1.3 Procedimento de ensaio e preparação dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova integros, tanto o concreto quanto as argamassas foram aplicados e adensados manualmente dentro das formas dos corpos de prova, sendo colocados em duas camadas, dando 20 golpes com um bastão de aço de 16 mm de diâmetro em cada uma. A superfície era alisada com desempenadeira de madeira, dando-se também leves batidas com um martelo de borracha nas laterais da forma para eliminação de bolhas. Após a moldagem os corpos de prova eram mantidos em ambiente de laboratório por 24 horas, cobertos por sacos de aninhagem molhados. Eram então desformados e colocados em câmara úmida, até a data do ensaio, sendo retirados 24 horas antes da realização do mesmo.

Os corpos de prova mistos eram preparados em duas etapas. Primeiro era moldada a metade da forma com concreto, colocado em uma única camada e adensado com 20 golpes de bastão. Após decorridos 3 dias, a superfície do concreto era apicoada, a fim de eliminar a nata de cimento superficial, sendo criado um pequeno sulco ao centro, para acomodação da barra de aço. Este procedimento foi adotado para se desenvolver melhores condições de aderência entre o concreto e a argamassa, e



também por ser um procedimento usual em obras de reforços e reparos a limpeza e apicoamento da superfície do concreto. A barra era então depositada sobre esta superfície e o corpo de prova era completado com argamassa, lançada com colher de pedreiro e regularizada da mesma maneira que os demais.

Os corpos de prova íntegros e as metades de concreto foram moldados numa única etapa, provenientes de uma mesma betonada. A idade do concreto na data do ensaio era de 28 dias. As metades de concreto começavam a ser apicoadas aos 3 dias de idade, sendo que a aplicação das argamassas se deu quando o concreto completava 7 dias de idade. Neste mesmo momento, eram moldados os corpos de prova de argamassa, sendo que a mesma argamassa preparada era utilizada para preencher os corpos de prova íntegros e as metades. Estes corpos de prova eram igualmente mantidos em laboratório por 24 horas, protegidos, para então serem desformados e colocados em câmara úmida, onde ficavam por 20 dias, para serem ensaiados no dia seguinte em conjunto com os de concreto.

O ensaio propriamente dito consistiu em aplicar incrementos crescentes de força de tração na barra, através de um macaco hidráulico, até que ocorresse o arrancamento da barra ou perda da aderência (deslizamento). Um deflectômetro analógico foi disposto na extremidade livre da barra para monitorar os escorregamentos, que são controlados. Entre o corpo de prova e o macaco hidráulico era disposta uma placa de aço de espessura 12mm e área igual à do corpo de prova, e uma chapa de couro, para distribuir os esforços por igual sobre o corpo de prova. Uma célula de carga e uma leitora digital foram colocadas junto ao macaco hidráulico, para a medição do esforço de tração que era aplicado, que constitui a variável medida do ensaio.

Estes esforços medidos a cada incremento de escorregamento que ocorria permitiram que se calculassem as tensões de aderência que se desenvolveram na superfície da barra, pela simples divisão da carga pela área lateral da mesma. Foram efetuadas medições dos esforços de tração a partir de um escorregamento de 0,01mm até o escorregamento de 5mm, sendo que no início do carregamento eram tomadas medidas mais freqüentes, pois muitas das ligações existentes entre os materiais são vencidas nesta etapa do ensaio.

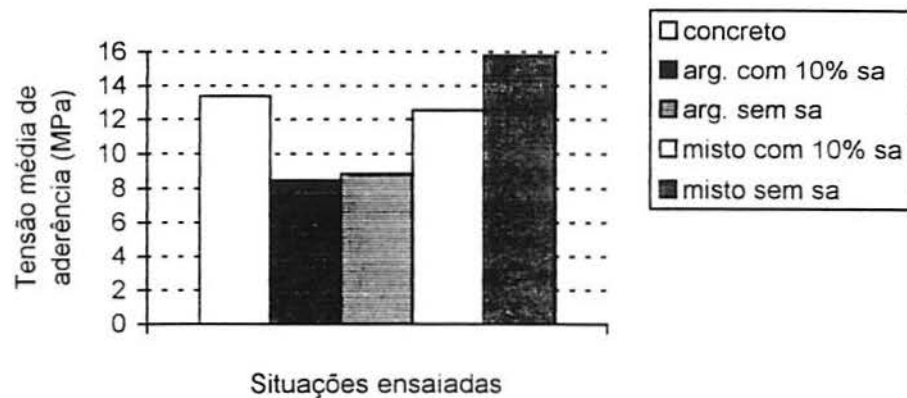
#### **4.1.4 Resultados obtidos**

Os resultados deste ensaio podem ser analisados em função das tensões médias de aderência entre a barra de aço e os materiais de cobrimento, que são calculadas como sendo as médias aritméticas das tensões de aderência nos escorregamentos pequenos (0,01 mm), nos escorregamentos de serviço (0,10 mm) e nos escorregamentos que caracterizam a ruptura da aderência (arrancamento ou tensão máxima que é alcançada) (VIEIRA, 1995). Também podem ser analisados em termos qualitativos a partir das curvas Tensão de aderência *versus* escorregamento, que identificam principalmente o tipo de ruptura que ocorreu. Na Tabela 4.1 são apresentadas as tensões médias de aderência calculadas para cada corpo de prova ensaiado, com as respectivas médias e variações.

**Tabela 4.1** Resultados do ensaio de *pull-out* - tensões médias de aderência.

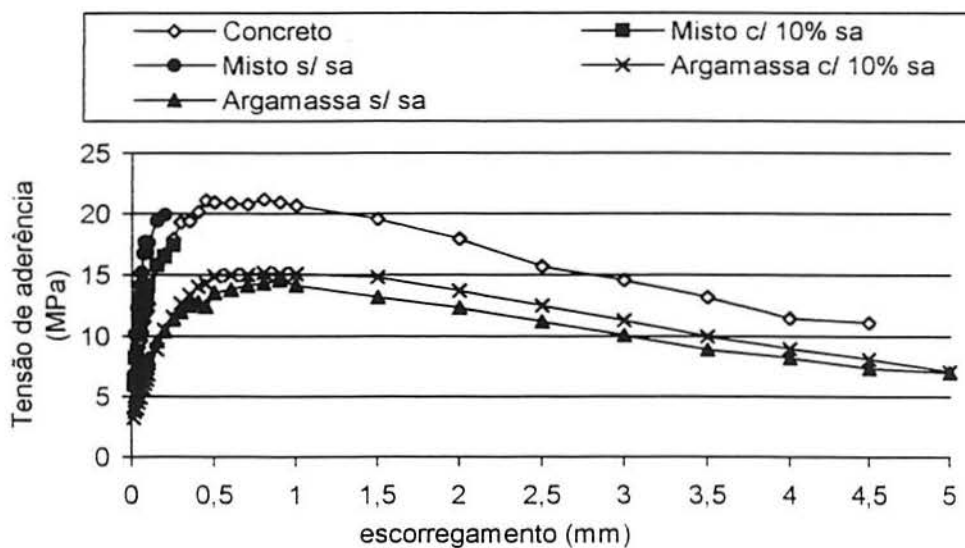
Corpo de prova	Tensões médias de aderência, em MPa					
	CP1	CP2	CP3	Média	desvio	CV (%)
Concreto integro	13.01	13.09	13.95	<b>13,35</b>	0.52	3.90
Argamassa com 10% sa	8.22	8.66	8.46	<b>8,45</b>	0.22	2.61
Misto com arg. com 10% sa	12.63	12.20	12.74	<b>12,52</b>	0.29	2.28
Argamassa sem sílica ativa	8.64	7.97	9.90	<b>8,84</b>	0.98	11.09
Misto com arg. sem sílica ativa	14.25	17.06	16.04	<b>15,78</b>	1.42	9.01

A Figura 4.2. apresenta as médias das Tensões médias de aderência na forma de um gráfico, para visualização de suas magnitudes.



**Figura 4.2** Tensão média de aderência *versus* situações ensaiadas.

A Figura 4.3 apresenta o gráfico Tensão de aderência *versus* escorregamentos, para as cinco soluções ensaiadas. Cada curva foi obtida a partir da média das três medições obtidas para cada situação.



**Figura 4.3** Tensão de aderência *versus* escorregamento, para as situações ensaiadas.



#### 4.1.5 Análise dos resultados

Os resultados deste ensaio podem ser analisados de duas maneiras: as tensões médias de aderência podem ser comparadas entre si, estatisticamente, indicando quais soluções foram mais eficientes do ponto de vista da resistência de aderência média; o traçado de curvas Tensão de aderência x escorregamentos possibilitam uma análise qualitativa do comportamento da aderência, com respeito à evolução das resistências desenvolvidas e ao tipo de ruptura que ocorre, o arrancamento brusco (fendilhamento) ou progressivo (deslizamento). Efetuou-se estas duas análises, que são apresentadas e discutidas a seguir.

##### 4.1.5.1 Análise comparativa das tensões médias de aderência

A partir dos resultados calculados em termos das tensões médias de aderência, apresentados na Tabela 4.1, realizou-se análises comparativas de médias (NANNI e RIBEIRO, 1992), entre os resultados obtidos para as diferentes situações ensaiadas. A comparação de médias foi realizada entre os resultados obtidos para os corpos de prova de argamassa, entre as argamassas e o concreto, entre o concreto e os corpos de prova mistos, e entre as duas soluções mistas, buscando-se identificar diferenças significativas entre estes grupos de resultados.

A análise permitiu verificar as seguintes relações, que podem ser justificadas por alguns fatores:

- a) não existiu diferença significativa entre o desempenho da aderência dos corpos de prova integros de argamassa, com ou sem adição de sílica ativa. Mesmo que a média das tensões médias de aderência foi um pouco diferente, não se evidenciou uma vantagem ou desvantagem da adição de sílica ativa nas argamassas, no que se refere a conferir aderência a barras de aço.
- b) a comparação entre os resultados obtidos para os corpos de prova de concreto e mistos demonstrou que não houve diferença significativa entre as tensões médias obtidas para o concreto e os corpos de prova mistos com argamassa com 10% de sílica ativa.
- c) a comparação entre as tensões obtidas para ambas situações mistas revelaram uma diferença significativa entre elas, sendo a solução mista com argamassa sem sílica ativa superior à solução com argamassa com sílica ativa. Este fato, que contraria o resultado obtido para os corpos de prova com as diferentes argamassas, que não diferem-se significativamente, pode estar associado a algum fator de moldagem e execução destes corpos de prova mistos, uma vez que as duas soluções foram preparadas em etapas distintas e sofreram intervenções durante o seu preparo, como o apicoamento da superfície do concreto e a colocação da barra. Estas intervenções possivelmente introduziram diferenças nas condições para o desenvolvimento da aderência às barras.
- d) a comparação entre os resultados do concreto e da solução mista com argamassa sem sílica ativa revelou pequena diferença entre ambos, demonstrando a superioridade novamente dos valores obtidos para a situação mista sem sílica ativa. Igualmente, acredita-se que tal fato explica-se com os aspectos relacionados à preparação dos corpos de prova, pois não é de se esperar que uma solução mista apresente desempenho superior a corpos de prova integros de concreto.

#### 4.1.5.2 Evolução da tensão de aderência x escorregamentos

A partir do gráfico Tensão de aderência *versus* escorregamento, constante na figura 4.3, é possível visualizar a evolução das tensões à medida que a barra é arrancada.

Observa-se nitidamente dois níveis de tensões de aderência. Um que se refere ao concreto e os corpos de prova mistos e outro, de menor magnitude, que refere-se aos corpos de prova de argamassa. A explicação de tal comportamento distinto se deve ao fato da aderência das barras nervuradas estar mais ligada ao encunhamento que é gerado pelo material que se deposita entre as nervuras, já ressaltado por RIBEIRO (1985) e VIEIRA (1995). No caso do concreto, a presença de agregados graúdos entre as nervuras responde por um excelente encunhamento e logo resulta numa maior resistência de aderência às barras. O que já não acontece com as argamassas, onde este encunhamento é desempenhado apenas com a própria resistência do material ao cisalhamento e tração.

A grande revelação do ensaio, no entanto, refere-se ao desempenho dos corpos de prova mistos, que apresentaram resistências muito semelhantes ao concreto, até sua ruptura. A existência de contato com a superfície rugosa e com os agregados graúdos expostos do concreto, e a consolidação proporcionada pela argamassa foram suficientes para garantir uma resistência de aderência tão elevada como se o corpo de prova fosse todo de concreto. Uma explicação mais detalhada pode ser feita considerando-se que em torno das barras mergulhadas no concreto puro pode ocorrer uma concentração de nata de cimento, pela segregação que frequentemente ocorre após a concretagem, criando uma zona mais frágil do que o restante da massa de concreto. Já nos corpos de prova mistos pode ocorrer um encunhamento direto dos agregados graúdos entre as nervuras, na face em contato com concreto, que ainda é consolidado pelo preenchimento com a argamassa.

A diferença apresentada entre os corpos de prova mistos e os de concreto referiu-se ao modo de ruptura. Enquanto os corpos de prova de concreto (e de argamassa também) foram perdendo lentamente a resistência de aderência após atingido um valor máximo, devido ao escorregamento da barra, nos corpos de prova mistos ocorreu o arrancamento súbito da barra, inclusive ocorrendo o desprendimento das partes em alguns casos. Isto também é um indicativo de que nos mistos o encunhamento funciona, mas até certo ponto.

Isto tudo demonstra que num reparo ou reforço a aderência das barras de aço que são substituídas ou adicionadas pode ser tão similar às das barras mergulhadas nas peças de concreto, porém estas estão mais sujeitas ao colapso súbito por descolamento. É claro, no entanto, que esta observação está longe de ser uma restrição, pois nas tensões de serviço o comportamento da aderência é satisfatório e está longe do risco de colapso.

#### 4.1.6 Conclusões

À semelhança de outros ensaios mecânicos realizados com as argamassas com diferentes teores de adição de sílica ativa, o efeito da adição nem sempre evidencia-se em determinadas propriedades. No particular caso da aderência de barras de aço nervuradas, a pouca importância das características da argamassa que são envolvidas na propriedade não permitiu a caracterização de uma diferença significativa entre uma argamassa com ou sem sílica ativa. O que é possível concluir com os



resultados aqui apresentados, considerando que a aderência de barras de aço é um aspecto importante em peças de concreto armado, é que o desempenho de um reparo ou reforço executado com uma argamassa pode ser eficiente quanto à consolidação de novas armaduras que são agregadas. O ensaio evidenciou ainda, em especial, a importância das atividades de preparo e execução do reparo ou reforço, que podem determinar a eficiência ou não da aderência entre barras de aço que são agregadas, a superfície de concreto endurecido e o material de recobrimento, no caso, uma argamassa com adições de sílica ativa ou não. O incremento nas características da argamassa gerado pela adição de sílica ativa não influenciou seu desempenho nas solicitações que foram avaliadas neste ensaio que foi realizado.

## 4.2 ENSAIO DE FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Vigas de concreto armado são elementos das estruturas que frequentemente são atingidos por patologias, e com certa frequência necessitam de reforços, quer por terem recebido sobrecargas ou por ser necessário incrementar suas capacidades. Sendo assim, as eventuais intervenções quase sempre envolvem a agregação de novas armaduras na face inferior das mesmas, para aumentar sua resistência à tração na flexão, quando também podem envolver incremento de seção ou armaduras na zona de compressão ou armadura transversal. Por estas razões, e, considerando que a argamassa com adição de sílica ativa pode adequar-se muito bem à aplicação como cobrimento de armaduras que são depositadas sobre um peça já existente, elegeu-se o caso de reforço de vigas de concreto armado como um dos casos em que a argamassa pode ser um boa alternativa como técnica de reforço ou reparo.

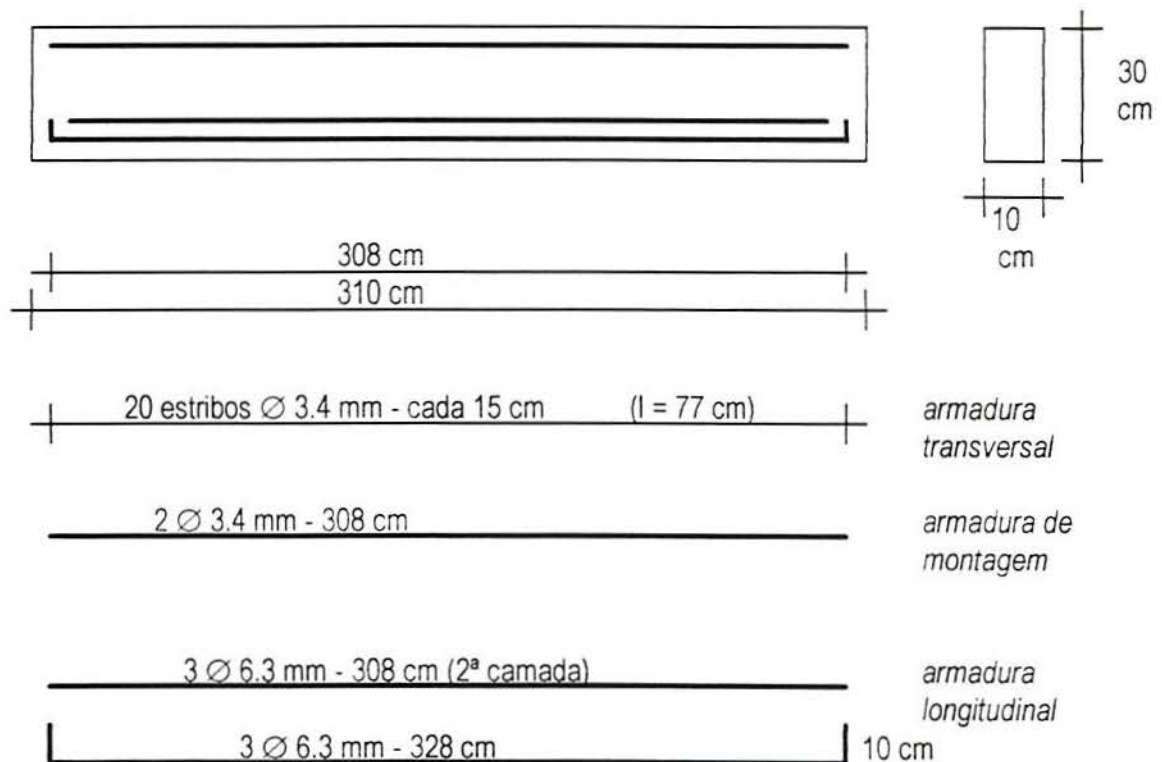
Como já foi mencionado, o estudo de propriedades isoladas muitas vezes pouco pode revelar sobre o comportamento de um material em serviço. No caso de uma viga de concreto armado, por exemplo, têm-se uma série de solicitações atuando em diferentes intensidades nas várias porções do elemento. Têm-se zonas submetidas à compressão, pura ou não, à tração, ao cisalhamento. Junto às armaduras existem as solicitações de aderência, e uma série de combinações entre estes esforços. Por isso, considerou-se que a avaliação de elementos estruturais reforçados com a técnica proposta, elaborados em condições e características idênticas às de elementos em uso, seria um estudo muito valioso no que tange a verificar sua eficiência enquanto solução para serviços desta natureza.

Assim sendo, o ensaio de flexão de vigas de concreto armado foi concebido para se verificar o comportamento em uso de peças reforçadas com novas armaduras e com cobrimento de argamassa com sílica ativa aplicado manualmente, em comparação com o comportamento de peças íntegras de concreto armado de igual capacidade. O carregamento à flexão pura foi adotado para se restringir a complexidade de solicitações que podem ocorrer em tais elementos, facilitando a obtenção e análise de resultados, e por ser o carregamento ao qual as vigas de concreto armado foram em princípio concebidas para resistir. Nesta seção apresenta-se o ensaio que foi realizado, com a descrição dos elementos estruturais ensaiados, os materiais e procedimentos de execução adotados, a metodologia de ensaio e os resultados obtidos.

#### 4.2.1 Modelos estruturais

Considerando a infra-estrutura disponível para a realização dos ensaios, adotou-se para os modelos estruturais as maiores dimensões possíveis, visando aproximar das dimensões reais de vigas de concreto armado. Buscou-se obter modelos em verdadeira grandeza, menos sujeitos a fatores que possam interferir nos resultados da análise.

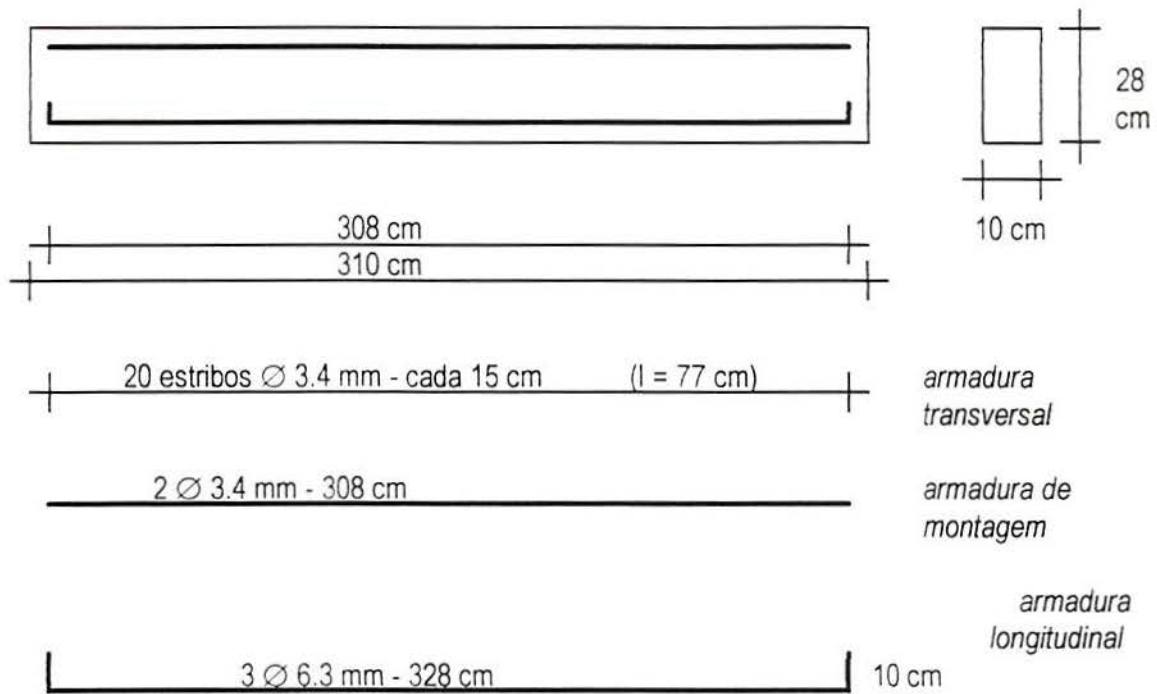
Os modelos estruturais foram projetados com as dimensões 10 x 30 x 310 cm. Estas dimensões referem-se às dimensões finais das peças, considerando que se terão vigas ditas testemunhos, compostas integralmente de concreto, e vigas reforçadas, que são compostas de concreto e uma parte da argamassa em estudo, referente ao reforço. A figura 4.4 apresenta o desenho esquemático das vigas testemunhos, a disposição das armaduras longitudinais e corte transversal.



**Figura 4.4** Representação esquemática das vigas testemunho - seção longitudinal e transversal, armaduras longitudinal e transversal.

As vigas a serem reforçadas foram concretadas inicialmente com altura de 28cm e com apenas uma camada de três barras de 6,3mm como armadura longitudinal de tração. A figura 4.5 apresenta o desenho esquemático das vigas. Estas vigas foram posteriormente submetidas à execução do reforço.





**Figura 4.5** Representação esquemática das vigas a serem reforçadas - seção longitudinal e transversal, armaduras longitudinal e transversal.

#### 4.2.1.1 Concepções de reforços e baterias de ensaios

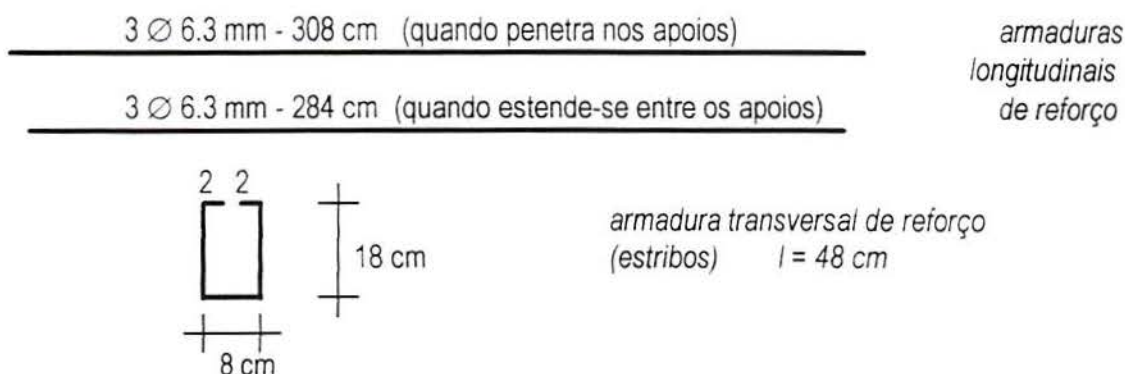
A fim de avaliar diferentes condições de execução de um reforço, neste estudo considerou-se três situações de fixação da armadura adicional, composta por três barras de diâmetro 6,3mm:

**(R1)** a armadura longitudinal é depositada sobre os estribos existentes e penetra na região onde irão os apoios, e é amarrada à armadura existente (estribos) com arame recozido.

**(R2)** a armadura longitudinal é depositada sobre os estribos existentes, penetra na região dos apoios e é fixada com a colocação de estribos suplementares na região próxima aos apoios (4 estribos suplementares de cada lado). Tais estribos encaixam-se em sulcos executados na lateral da viga, penetram na alma da viga, a uma altura de aproximadamente 9 cm da face superior da viga, e são amarrados com arame nos estribos existentes, junto com a armadura longitudinal de reforço.

**(R3)** a armadura longitudinal de reforço é depositada sobre estribos existentes, estende-se pela região entre os apoios sem penetrar nos mesmos e é amarrada aos estribos existentes com arame recozido.

A Figura 4.6 apresenta o esquema representativo das armaduras de reforço adotadas.



**Figura 4.6** Representação esquemática das armaduras longitudinais de reforço e estribos suplementares.

A Figura 4.7 apresenta um esquema da seção transversal das vigas quando prontas, isto é, após a realização dos reforços.



**Figura 4.7** Representação esquemática da seção transversal dos dois tipos de vigas ensaiadas, testemunhos e reforçadas, após terem sido realizados os trabalhos de reforço.

Confeccionou-se duas vigas experimentais para cada concepção de reforço, e mais duas vigas testemunhos, resultando num total de oito vigas ensaiadas. As vigas foram confeccionadas e ensaiadas em três etapas, constituindo cada concepção uma bateria de ensaios, sendo as duas testemunhos agregadas cada uma a uma bateria distinta.

Bateria B1: 1 testemunho

2 reforçadas (R1) a e b

Bateria B2: 1 testemunho

2 reforçadas (R2) a e b

Bateria B3: 2 reforçadas (R3) a e b



## 4.2.2 Materiais utilizados

As vigas foram confeccionadas em concreto armado e reforçadas com a argamassa com adição de sílica ativa.

**Concreto:** utilizou-se cimento Portland CPV-ARI, areia média do Rio Guaíba, brita basáltica e aditivo a base de formaldeído naftaleno sulfonado (1,5%), no traço:

traço: 1 : 2,94 : 4,1      a/c = 0,61      Abatimento = 7 cm +/- 1 cm

A mistura foi em betoneira de eixo inclinado. A resistência média esperada aos 28 dias era de 30MPa.

**Argamassa:** utilizou-se a argamassa de traço 1: 3, a/c 0,55, com adição de 10% de sílica ativa. Mistura em betoneira de eixo vertical.

**Aço:** diâmetro: 6,3mm - CA 50-A

3,4mm - CA 60-B

arame recozido para concreto nº 18

## 4.2.3 Confeção dos modelos estruturais

### 4.2.3.1 Concretagem e cura dos modelos estruturais

As vigas foram concretadas em três baterias. Para cada bateria foram preparados também seis corpos de provas cilíndricos de Ø9,5 x 19cm para a determinação da resistência à compressão do concreto, segundo NBR 5738 (ABNT, 1984) e NBR 5739 (ABNT, 1980). Utilizou-se adensamento vibratório mecânico nas vigas.

Decorridas três horas após a concretagem, as vigas eram cobertas com sacos de aninhagem molhados para proporcionar a cura do concreto. Este procedimento estendeu-se por 28 dias.

### 4.2.3.2 Confeção dos reforços

Após decorridos 7 dias da concretagem das vigas, as que seriam reforçadas eram retiradas do processo de cura para serem executadas as etapas seguintes do reforço:

- a) remoção do cobrimento de concreto até a exposição dos estribos;
- b) colocação da armadura longitudinal de reforço sobre os estribos;
- c) fixação da armadura longitudinal de reforço conforme o caso (item 4.2.1.1);
- d) limpeza da superfície do concreto e armaduras;
- e) aplicação da argamassa, até atingir o cobrimento mínimo de 1cm (da armadura) e a altura da viga em 30cm.





**b)** dispositivo de aplicação de carga: utilizou-se um perfil metálico para efetuar a transmissão de carga em dois pontos, localizados no terço médio da viga e distanciados entre si de 90cm. Os pontos de contato entre a viga e o perfil metálico também eram dispositivos metálicos rotulados.

**c)** célula de carga: sobre o perfil metálico foi instalada uma célula de carga, perfeitamente centrada, para efetuar as medições das cargas aplicadas .

**d)** macaco hidráulico: sobre a célula de carga foi instalado um macaco hidráulico para a aplicação das cargas.

**e)** deflectômetros analógicos: foram colocados no centro da viga e nos dois terços centrais da viga, a 1 metro dos apoios, para o acompanhamento das deformações (flechas).

A aplicação da carga era feita gradualmente, pela aplicação de incrementos de carga de 500 kg (aproximadamente 10% da carga última esperada), até a ruptura do modelo por alguma das configurações de ruptura esperadas:

**a)** escoamento da armadura de tração, com aumento progressivo das deformações sem o incremento das cargas aplicadas;

**b)** mesmo comportamento aliado à ruptura por esmagamento do concreto na parte superior da viga.

Durante a realização do ensaio, a cada aplicação de incremento de carga eram registradas as deformações e feito o acompanhamento do surgimento das fissuras, com registro da carga correspondente ao aparecimento das primeiras fissuras visíveis. A carga máxima suportada pela viga ou a carga que rompia pelo esmagamento do concreto era registrada como carga de ruptura (carga última).

Cada bateria de vigas era ensaiada de uma só vez, num mesmo dia, com idade do concreto de 41 a 43 dias e idade do reforço (da argamassa) de 34 dias.

#### **4.2.5 Ensaio complementares**

A fim de se obter dados mais precisos a respeito das capacidades das vigas, determinou-se :

**a)** resistência à compressão do concreto utilizado na confecção das vigas no mesmo dia em que eram ensaiadas, segundo NBR 5739 (ABNT, 1980);

**b)** resistência à compressão da argamassa, para fins de controle, também na mesma data do ensaio, segundo NBR 7215 (ABNT, 1991);

**c)** tensão de escoamento das barras de aço utilizadas nas armaduras, segundo NBR 6152 (ABNT, 1984).

## 4.2.6 Resultados

Os resultados do ensaio subdividem-se em experimentais, obtidos a partir das medições no laboratório, e os teóricos, calculados para a solução ensaiada.

### 4.2.6.1 Resultados experimentais

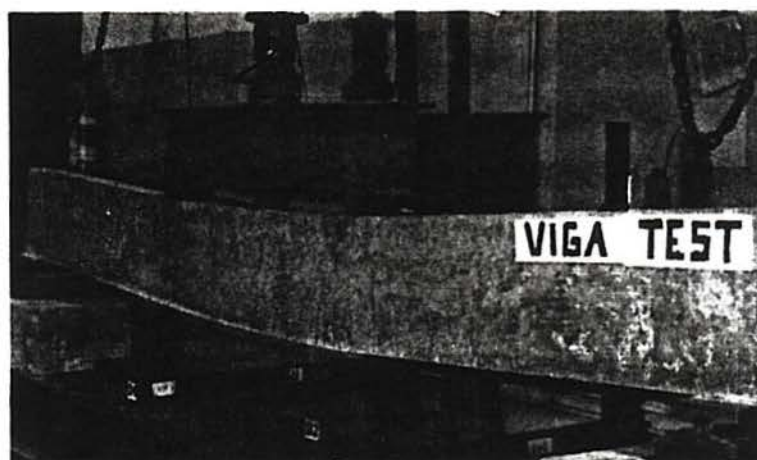
#### 4.2.6.1.1 Ensaio de flexão dos modelos estruturais

Como resultados do ensaio de flexão das vigas considerou-se as cargas e deformações obtidas ao longo do ensaio. Na tabela 4.2 são apresentadas as medições de carga e flechas centrais, e destaca-se também as cargas de ruptura e de aparecimento das primeiras fissuras visíveis.

**Tabela 4.2** Resultados do ensaio de flexão de vigas bi-apoiadas.

VIGA	Carga fissuras (kg)	Carga ruptura (kg)	Deformação - flecha central (mm) (conforme carga, em kg)												
			500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
test.(B1)	3000	5840	0.52	1.09	1.82	2.89	4.69	6.62	8.42	10.38	12.89	17.24	31.24		
test.(B2)	3000	6500	0.33	0.81	1.36	2.72	4.47	6.34	8.12	9.82	12.00	15.20	21.62	35.27	
média		6170	0.43	0.95	1.59	2.81	4.58	6.48	8.27	10.10	12.45	16.22	26.43	35.27	
ref.(R1)a	3000	6050	0.48	1.01	1.93	3.67	5.47	7.33	10.31	11.46	14.96	20.76	30.26		
ref.(R1)b	3000	5940	0.58	1.25	2.35	3.88	5.55	7.14	8.87	10.75	13.62	19.22	31.86		
média		5995	0.53	1.13	2.14	3.78	5.51	7.24	9.59	11.11	14.29	19.99	31.06		
ref.(R2)a	2000	6400	0.45	0.98	1.61	3.05	4.81	6.83	8.57	10.55	12.67	15.42	21.55	40.55	
ref.(R2)b	2000	6290	0.45	1.01	1.81	3.44	5.41	7.33	9.15	11.02	13.31	16.66	25.71	47.07	
média		6345	0.45	1.00	1.71	3.25	5.11	7.08	8.86	10.79	12.99	16.04	23.63	43.81	
ref.(R3)a	2000	6330	0.42	0.95	1.88	4.05	6.04	7.88	9.72	11.62	14.28	18.03	28.66	42.55	
ref.(R3)b	2000	6800	0.46	0.91	1.81	3.88	5.74	7.73	9.71	12.20	14.36	18.01	34.93	36.54	47.79
média		6565	0.44	0.93	1.85	3.97	5.89	7.81	9.72	11.91	14.32	18.02	31.80	39.55	47.79

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam o aspecto das vigas após o ensaio.



**Figura 4.9** Aspecto de uma das vigas testemunho, após o ensaio.





**Figura 4.10** Aspecto de uma das vigas reforçadas, após o ensaio.

#### 4.2.6.1.2 Ensaio com os materiais

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da determinação das resistências dos materiais utilizados, concreto, argamassa e aço. Estes resultados foram adotados no cálculo dos resultados teóricos.

**Tabela 4.3** Resultados para as resistências dos materiais

Resistência à compressão do concreto			
bateria/reforço	idade (dias)	fc médio (MPa)	C.V. (%)
(1)	43	41.37	6.71
(2)	43	39.22	4.02
(3)	41	34.28	2.42
Resistência à compressão da argamassa			
bateria/reforço	idade (dias)	fa médio (MPa)	C.V. (%)
(1)	34	45.10	7.34
(2)	34	46.91	5.36
(3)	34	36.83	6.61
Tensão de escoamento do aço			
Aço/barra		fy médio (kg/cm <sup>2</sup> )	
CA50-A 8mm		5660	
CA60-A 3.4mm		8921	

#### 4.2.6.2 Resultados teóricos: cálculo da carga última das vigas

O comportamento teórico esperado para as vigas foi calculado segundo as recomendações e determinações da NBR 6118 (ABNT, 1980) para o cálculo no estado limite último de vigas submetidas à flexão simples. As hipóteses de cálculo adotadas para a ruptura referem-se ao domínio 2 - deformação plástica excessiva, isto é, armadura de tração na tensão de escoamento e sem ruptura por

esmagamento do concreto ( $\epsilon_c < 0.35\%$ ) (Eq. 4.2.1.). A partir do momento último encontrado para as vigas (Eq. 4.2.2., Eq. 4.2.3., Eq. 4.2.4.), obteve-se as cargas de ruptura esperadas (Eq. 4.2.5.). Também foram determinados os momentos e cargas de fissuração, a fim de definir a passagem do comportamento das vigas de estágio I para o estágio II, que são apresentados na seção seguinte. As equações adotadas são as que seguem:

$$f_y \cdot A_s = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_c \quad \text{Eq. 4.2.1.}$$

$$M_u = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad \text{Eq. 4.2.2.}$$

$$M_u = M_{\text{próprio}} + M_{\text{máx}} \quad \text{Eq. 4.2.3.}$$

$$M_{\text{próprio}} = (q \cdot l^2) / 8 \quad \text{Eq. 4.2.4.}$$

$$M_{\text{máx}} = P \cdot 0,95m \quad \text{Eq. 4.2.5.}$$

As cargas P de ruptura calculadas são as seguintes:

Vigas testemunhos: 5.318 kg

Vigas reforçadas: 5.175 kg

Os cálculos foram efetuados adotando-se as dimensões reais das vigas, a posição real das armaduras, resistência do concreto determinada nas datas dos ensaios e a tensão de escoamento do aço obtida nos ensaios de tração. Foram suprimidos todos os coeficientes de minoração e majoração, usualmente adotados no cálculo de vigas de concreto armado.

Devido a pequenas diferenças na resistência à compressão do concreto, calculou-se separadamente as cargas de ruptura para as três baterias/tipo de reforço de vigas. As cargas calculadas, porém, resultaram com diferenças inferiores a 0,5% entre si, então para efeitos de resultados teóricos adotou-se sempre a média entre os valores calculados para cada viga, já apresentado. A diferença entre as cargas calculadas para as vigas testemunhos e reforçadas se deve a pequenas diferenças na posição real das armaduras. Esta diferença, porém, é de 2,7% e em uma das análises que se realizou considerou-se a média entre as duas.

#### **4.2.6.3 Resultados teóricos: deformações**

O comportamento teórico quanto às deformações sofridas pelas vigas quando submetidas à flexão foi calculado segundo as recomendações do CEB - Boletim no.158 (CEB, 1985), para o cálculo de flechas instantâneas. Considerou-se a parcela da flecha gerada pela carga de peso próprio da vigas separadamente da gerada pelo carregamento, a fim de suprimir a flecha inicial existente pelo peso próprio (Eq. 4.2.10. a Eq. 4.2.13.). O cálculo da flecha foi realizado separadamente para os estádios I e II do carregamento, acompanhando as mudanças na resistência das peças (Eq.4.2.6. a 4.2.9., Eq. 4.2.12. a Eq. 4.2.16.). Seguem as equações adotadas:



Hipótese para o estágio I:

$$(b \cdot x^2) / 2 - b \cdot (h - x)^2 / 2 - (n - 1) \cdot A_s \cdot (d - x) = 0 \quad \text{Eq. 4.2.6.}$$

$$(I_x)_i = (b \cdot x^3) / 3 + b \cdot (h - x)^3 / 3 + (n - 1) \cdot A_s \cdot (d - x)^2 \quad \text{Eq. 4.2.7.}$$

Hipótese para o estágio II:

$$(b \cdot x^2) / 2 - n \cdot A_s \cdot (d - x) = 0 \quad \text{Eq. 4.2.8.}$$

$$(I_x)_{ii} = (b \cdot x^3) / 3 + n \cdot A_s \cdot (d - x)^2 \quad \text{Eq. 4.2.9.}$$

$$F_{pp} = (5 \cdot q \cdot l^4) / (384 \cdot E_c \cdot (I_x)) \quad \text{Eq. 4.2.10.}$$

$$F_{m\acute{a}x} = P \cdot a \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2) / (24 \cdot E_c \cdot (I_x)) \quad \text{Eq. 4.2.11.}$$

$$A_{0i} = F_{m\acute{a}x}(i) \quad \text{Eq. 4.2.12.}$$

$$A_{0ii} = (1 - E_d) \cdot A_{0i} + E_d \cdot (F_{pp}(ii) + F_{m\acute{a}x}(ii) - F_{pp}(i)) \quad \text{Eq. 4.2.13.}$$

$$E_d = 1 - B_1 \cdot B_2 \cdot (M_f / M_{m\acute{a}x}) \quad \text{Eq. 4.2.14.}$$

No caso,  $B_1 = 0,5$  e  $B_2 = 1,0$

$$M_f = f_t \cdot b \cdot h^2 / 4 \quad \text{Eq. 4.2.15.}$$

$$f_t = 0,7 + 0,06 \cdot f_c \quad \text{Eq. 4.2.16.}$$

Os cálculos foram realizados novamente para as vigas testemunhos e para as reforçadas separadamente. A tabela 4.4 apresenta os valores calculados.

**Tabela 4.4** Flechas centrais teóricas (mm).

Viga	Carga (kg)												
	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
testemunho	0.275	0.550	1.123	2.305	3.488	4.671	5.854	7.038	8.220	9.404	10.587	11.770	13.047
reforçada	0.277	0.554	1.230	2.450	3.669	4.888	6.107	7.327	8.546	9.765	10.984	12.203	13.377

Calculou-se ainda as cargas de fissuração das vigas, que caracterizam a passagem do estágio I para o II. As cargas calculadas são:

vigas testemunhos: 668 kg

vigas reforçadas: 642 kg

## 4.2.7 Análise dos resultados

### 4.2.7.1 Comparação entre cargas últimas

#### 4.2.7.1.1 Carga última teórica x experimental

A Tabela 4.5 apresenta as cargas últimas experimentais e teóricas para as vigas reforçadas e testemunhos, e as relações entre elas, em termos de porcentagem da experimental sobre a teórica. As cargas experimentais consideradas são as médias dos dois valores obtidos para cada solução ensaiada.

**Tabela 4.5** Relação entre carga de ruptura (última) teórica e experimental.

	testemunho	(R1)	(R2)	(R3)
carga teórica (kg)	5318	5175	5175	5175
carga experimental (kg)	6170	5995	6345	6565
experim./teór. (%)	116.0	115.8	122.6	126.9

Observou-se que as cargas de ruptura experimentais foram em média 20,3% superiores às cargas calculadas para a ruptura no domínio 2, estágio III. Estas cargas experimentais de ruptura, por sua vez, na maioria dos casos corresponderam não apenas à carga máxima de deformação plástica suportada pela viga como também caracterizavam a ruptura pelo esmagamento do concreto. Tal comportamento, no entanto, não foi analisado em detalhes pois considerou-se os resultados como satisfatórios, uma vez que as vigas suportaram um carregamento bastante próximo e até superior ao estipulado pelos métodos de cálculo utilizados. Portanto, pode-se dizer que é possível prever a capacidade de uma peça estrutural reforçada ou não segundo os métodos de cálculo disponíveis, e que um reforço pode ser especificado segundo as mesmas equações adotadas para as peças integras.

As cargas de fissuração calculadas foram bem inferiores às verificadas no ensaio, pois as fissuras visíveis somente passam a aparecer após excedidos os limites de fissuração.

#### 4.2.7.1.2 Carga última da viga testemunho x reforçadas

Mesmo que ambas soluções apresentaram comportamento experimental superior ao calculado, pequenas diferenças nas cargas de ruptura experimentais requerem comparações entre as soluções ensaiadas. Assim, e, pelas peças terem sido concebidas com dimensões e capacidades semelhantes, comparou-se as cargas de ruptura das vigas reforçadas com relação às testemunhos, considerando sempre o valor médio das duas determinações que foram realizadas para cada solução ensaiada. A comparação é expressa em termos de porcentagem da carga de ruptura de uma solução reforçada sobre a carga de ruptura da testemunho.



**Tabela 4.6** Relação entre cargas de ruptura das vigas testemunhos com as reforçadas.

	(R1)	(R2)	(R3)
carga reforçada (kg)	5995	6345	6565
carga testemunho (kg)	6170	6170	6170
reforç./testemun. (%)	97.2	102.8	106.4

Comparando-se as cargas de ruptura das vigas das três concepções de reforço com as da testemunho, observa-se que as diferenças situam-se entre -2.8% e +6.4%. Tais diferenças podem ser consideradas como pouco significativas e é possível colocar os seguintes comentários:

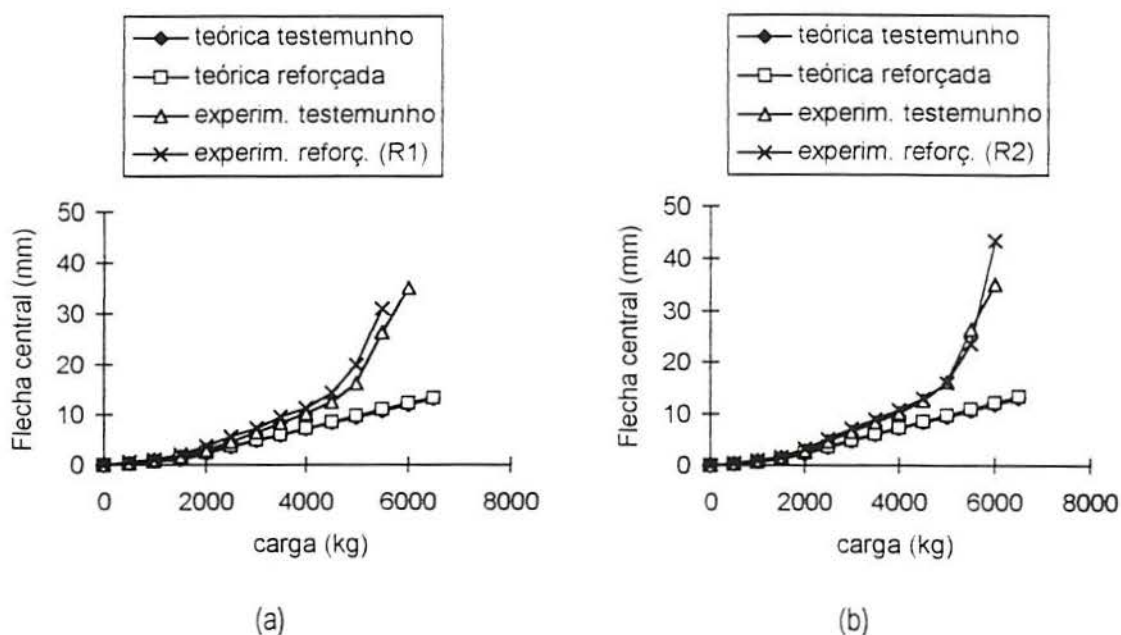
**a)** estas pequenas diferenças podem ser consideradas como variabilidade do ensaio e se pode concluir que não existem diferenças significativas na capacidade de uma viga reforçada com relação a uma viga de igual característica, íntegra de concreto. Este fato é indicativo da eficiência do reforço executado;

**b)** as pequenas diferenças entre as três concepções de reforço estudadas levam a crer que os três procedimentos de ancoragem realizados são eficientes, mesmo o reforço tipo (R3), que não possui armadura longitudinal de reforço penetrando na região dos apoios. A adoção ou não de estribos suplementares também não revelou vantagens nesta análise. Contudo, ressalta-se que todos os cuidados devem ser tomados com a ancoragem de uma armadura de reforço na armadura existente, pois esta ancoragem garantirá a integralidade do conjunto no desempenho mecânico da peça;

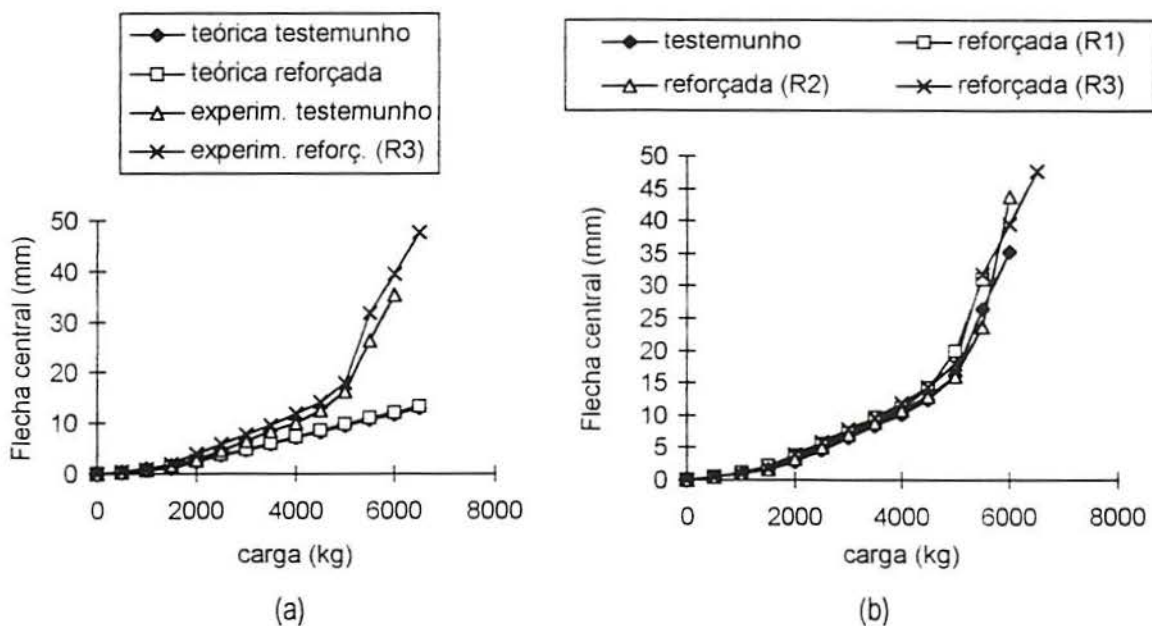
**c)** esta comparação também reforça a possibilidade de se efetuar o cálculo de uma viga reparada ou reforçada como se fosse íntegra de concreto. A argamassa com adição de sílica ativa, com sua aderência e resistência adequadas, consolida o reforço executado, garantindo a integralidade da peça reforçada.

#### 4.2.7.2 Deformações

Os gráficos que seguem (Figuras 4.11 e 4.12) apresentam as deformações das vigas (flechas centrais) em função da carga aplicada, para cada uma das concepções de reforço e também em conjunto, para visualização das deformações entre si.



**Figura 4.11** Carga versus flecha central para a concepção de reforço (R1) (a), e (R2) (b), em conjunto com os resultados para as vigas testemunho.



**Figura 4.12** Carga x flecha central da concepção de reforço (R3) (a), junto com as dos testemunhos, e (b) apresenta as curvas para as quatro concepções ensaiadas conjuntamente.

Pode-se observar em todos os gráficos que as deformações experimentais são sempre superiores às calculadas. O desenvolvimento destas deformações com a aplicação das cargas aumenta progressivamente de maneira mais ou menos uniforme até próximo da carga calculada de ruptura para o estágio II (em torno de 5000 kg). A partir deste momento as deformações desenvolvidas pelas vigas são excessivamente superiores, caracterizando a ruína da peça por deformações plásticas excessivas



ou esmagamento do concreto. Uma explicação para tal fato seria considerar que neste estágio do carregamento a viga estaria entrando na fase de comportamento do estágio III, sem proporcionalidade entre cargas e deformações.

O fato das deformações desenvolvidas pelas vigas terem se apresentado sempre superiores durante todo o ensaio, pode-se concluir que o método de cálculo adotado para a previsão das mesmas fornece informações por demais otimistas com relação à deformabilidade das peças. Portanto, deve-se considerá-las com cuidado ao realizar o cálculo de vigas segundo os estados limites de utilização, fissuração e deformação, uma vez que mesmo as vigas testemunhos, íntegras de concreto, apresentaram o mesmo comportamento.

Com relação às diferentes concepções de reforço experimentadas, mesmo que a concepção de reforço (R2), com estribos suplementares e armadura longitudinal de reforço penetrando na região dos apoios, tenha apresentado deformações bem próximas às deformações das vigas testemunho, durante quase todo o ensaio, não pode-se afirmar que uma solução foi efetivamente melhor ou pior do ponto de vista das deformações. Pode-se crer que a adoção de estribos suplementares para auxiliar na ancoragem e integração da armadura de reforço à armadura existente contribui de alguma maneira no desempenho de vigas reforçadas, em suportar os esforços e deformações, a favor da segurança. Mas as pequenas diferenças apresentadas entre todas as soluções ensaiadas, neste trabalho, nada evidenciam a este respeito, demonstrando que as três soluções foram eficazes em suportar as deformações tão bem quanto vigas íntegras.

#### **4.2.8 Conclusões**

À semelhança dos resultados encontrados em outros trabalhos que avaliaram o comportamento de elementos em verdadeira grandeza, íntegros ou reforçados, o desempenho de vigas de concreto armado quando submetidas à flexão é bem previsto pelas normas vigentes. SOUZA (1991), encontrou resultados muito semelhantes aos encontrados neste trabalho, sendo que seus elementos reforçados eram previamente submetidos a um carregamento, para provocar a fissuração das peças.

No presente estudo as peças que receberam parte das armaduras na forma de um reforço tiveram um comportamento quase idêntico ao de vigas íntegras. Diferentes maneiras de se ancorar as armaduras de reforço foram testadas, mas não ficou evidente se alguma delas era superior ou inferior, mesmo no caso em que as armaduras longitudinais de reforço eram apenas amarradas às existentes, sem penetrar na região dos apoios. A argamassa comportou-se como um ótimo elemento de integração entre as novas armaduras e as existentes, sem que fissuras ou descolamentos dignos de nota ocorressem.

É necessário que se ressalte, no entanto, que a qualidade dos serviços de reparo ou reforço executados serão determinantes do desempenho da peça reforçada. Como já se observou em outros ensaios, o desempenho da argamassa como material que recobre um elemento de concreto armado ou suas armaduras adicionais será tanto melhor e confiável quanto melhor forem executadas todas as etapas de reparo e reforço.

Mesmo que neste ensaio as propriedades da argamassa são pouco avaliadas, em termos de suas resistências, e observou-se através dos outros ensaios realizados que nem sempre a adição de

silica ativa atua sobre as mesmas, a justificativa para a adição ainda se mantém pelos benefícios que ela pode trazer em termos de durabilidade do reparo ou reforço executado. Como técnica de reforço de vigas de concreto armado, a utilização de argamassas (com ou sem adição), como material que cobre as armaduras e às integra à estrutura existente, parece satisfazer plenamente o desempenho esperado.

### **4.3 ENSAIO DE FLEXÃO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO**

Da mesma forma que o ensaio com as vigas de concreto armado, este ensaio também foi concebido de forma que elementos estruturais tipo lajes armadas em uma só direção, idênticos quanto às suas dimensões e capacidades portantes mas diferentes na forma de serem constituídos, fossem submetidos a um carregamento que proporcionasse flexão simples. Poucas referências sobre ensaios com lajes foram encontradas (SWAMY, 1996). Sendo assim, adotou-se a princípio todos os procedimentos tomados para o ensaio com as vigas, adaptando-se somente para o caso de lajes.

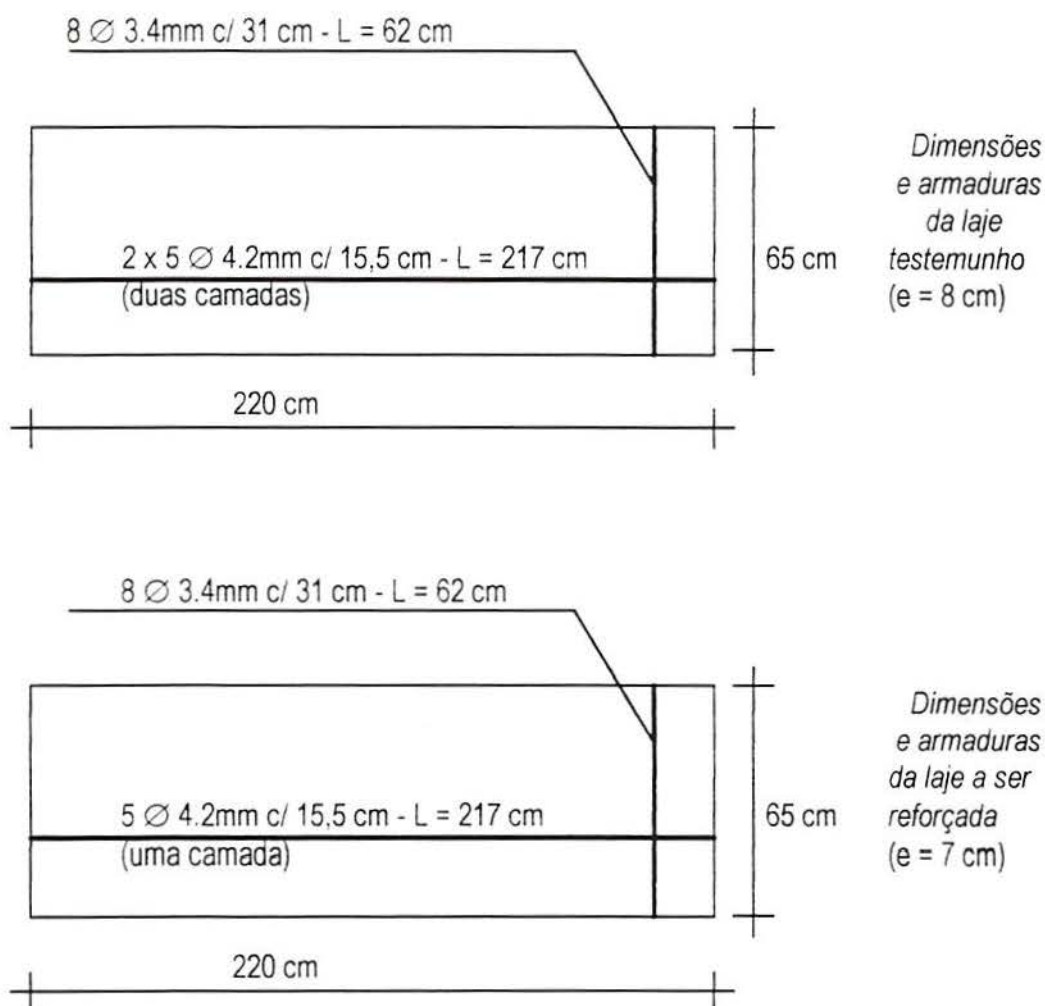
As lajes de concreto armado são elementos que muito frequentemente sofrem danos, quer por erros de projeto e execução ou por ação de agentes degradantes (seção 1.1). Como a argamassa em estudo foi concebida para ter uma consistência e coesão tais que seja possível sua aplicação como revestimento inferior de lajes, considerou-se que o ensaio com modelos estruturais em verdadeira grandeza seria muito valioso para se avaliar o desempenho da técnica. Além disso, como o comportamento experimental de lajes foi pouco estudado, tendo-se poucas referências sobre o assunto, achou-se por bem investigar tais elementos, que possuem solicitações diferenciadas das vigas de concreto armado.

Apresenta-se a seguir o estudo que foi realizado com lajes de concreto armado reforçadas e integras, a descrição dos elementos estruturais ensaiados, os materiais e o procedimento de execução adotados e a metodologia de ensaio.

#### **4.3.1 Modelos Estruturais**

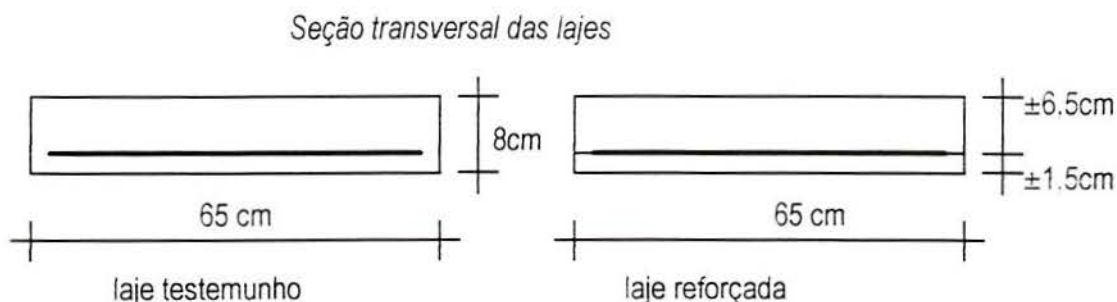
A descrição das lajes ensaiadas é apresentada a seguir na Figura 4.13:





**Figura 4.13** Representação esquemática da laje testemunho e a ser reforçada, com suas respectivas armaduras longitudinais e transversais (de montagem).

A armadura de reforço consistiu em acrescentar uma camada de 5 Ø4.2 mm, com comprimento de 198 cm. Desta forma, a armadura de reforço ficaria compreendida entre as regiões onde se localizariam os apoios, nas extremidades da laje, sem estender-se através das mesmas (isto garantiu uma faixa de 10 cm nas extremidades da laje, livres para receberem os dispositivos de apoio). A seção transversal das lajes após sua concretagem e reforço são apresentadas na Figura 4.14.



**Figura 4.14** Representação esquemática da seção transversal das lajes quando prontas.

Para este ensaio foram concretados apenas dois elementos: um testemunho, íntegro de concreto, e um a ser reforçado. Ambos foram concretados e ensaiados conjuntamente em uma etapa só.

#### 4.3.2 Materiais utilizados

Adotou-se os mesmos materiais e traços que foram utilizados durante a pesquisa e no ensaio com as vigas, apresentado no capítulo 4.2.

As lajes foram confeccionadas em concreto armado e o reforço foi executado com a argamassa com adição de 10% de sílica ativa.

**Concreto:** traço 1: 2,94: 4,1 a/c 0,61 Abatimento = 7 cm +/- 1 cm

Utilizou-se aditivo superplastificante à base de formaldeído naftaleno sulfonado (1,5%). Resistência esperada aos 28 dias: 30 MPa. Misturado em betoneira de eixo inclinado.

**Argamassa:** traço 1: 3 a/c 0,55 adição de 10% de sílica ativa. misturada em betoneira de eixo vertical.

**Aço:** diâmetro: 4,2mm - CA 60-B

3,4mm - CA 60-B

arame recozido para concreto no. 18

#### 4.3.3 Confeção dos modelos estruturais

##### 4.3.3.1 Concretagem e cura dos modelos estruturais

A concretagem compreendeu uma só etapa, sendo necessárias quatro betonadas para o preenchimento das duas peças. Em cada betonada foram preparados três corpos de prova cilíndricos de  $\varnothing 9,5 \times 19$  cm para a determinação da resistência à compressão do concreto, segundo NBR 5738 e 5739 (ABNT, 1984 e 1980). Adotou-se adensamento com vibrador mecânico de imersão.



A laje a ser reforçada foi concretada com a espessura de 7 cm, por ter apenas uma camada de 5 barras de 4.2mm. Após transcorridas 3 horas da concretagem ambas as lajes foram submetidas a um período de cura úmida de 10 dias, que consistiu em cobri-las com sacos de aninhagem que eram constantemente molhados. Neste momento, a laje a ser reforçada começou a ser preparada para a execução do reforço.

#### **4.3.3.2 Confeção dos reforços**

Após transcorridos 10 dias da concretagem e cessado o período de cura iniciou-se a execução do reforço na laje destinada. O reforço da laje compreendeu os seguintes serviços:

- a) apicoamento do cobrimento de concreto com martetele elétrico, até a exposição das barras transversais;
- b) limpeza;
- c) colocação da armadura de reforço, a outra camada de 5 barras de 4.2mm, sobre a superfície da laje, amarrando-as às armaduras existentes com arame recozido;
- d) aplicação manual da argamassa com adição de sílica ativa. Esta aplicação foi feita colocando-se a laje na posição vertical e lançando-se lateralmente a argamassa com colher de pedreiro. Este procedimento foi tomado para se ter uma maior proximidade das condições práticas de aplicação, quando, no caso de uma laje, tem-se o lançamento de baixo para cima de qualquer revestimento que se aplica no fundo da mesma;
- e) acabamento e desempenho da superfície com régua e desempenadeira de madeira.

Todos estes serviços foram realizados por pedreiros e laboratoristas familiarizados com os mesmos, e todos os cuidados possíveis foram tomados com relação a aproximar-se de condições reais de execução de um serviço desta natureza.

A camada de argamassa teve espessura suficiente para recobrir as novas armaduras e completar a altura da laje até 8 cm, o que resultou num cobrimento próximo a 1 cm. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de  $\varnothing 5 \times 10$  cm de argamassa para determinação de sua resistência à compressão, segundo NBR 7215 (ABNT, 1991). Foi realizada a cura úmida da argamassa por 7 dias, com o mesmo procedimento de cobrir com sacos de aninhagem molhados.

Na figura 4.15 pode-se observar a aplicação da argamassa sobre a laje.



**Figura 4.15** Aplicação da argamassa sobre a laje.

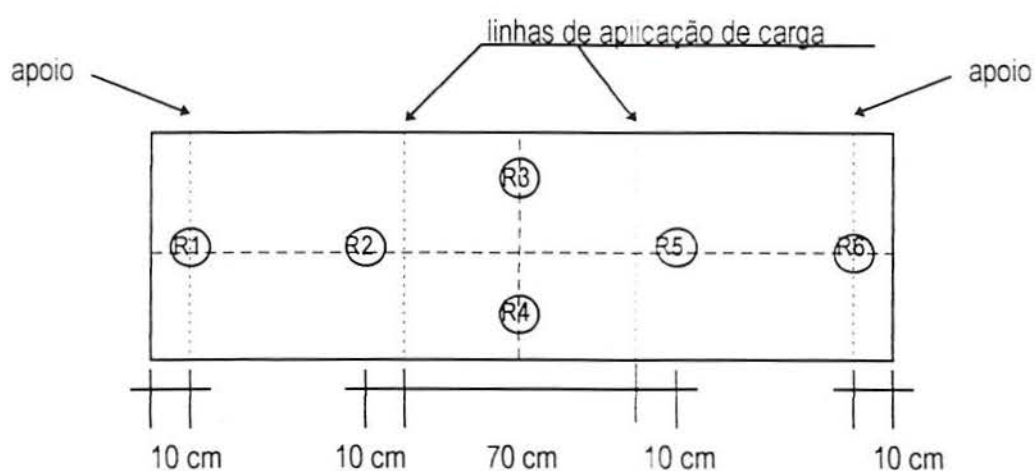
#### **4.3.4 Ensaio de flexão simples de lajes bi-apoiadas**

O ensaio propriamente dito consistiu na aplicação crescente de incrementos de carga em um dispositivo metálico, que transferia um carregamento linear uniforme ao longo de toda a largura da laje, em duas posições localizadas no terço médio das peças. Desta forma obtinha-se na região central das lajes um momento uniforme, caracterizando a flexão simples ao longo de toda a extensão das mesmas.

Foram registradas as deformações apresentadas pelas lajes durante toda a execução do ensaio. A carga de ruptura considerada correspondia à carga máxima absorvida pela peça, a partir da qual todo incremento de carga se traduzia integralmente em deformação da peça. Registrou-se também as cargas que correspondiam ao aparecimento das primeiras fissuras visíveis.

As deformações sofridas pelas lajes durante a aplicação do carregamento foram registradas por deflectômetros analógicos como deslocamentos verticais percebidos na superfície superior das lajes. Foi considerado como deslocamento positivo, ou flecha positiva, os deslocamentos ocorridos para baixo, e negativos os deslocamentos ocorridos para cima, contraflechas. Isto assim se arbitrou pois nas extremidades das lajes ocorriam deslocamentos para cima, em função da flexão das mesmas. Foram colocados 6 deflectômetros, posicionados conforme a Figura 4.16, onde constam também as posições dos apoios e linha de aplicação de carga:





**Figura 4.16** Distribuição dos defletores na face superior das lajes e posição do carregamento.

### 4.3.5 Ensaio complementares

Para determinar as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na confecção dos modelos, que são necessárias para a avaliação do comportamento dos mesmos, realizou-se ensaios complementares que determinaram as seguintes propriedades:

- resistência à compressão do concreto utilizado na confecção das lajes segundo NBR 5739 (ABNT, 1980), determinada no dia do ensaio das lajes. Adotou-se 3 corpos de prova por betonada;
- resistência à compressão da argamassa de reforço, segundo NBR 7215 (ABNT, 1991), também na data do ensaio das lajes (9 corpos de prova);
- tensão de escoamento das barras de aço utilizadas nas armaduras, segundo NBR 6152 (ABNT, 1984) (3 corpos de prova).

### 4.3.6 Resultados

Os resultados do ensaio de flexão em lajes subdividiu-se em resultados experimentais, os obtidos nas medições em laboratório, e os teóricos, calculados segundo as características das lajes ensaiadas.

#### 4.3.6.1 Resultados experimentais

##### 4.3.6.1.1 Ensaio de flexão dos modelos estruturais

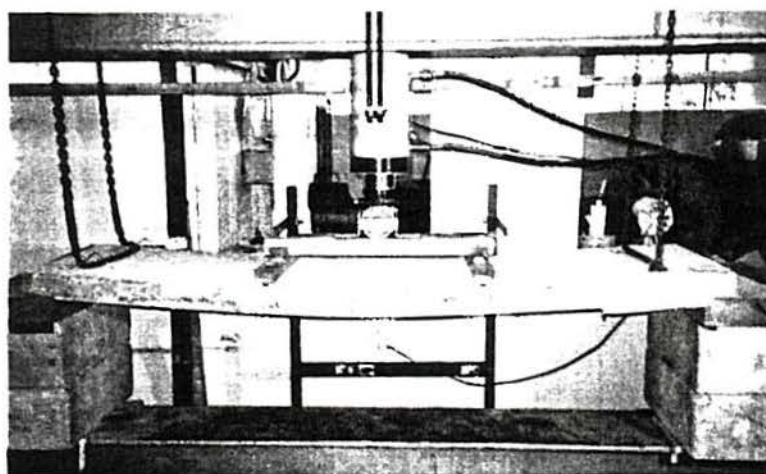
A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão das lajes. Apresenta-se as flechas lidas nos seis defletores instalados e as cargas aplicadas, assinalando-se a carga última e a carga a partir da qual verificou-se as primeiras fissuras.

**Tabela 4.7** Resultados do ensaio de flexão da lajes.

Carga P (kg)	Deformações - flechas em mm											
	testemunho						reforçada					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R1	R2	R3	R4	R5	R6
150	0,03	0,25	0,32	0,27	0,25	0,03	0,00	0,22	0,28	0,29	0,24	0,05
300	0,11	0,54	0,70	0,58	0,53	0,10	0,05	0,61	0,80	0,80	0,63	0,12
450	0,19	0,83	1,07	0,90	0,81	0,16	0,10	1,08	1,38	1,37	1,07	0,18
600	0,28	1,19	1,53	1,31	1,14	0,22	0,12	1,54	1,98	2,01	1,55	0,28
750	0,35	1,65	2,12	1,87	1,57	0,27	0,16	2,25	2,93	2,94	2,30	0,31
900	0,37	2,77	3,66	3,39	2,65	0,31	0,20	3,30	4,48	4,46	3,44	0,34
1020*	0,32	5,18	7,01	6,69	4,92	0,26	0,12	6,09	8,42	8,40	6,16	0,34
1200	0,09	8,97	11,95	11,00	8,65	0,13	-0,03	8,96	12,44	12,44	9,13	0,28
1350	-0,05	11,73	15,76	15,50	11,50	-0,00	-0,25	12,65	17,40	17,38	12,99	0,13
1500	-0,35	16,21	21,48	21,34	16,78	-0,22	-0,48	16,29	22,14	22,19	16,49	-0,03
1650	-0,77	22,34	29,66	29,70	21,77	-0,57	-0,90	21,97	29,82	30,01	21,99	-0,36
1670**	-1,93	36,68	49,14	49,60	35,46	-1,55	-1,45	29,88	40,93	41,34	29,57	-2,22
1730	-	-	-	-	-	-	-2,09	38,52	52,88	-	37,94	-1,68

\*Carga do surgimento das 1<sup>o</sup> fissuras visíveis : 1020 kg para a testemunho e 1000 kg para a reforçada. \*\* Carga final máxima para a testemunho: 1670 kg . Para a reforçada, esta medição é 1720 kg.

Na Figura 4.17 apresenta-se a laje reforçada após o ensaio.

**Figura 4.17** Aspecto da laje reforçada após o ensaio.

#### 4.3.6.1.2 Ensaio com os materiais

A média dos resultados obtidos para a resistência à compressão do concreto utilizado nas lajes, determinados aos 37 dias de idade, considerando corpos de prova retirados das três betonadas, é a seguinte:

Média total:  $f_{c37 \text{ dias}} = 37,08 \text{ MPa}$

desvio-padrão: 1,372 MPa



coef. de variação: 3.70 %

Abatimento (*slump*): 1,5 cm

A média dos resultados obtidos para a resistência à compressão da argamassa utilizada na confecção do reforço, aos 21 dias de idade, é a seguinte (9 corpos de prova):

Média:  $f_{c_{21 \text{ dias}}} = 38,65 \text{ MPa}$

desvio-padrão: 5,22 MPa

coef. de variação: 13,50 %

A média dos resultados obtidos no ensaio de tração das barras de aço que foram utilizadas nas lajes é a seguinte:

Média:  $f_y = 61,33 \text{ KN/cm}^2$

desvio-padrão: 0,64 KN/cm<sup>2</sup>

coef. de variação: 1,04%

#### **4.3.6.2 Resultados teóricos: cálculo das capacidades e deformações das lajes**

O mesmo procedimento de tomar as medidas reais das peças e posição final das armaduras foi adotado neste cálculo, que seguiu a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 1980) e as recomendações do CEB (CEB, 1985), sendo igualmente adotados os valores experimentais determinados para a resistência do concreto e para a tensão de escoamento das barras de aço. O cálculo suprimiu coeficientes de majoração e minoração.

##### **4.3.6.2.1 Cálculo do momento último - carga última**

O cálculo do momento resistente último das lajes foi realizado seguindo-se as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 1980) para o cálculo de vigas e lajes de concreto armado nos estados limites últimos. No caso, em se tratando de laje armada em uma só direção e do carregamento aplicado ser constante ao longo da largura da laje, adotou-se seqüência de cálculo como se fosse para uma viga armada somente na zona de tração.

A hipótese de ruptura foi feita para o estágio III, domínio 2, com a laje fissurada na zona de tração, armadura de tração na tensão de escoamento do aço e deformação de 1%, o concreto sendo comprimido na zona superior da laje na resistência de ruptura e com deformação máxima de 0.35% (Eq.4.3.1.). Desta forma, obteve-se a resistência da seção como estando no domínio 2. A partir de então calculou-se o momento último resistente da seção (Eq. 4.3.2.). Com este momento último, separou-se a parcela de momento gerada pelo peso próprio da laje e obteve-se a parcela de momento máximo dado pelo carregamento na ruptura (Eq. 4.3.3. e Eq. 4.3.4.). Pela distribuição de momentos gerada pelo carregamento determinou-se a carga última de ruptura para a seção mais carregada (Eq. 4.3.5.). As principais equações utilizadas encontram-se a seguir:

$$f_y \cdot A_s = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_c \quad \text{Eq. 4.3.1.}$$

$$M_u = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad \text{Eq. 4.3.2.}$$

$$M_u = M_{\text{próprio}} + M_{\text{máx}} \quad \text{Eq. 4.3.3.}$$

$$M_{\text{próprio}} = (q \cdot l^2) / 8 \quad \text{Eq. 4.3.4.}$$

$$M_{\text{máx}} = P/2 \cdot 0,65 \text{ metros} \quad \text{Eq. 4.3.5.}$$

Este cálculo foi realizado para a laje testemunho e para a laje reforçada, pois possuíam pequenas diferenças nas suas dimensões. Contudo, as cargas de ruptura resultantes foram bastante próximas. Adotou-se nos cálculos os valores de resistências e dimensões obtidos no experimento (item 4.3.6.1.2). Suprimiu-se os coeficientes de minoração e majoração sugeridos pela norma. Os valores encontrados são os seguintes, considerando como sendo a carga concentrada no dispositivo de aplicação de carga:

Laje testemunho: carga última (concentrada no dispositivo de carga):

1.578,86 kg.

Laje reforçada: carga última (concentrada no dispositivo de carga):

1.550,25 kg.

#### 4.3.6.2.2 Cálculo das deformações - flechas centrais

As deformações das lajes foram calculadas segundo as recomendações do CEB (CEB, 1985) para o cálculo das flechas centrais de vigas de concreto armado sob carga de curta duração. Considerou-se a parcela da flecha gerada pela carga de peso próprio da laje separadamente da gerada pelo carregamento, a fim de suprimir a flecha inicial existente pelo peso próprio (Eq. 4.3.10. e 4.3.11., 4.3.12. e 4.3.13). O cálculo da flecha foi realizado separadamente para os estádios I e II do carregamento, acompanhando as mudanças na resistência das peças (Eq. 4.3.6. a 4.3.9., 4.3.12. a 4.3.16.). Segue o formulário seguido:

Hipótese para o estádio I:

$$(b \cdot x^2) / 2 - b \cdot (h - x)^2 / 2 - (n - 1) \cdot A_s \cdot (d - x) = 0 \quad \text{Eq. 4.3.6.}$$

$$(l_x)_i = (b \cdot x^3) / 3 + b \cdot (h - x)^3 / 3 + (n - 1) \cdot A_s \cdot (d - x)^2 \quad \text{Eq. 4.3.7.}$$

Hipótese para o estádio II:

$$(b \cdot x^2) / 2 - n \cdot A_s \cdot (d - x) = 0 \quad \text{Eq. 4.3.8.}$$

$$(l_x)_{ii} = (b \cdot x^3) / 3 + n \cdot A_s \cdot (d - x)^2 \quad \text{Eq. 4.3.9.}$$

$$F_{pp} = (5 \cdot q \cdot l^4) / (384 \cdot E_c \cdot (l_x)) \quad \text{Eq. 4.3.10.}$$

$$F_{\text{máx}} = P \cdot a \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2) / (24 \cdot E_c \cdot (l_x)) \quad \text{Eq. 4.3.11.}$$



$$A0i = F_{\text{máx}(i)} \quad \text{Eq. 4.3.12.}$$

$$A0ii = (1 - E_d) \cdot A0i + E_d \cdot (F_{pp(ii)} + F_{\text{máx}(ii)} - F_{pp(i)}) \quad \text{Eq. 4.3.13.}$$

$$E_d = 1 - B_1 \cdot B_2 \cdot (M_f / M_{\text{máx}}) \quad \text{Eq. 4.3.14.}$$

No caso,  $B_1 = 0,5$  e  $B_2 = 1,0$

$$M_f = f_t \cdot b \cdot h^2 / 4 \quad \text{Eq. 4.3.15.}$$

$$f_t = 0,7 + 0,06 \cdot f_c \quad \text{Eq. 4.3.16.}$$

Os cálculos foram realizados novamente para a laje testemunho e para a reforçada separadamente. A Tabela 4.8 apresenta os valores calculados

**Tabela 4.8** Flechas centrais calculadas para as lajes.

Carga P (kg)	Deformações - flecha central (mm)	
	testemunho	reforçada
150	0,197	0,191
300	0,395	0,381
450	0,592	0,572
600	0,789	0,762
750	0,986	0,953
900	8,028	8,147
1020*	9,541	9,446
1200	11,806	12,041
1350	13,693	13,985
1500	15,578	15,929
1650	17,462	17,871
1670*	17,714	18,778

\* para a laje reforçada estes valores correspondem a 1000kg e 1720kg respectivamente.

Calculou-se também as cargas de fissuração das lajes, a partir do momento de fissuração. A partir delas teoricamente inicia-se o estágio II, mas para fins o cálculo das deformações iniciou-se pela carga de 900 kg.

Cargas de fissuração calculadas:

testemunho: 697,3 kg

reforçada: 716,96 kg

### 4.3.7 Análise dos resultados

Os resultados do ensaio foram interpretados à luz da simples comparação entre o comportamento da laje testemunho e o da reforçada, e comparando-se o comportamento de ambas com valores obtidos através de cálculo. Estas comparações foram feitas considerando-se as cargas últimas atingidas e calculadas, e as deformações, também obtidas e calculadas. Apresenta-se a seguir as comparações e análises efetuadas.

#### 4.3.7.1 Carga última

A Tabela 4.9 apresenta a relação entre as cargas últimas experimentais e teóricas calculadas, para a laje testemunho e laje reforçada.

**Tabela 4.9** Relação entre carga teórica e experimental das lajes.

	Carga experim. (kg)	Carga teórica (kg)	experim./teórica (%)
testemunho	1670	1578.86	105.8
reforçada	1720	1550.26	110.9

Observa-se que as cargas últimas experimentais foram ligeiramente superiores que as teóricas calculadas, segundo as hipóteses de cálculo adotadas. Este resultado apenas permite concluir que as lajes experimentais alcançam as resistências previstas. Não é possível extrapolar e afirmar que as mesmas ultrapassam a capacidade prevista por cálculo pois este experimento é único e desconhece-se a variabilidade do mesmo. Também, os valores adotados no cálculo para as propriedades do concreto e do aço e dimensões das peças podem não ser constantes e válidos para toda a peça, ao mesmo tempo que também estão sujeitos a variabilidades. Mesmo assim, pode-se considerar estes resultados como satisfatórios, uma vez que estão próximos do esperado, com variabilidade a favor da segurança. Em relação à diferença de comportamento entre laje reforçada e integra de concreto (testemunho), ambas alcançam igualmente as resistências esperadas, tendo a reforçada ultrapassado um pouco mais a carga esperada do que a testemunho. Porém, pelos mesmos motivos levantados acima, não se considerou tal diferença como relevante, concluindo-se apenas que o cálculo proposto permite estimar a capacidade de ambas situações. A Tabela 4.10 expressa com mais detalhes as diferenças entre testemunho e reforçada.

**Tabela 4.10** Relação entre laje testemunho e reforçada.

	testemunho	reforçada	reforç./testem. (%)
Carga experim.(kg)	1670	1720	103.0
Carga teórica (kg)	1578.86	1550.26	98.2



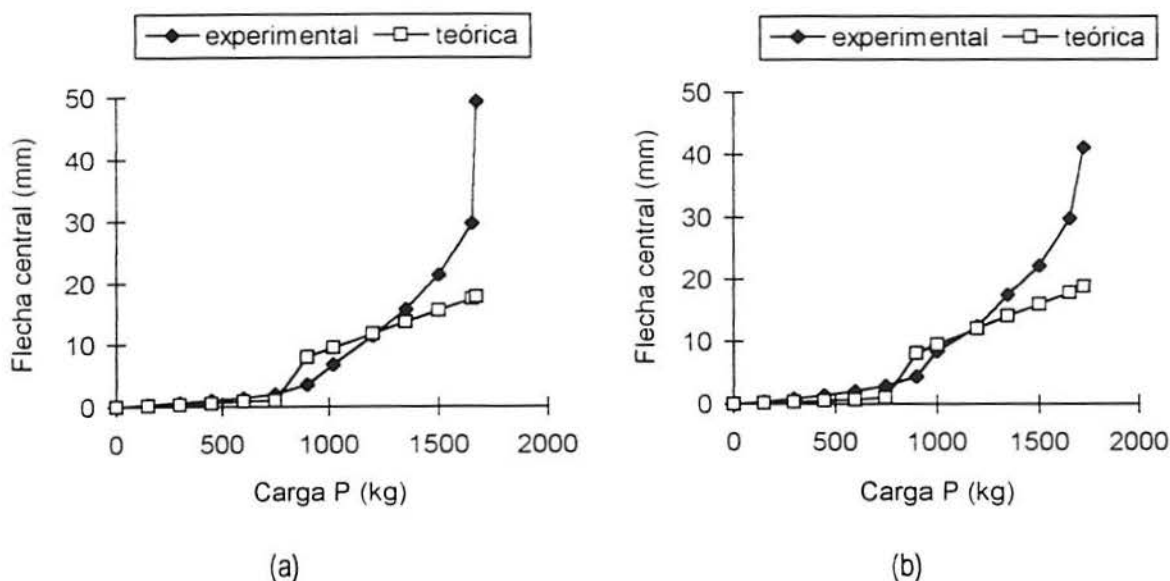
Por pequenas diferenças nas dimensões das peças, as cargas teóricas diferem ligeiramente. Considerando isto, a laje reforçada alcançou uma carga última superior que a testemunho, mas por uma vantagem de menos de 5%. Portanto, novamente, atribui-se tais diferenças como irrelevantes e não conclusivas, admitindo que laje reforçada e laje testemunho têm comportamento bastante próximo quanto às cargas últimas, evidenciando a eficiência do reforço executado. Com este resultado, evidencia-se que é possível compor uma determinada peça com a técnica proposta e alcançar uma resistência desejada, como se fosse uma peça íntegra de concreto.

Ressalta-se, contudo, que tais resultados satisfatórios valem para a situação ensaiada. Numa situação real todos os cuidados com a execução do reforço devem ser tomados para realmente alcançar-se tal eficiência e integralidade do reforço com a peça estrutural. Da mesma forma, recomenda-se cautela ao se especificar as resistências a alcançar com o reforço. Os resultados aqui apresentados são insuficientes para designarem recomendações de cálculo para lajes a serem reforçadas com argamassa com adições de sílica ativa, mas indicam um caminho a ser seguido.

As cargas de fissuração teóricas calculadas, como nas vigas, foram inferiores às experimentais, pois as fissuras passam a ser perceptíveis após ultrapassados estes limites.

#### 4.3.7.2 Deformações

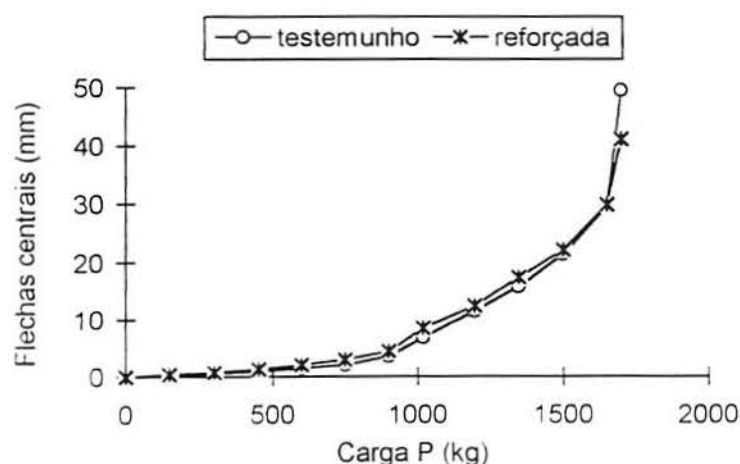
A Figura 4.18 apresenta as flechas centrais experimentais e teóricas em função da carga aplicada, para a laje testemunho e reforçada.



**Figura 4.18** Flechas centrais versus cargas aplicadas, para (a) laje testemunho e (b) reforçada.

Observa-se que em ambas lajes experimentais as flechas centrais até o estágio I do carregamento são superiores às calculadas pelo modelo adotado, mas crescem aproximadamente segundo uma reta semelhante a que se verifica nas calculadas. A partir de então as flechas

experimentais crescem gradativamente até valores bem excessivos, caracterizando a ruptura da peça. Neste estágio do carregamento, estágio II, que inicia a partir da carga de fissuração da peça e estende-se até bem próximo da ruptura, quando então passa a caracterizar o estágio III do carregamento, o modelo adotado não descreve muito bem o comportamento das deformações. Ao se passar para o estágio II no cálculo as flechas aumentam bruscamente, ultrapassando os valores experimentais, e passam a crescer progressivamente segundo uma reta, que em determinado carregamento equipara-se aos valores experimentais e a partir de então passa a dar valores inferiores aos mesmos, afastando-se em muito a medida em que se aproxima a ruína das peças. O modelo de cálculo adotado, neste estágio do carregamento, não descreve satisfatoriamente o desenvolvimento das deformações das peças, talvez por se aplicar mais a vigas de concreto armado e não tão bem a lajes armadas em uma só direção, além de ser um modelo simplificado para o cálculo de flechas centrais de curta duração. Contudo, se considerarmos que em utilização as peças serão submetidas no máximo até certo ponto do estágio II de carregamento, o modelo dá uma boa magnitude das deformações das peças, instantâneas. Próximo à ruína das peças, como em outros ensaios em peças estruturais, as deformações atingidas pelas peças são sempre excessivas e sua determinação requer cálculos complicados, não sendo objetivo deste trabalho. De qualquer forma, a Figura 4.19 apresenta as curvas de Flecha central experimental versus carga da laje testemunho e reforçada, e observa-se que são bastante semelhantes.



**Figura 4.19** Flecha central experimental versus carga aplicada, laje testemunho e reforçada.

Apesar das deformações da laje reforçada serem ligeiramente superiores do que as da laje testemunho, em determinados carregamentos, tal diferença não pode ser considerada como relevante novamente, pois tanto pode ser uma evidência da maior suscetibilidade a deformações da laje reforçada como variabilidade das peças ensaiadas. Mesmo assim, o comportamento de ambas é bastante semelhante e isto reforça novamente que laje testemunho, íntegra de concreto, e laje reforçada, têm comportamento semelhante e a eficiência do reforço executado fica mais uma vez comprovada.



#### 4.3.8 Conclusões

Assim como no ensaio de flexão de vigas, o resultado mais relevante num primeiro momento é a semelhança obtida entre a carga de ruptura da laje reforçada e a da testemunho. Ambas apresentaram cargas máximas muito próximas, o que comprova a eficiência do reforço executado. A diferença de menos de 5%, mesmo que a favor da laje reforçada, pode ser considerada como simples variabilidade do ensaio, uma vez que foram ensaiados apenas um exemplar de cada solução.

As deformações apresentadas por ambas as lajes foram igualmente semelhantes, o que evidencia novamente o desempenho da tecnologia adotada no reforço em conferir capacidade e integridade às peças, de forma que elas se comportam como um elemento íntegro. Não houve descolamento da argamassa mesmo após o aparecimento de fissuras.

Se compararmos os resultados experimentais com os valores teóricos calculados, pode observar-se que as cargas de ruptura experimentais foram superiores às calculadas. Isto, no entanto, não deve ser considerado como se a teoria não estivesse correspondendo à prática, pois estas pequenas diferenças podem bem ser apenas distorções do ensaio, e o mesmo fato ocorreu no ensaio com as vigas. Aceitou-se, portanto, que os valores experimentais foram semelhantes aos teóricos, a favor da segurança. Já quanto as deformações, observou-se que a metodologia adotada para o cálculo das mesmas não foi muito adequada. O cálculo das deformações foi efetuado segundo o modelo simplificado sugerido pelo CEB (CEB, 1985) para vigas de concreto armado, acreditando-se que bem se aplicaria às lajes armadas em uma só direção. Na prática, no entanto, verificou-se que as deformações tiveram comportamento bastante diferenciado do que o previsto segundo esta metodologia, principalmente a partir do momento em que se passa ao estágio II do carregamento. Considerar-se-á, então que as deformações de lajes armadas em uma só direção necessitam de um modelo mais preciso de cálculo, principalmente em estágios mais avançados do carregamento.

Os resultados deste ensaio devem também ser considerados em termos de que indicam um caminho a seguir ao se especificar reforços (ou reparos) de lajes com a agregação de novas armaduras e cobrimento com argamassa. A técnica aqui avaliada apresentou-se eficiente em aumentar a capacidade da laje, tal como se ela fosse íntegra de concreto. As propriedades da argamassa com adição de sílica ativa, mesmo que nem sempre beneficiadas pela adição, em comparação com argamassas sem adições, foram adequadas em integrar novas armaduras a um elemento de concreto armado, que passou a atuar como se íntegro fosse.

## 5 AVALIAÇÃO ECONÔMICA COMPARATIVA

Para que um material ou sistema de reparo seja viável, além de propriedades e características adequadas para as situações de aplicação, é necessário considerar o custo das soluções com este material ou sistema, para que realmente se saiba quais aplicações são as mais indicadas para o mesmo, em todos os sentidos. Considerando as possíveis aplicações que a argamassa com adição de sílica ativa pode ter, realizou-se uma análise econômica da sua utilização em comparação com outros materiais e técnicas que se aplicam às mesmas condições de reparo.

Para efetuar esta análise, elaborou-se dois exemplos fictícios de aplicação da argamassa e calculou-se os custos para execução dos serviços com a argamassa ou com outras técnicas indicadas. Os custos das soluções selecionadas foram elaborados pela equipe de orçamentos da empresa participante do programa de pesquisa que originou este trabalho, Elveco Engenharia Ltda., que atua no setor de recuperações estruturais e revestimentos especiais há mais de 10 anos. Como a empresa utiliza atualmente a argamassa com adição de sílica ativa como uma de suas soluções técnicas para reparos e reforços de estruturas de concreto armado, os custos puderam ser levantados com base na própria experiência da empresa com a aplicação do material, além das demais técnicas selecionadas.

Foi elaborado um caso de reforço em viga de concreto armado, onde uma taxa de armaduras longitudinais de tração deveria ser adicionada. Os custos para executar tal serviço foram levantados considerando o uso da argamassa como material de cobrimento e integração de barras de aço atadas à armadura de tração e transversal existente, o uso de concreto convencional como material de cobrimento e integração para barras de aço atadas da mesma forma, porém havendo a colocação de formas para gerar a nova seção, e com o uso de chapas de aço coladas com resina epóxi sobre a superfície da viga.

O outro caso analisado foi de um tanque de concreto armado enterrado, necessitando de revestimento protetor e armadura de reforço para combater fissuração de origem térmica. Neste caso, considerou-se a argamassa como material de cobrimento e revestimento, em comparação com concreto projetado por via seca para a mesma função.

Os custos foram calculados com base nos custos unitários praticados pela empresa em seus orçamentos. Foram feitas considerações práticas sobre os detalhes de cada aplicação. Não foi considerada nenhuma taxa de benefícios e despesas indiretas (BDI). A mão de obra foi calculada considerando todos os encargos trabalhistas. Não foram levados em consideração custos de mobilização e desmobilização, assim como custos relacionados às condições do local do serviço, pois estes custos dependem da situação de cada local de obra. Os custos unitários considerados referem-se a situações onde um volume razoável de cada serviço seria executado, para que os valores não fossem distorcidos pela pequena escala dos trabalhos analisados. Foram considerados custos de alimentação e transporte para a mão de obra.

Os valores que serão apresentados não devem ser entendidos como preços para estes serviços, mas simplesmente como custos de execução. Cada obra tem particularidades que geram custos ocasionais, e estes não foram aqui considerados. Os serviços orçados consideraram o trabalho isoladamente, sem condições de contorno a não ser aquelas realmente pertinentes. Os valores, em



moeda nacional, referem-se às cotações do mercado em dezembro de 1997. As cotações médias do dólar americano neste mês de referência é de R\$ 1,00 = US\$ 1,12.

Apresenta-se nas seções seguintes os custos elaborados pela empresa e a análise comparativa efetuada, que levou em consideração aspectos técnicos e práticos também.

## 5.1 REFORÇO DE UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO

Considerando um elemento de concreto armado com dimensões de 25 x 50 x 500 cm, bi-apoiado e com vão livre de 5 metros, definiu-se um reforço que deveria acrescentar 3,68 cm<sup>2</sup> de armaduras para concreto. Esta armadura poderia ser composta por três barras de Ø 12,5 mm ou chapa de espessura 2,63 mm e 14 cm de largura, por toda a extensão do vão da viga.

No caso das barras, a ligação deveria ser feita com arame recozido para concreto, conectando as mesmas à armadura existente da viga (longitudinal e estribos). O cobrimento definido deveria ser uma camada de argamassa de 3 cm sobre as barras, gerado uma espessura real de 4 cm, ou camada de igual espessura de concreto. A chapa deveria ser apenas colada à face inferior da viga. Estas três soluções foram consideradas como equivalentes no que diz respeito ao desempenho mecânico.

Não foram considerados custos de escoramento e alívio da estrutura adjacente para a execução do reforço, pois tal custo seria o mesmo para as três soluções. Foi orçado o custo para a realização do reforço de três vigas, para que os consumos fossem mais significativos, principalmente de mão de obra. Foram definidas equipes ótimas para a realização dos serviços com base na experiência da empresa.

Apresenta-se a seguir os custos parciais e globais para a execução das três soluções de reforço. O custo global é obtido considerando alguns arredondamentos, em função de considerações práticas da empresa.

### 5.1.1 Reforço com cobrimento de argamassa com adição de 10% de sílica ativa

#### a) Preparo da superfície:

Mão de obra:	apicoamento manual - 0,75 m <sup>2</sup> /dia/servente: 1,67 dias	
	para acesso e instalação de andaime: 0,33 dias de servente	
	equipe: 1 servente por 2 dias.....	Valor: R\$ 39,60
Material:	ferramentas - verba.....	Valor: R\$ 10,00
	andaimés(aluguel) e prachas (Valor R\$ 66,92)	
	Considerando reaproveitamento para as três vigas.....	Valor: R\$ 22,31

## b) Colocação da armadura de reforço:

Mão de obra:	equipe: 1 profissional por 0,5 dia.....	Valor: R\$ 14,52
Material:	3 Ø12,5 mm - 15 metros de aço CA 50-A.....	Valor: R\$ 13,04
	Arame recozido - verba.....	Valor: R\$ 1,00

## c) Aplicação da argamassa de cobrimento:

Mão de obra:	equipe: 1 profissional - 0,5 dia	
	1 servente - 0,5 dia.....	Valor R\$ 24,42
Material:	considerados 5 cm de espessura de argamassa - 0,0625 m <sup>3</sup>	
	Custo: R\$ 200,00/m <sup>3</sup> .....	Valor R\$ 12,50
	10 m de guias de 15 x 2,5 cm - 1,23 m (Valor R\$ 12,30)	
	6 grampos metálicos - 3,75 kg (Valor R\$ 3,15)	
	Considerando reaproveitamento para as três vigas.....	Valor R\$ 5,15

O orçamento total para executar 3 vigas, no prazo de 7 dias, considerando o acompanhamento de 1 encarregado e supervisão técnica, somadas as despesas com alimentação e transporte da mão de obra:

Mão de obra:	40 horas-encarregado, 30 horas-profissional, 80 horas-servente: R\$ 656,46
Materiais:	R\$ 191,99
Supervisão técnica:	R\$ 600,00
Total:	R\$ 1448,48

**5.1.2 Reforço com cobrimento de concreto convencional (com formas)**

## a) Preparo da superfície: mesmos custos da solução com argamassa

Mão de obra:	R\$ 39,60
Material:	R\$ 32,31

## b) Colocação da armadura: mesmos custos da solução com argamassa

Mão de obra:	R\$ 14,52
Material:	R\$ 14,04

## c) Formas:

Mão de obra:	equipe: 1 profissional - 1 dia	
	1 servente - 1 dia.....	Valor: R\$ 48,84



Material: 3,03 m<sup>2</sup> de compensado, 12,10 m de sarrafo de 7 cm, 30,00 m de sarraio de 5 cm,  
0,75 kg de pregos, escoramento adicional (Valor: R\$ 49,22)

desmoldante - verba (Valor R\$ 10,00)

Considerando reaproveitamento para as três vigas..... Valor: R\$ 19,74

d) Concretagem:

Mão de obra: equipe: 2 profissionais - 0,5 dia

3 serventes - 0,5 dia..... Valor: R\$ 58,74

Material: considerados 5 cm de espessura e 30 cm de largura - 0,075 m<sup>3</sup> de concreto

Custo: R\$ 200,00/m<sup>3</sup>..... Valor: R\$ 15,00

Orçamento total para executar 3 vigas, em um prazo de 10 dias, com 1 encarregado e supervisão técnica, somando despesas com transporte e alimentação da mão de obra:

Mão de obra: 60 horas-encarregado, 100 horas-profissional, 170 horas-servente: R\$ 1.228,94

Materiais: R\$ 243,26

Supervisão técnica: R\$ 850,00

Total: R\$ 2.322,20

### 5.1.3 Reforço com chapa colada com adesivo epoxi

Para este caso, em função da necessidade de um serviço de terceiros e de limitação quanto às quantidades disponíveis de adesivo (embalagens), realizou-se o orçamento para as três vigas em conjunto.

a) Preparo da superfície e da chapa:

Serviço: jateamento com areia

1,25 m<sup>2</sup> fundo da viga

0,70 m<sup>2</sup> chapa..... Valor: R\$ 150,00

b) Colagem da chapa:

Mão de obra: equipe: 2 profissionais - 2 dias

2 serventes - 2 dias..... Valor: R\$ 195,36

Material: Chapa - 1,65 m<sup>2</sup> - custo: R\$ 38,01/m<sup>2</sup>..... Valor: R\$ 79,82

Adesivo - 68,13 kg (primers e resina)..... Valor: R\$ 480,94

Sargentos, cunhas - verba..... Valor: R\$ 50,00

Frete para o adesivo..... Valor: R\$ 61,00

Orçamento total para executar as 3 vigas, no prazo de 5 dias, com um encarregado e supervisão técnica, somando despesas com alimentação e transporte da mão de obra:

Mão de obra: 40 horas-encarregado, 80 horas-profissional, 80 horas-servente: R\$ 845,36

Materiais: R\$ 821,76

Supervisão técnica: R\$ 600,00

Total: R\$ 2.267,12

#### 5.1.4 Análise comparativa

A tabela 5.1 resume os valores obtidos para cada solução orçada.

**Tabela 5.1** Comparação dos custos das três soluções de reforço de viga.

	Argamassa com 10% sa	Concreto convencional	Chapa colada
Mão de obra	R\$ 656.46	R\$ 1228.94	R\$ 845.36
Materiais	R\$ 191.99	R\$ 243.26	R\$ 821.76
Subtotal	R\$ 848.45	R\$ 1.472.20	R\$ 1.667.12
Supervisão técnica	R\$ 600.00	R\$ 850.00	R\$ 600.00
<b>Total</b>	<b>R\$ 1.448.48</b>	<b>R\$ 2.322.20</b>	<b>R\$ 2.267.12</b>
Prazo de execução	7 dias	10 dias	5 dias
Relação à mais barata	100.00%	160.32%	156.52%

Como pode-se observar, a solução com cobertura de argamassa com sílica ativa resultou na de menor custo, principalmente por consumir menos mão de obra. O prazo de execução foi intermediário. A solução com concreto convencional resultou na mais onerosa, pelo consumo de mão de obra necessário à confecção das formas, principalmente. Fato que gerou a necessidade de maior prazo para execução, pela necessidade de montar e desmontar as formas, e obter ganhos com o reaproveitamento. A solução com chapa colada teve um custo ligeiramente inferior ao da solução com concreto convencional. Este valor foi gerado principalmente pelo alto custo do adesivo. A mão de obra teve uma participação média no custo, pois uma parte dela referiu-se a serviços especializados de terceiros. Mas o prazo de execução foi menor, pela simplicidade que a aplicação tem, além da rapidez com que o material adquire suas propriedades.

Em termos práticos, se não há uma exigência de prazos menores, a argamassa constitui-se na mais atrativa, principalmente por que seu custo foi significativamente inferior às demais. Deve-se observar, no entanto, que ganhos de escala são difíceis de se obter nesta situação específica, pois a mão de obra consumida será diretamente proporcional ao volume do serviço, assim como o consumo de materiais. Esta solução implica num aumento da seção das peças, o que em certos casos de aplicação



não é admitido. Contudo, constitui-se numa solução completa e final, pois não requer acabamentos ou proteções, apenas um tratamento estético simples como pintura.

A solução com chapa colada revela-se interessante em termos do prazo de execução. Realmente, constitui-se numa solução que se caracteriza pela rapidez de execução, se forem desconsiderados o período de transporte necessário do material do fabricante (não se dispõem no Rio Grande do Sul) até a obra, e a disponibilidade do serviço de jateamento, que também requer um período para transporte e instalação na obra. Por estes aspectos, esta solução apresenta a possibilidade de ter ganhos de escala, uma vez que os custos com os transportes necessários diluem-se quando há um volume maior de serviço a executar. Mas o elevado custo do material, e a necessidade de se proteger a chapa posteriormente, aqui não considerada, fazem desta solução uma alternativa somente para quando há necessidade de rapidez de execução e pouca alteração na seção das peças.

A solução com concreto convencional se mostrou a menos atrativa. Foi a mais onerosa, igualmente não permite muitos ganhos de escala e implica no aumento da seção das peças. Demanda mais tempo, pois há mais tarefas a executar, sem falar na necessidade de um acabamento posterior, pois é preciso concretar uma seção maior que a necessária para que se consiga fazer o preenchimento da forma. Após a desforma, o excesso deve ser removido e a superfície deve ser reparada. Pode-se dizer que não é uma técnica recomendada para este tipo de reforço, pois seu desempenho também pode ser questionado em função da dificuldade de se garantir que o concreto preencheu toda a seção necessária.

Portanto, neste tipo particular de reparo, o reforço e revestimento de uma viga de concreto armado, o uso de argamassa com adição de sílica ativa parece ser uma alternativa viável e atrativa, dado que seu desempenho técnico e econômico na situação proposta foi comprovado neste trabalho.

## 5.2 REVESTIMENTO E REFORÇO DE TANQUE DE CONCRETO ARMADO

Considerando-se um tanque de concreto armado, enterrado, com dimensões internas de 3 x 7 x 1,80 metros, definiu-se um reparo que consistia em revestir a superfície do tanque, agregando-se uma malha de reforço. A malha seria composta por  $\varnothing$  4,2 mm, disposta a cada 15 x 15 cm.

Como alternativas para o revestimento, avaliou-se o custo de revestir com a argamassa com adição de 10% de sílica ativa, aplicada manualmente, em comparação com concreto projetado. Para as duas soluções foi definida uma espessura de 3 cm de revestimento, sendo que foi considerado um acréscimo de 10% a título de desperdício, para ambos os casos.

Para a solução com concreto projetado considerou-se a locação e transporte do equipamento e operadores, pois o mesmo não é disponível pela empresa e demais estabelecimentos do gênero no Rio Grande do Sul. A fixação da tela seria feita por meio de tarugos conectados à armadura existente.

Apresenta-se a seguir os custos das duas soluções.

### 5.2.1 Revestimento com argamassa com 10% de sílica ativa

#### a) Preparo da superfície:

Mão de obra: apicoamento manual: 1,2 m<sup>2</sup>/homem.dia - R\$ 18,00/m<sup>2</sup> + despesas com alimentação e transporte (R\$ 6,76/homem.dia). Área do tanque: 47 m<sup>2</sup>. Necessários 40 homem.dias (47m<sup>2</sup> / 1,2m<sup>2</sup>/homem.dia).

47m<sup>2</sup> x 18,00 = R\$ 846,00

40 dias x 6,76 = 270,40 (despesa com alimentação e transporte)

Serviço de apicoamento - total..... Valor: R\$ 1116,40

Material: ferramentas (ponteiras, marreta, talhadeiras) - verba..... Valor: R\$ 250,00

#### b) Colocação da tela:

Mão de obra: corte: 1 profissional - 1 dia

1 servente - 1 dia

colocação: 1 profissional - 2 dias

3 serventes - 2 dias

Total: 70 horas de servente (Valor: R\$ 138,60)

30 horas de profissional (Valor: R\$ 87,12)..... Valor: R\$ 225,72

Despesas com alim. e transporte: 10 homem.dia..... Valor: R\$ 67,60

Material: Furadeira: R\$ 20,00/dia de locação - 3 dias..... Valor: R\$ 60,00

tarugos de aço - 2,60 kg..... Valor: R\$ 6,56

brocas: 2 unidades - R\$ 98,00/un..... Valor: R\$ 196,00

Tela soldada: 47 m<sup>2</sup> + 5% quebra - R\$ 2,10/m<sup>2</sup>..... Valor: R\$ 103,64

#### c) Aplicação da argamassa:

Mão de obra: produtividade lançamento manual: 10 m<sup>2</sup>/homem.dia

2 profissionais - 2,5 dias..... Valor: R\$ 145,20

4 serventes - 2,5 dias..... Valor: R\$ 198,00

Despesas com alim. e transporte: 18 homem.dia..... Valor: R\$ 121,68

Material: argamassa - 3 cm + 10% - 1,551 m<sup>3</sup> - R\$ 127,78/m<sup>3</sup>..... Valor: R\$ 198,18

O orçamento total para executar o serviço num prazo de 18 dias, considerando uma equipe ótima, com a supervisão de um encarregado mais supervisão técnica e despesas com alimentação e transporte da mão de obra:



Mão de obra: 120 horas - encarregado, 130 horas - profissional, 270 horas - servente, 400 horas - cortador: R\$ 2.832,92

Materiais: R\$ 814,38

Supervisão técnica: R\$ 1.750,00

Total: R\$ 5.397,30

## 5.2.2 Revestimento com concreto projetado

a) Preparo da superfície: idêntico à solução com argamassa

Mão de obra: R\$ 1.116,40

Material: R\$ 250,00

b) Colocação da tela: idêntico à solução com argamassa

Mão de obra: R\$ 225,72

Material: R\$ 366,20

c) Projeção do concreto:

Mão de obra: 1 profissional - 1 dia..... Valor: R\$ 29,04

2 serventes - 1 dia..... Valor: R\$ 39,60

Despesas alim. e transporte: 3 homem.dia..... Valor: R\$ 20,28

2 operadores - 1 dia - R\$ 250,00/dia..... Valor: R\$ 500,00

Material e equipamento:

equipamento: R\$ 500/dia - 4 dias..... Valor: R\$ 2.000,00

compressor: R\$ 150,00/dia - 3 dias..... Valor: R\$ 450,00

diesel: 14 l/h..... Valor: R\$ 56,00

frete local..... Valor: R\$ 100,00

concreto - 3 cm + 10% - 1,551 m<sup>3</sup>..... Valor: R\$ 114,90

O orçamento total para executar o serviço em 14 dias, considerando um equipe ótima, com o acompanhamento de um encarregado e supervisão técnica, mais despesas com alimentação e transporte para a mão de obra:

Mão de obra: 90 horas - encarregado, 40 horas-profissional, 90 horas - servente, 400 horas-cortador, 2 operadores: R\$ 2.717,38

Materiais e equipamentos: R\$ 3.337,10

Supervisão técnica: 1.350,00

Total: R\$ 7.404,48

### 5.2.3 Análise comparativa

A tabela 5.2 apresenta um resumo dos custos de cada solução.

**Tabela 5.2** Comparação dos custos de revestimento e reforço do tanque.

	Argamassa com 10% sa	Concreto projetado
Mão de obra	R\$ 2.832,92	R\$ 2.717,38
Materiais	R\$ 814,38	R\$ 3.337,10
Subtotal	R\$ 3.647,30	R\$ 6.054,48
Supervisão técnica	R\$ 1.750,00	R\$ 1.350,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 5.397,30</b>	<b>R\$ 7.404,48</b>
Prazo de execução	18 dias	14 dias
Relação à de menor custo	100,00%	137,19%

Observa-se que a solução com o revestimento de argamassa com sílica ativa resultou na de menor custo, principalmente quanto a materiais e equipamentos. O custo do aluguel e transporte da máquina de projeção, que nem foi considerado como transporte interestadual, encarece em muito o custo da solução com revestimento de concreto projetado.

O custo da mão de obra para as duas soluções foi semelhante, mas ao observar-se o que compôs este custo, verifica-se que a solução com argamassa consome mais mão de obra simples, serventes e profissionais (pedreiros), e que o tempo para executar o serviço é maior também. Para o concreto projetado, além da necessidade do equipamento é necessário operadores específicos e treinados, mão de obra mais qualificada e onerosa. Mas o tempo para executar o revestimento é menor, pois a projeção de concreto é feita em poucas horas.

Estes comentários destacam um aspecto da aplicabilidade da argamassa como material a ser lançado manualmente por pedreiros. Para pequenas áreas, esta atividade pode ser muito mais atrativa em termos do custo e facilidade de execução, pois empregados comuns da construção podem ser utilizados, e o tempo para executá-la é satisfatório. A medida em que a área a ser revestida for aumentando, esta solução começa a se tornar onerosa por ter um consumo de mão de obra diretamente proporcional ao volume do trabalho, e toma tempo de execução também diretamente proporcional ao volume do trabalho. Portanto, é uma atividade que, para estas situações de reparo, se aplica com vantagens até certa quantidade de área, ou quando não se dispõem de equipamento e operadores especializados.



Para grandes áreas, o concreto projetado torna-se atrativo por que o custo do equipamento e operadores se dilui no custo do serviço global, ainda mais que esta técnica permite uma produtividade muito grande. Mas o consumo de material, o concreto no caso, será maior devido aos desperdícios que ocorrem com esta técnica pela reflexão (*rebound*), de 30 a 50% às vezes, que com a argamassa é inferior e pode ser mais facilmente controlado. Nesta análise considerou-se a mesma taxa de perdas (10%) para ambas soluções.

Estas observações indicam uma potencialidade importante para as argamassas com adição de sílica ativa. Elas são particularmente interessantes como solução para reparos de pequena e média escala, ou onde não há disponibilidade de equipamentos e mão de obra especializada. As referências encontradas na literatura (capítulo 2) confirmam esta tendência.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÕES

O programa experimental que foi conduzido neste trabalho possibilitou obter-se uma boa avaliação do comportamento de argamassas com adições de sílica ativa quando utilizadas em reparos de estruturas de concreto armado, validando as expectativas levantadas a partir da revisão bibliográfica.

Na primeira parte do programa, conforme foi exposto no item 3.5, observou-se principalmente que as argamassas apresentam propriedades mecânicas e de durabilidade adequadas ao emprego como material de reparo. Salientou-se que o efeito das adições de sílica ativa em argamassas às vezes é diferente do que no concreto, principalmente pela ausência do agregado graúdo. O refinamento de poros que a sílica ativa promove manifestou-se também nas argamassas, mas nem sempre este refinamento provocou efeitos significativos em propriedades que não dependem exclusivamente deste aspecto. Em geral, nas propriedades mecânicas o efeito da sílica ativa não é muito destacado. Seus maiores benefícios ocorrem em aspectos relacionados à durabilidade, traduzidos em termos de porosidade e permeabilidade a agentes degradantes das estruturas. A adição de até 10% de sílica ativa é responsável por um incremento importante no desempenho das mesmas, principalmente frente aos agentes envolvidos na corrosão das armaduras. O traço que se considerou mais adequado ao emprego como material de reparo, tanto por aspectos de desempenho como de custo e aplicabilidade, foi o traço com 10% de adição e relação água/aglomerante 0,55.

Nos ensaios que avaliaram aspectos do comportamento em uso da argamassa selecionada, na segunda parte do programa experimental, observa-se que a argamassa, quando utilizada como material que recobre armaduras e reveste a superfície de um elemento de concreto armado, comporta-se adequadamente frente às solicitações mecânicas que são aplicadas. Verificou-se que o comportamento de elementos reforçados com novas armaduras, atadas às existentes por amarração com arame e revestidas com a argamassa com sílica ativa, apresentam desempenho à flexão semelhante ao de elementos de mesmas dimensões e capacidades, totalmente em concreto. Especificamente, a aderência de barras de armadura colocadas sobre superfícies de concreto endurecido e cobertas com argamassa revelou-se a mesma de barras inteiramente mergulhadas no concreto, nas tensões de serviço. O comportamento dos elementos reforçados submetidos à flexão pode ser previsto com os procedimentos de cálculo disponíveis para elementos totalmente em concreto.

Mesmo que não estudadas a fundo neste trabalho, as condições de preparo do substrato e mistura e aplicação das argamassas foram identificadas como fatores determinantes do desempenho das mesmas e da técnica proposta de utilizá-las como material de revestimento e preenchimento de elementos de concreto armado.

Estes resultados levam a crer que o uso de argamassas com adições de sílica ativa pode ser indicado para inúmeras situações de reparos ou reforços, com vantagens em termos de desempenho superiores a outras técnicas e materiais. Na análise econômica realizada, verificou-se que o uso da argamassa como material para revestimento e cobrimento de armaduras em estruturas de concreto é especialmente indicado para serviços de pequena e média extensão, ou quando não se dispõem de



equipamentos e mão de obra especializada. A facilidade de preparo e aplicação da argamassa, sem falar no baixo custo, tornam-na muito atrativa para diversas situações de uso.

Confirmando-se as hipóteses colocadas no início deste trabalho, pode-se dizer que é viável utilizar argamassas com adições de sílica ativa em reparos ou reforços de estruturas de concreto armado. A técnica de aplicar a argamassa com sílica ativa sobre superfícies apicoadas de concreto endurecido, quer seja para protegê-lo ou para integrar novas barras de armaduras, demonstrou-se viável neste trabalho, permitindo que se coloque esta aplicação das argamassas como mais uma alternativa para reparos desta natureza.

## 6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Primeiramente, como os resultados deste trabalho aplicam-se somente aos traços que foram estudados, vale estender o estudo de certas propriedades a outras relações água/aglomerante e teores de adição de sílica ativa, principalmente de 5 a 15%. Buscar traços com menor consumo de cimento também é indicado, para reduzir problemas relacionados à retração e calor de hidratação, além de custos.

Diversos aspectos do desempenho de um material de reparo merecem ser estudados para que se valide totalmente seu uso. Destaca-se, considerando o caso das argamassas de cimento Portland, os seguintes aspectos e propriedades:

**a) Retração por secagem:** sendo a retração por secagem às vezes responsável pela perda de aderência de argamassas a substratos de concreto endurecido, é imprescindível estudar sua magnitude e formas de controle nas argamassas com adições de sílica ativa. Para os traços com relação água/aglomerante 0,55 o fenômeno não foi percebido, mas para os de relação 0,35 foi verificada fissuração característica oriunda deste fenômeno.

**b) Aderência:** avaliou-se esta propriedade somente sob duas solicitações, cisalhamento com compressão e à tração direta. Outras solicitações devem ser investigadas, além de se buscar métodos de avaliação mais eficientes, não tão sujeitos a variações. A durabilidade da aderência com o passar do tempo, mais importante do que a própria, deve ser investigada a fundo, até porque estudos que envolvem a durabilidade de soluções para reparos são escassos. O coeficiente de dilatação térmica das argamassas deve ser quantificado, pois pode se relacionar com a durabilidade da aderência sobre determinados substratos, se for muito diferente do material dos mesmos.

**c) Condições do substrato:** avaliou-se somente substratos de concreto apicoados e parcialmente saturados, em todos os ensaios que envolveram a preparação do substrato de aplicação. Estudar outras formas de preparo da superfície, como o jateamento com areia ou água, são indicados para que se obtenha mais opções para executar esta etapa de um reparo ou reforço. Avaliar se o estado de saturação tem influência sobre a aderência das argamassas também é recomendável, pois não há ainda um consenso na literatura.

**d) Comportamento de elementos reparados:** além das situações aqui investigadas, outras situações de uso das argamassas devem ser avaliadas para se detectar todas as suas potencialidades de reparo:

como revestimento de pisos, reparos em pilares, reparos onde a argamassa é solicitada à compressão, etc. Além disso, o comportamento de elementos reparados sob esforços dinâmicos também requer estudos, pois somente foram avaliadas propriedades estáticas.

**e) Durabilidade frente a agentes agressivos e degradantes:** mesmo que os ensaios aqui realizados permitem que se compreenda o comportamento da argamassa frente a outras ações degradantes das estruturas de concreto armado, são necessários estudos que avaliem seu desempenho frente à ação de outros agentes químicos, como sulfatos e ácidos, ação de gelo e degelo, abrasão e erosão, reação álcali-agregado, fogo, ação de microorganismos, variações térmicas e fluência.

Estas e outras sugestões podem complementar este trabalho, assegurando a viabilidade do uso de argamassas com sílica ativa como material para reparo de estruturas de concreto armado, destacando talvez outras potencialidades para o material que se propõe.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 226. Silica fume in concrete. *ACI Materials Journal*. v.84, n.2. March/April 1987. p. 158-166.
- ALLEN, R.T.L. Cements and aggregates. In: *The repair of concrete structures*. Blackie. Glasgow. 1987a. p.33-36.
- ALLEN, R.T.L. Damage occurring during construction. In: *The repair of concrete structures*. Blackie. Glasgow. 1987b. p.1-14.
- ALLEN, R.T.L. Investigations and Diagnosis. In: *The repair of concrete structures*. Blackie. Glasgow. 1987e. p.15-31.
- ALLEN, R.T.L. Large-volume repairs. In: *The repair of concrete structures*. Blackie. Glasgow. 1987c. p.92-98.
- ALLEN, R.T.L. Spalled concrete: hand-applied repairs. In: *The repair of concrete structures*. Blackie. Glasgow. 1987d. p.64-72.
- ALLEN, R.T.L.; EDWARDS, S.C. Repairs to cracked concrete. In: *The repair of concrete structures*. Blackie. Glasgow. 1987. p.53-63.
- AMARAL FILHO, E. M. **Concreto de alta resistência**. São Paulo. 1988. Texto datilografado.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1990. Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens: G1.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1991. Standard test method for comparing concretes on the basis of bond developed with reinforcing steel: C 234-91a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1994. Standard test method for Static Modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression: C 469-94. v.4.2.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1991. Standard especification for Epoxi-Resin-Base systems for concrete: C 881, 5p. [s.v.]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1991. Standard test method for bond strength of Epoxi-Resin systems used with concrete by Slant shear: C 882, 3p. [s.v.]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1991. Standard test method for bond strength of Latex systems used with concrete by Slant shear: C 1042, 2p. [s.v.]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1991. Standard especification for Latex agents for bonding fresh to hardened concrete: C 1059. 1p. [s.v.]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards**. Philadelphia. 1991. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration: C 1202, 6p. [s.v.]
- ANDRADE, J.; DAL MOLIN, D. Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região nordeste. In: 38ª Reibrac - Ibracon. Ribeirão Preto. 1996. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1996. p. 217-228.
- ANDRES, P.R. A influência da natureza do aglomerante e suas adições na carbonatação de argamassas e concretos. In: Reforços, reparos e proteção das estruturas de concreto. IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção. EPUSP, São Paulo. **Anais...** São Paulo: PINI, 1989. p.19-44.
- ANQI, L. et al. Study on corrosion prevention in reinforced concrete containing condensed silica fume and its application. In: Durability of concrete - SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, Montreal. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. p.499-510. (SP126).
- ARANHA P.M.S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. Porto Alegre, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia a ser concluído) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado - determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.



- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - determinação da absorção de água em agregados miúdos**: NBR 9777. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman**: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas de concreto - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação de perda ao fogo**: NBR 5743. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação de resíduo insolúvel**: NBR 5744. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação de anidrido sulfúrico**: NBR 5745. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação de enxofre na forma de sulfeto**: NBR 5746. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação da resistência à compressão**: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol**: NBR 7227. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira número 200**: NBR 11579. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - determinação dos tempos de pega**: NBR 11581. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland comum e clínquer - análise química por complexidade**: NBR 9203. Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de alta resistência inicial**: NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica**: NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da área específica**: NBR 7224. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Confecção e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos**: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação das propriedades mecânicas à tração**: NBR 6152. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 1980.
- BASS, R.A. et al. Shera transfer across new and existing concrete interfaces. *ACI Structural Journal*, v.86, n.4, July/Aug., 1989.
- BAUER, E. Parâmetros e grandezas de importância no estudo da evolução da corrosão das armaduras no concreto. In: 38ª Reibrac - Ibracon. Ribeirão Preto, 1996. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 1996. p.413-426.
- BERKE, N.S. et al. Long-term corrosion resistance of steel in silica fume and/or fly ash containing concretes. In: *Durability of concrete - SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE*, Canada, 1991. *Proceedings...* Canada, 1991. v.1. p.393-422. (SP 126).
- BUCHER, H.R.E. **Parâmetros que caracterizam e influem sobre as propriedades mecânicas, elásticas e volumétricas de argamassas de cimento Portland**. São Paulo, 1989. Associação Brasileira de Cimento Portland, 1989.
- CAMPAGNOLO, J.L. Estudo da influência da aplicação de revestimentos no controle da corrosão. IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. Porto Alegre, 1997. *Anais...* Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997. v2, p.563-570.
- CÂNOVAS, M.F. **Patologia e terapia do concreto armado**. Tradução de L..A. Falcão Bauer e outros. São Paulo: PINI, 1988.



- CARETTE, G.G.; MALHOTRA, V.M. Long-term strength development of silica fume concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SLAG AND SILICA FUME AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 4., Istanbul, Turkey, 1992. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1993. v.2, p.1017-1044 (SP 132).
- CARNEIRO, E.F. et al. Avaliação do desempenho dos reparos executados na soleira do vertedouro da UHE Porto Primavera. In: 38ª Reibrac - Ibracon. Ribeirão Preto, 1996. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1996. p.393-398.
- CEB - Comité Euro-Internacional du Béton. **Bulletin D'Information no. 158**. Paris: CEB, 1985.
- CHAN, S.T. et al. A classification and quality system for concrete repair mortars. In: EVALUATION AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN, 1991. Hong Kong. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. 2v. v.1, p.577-591 (SP 128).
- CLÍMACO, J.C.T.S. Uma análise crítica dos métodos de avaliação de aderência e uso de agentes adesivos no reparo de estruturas de concreto. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 25, 1991, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1991.
- CLÍMACO, J.C.T.S. **Repair of structural concrete involving the addition of new concrete**. London, 1990. PhD. thesis. Faculty of Engineering, The Polytechnic of Central London, 1990.
- COMITE BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, CB-02. **Projeto 02:102.17-001. Revestimento de paredes e/ou tetos em argamassas inorgânicas-especificação**. ABNT, Rio de Janeiro, 1995.
- COMITE BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO CIVIL, CB-02. **Projeto 02:102.17-003. Revestimento de argamassas inorgânicas de paredes e tetos- determinação da resistência de aderência à tração**. ABNT, Rio de Janeiro, 1995.
- CSTB - Centre Scientifique et Technique du Béton. **DSTU 26.1**. 1978.
- DAL MOLIN, D.C. Incidência de manifestações patológicas em edificações de concreto armado. In: Reforços, reparos e proteção das estruturas de concreto. IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, São Paulo, 1989. **Anais...** São Paulo: PINI, 1989. p.265-278.
- DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas de concreto de alta resistência com adições de microssilica**. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.
- EDWARDS, S.C. Surface coatings. In: **The repair of concrete structures**. Blackie. Glasgow. 1987. p.118-144.
- EMBERSON, N.K.; MAYS, G.C. Significance of property mismatch in the patch repair of structural concrete, Part 3: Reinforced concrete members. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 174, March, 1996.
- FEDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNE. **Condensed Silica Fume in Concrete**. London: Thomas Telford, 1988. 35p.
- FERNADES, G.B.; FUSCO, P.B. O desempenho das armaduras na resistência ao cisalhamento nas vigas de concreto de alta resistência. In: International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis. 1996. **Anais...** Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. p.330-341.
- FIGUEIREDO, A.D. Metodologia de avaliação do desempenho de grautes. In: Reforços, reparos e proteção das estruturas de concreto. IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção. São Paulo, 1989. **Anais...** São Paulo: PINI, 1989. p.45-66.
- FIGUEIREDO, E.J.P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para a proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas: contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado**. São Paulo, 1994. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- GILBRIDE, P. et al. Performance of shotcrete repairs to the Berth faces at the Port of Saint John. In: Odd E. Gjorv symposium on concrete for marine structures. St. Andrews-by-the Sea. 1996. **Proceedings...** CANMET, 1996. p.163-174.
- GJORV, O.E. High-strength concrete. In: **Advances in concrete technology**. Ottawa, 1994 Canada: CANMET, 1994. p.19-82 .2 ed.
- GJORV, O.E. Properties of silica fume. In: INTERNATIONAL WORK SHOPS ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME AND OTHER SILICEOUS MATERIALS IN CONCRETE, Australia, 1988. **Proceedings...** Australia, 1988. p. 230-251.
- GJORV, O.E. et al. Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.87, n.6, p.573-580, 1990.



- GOULART NETO, A.A. et al. Reparos com argamassa de cimento e microssilica. . In: 38ª Reibrac - Ibracon. Ribeirão Preto. 1996. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1996. p.585-600.
- GOWRIPALAN, N.; PILLAR, N. Advanced shotcrete technology in Australia. In: International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis. 1996. **Proceedings...** Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. p.445-454.
- HELENE, P.R.L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2.ed. São Paulo: PINI, 1992. 213p.
- HELENE, P.R.L. et al. Influência do tipo de cimento e da relação a/c na carbonatação do concreto. in: 37ª Reibrac - Ibracon. Goiânia, 1995. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1995.
- HOFF, G.C. Concrete for offshore structures. In: **Advances in concrete technology**, Ottawa, 1994. Canada: CANMET, 1994. 2ed.
- IOPPI, P.R. **Estudo da aderência de argamassas de revestimento em substratos de concreto**. Florianópolis, 1995. Dissertação (mestrado em engenharia). Universidade federal de Santa Catarina, 1995.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Método de ensaio ME-10**. São Paulo, 1981.
- KAZMIERCZAK, C.S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. São Paulo, 1995. 168p. Tese (doutorado em Engenharia). EPUSP, Universidade de São Paulo.
- KAZMIERCZAK, C.S. Metodologia para seleção de sistemas de pinturas para superfícies externas de concreto. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCION Y CONTROL DE CALIDAD, 1. Y 3., 1991, Cordoba, Argentina. **Anais...** Cordoba: COMPAT, 1991. v2.
- KHAYAT, K.H.; BALLIVY, G. High performance cement grout for underwater crack injection. In: Odd E. Gjorv symposium on concrete for marine structures. St. Andrews-by-the Sea. 1996. **Proceedings...**Ottawa: CANMET, 1996. p.138-162.
- KULAKOWSKI, M.P. **Argamassa com adição de microssilica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos**. Porto Alegre, 1994. 129p. Dissertação (mestrado em engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LAMB, R.W. International developments in materials and methods for the repair of concrete. In: Reforços, reparos e proteção das estruturas de concreto. IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, São Paulo, 1989. **Anais...** São Paulo: PINI, 1989. p.125-172.
- LAMBE, R.W.; HUMPHREY, M.J. Developments of materials for repair and protection of reinforced concrete. In: **CORROSION of reinforcement in concrete**. London: SCI & Elsevier Applied Science. 1990. p.471-484.
- LANGLEY, W.S.; LEAMAN, G.H. Concrete for underwater concreting operations. In: Odd E. Gjorv symposium on concrete for marine structures. **Proceedings...** St. Andrews-by-the Sea. 1996. Ottawa: CANMET, 1996. p.235-258.
- LIMA, M.G. Corrosão de armaduras: método de ensaio comparativo. In: Simpósio sobre patologia das edificações: prevenção e recuperação. Porto Alegre, 1989. **Anais...** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989. p.104-117.
- LOLAND, K.E. **Silica fume in concrete**. Trondheim: Norwegian Institute of Tecnology, 1981. 32p. (Technical Report, STF 065813).
- MAAGE, M; SELLEVOLD, E.J. Effects of microsilica on the durability of concrete structures. **Concrete International**, v.9, n.12, p.39-43. Dec. 1987.
- MAC DONALD, J.E. Application of new technology for repair and rehabilitation of concrete structures. In: EVALUATION AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN, 1991, Hong Kong. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. v.2, p.1439-1456 (SP 128).
- MAILVAGANAM, N.P.; Durability. In: **REPAIR and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press, 1992d. p.131-190.
- MAILVAGANAM, N.P.; Introduction. In: **REPAIR and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press, 1992c. p.1-3.
- MAILVAGANAM, N.P.; DEANS, J.J. Materials, selection and handling. In: **REPAIR and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press, 1992a. p.27-42.
- MAILVAGANAM, N.P.; DEANS, J.J. Patching and resurfacing materials. In: **REPAIR and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press, 1992b. p.43-86.
- MAILVAGANAM, N.P. et al. Sealing and waterproofing materials. In: **REPAIR and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press, 1992a. p.87-116.



- MALVAGANAM, N.P.; HEMMINGS, R.T. Science of concrete and polymeric building materials. In: **REPAIR and protection of concrete structures**. Boca Raton: CRC Press. 1992. p.7-26.
- MALHOTRA, V.M. Use of fly ash, slag and condensed silica fume in North America and Europe. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE USE OF FLY ASH, SLAG, SILICA FUME AND OTHER SILICEOUS MATERIALS IN CONCRETE, Australia, 1988. **Proceedings...** Australia, 1988. p.23-55.
- MALHOTRA, V.M. Cement and concrete admixtures for high-performance concrete: ASTM and ACI specifications and standards. Florianópolis, 1996. **Proceedings...** Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.
- MALHOTRA, V.M. **Mechanical properties and freezing and thawing resistance of non-air entrained and air-entrained condensed silica fume concretes using ASTM teste C666 procedures A and B**. Montreal: CANMET, 1984 (CANMET Report, MRP/MSL, 84-153).
- MALHOTRA, V.M. et al. Role of silica fume in concrete: a review. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, 1992. **Proceedings...**Montreal: CANMET, 1992. p.925-991.
- MALHOTRA, V.M. et al. Role of silica fume in concrete. In: **Advances in concrete technology**. Ottawa:CANMET, 1994. p.915-990.
- MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Gordon & Breach. Ottawa. 1996. v.1.
- MASUERO, A.G. **Metodologia de avaliação do desempenho de sistemas destinados a pontes de aderência entre concreto fresco e endurecido**. Porto Alegre, 1993. Dissertação (mestrado em Engenharia) 142p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MEHTA, P.K. Durability of concrete - fifty years of progress? In: SEMINÁRIO DE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. Porto Alegre, RS, 1993. **Anais....** Porto Alegre: CPGEC-NORIE-UFRGS, 1993. 33p. [Documento suplementar].
- MEHTA, P.K. High-performance concrete technology for the future. In: International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis. 1996. **Proceedings...** Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. p.1-15.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. **Concrete - structure, properties and materials**. 2.ed. New Jersey. Prentice Hall, 1993. 548p.
- MIRZA, J. Characterization of mortars as surface repair materials. In: EVALUATION AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN. 1991. Hong Kong. **Proceedings...**Detroit: American Concrete Institute, 1991a. 2v. v.1, p.577-591. (SP 128).
- MIRZA, J. Durability properties of overlays for erosion-damaged concrete. In: Durability of concrete. Second International Conference. Montreal, 1991b. **Proceedings...** Detroit:American Concrete Institute, 1991b. v.1. p.279-294. (SP 126).
- MONTEIRO, P.J.M. **Caracterização da microestrutura do concreto**. São Paulo, 1993. Tese (livre docência). EPUSP.
- MONTEIRO, P.J.M.; MEHTA, P.K. Improvement of the aggregate-cement paste transition zone by grain refinement of hydration products. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA QUÍMICA DO CIMENTO, 8., 1986. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 1986.
- MORGAN, D.R. New developments in shotcrete. In: **Advances in concrete technology**. Ottawa: CANMET, 1994. p.675-720.
- NANNI, L.F.; RIBEIRO, J.L. Planejamento e avaliação de experimentos. 2.ed. Porto Alegre: CPGE/UFRGS, 1992. 213p. (caderno Técnico 30).
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982. 738p.
- NINCE, A.A. **Levantamento de dados sobre a deterioração de estruturas na região Centro-Oeste**. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- OH, B.H. et al. Flexural behaviour of reinforced concrete beams containing steel fibers. In: EVALUATION AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN, Hong Kong, 1991. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. (SP128).
- OLIVEIRA, P.S.F. Preparo do substrato e metodologia de reparos. In: Reforços, reparos e proteção das estruturas de concreto. IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, São Paulo, 1989. **Anais...** São Paulo: PINI. 1989. p.67-82.



- PAILLÈRE, A.M; EL JAIZAIRI, B. Standard activities for protection and repair of structures in Europe. In: EVALUATION AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN, 1991. Hong Kong. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. 2v. v.2, p.741-748.(SP 128).
- PEGORARO, M.F.L.; FERNANDES, G.B. Cisalhamento em vigas de concreto de alta resistência com aberturas na alma. In: International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis, 1996. **Proceedings...** Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. p.318-329.
- PERKINS, P.H. **Repair, protection and waterproofing of concrete structures**. Elsevier ASP. Essex. 1986. 302p.
- PIGEON, M.; SAUCIER, F. Durability of repaired concrete structures. In: **Advances in concrete technology**. Ottawa: CANMET, 1994. p.721-752.
- PIGEON, M.; SAUCIER, F. Durability of new-to-old concrete buildings. In: EVALUATIONS AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN, Hong Kong, 1991. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. (SP 128).
- PRUDÊNCIO, W.J. Aspecto arquitetônico na recuperação das estruturas de concreto armado. In: Reforços, reparos e proteção das estruturas de concreto. IX Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção. **Anais...** São Paulo: PINI, 1989. p.225-248.
- RAMIRES, M.V.V. **Estudo da influência da cura na resistência à compressão em concretos de alta resistência**. Porto Alegre, 1993. 92p. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- RAMOS, R.R.C.M. **Avaliação de desempenho de sistemas destinados a proteção de concreto aparente**. Porto Alegre, 1991. 111p. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- RIBEIRO, J.L.D. **Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas**. Porto Alegre, 1985. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ROPER, H.; BAWEJA, D. Concrete durability - recent solutions to enduring problems. In: **Advances in concrete technology**. Ottawa: CANMET, 1994. p.515-550.
- SELLEVOLD, E.J.; NILSEN, T. Condensed silica fume in concrete: a world review. In: **Supplementary cementing material for concrete**. Ottawa: CANMET, 1987. p.167-243.
- SOUZA, R.H.F. Reforço à flexão de vigas bi-apoiadas de concreto armado. In: XXX Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Porto Alegre, 1991. **Anais...** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1991.
- SWAMY, R.N. A material and structural design strategy for high performance concrete structures. In: International congress on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. Florianópolis, 1996. **Proceedings...** Universidade Federal de Santa Catarina. 1996. p.272-286.
- TANKUT, A.T.; ERSOY, U. Behaviour of repaired/strengthened reinforced concrete structural members. In: EVALUATION AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN, Hong Kong, 1991. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. (SP 128).
- TARALLO Jr., J. et al. Reparo em concreto, utilizando argamassa com microssilica. 36ª REIBRAC - IBRACON, Porto Alegre, 1994. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1994.
- VIEIRA, F. M.P. **Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microssilica**. Porto Alegre, 1994 107p. Dissertação (mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do sul.
- WARNER, J. Selection of repair materials. **Concrete Construction**, n.8, p.865-868. 1984.
- WOLF, J. **Estudo sobre a durabilidade de concretos de alta resistência com adição de microssilica**. Porto Alegre, 1991. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- WOLF, J.; DAL MOLIN, D. Carbonatação de argamassas e concretos - fatores intervenientes. In: Simpósio sobre patologia das edificações: prevenção e recuperação, Porto Alegre, 1989. **Anais...** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989. p.118-133.
- WOLSIEFER, J.T. Silica fume concrete: a solution to steel reinforcement corrosion in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 2., Montreal. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. p.527-558. (SP 126).
- YUAN, Y.S.; MAROSSZEKY, M. Major factors influencing the performance of structural repair. In: EVALUATION AND REHABILITATION OF CONCRETE STRUCTURES AND INNOVATIONS IN DESIGN, Hong Kong, 1991. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. p. 819-838. (SP 128).



Os estudos apresentados nesta dissertação foram publicados pela autora nos seguintes artigos:

- DAL MOLIN, D.C., KULAKOWSKI, M.P. e SCHULER, A. "Durabilidade de reparos e reforços executados com argamassa com adição de microssilica". In: SEMINÁRIO "QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO". PORTO ALEGRE, 1993. **Anais...** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, CPGEC-NORIE. Porto Alegre, 1993.
- SCHULER, A. e DAL MOLIN, D. "Argamassas com adições de microssilica: estudo de suas propriedades como material para reparo e reforço de estruturas de concreto armado". In: V ENTAC - AVANÇOS EM TECNOLOGIA E GESTÃO DA PRODUÇÃO DE EDIFICAÇÕES. São Paulo, 1993. **Anais...** ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, 1993.
- SCHULER, A. e DAL MOLIN, D.C. "Argamassas com adições de microssilica: estudo de suas propriedades como material para reparo e reforço de estruturas de concreto armado". In: XXVI JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL. Montevideo, Uruguay, 1993. **Anais...** Associação Sulamericana de Engenheiros Estruturais e Instituto de Estruturas e Transportes da Faculdade de Engenharia da Universidad de la Republica del Uruguay. Montevideo, Uruguay, 1993.
- SCHULER, A. e DAL MOLIN, D.C. "Argamassas com adições de microssilica como material para reparos e reforços estruturais: aderência ao aço e integralidade de peças compostas". In: VI ENTAC - QUALIDADE E TECNOLOGIA NA HABITAÇÃO. Rio de Janeiro, 1995. **Anais...** ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, 1995.
- SCHULER, A. e DAL MOLIN, D.C. "Reforços estruturais em lajes com argamassa de alto desempenho". In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES E IV CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE. Porto Alegre, 1997. **Anais...** Asociacion Internacional de Control de Calidad Patologia y Recuperacion de la Construccion e UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- SCHULER, A., OLIVEIRA, A.P.M. , DAL MOLIN, D.C. "Reforço de vigas de concreto armado com argamassa de alto desempenho". In: 36ª REUNIÃO ANUAL DO INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, Porto Alegre, 1994. **Anais...** Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 1994.