

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SILICA
ATIVA EM REFORÇOS DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS DE CONCRETO**

Nei Ricardo Vaske

Dissertação apresentada ao Programa 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 na modalidade Acadêmico.

Área de Concentração: Construção

Porto Alegre

2005

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a. Dra. Denise C. C. Dal Molin

Orientadora

Prof. MSc. João Luiz Campagnolo

Colaborador

Prof. Dr. Fernando Schnaid

Coordenador do Programa de Pós-Graduação

em Engenharia Civil

Banca Examinadora

- Prof. Dr. Ivo José Padaratz
- Prof^a. Dra. Marlova Piva Kulakowski
- Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

“Não sei como aparecerei para o mundo. Para mim mesmo, me vejo como um garoto, brincando na praia, divertindo-se aqui e ali por achar uma pedra mais polida ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o grande oceano da verdade permanece desconhecido em minha frente”.

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

À professora Dra. Denise C. C. Dal Molin e professor MSc. João Luiz Campagnolo pela confiança, apoio e orientação prestados durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao professor Dr. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal, professor MSc. Dario Klein e professor Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho por propiciar a infraestrutura necessária para a execução dos ensaios, além das valiosas observações.

Ao professor Dr. Hélio Adão Greven e professor Dr. Ronaldo Bastos Duarte pelas palavras de estímulo.

Aos colegas Dr. Andriei José Beber, Dr. Ranier Adonis Barbieri e Mestrando Dirceo Santarosa pela amizade e colaboração durante todas as etapas deste trabalho.

Aos técnicos Eurípedes Martins Fontes, Paulo Francisco Bueno e Flávio Luís César de Lima pela disposição e eficiência demonstradas e aos auxiliares Alcemar Macedo Ramos, Airton Luis Freitas e Edérson Soares Chagas pelo auxílio prestado.

A Lilliani Gaeversen Mazzali pela sua presteza e colaboração ao longo deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	5
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE QUADROS	12
LISTA DE TABELAS	14
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Justificativa da pesquisa	19
1.2 Hipótese da pesquisa	20
1.3 Objetivo da pesquisa	20
1.4 Limitações da pesquisa	21
1.5 Estruturação da pesquisa	21
2 ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA COMO MATERIAL DE REPARO/REFORÇO	23
2.1 Propriedades dos materiais de reparo e reforço	23
2.2 Argamassa de cimento Portland como material de reparo e reforço	25
2.3 Adição de sílica ativa em argamassas de cimento Portland	27

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL – PARTE 1: DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA APLICADA AO SUBSTRATO E EM CORPOS-DE-PROVA NORMATIZADOS	35
3.1 Ensaios realizados	36
3.2 Materiais utilizados	36
3.2.1 Cimento	36
3.2.2 Sílica ativa	38
3.2.3 Agregado miúdo	38
3.2.4 Água	39
3.3 Metodologia	39
3.4 Resultados obtidos	46
3.5. Análise dos resultados	51
3.6 Conclusões	60
 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL – PARTE 2: APLICAÇÃO DA ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA COMO MATERIAL DE REFORÇO EM ELEMENTOS COMPRIMIDOS DE CONCRETO	 63
4.1 Modelos estruturais	63
4.2 Modelo teórico para o cálculo da capacidade última da peça	66
4.2.1 Cálculo da capacidade última da peça	66
4.3 Materiais utilizados	67
4.3.1 Cimento	67
4.3.2 Sílica ativa	68
4.3.3 Agregado miúdo	68
4.3.4 Agregado graúdo	68

	7
4.4 Proporcionamento do concreto e da argamassa	70
4.4.1 Proporcionamento do concreto dos pilares	70
4.4.2 Proporcionamento da argamassa dos reforços	70
4.5 Formas	71
4.6 Concretagem dos pilares	72
4.7 Reforço dos pilares	81
4.7.1 - Preparação para o lançamento da argamassa de reforço dos pilares PR 01, PR 02 e PR 03	81
4.7.2 Execução dos reforços	83
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
5.1 Cargas de ruptura teóricas	91
5.2 Cargas de ruptura experimentais	93
5.3 Comparação entre os resultados teóricos e resultados experimentais das cargas de ruptura	99
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	105
6.1 Conclusões	105
6.2 Sugestões para futuros trabalhos	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Dispositivo para execução da placa	40
Figura 3.2 - Aplicação da argamassa na placa	41
Figura 3.3 – Placa e corpos-de-prova cilíndricos	42
Figura 3.4 - Ensaio dos corpos-de-prova cúbicos (25x25x25 mm).....	43
Figura 3.5 - Ensaio dos corpos-de-prova retangulares de seção quadrada (25x25x50 mm)	43
Figura 3.6 - Ensaio dos corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm)	44
Figura 3.7 - Localização das amostras na placa	45
Figura 3.8 – Resistência à compressão das amostras	49
Figura 3.9 – Gráfico das resistências das amostras de razão altura/lado igual a 1 e igual a 2 .	50
Figura 3.10 – Gráfico das resistências médias	50
Figura 3.11 – Distribuição das resistências das amostras razão altura/lado=1	53
Figura 3.12 – Distribuição das resistências das amostras razão altura/lado=2.....	53
Figura 3.13 – Gráfico das resistências das amostras de razão altura/lado igual a 1 corrigidas, razão altura/lado igual a 2 e resistência média da placa	55
Figura 3.14 – Gráfico das resistências médias	55
Figura 3.15 – Distribuição das resistências das amostras razão altura/lado=1 corrigidas.....	56

Figura 3.16 – Distribuição das resistências na placa	56
Figura 3.17 – Gráfico das “seções transversais” da placa	58
Figura 3.18 – Gráfico dos “perfis longitudinais” da placa	58
Figura 3.19 – Gráfico de superfície da distribuição de resistências na placa (MPa).....	59
Figura 4.1 - Pilares testemunhos e reforçados	64
Figura 4.2: Formas dos pilares	71
Figura 4.3 - Concretagem dos pilares.....	73
Figura 4.4 - Moldagem dos corpos-de-prova de controle.....	74
Figura 4.5 – Pilar sendo envolvido por saco de aniagem úmido e saco plástico para cura.....	75
Figura 4.6 - Pilares e corpos-de-prova de controle em cura.....	76
Figura 4.7 – Pilares e corpos-de-prova após a cura	76
Figura 4.8 - Gráfico resistência x idade do concreto dos pilares.....	78
Figura 4.9 - Ensaio de corpo-de-prova de concreto instrumentado para leitura de cargas e deformações.....	79
Figuras 4.10 - Curvas resistência x deformação do corpo-de-prova TP 04 aos 28 dias.....	79
Figuras 4.11 - Curvas resistência x deformação do corpo-de-prova TP 05 aos 28 dias.....	80
Figuras 4.12 - Curvas resistência x deformação do corpo-de-prova TP 06 aos 28 dias.....	80
Figura 4.13 - Apicoamento do pilar.....	82
Figura 4.14 - Gabarito para controle da seção.....	82

Figura 4.15 - Pilar apicoado pronto para receber o reforço de argamassa	83
Figura 4.16 - Mistura da argamassa de reforço	84
Figura 4.17 - Determinação do índice de consistência da argamassa	84
Figura 4.18 - Moldagem dos corpos-de-prova de controle da argamassa de reforço.....	85
Figura 4.19 - Pilar pronto para receber argamassa de reforço.....	86
Figura 4.20 - Pilares sendo reforçados	87
Figura 4.21 - Pilar reforçado	87
Figura 4.22 - Cura dos pilares reforçados.....	88
Figura 5.1: - Gráfico das cargas teóricas de ruptura com resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 33,20 MPa	92
Figura 5.2: - Gráfico das cargas teóricas de ruptura com resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 33,20 MPa	93
Figura 5.3 - Cargas experimentais de ruptura	95
Figura 5.4 - Ruptura do pilar testemunho PT 01	96
Figura 5.5 - Ruptura do pilar testemunho PT 02	96
Figura 5.6 - Ruptura do pilar testemunho PT 03	97
Figura 5.7 - Ruptura do pilar reforçado PR 01	97
Figura 5.8 - Ruptura do pilar reforçado PR 02	98
Figura 5.9 - Ruptura do pilar reforçado PR 03	98

Figura 5.10 - Vista geral dos pilares após ruptura.....	99
Figura 5.11 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 33,20 MPa.....	100
Figura 5.12 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 33,20 MPa.....	100
Figura 5.13 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 39,72 MPa.....	101
Figura 5.14 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 39,72 MPa.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Níveis mínimos para as propriedades das argamassas de reparo	26
Quadro 3.1 - Ensaios químicos – CP V-ARI - Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.	37
Quadro 3.2 - Ensaios físicos – CP V-ARI - Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.	37
Quadro 3.3 - Ensaios químicos – sílica ativa – Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.	38
Quadro 3.4 - Ensaios físicos – sílica ativa – Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.....	38
Quadro 3.5 – Distribuição granulométrica e classificação do agregado miúdo	39
Quadro 4.1- Denominação dos protótipos.....	63
Quadro 4.2 – Distribuição granulométrica e classificação do agregado graúdo	69
Quadro 4.3 - Características do concreto.....	70
Quadro 4.4 - Consumos da argamassa	71
Quadro 4.5 - Resultados dos ensaios à compressão dos corpos-de-prova de controle do concreto	77
Quadro. 4.6 - Módulo de deformação das amostras aos 28 dias de idade.....	81
Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova de controle da argamassa de reforço aos 28 dias.....	85
Quadro 5.1 - Valores adotados para a determinação das cargas teóricas de ruptura.....	91
Quadro 5.2 - Cargas teóricas de ruptura dos protótipos com resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 33,20 MPa	92

Quadro 5.3 - Cargas teóricas de ruptura dos protótipos com resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 33,20 MPa	93
Quadro 5.4 - Cargas de ruptura dos modelos experimentais	94
Quadro 6.1 – Resistências à compressão.....	106
Quadro 6.2 – Cargas teóricas de ruptura x experimental	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de controle da argamassa.....	46
Tabela 3.2 - Amostras razão altura/lado=1.....	47
Tabela 3.3 – Amostras razão altura/lado=2.....	48
Tabela 3.4 – Análise de variância para resistência à compressão das amostras prismáticas ...	52
Tabela 3.5 – Análise de variância para resistência à compressão das amostras prismáticas (com as amostras razão=1 corrigidas).....	57

RESUMO

VASKE, N.R. Contribuição ao Estudo da Argamassa com Adição de Sílica Ativa em Reforços de Elementos Comprimidos de Concreto. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. No uso de argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço, adotam-se valores de resistência à compressão provenientes de ensaios normatizados, cujos valores não são representativos da técnica adotada. Na execução de um reforço, cada porção de argamassa que é lançada sofre um adensamento que varia em função da energia com que colide com o substrato, gerando, desta forma, pontos de diferentes resistências por toda a extensão do reforço, refletindo diretamente sobre a resistência do reforço como um todo, que por sua vez define a nova capacidade de carga do elemento estrutural em questão. Procurando verificar o comportamento “in loco” da argamassa de reforço, executou-se uma placa de argamassa com adição de sílica ativa com dimensões iguais a um reforço de uma das faces de um pilar, sendo extraídas amostras prismáticas desta placa e ensaiadas à compressão e determinada uma resistência média que, comparada com a resistência média obtida de corpos-de-prova cilíndricos, moldados com a mesma argamassa com que foi executada a placa demonstrou que a resistência média à compressão das amostras prismáticas extraídas da placa apresenta, particularmente neste estudo, uma redução em relação à resistência média à compressão resultante dos corpos-de-prova cilíndricos da ordem de 35%. Em sequência foram moldados seis pilares de concreto, sendo três reforçados com argamassa com adição de sílica ativa e os outros três como testemunhos. Após a ruptura dos pilares foram analisados os resultados teóricos e resultados experimentais das cargas de ruptura, aderência entre o substrato e a argamassa de reforço e a redução de resistência à compressão observada nos ensaios preliminares da argamassa. Pelas análises realizadas verificou-se a eficiência da técnica de reforço quanto ao aumento da capacidade de carga, da ordem de 72 %, aderência adequada entre o substrato e a argamassa de reforço e confirmação da redução da resistência à compressão da argamassa nos níveis propostos.

ABSTRACT

VASKE, N.R. Contribuição ao Estudo da Argamassa com Adição de Sílica Ativa em Reforços de Elementos Comprimidos de Concreto. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Reinforcement materials constituted by mortar with silica fume addition usually adopt compression strength values obtained from experimental tests which are ruled by standard codes that are not in agreement with the adopted reinforcement technique. When portions of mortar are thrown over a substratum in reinforcement procedures, they are subjected to the densification phenomenon. The densification process is related to the amount of energy observed in collisions of the mortar portions against the substratum. Hence, it is verified that different points of the reinforcement show different strength values, affecting directly the reinforcement overall strength, which defines the new load resistance of the current structural element. In order to verify the mortar reinforcement behavior “in loc”, it was considered a plate constituted by mortar with silica fume addition with geometrical characteristics similar to a specific face of a column reinforcement. Prismatic specimens were taken from the plate and submitted to compression tests, obtaining a reduction of about 35% in the mean strength value when it is compared to the mean strength value obtained by cylindrical specimens made by the same material used in the plate. In the following, six concrete columns were modeled, where three models were made from usual materials and the rest presented a reinforcement of mortar with silica fume addition. Theoretical and experimental results referred to failure load, adherence between substratum and the mortar reinforcement and reduction of the compression strength in the preliminary tests were analyzed after the column failures. It was observed that the reinforcement technique employed in this work resulted in an improvement of about 72% in the load resistance. Moreover, adequate adherence was verified between substratum and the mortar reinforcement and a reduction to the proposed levels for the mortar compression strength was also observed.

1 INTRODUÇÃO

As estruturas em concreto se deterioram com o passar do tempo e não alcançam sua vida útil se não são bem projetadas, executadas com esmero, utilizadas com critério e, finalmente, submetidas a uma manutenção preventiva. Quando o projeto de engenharia for mal detalhado, a construção for realizada com insuficiente planejamento e controle, os técnicos e operários não forem dotados da qualificação adequada e os prazos de execução forem excessivamente curtos, a estrutura em concreto resultante possivelmente será de má qualidade e irá se deteriorar de modo prematuro, absorvendo gastos de recuperação e de reforço exagerados para ser mantida em condições de uso. Como as estruturas em concreto existentes estão envelhecendo, muitas já estão com dezenas de anos, os problemas de deterioração estão cada vez mais acentuados, exigindo com frequência trabalhos de recuperação e de reforço estrutural e mesmo, em casos mais graves, sua demolição (SOUZA e RIPPER, 1998).

Mesmo as estruturas bem projetadas e construídas, e corretamente utilizadas, podem apresentar sintomas patológicos. Além disto, muitos são os casos de estruturas que, por um motivo ou outro, necessitam ter sua capacidade portante aumentada. Nestes casos, que implicam trabalhos de recuperação ou de reforço da estrutura, o conhecimento dos procedimentos e das técnicas a serem adotados é de fundamental importância para que a estrutura tenha realmente a sua capacidade portante original restaurada (recuperação), ou ampliada (reforço) (SOUZA e RIPPER, 1998).

Independente da técnica de reforço empregada, um dos principais requisitos do sistema composto (existente + reforço) é a capacidade de funcionar como um todo, como um sistema integrado. Isto pode ser alcançado somente quando se proporciona uma adequada aderência entre o elemento de concreto pré-existente e o reforço. A força de aderência deve ser tal que a estrutura composta apresente um comportamento monolítico. Esta ligação deve ser resistente e durável. Neste contexto, a noção de durabilidade do reforço subentende a coexistência de dois materiais diferentes em um sistema composto durante um período de tempo determinado no projeto de reforço ou recuperação (CAMPAGNOLO et al, 1999).

O comportamento e as propriedades de um sistema composto dependem da natureza, da forma, arranjo estrutural e da interação entre os componentes. Naturalmente, as propriedades e características intrínsecas de cada componente determinam grandemente as propriedades gerais do sistema. Entretanto, a interação entre os componentes resultará em um novo grupo de propriedades, derivadas da combinação das propriedades individuais de cada componente. Ainda, raramente a soma das propriedades de cada componente é igual à propriedade do sistema como um todo. Portanto, o reparo e reforço de estruturas em concreto devem ser encarados como um sistema composto (CAMPAGNOLO et al, 1999).

1.1 Justificativa da pesquisa

Pilares em concreto são elementos estruturais que freqüentemente apresentam manifestações patológicas por falhas de projeto ou execução ou sofrem mudanças em seu regime de utilização, necessitando de reparos ou reforços que procuram restaurar a capacidade resistente original da peça ou buscam incrementar a resistência da peça, excedendo a sua capacidade original.

Dentre as diversas técnicas utilizadas no reparo ou reforço de elementos estruturais em concreto, pode-se citar aquelas que empregam protensão, perfis metálicos, concreto armado, concreto de alto desempenho, chapas metálicas coladas com resina epóxi, compósitos de fibra de carbono e argamassa com adição de sílica ativa, sendo esta última, a técnica a ser empregada na presente pesquisa, por apresentar como vantagens de sua utilização, emprego de materiais simples, baixo custo, simplicidade de execução, e como mão-de-obra um pedreiro profissional do próprio canteiro de obra devidamente orientado e fiscalizado.

Existem várias pesquisas sobre reforços de pilares em concreto com as diversas técnicas mencionadas (ZANATO, 1999; MAEKAWA e AN, 2000; TAKEUTI e HANAI, 2000; CARNEIRO et al, 2000; WILLRICH e LIMA, 2002; CARRAZEDO et al, 2002; SANTAROSA et al, 2002; SOUZA et al, 2002; YAO et al, 2001; MAALEJ et al, 2003), porém nenhuma tratando especificamente de reforço de argamassa com adição de sílica ativa.

Face ao exposto acima, esta pesquisa terá como tema a investigação do desempenho de argamassa com adição de sílica ativa no reforço de elementos comprimidos em concreto submetidos a esforços de compressão simples.

1.2 Hipótese da pesquisa

O comportamento da argamassa com adição de sílica ativa no reforço de elementos comprimidos de concreto, quando submetidos a esforços de compressão simples, demonstra ser uma técnica de reforço eficiente.

1.3 Objetivo da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é verificar o incremento da capacidade de carga de elementos comprimidos em concreto reforçados com argamassa com adição de sílica ativa quando submetidos a esforços de compressão simples.

Como objetivos secundários desta pesquisa tem-se:

- a) avaliação da resistência à compressão da argamassa com adição de sílica ativa, após aplicação ao substrato, comparada à resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de controle;
- b) verificação do comportamento do elemento comprimido reforçado como modelo estrutural monolítico; e
- c) verificação do comportamento do reforço quanto a sua aderência ao elemento de concreto preexistente.

1.4 Limitações da pesquisa

Face às limitações relativas à infra-estrutura disponível para a realização dos ensaios (curso útil da prensa), e as seções mínimas adotadas no intuito de não se obter carregamentos excessivos, os elementos comprimidos estarão submetidos somente a esforços de compressão simples, com carregamento suposto centrado e índice de esbeltez $\lambda = \ell_e / i \leq 40$.

Os protótipos a serem reforçados terão seus núcleos íntegros, ou seja, não estarão sujeitos a nenhum pré-carregamento.

1.5 Estruturação da pesquisa

A dissertação estrutura-se em seis capítulos, sendo que o primeiro capítulo, que constitui-se a introdução, apresenta a justificativa, hipótese, objetivos e limitações da mesma.

O capítulo 2 aborda as várias características que qualificam a argamassa com sílica ativa como material de reparo e reforço em elementos estruturais de concreto armado.

O capítulo 3 discorre sobre ensaios realizados com a argamassa com adição de sílica ativa, procurando obter um valor de resistência à compressão mais próximo da situação real de uso, através da determinação da relação entre a resistência à compressão da argamassa aplicada ao substrato e em corpos-de-prova normatizados.

O capítulo 4 apresenta a parte experimental relativa à aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto, com detalhes referentes às características dos protótipos, hipóteses e modelo teórico para o cálculo da capacidade última da peça, materiais empregados, aplicação de carregamento e procedimentos pertinentes à técnica.

O capítulo 5 faz a comparação dos resultados obtidos nos ensaios dos protótipos com os resultados do modelo teórico.

O capítulo 6 finaliza o presente trabalho com as conclusões e considerações finais a respeito da pesquisa realizada.

2 ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA COMO MATERIAL DE REPARO/REFORÇO

Sendo a função de um reparo ou reforço restaurar a capacidade resistente original da peça ou buscar incrementar a resistência da peça, excedendo a sua capacidade original, os materiais que se destinam a isso devem apresentar determinadas características para que seja alcançado o efeito esperado e de forma duradoura.

2.1 Propriedades dos materiais de reparo e reforço

Warner (1984) e Mailvaganam e Deans (1992a) apontam algumas propriedades que os materiais de reparo ou reforço devem ter:

- i) estabilidade dimensional: um material de reparo ou reforço deve ficar perfeitamente aderido ao substrato de concreto, promovendo o monolitismo do conjunto. Uma das principais causas de perda de aderência entre reparo/reforço e o substrato é a retração do material de reparo/reforço, uma vez que o substrato de concreto já está endurecido e não retrai mais, ou retrai menos que o material de reparo/reforço, sendo este último um material à base de cimento. Desta forma, o material de reparo/reforço deve possuir uma baixa retração ou retrair sem perder a aderência ao substrato.
- ii) coeficiente de dilatação térmica: variações de temperatura provocam contração ou dilatação nos materiais, acarretando uma movimentação térmica. Esta movimentação térmica do material é regida pelo seu coeficiente de dilatação térmica, que é a medida da variação de comprimento que ocorre no material quando sujeito a uma variação de temperatura. Quando dois materiais de coeficientes de dilatação térmica diferentes são unidos em contato direto, ao ocorrer uma variação de temperatura, os dois materiais apresentam movimentação

diferenciada, que tensionam a interface de ligação, comprometendo a aderência ou ocorrendo falha na seção do material de resistência mecânica mais baixa;

- iii) módulo de elasticidade: a rigidez de um material é caracterizada pelo seu módulo de elasticidade. Quanto maior o módulo de elasticidade de um material, mais rígido será este material, deformando-se menos sob ação de um determinado carregamento em relação a um material com módulo de elasticidade menor. Quando dois materiais, com módulos de elasticidade bastante diferentes, são unidos por intermédio de uma ponte de aderência, ao sofrerem um determinado carregamento, a deformação diferenciada dos dois materiais poderá levar ao rompimento da ligação. Em geral, os materiais de reparo/reforço devem ter baixo módulo de elasticidade, para que suportem as deformações de origem térmica, retração e carregamento, permitindo movimentações sem tensionar a interface ou se descolar do substrato.
- iv) permeabilidade: ter certa permeabilidade ao vapor d'água é importante em materiais de reparo/reforço 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. Por outro lado, 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;
- v) compatibilidade química: esta propriedade refere-se à reação entre material de reparo/reforço e o aço da armadura e outros metais imersos no concreto, ou proteções específicas como pinturas e selantes aplicadas sobre o reparo/reforço propriamente dito. Para manter as armaduras existentes ou as novas armaduras em estado passivo, é desejável que os materiais de reparo/reforço tenham um pH alto (acima de 11,5) e que sejam capazes de mantê-lo assim. Quando certos acabamentos à estrutura reparada são desejados, o material de reparo/reforço deve ter compatibilidade química com os mesmos;
- vi) propriedades elétricas: se o material de reparo/reforço possuir uma resistividade mais alta do que o concreto adjacente ao reparo, ou não for condutivo, pode-se estar gerando uma descontinuidade no elemento que pode vir a criar uma diferença de potencial, que poderia levar a uma corrente de corrosão a uma

determinada área, ocasionando uma falha prematura do reparo/reforço ou da área adjacente.

Morgan (1996) define a compatibilidade entre o material de reparo e o substrato, como o balanço das propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e dimensionais que garantirão que diante de solicitações de tensões provocadas por variação de volume, ou sob efeitos de deteriorização de agentes externos, o material utilizado como reparo irá manter-se estável.

2.2 Argamassa de cimento Portland como material de reparo e reforço

As argamassas de cimento Portland são indicadas como um material de reparo/reforço, principalmente em situações que necessitem a reconstituição da seção do elemento, revestimento do concreto e das armaduras existentes.

Mailvaganam e Deans (1992b) indicam as argamassas de cimento Portland em casos de lascamento do concreto por corrosão das armaduras ou outro agente, ninhos de segregação no concreto, estruturas fissuradas, abrasão ou erosão de superfícies, problemas de infiltração e permeabilidade.

Lamb (1989) considera as argamassas de cimento Portland como um material de boa aceitação para as mais variadas situações de reparo/reforço em estruturas deterioradas pela corrosão das armaduras ou outro agente, mesmo para áreas extensas, devido ao baixo custo, facilidade de aplicação e propriedades compatíveis com as do concreto.

Dentre as propriedades que se destacam das argamassas de cimento Portland, pode-se citar:

- i) aderência a substratos de concreto endurecido: a boa aderência que pode existir entre a argamassa e o concreto, desde que o substrato seja devidamente preparado. O uso de adições e a adoção de baixas relações água/aglomerante melhoram as propriedades das argamassas, entre elas a aderência (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b);
- ii) deformações: as deformações das argamassas são compatíveis com as do concreto, possibilitando a aderência ser mantida a curto e longo prazo. O

coeficiente de expansão térmica é praticamente o mesmo e o módulo de elasticidade pode ser semelhante ou apresentar-se dentro de limites adequados (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b);

- iii) adesão inicial e tixotropia: possibilidade de aplicação em superfícies verticais e tetos. Sua consistência pouca fluida se presta muito bem à aplicação superficial (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b);
- iv) alcalinidade: semelhante à alcalinidade do concreto, garantindo a passivação das armaduras. Quanto à carbonatação, podem desenvolver baixa carbonatação desde que tenham reduzida porosidade capilar, com a adoção de baixas relações água/aglomerante e/ou adições que proporcionem o refinamento dos poros (WOLF e DAL MOLIN, 1989, BAUER, 1996).
- v) disponibilidade, baixo custo e experiência já adquirida com argamassas de cimento Portland tornam o uso bastante atrativo (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b).

Alguns cuidados devem ser observados quanto ao seu uso, principalmente com relação à retração por secagem. A adição de água em excesso, na tentativa de se obter trabalhabilidade adequada, pode provocar retração que leve ao comprometimento da aderência (MAILVAGANAM e DEANS, 1992b).

Silva (2001) propôs níveis mínimos para as propriedades das argamassas de reparo, conforme o quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Níveis mínimos para as propriedades das argamassas de reparo

Propriedade	Valor mínimo
Resistência à compressão	10,0 MPa
Resistência à flexão	2,0 MPa
Resistência à tração	1,0 MPa
Módulo de elasticidade	5,0 GPa
Coeficiente de expansão térmica	$7 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Absorção de água (%) em massa	0,1
Temperatura máxima de serviço	40,0 °C

2.3 Adição de sílica ativa em argamassas de cimento Portland

A sílica ativa é um subproduto, oriunda das indústrias de produção de silício metálico ou de ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em fornos elétricos a arco voltaico. Pelo aquecimento das matérias primas utilizadas na produção destes materiais, ocorrem reações químicas e se tem como uma das conseqüências a produção de vapor de SiO como uma “fumaça” de sílica. Esta “fumaça” oxida e condensa, em zonas de baixa temperatura, a partículas esféricas extremamente pequenas, consistindo de sílica amorfa. Estas partículas são removidas por filtração dos gases de exaustão em filtros manga, com diâmetro médio da ordem de 0,1 μm e superfície específica da ordem de 20000 a 25000 m^2/kg (NEVILLE, 1982; SELLEVOLD e NILSEN, 1987; MALHOTRA e MEHTA, 1996).

Com relação ao diâmetro médio das partículas e superfície específica da sílica ativa, Kulakowski (2002) realizando análises em amostras de sílica ativa, provenientes de duas fontes, em três laboratórios distintos pelo método de granulometria laser, obteve, em um primeiro momento, tamanho médio das partículas excedendo em muito o tamanho de 0,3 μm e, em uma quarta análise realizada por distribuição granulométrica por sedimentação, o tamanho médio de partícula obtido foi de 0,3 μm e 0,25 μm para a amostra 1 e para a amostra 2, respectivamente, sendo a superfície específica da ordem de 13.000 a 30.000 m^2/kg .

Os efeitos da sílica ativa, quando adicionada em concretos e argamassas, são observados em função das suas propriedades física e química.

O efeito físico é devido à forma esférica das partículas e sua extrema finura, com um diâmetro médio da ordem de 100 vezes menor que o do cimento, atuando como um microfiler, com preenchimento dos espaços vazios deixados durante a hidratação do cimento com diminuição da capilaridade, proporcionando uma maior densificação e continuidade da pasta de cimento e, por sua vez, do concreto ou argamassa.

O efeito químico deve-se ao alto teor de sílica na forma amorfa, com um índice de atividade pozolânica com o cimento Portland de cerca de 210% (WOLSIEFER, 1991). Mehta (1993) refere-se à sílica ativa como sendo uma superpozolana em conseqüência da sua alta reatividade. Na hidratação do cimento Portland são gerados compostos de silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio. O hidróxido de cálcio em presença da sílica ativa reage,

formando silicato de cálcio hidratado semelhante ao formado na reação primária, que é o maior responsável pela resistência da pasta.

A ação conjunta dos efeitos físico e químico resulta em mudanças na microestrutura e propriedades macroscópicas das argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Mailvaganam e Deans (1992b) colocam que a adição de sílica ativa é extremamente importante em argamassas a serem utilizadas em reparos/reforços de estruturas em concreto armado, especialmente onde se quer alta resistência e baixa porosidade e permeabilidade.

Rao (2001), investigando o desenvolvimento da resistência mecânica de argamassas com teores de sílica ativa de 0 a 30% da massa de cimento e relações água/aglomerante de 0,35, 0,40, 0,45 e 0,50, concluiu que durante as primeiras idades, 3 e 7 dias, a **resistência à compressão** das argamassas com sílica ativa, em geral, foi significativamente maior para qualquer relação água/aglomerante, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência. Para as relações água/aglomerante de 0,35, 0,40 e 0,45, o conteúdo ótimo de sílica ativa para obter-se a mais alta resistência à compressão variou entre 17,5 e 22,5%, sendo que para a relação água/aglomerante de 0,50, a resistência à compressão da argamassa aumentou com qualquer conteúdo de sílica ativa. O desenvolvimento da resistência à compressão depois de 28 dias foi mais moderado para as relações água/aglomerante 0,35 e 0,40 e relativamente superior para 0,45, sendo que para 0,50, apresentou o melhor e mais consistente desenvolvimento de resistência à compressão para qualquer idade e com todos os conteúdos de sílica ativa.

Buil et al (1984), estudando a adição de sílica ativa em argamassas com relações sílica ativa/cimento de 0,40 e superplastificante/cimento de 2,4%, verificou resistência à compressão cerca de 2 a 2,7 vezes maiores em relação à argamassa de referência, aos 28 dias de idade.

Shannag (2000) estudou combinações de pozolana natural e sílica ativa e verificou que certas combinações podem melhorar a resistência à compressão das argamassas mais do que sílica ativa ou pozolana quando atuando separadamente. Resistência da ordem de 110 MPa foi conseguida com 15% sílica ativa e 15% de pozolana natural em relação à massa de cimento, aos 28 dias de idade.

Rao (2001), em estudo realizado sobre a influência da granulometria do agregado miúdo em argamassas com sílica ativa, verificou que a resistência à compressão aumentou inicialmente e então gradualmente diminuiu com o aumento do tamanho do grão da areia, sendo que a melhor resistência foi observada com grãos de tamanho entre 1,5 a 2,0 mm.

Dal Molin e Schuler (1993), estudando a resistência à compressão de argamassas com adição de sílica ativa, obtiveram um ganho da ordem de 15% quando se passa de níveis de teor de adição de sílica ativa de 0 a 10%.

Rao (2001), analisando a resistência à compressão de argamassas simples e de argamassas com sílica ativa, concluiu que as argamassas simples obedecem a lei de Abrams para qualquer idade, já as argamassas com sílica ativa, que apresentam um acelerado desenvolvimento de resistência nas primeiras idades devido à reação pozolânica, não obedecem esta lei.

Dal Molin e Schuler (1993), com relação à **aderência** de argamassas ao substrato empregando argamassas sem sílica ativa e com 10% de adição e relação água/aglomerante 0,55, obtiveram nos ensaios de arrancamento de revestimento em paredes valores de resistência aos 3,7 e 21 dias de idade de 0,38, 0,33 e 0,37 MPa para a argamassa com adição e, para a argamassa sem adição, 0,17, 0,18 e 0,38 MPa, demonstrando uma melhora significativa da resistência com adição de sílica ativa, principalmente nas primeiras idades.

Mirza (1991) estudou diversos tipos de argamassas como material de reparo, tendo encontrado resistência de aderência em ensaio de compressão-cisalhamento junta inclinada para as argamassas com adição de 6% de sílica ativa de 12,7 MPa, aproximadamente 2,5 vezes maior do que a resistência da argamassa de referência, que foi de 4,9 MPa.

Mattos et al (2002), estudando propriedades físicas e mecânicas de argamassas à base de cimento e polímero industrializadas e argamassa de cimento e areia com traço em massa 1:3 com 10% de adição de sílica ativa em relação à massa de cimento e relação água/aglomerante 0,4, obtiveram valores de resistência de aderência em ensaio de compressão-cisalhamento à junta inclinada para a argamassa com adição de sílica de 9,62 MPa, superando a resistência da argamassa industrializada que foi de 8,68 MPa, assim como o nível mínimo de resistência à tração de 1,0 MPa proposto por SILVA (2001) para argamassa de reparo.

Schuler (1998), referindo-se à aderência de barras de aço nervuradas com argamassas com adição de sílica ativa, não comprovou diferenças significativas entre uma argamassa com ou sem sílica ativa, porém ressalta a importância das atividades de preparo e execução do reparo ou reforço, determinantes na eficiência ou não da aderência entre barras de aço que são agregadas à superfície de concreto endurecido e o material de recobrimento, no caso, uma argamassa com adição de sílica ativa ou não.

Mirza (1991) observa que o **módulo de elasticidade** de uma argamassa com adição de 6% de sílica ativa é similar ao de uma argamassa comum de cimento e areia. O módulo de elasticidade da argamassa com sílica ativa foi da ordem de $1,12 \times 10^4$ MPa e o da argamassa sem adição da ordem de $1,07 \times 10^4$ MPa.

Kulakowski (1994), estudando aspectos relativos à **durabilidade** de argamassas com adição de sílica ativa para reparos estruturais, concluiu que tanto a redução da relação água/aglomerante quanto o aumento no teor de adição de sílica ativa são estatisticamente significativos com relação à penetração de íons cloretos, obtendo aumentos de até 6 vezes na resistência à penetração de íons cloretos com adições de 15% de sílica ativa.

Torii e Kawamura (1994) relatam mudança na estrutura dos poros das argamassas contendo de 10 a 15% de sílica ativa, com um aumento dos poros finos menores que $0,04 \mu\text{m}$ e uma redução dos poros grandes maiores que $0,1 \mu\text{m}$. A argamassa com sílica ativa mostrou uma permeabilidade a íons cloretos menor do que a das argamassas comuns nas primeiras idades e idades posteriores.

Gao et al (2002), estudando as propriedades de argamassas com sílica ativa e emulsão de éster poliacrílico, verificou a diminuição da porosidade e difusão de íons cloretos e aumento da densidade. Também constatou aumento na resistência à compressão e resistência à flexão das argamassas.

Paillere et al. (1991) destacam o uso de sílica ativa em argamassas, principalmente para reduzir sua porosidade. No entanto, essas argamassas precisam ser cuidadosamente curadas para alcançarem de forma eficaz as suas capacidades. Argamassas com sílica ativa, após cura úmida, obtiveram redução da porosidade total, com relação à argamassa de controle, de 25 a 45%.

Zain e Yusof (1999), estudando a permeabilidade à água de argamassas sem e com adição de sílica ativa para diferentes temperaturas de cura, observou que as argamassas sem

adição de sílica ativa tiveram um aumento da permeabilidade à água para temperaturas acima de 75°C. Já as argamassas com sílica ativa tiveram a permeabilidade à água diminuída com o aumento da temperatura, indicando que a alta reação pozolânica e o efeito microfíler da sílica ativa a temperaturas médias modificam os canais abertos junto à zona de transição, tornando-a mais densa e mais forte com uma fina e descontínua estrutura porosa.

Schuler (1998), estudando a evolução da profundidade de carbonatação em argamassas com adição de sílica ativa, recomenda o emprego de argamassas com até 10% de adição como material passivador das armaduras, fato recentemente corroborado por Vieira et al (2003).

Kulakowski (2002) estudando a carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa, abrangendo níveis de relação água/aglomerante entre 0,30 e 0,80 e níveis de teor de sílica ativa entre 0 e 20% relata existir um intervalo de relações água/aglomerante limite, com valores entre 0,45 e 0,50, no qual, abaixo desta zona de relação água/aglomerante limite, a carbonatação é regida principalmente pela porosidade da matriz cimentante conferida pelo teor de água e o teor de Ca(OH)_2 e o pH, nestes níveis de relação água/aglomerante, apresentam pouca influência na profundidade de carbonatação. Acima do intervalo de relação água/aglomerante limite, as características químicas passam a exercer um efeito fortemente significativo na profundidade de carbonatação e, então, o consumo de Ca(OH)_2 nas reações pozolânicas promovidas pela sílica ativa passam a ser desfavoráveis para a carbonatação.

Aköz et al (1999), estudando o comportamento de argamassas com sílica ativa sob a ação de soluções de sulfato de sódio e sulfato de magnésio, em temperaturas de 20 e 40°C, por um período de 300 dias, verificou que não houve aceleração da deteriorização das argamassas com o aumento da temperatura das soluções de sulfato, e algumas propriedades das argamassas apresentaram melhoras significativas.

Roy et al (2001) verificaram o aumento da resistência química de argamassas com sílica ativa em comparação a argamassas sem adição, quando submetidas a soluções de ácido hidrolórico, ácido sulfúrico e ácido nítrico em concentrações de 1%, porém, para soluções de ácido sulfúrico, ácido acético e ácido fosfórico em concentrações de 5%, apresentaram uma fraca resistência.

Boddy et al (2000), estudando a forma da sílica ativa que possui a melhor capacidade de controlar a reação álcali-sílica em amostras de argamassa, com substituições de 4,8 e 12%

em massa de cimento por sílica ativa, constataram que a substituição de 12% de sílica ativa não densificada e sílica ativa densificada apresentaram melhores resultados.

Boddy et al (2003), estudando o conteúdo de SiO_2 da sílica ativa em argamassas, verificou que teores de SiO_2 de 88% são mais efetivos no controle da reação álcali-sílica do que teores de 68%, para as mesmas relações de substituição.

Bágel (1998) realizou estudos de argamassas com escória de alto forno e sílica ativa e observou que a presença de escória de alto forno em argamassas de sílica ativa garantiu que o aumento da demanda de água devido à alta finura da sílica ativa pareceu não ser tão expressivo como nas argamassas com adição somente de sílica ativa, fazendo com que a queda da resistência à compressão devido ao aumento da relação água/aglomerante seja significativamente mais baixa.

Rao (1998) relatou que argamassas com sílica ativa apresentaram altos valores de **retração por secagem**, concluindo que a adição de sílica ativa aumentou o conteúdo de silicato de cálcio hidratado que é o mais importante fator causador de retração em 28 dias.

Campagnolo e Dal Molin (1994), sobre o emprego de sílica ativa em argamassas a serem utilizadas **em reforços de elementos estruturais em concreto armado**, salientam o aumento da durabilidade, facilidade e rapidez de execução deste tipo de reforço, eliminação do uso de formas e a não necessidade de mão-de-obra especializada, com conseqüente diminuição dos custos.

Campagnolo et al (2003) realizaram um estudo comparativo de técnicas para aumento da capacidade portante de vigas de concreto, utilizando chapa de aço colada com resina epóxi, tecido de fibra de carbono colado com resina epóxi e armaduras incorporadas com utilização de argamassa de cimento Portland com adição de sílica ativa. Do ponto de vista econômico, a técnica de reforço com argamassa com sílica ativa obteve o menor custo unitário por aumento da capacidade de carga (custo/kN), sendo cerca de 11 vezes menor que a técnica de reforço utilizando chapa colada e 48 vezes menor que a técnica de reforço utilizando fibra de carbono.

Campagnolo et al (1996) ressaltam que a execução de reforços com argamassa com adição de sílica ativa, além da facilidade de execução e aquisição dos materiais constituintes do reforço, apresentam uma boa aderência entre a argamassa e o concreto antigo, conferindo à peça reforçada caráter monolítico e custo vantajoso comparado a outras técnicas.

Schuler (1998), após análises de argamassas com ou sem adição de sílica ativa, com relação às propriedades anteriormente citadas, recomenda o traço com 10% de sílica ativa e relação água/aglomerante de 0,55 como o que mais reúne aspectos favoráveis ao emprego em reparos de estruturas em concreto armado.

Baseado nestas referências considerou-se que as argamassas com adição de sílica ativa possuem os requisitos necessários para o reforço de estruturas de concreto, principalmente pelos efeitos benéficos da sílica ativa em várias das propriedades que se espera de um material de reforço.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL – PARTE 1: Determinação da relação entre a resistência à compressão da argamassa com adição de sílica ativa aplicada ao substrato e em corpos-de-prova normatizados

Considerando que para a realização de um serviço de reforço faz-se necessário a elaboração preliminar de um cálculo estrutural, é necessário o conhecimento de algumas características do material a ser empregado como reforço, independente de ser ele utilizado em alterações de função da estrutura, em que se tem o aumento da carga de utilização, ou devido a danos sofridos pela estrutura, onde o reforço passa a ser uma intervenção de recuperação.

Em ambos os casos, são da máxima importância o conhecimento da resistência à compressão que este material apresenta a fim de dimensionar com segurança o reforço de um determinado elemento estrutural.

Na utilização da técnica de reforço de estruturas em concreto armado em que se adota argamassa, seja ela com adição de algum produto que melhore suas qualidades, ou não, a determinação da sua resistência à compressão é feita baseada em procedimentos normatizados, cujos valores nem sempre são representativos da argamassa lançada no substrato.

Este capítulo procura estabelecer uma relação entre a resistência média da argamassa utilizada no reforço propriamente dito e a resistência média obtida na ruptura de corpos-de-prova de referência desta argamassa, no presente caso, com adição de sílica ativa.

A necessidade de se ter dados mais próximos à situação real de utilização de um reforço torna-se importante à medida que propicia a elaboração de projetos de reforços mais condizentes com a necessidade, evitando subdimensionamentos que possam vir a comprometer o resultado desejado.

3.1 Ensaios realizados

Sobre uma chapa de compensado de 14 mm de espessura, foram pregadas duas ripas de madeira com seção de 2,5x 2,5 cm e comprimento de 70 cm, afastadas entre si de 17 cm e, perpendicularmente a elas, duas ripas de mesma seção, sendo uma pregada em uma extremidade e a outra na extremidade oposta, formando um quadro retangular de 70 cm de altura por 17 cm de largura e espessura de 2,5 cm, procurando desta forma simular um reforço de espessura de 2,5 cm de uma das faces de um pilar de seção 12x12 cm e altura de 70 cm

Deste quadro, após lançamento e cura da argamassa, foram extraídas 36 amostras cúbicas de 25 mm de aresta.

Devido à falta de uma norma brasileira que recomende amostras cúbicas para determinação da resistência à compressão de argamassas, fez-se uso da norma americana ASTM C 109/C 109M que trata da determinação da resistência à compressão de argamassas de cimento usando amostras cúbicas de 50 mm de aresta. Desta norma foram utilizadas as recomendações quanto à velocidade de aplicação da carga durante o ensaio, área da seção transversal a ser adotada para o cálculo da resistência à compressão e a forma da amostra propriamente dita, já que as amostras cúbicas adotadas no presente trabalho são de 25 mm de aresta, medida esta delimitada pela espessura da placa que simula um reforço.

Foram também extraídas 36 amostras prismáticas de seção quadrada de 25 mm de lado e altura de 50 mm de forma a comparar a resistência à compressão das amostras quando com relação altura/lado igual a um e igual a dois.

Com relação aos corpos-de-prova cilíndricos, a determinação da resistência à compressão baseou-se nas recomendações da NBR 13279 (ABNT, 1995).

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Cimento

Como a maioria dos reforços são executados em estruturas avariadas que correm risco de colapso ou a intervenção causa transtornos aos usuários, é recomendável a utilização de materiais que desempenhem suas capacidades mecânicas logo nas primeiras idades da execução dos mesmos. Por este motivo, foi utilizado como aglomerante hidráulico o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), com massa específica $3,13 \text{ kg/dm}^3$, que desenvolve grande resistência nos primeiros dias de idade. Outro fator para a escolha do cimento Portland CPV-ARI é por ser um tipo de cimento que possui um mínimo de adição em sua composição, sendo a sílica ativa a única adição pozolânica da argamassa (NBR 5733, 1991).

As características químicas e físicas do cimento são apresentadas nos quadros 3.1 e 3.2.

Quadro 3.1 - Ensaio químicos – CP V-ARI - Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.

Ensaio químicos	
Perda ao fogo a 1000 oC	2,35%
CaO livre	1,36%
MgO	1,59%
SiO ₃	3,09%
Resíduo insolúvel	0,45%

Quadro 3.2 - Ensaio físicos – CP V-ARI - Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.

Ensaio físicos	
Superfície específica	453 m ² /kg
Resíduo # 200	0,10%
Início de pega	125 min.
Fim de pega	218 min.
Massa específica	3,13 g/cm ³
Resistência a 1 dia	24,0 MPa
Resistência a 3 dias	42,7 MPa
Resistência a 7 dias	47,2 MPa
Resistência a 28 dias	55,7 MPa

3.2.2 Sílica ativa

Utilizou-se sílica ativa coletada em fábrica de silício metálico, comercializado puro, em pó, não densificada, com massa específica 2,22 g/cm³.

As características químicas e físicas da sílica ativa são apresentadas nos quadros 3.3 e 3.4.

Quadro 3.3 - Ensaaios químicos – sílica ativa – Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.

Ensaaios químicos	
SiO ₂	95,00%
Al ₂ O ₃	0,06%
Fe ₂ O ₃	0,04%
CaO	0,17%
MgO	0,41%
TiO ₂	0,01%
Na ₂ O	0,51%
K ₂ O	0,49%

Quadro 3.4 - Ensaaios físicos – sílica ativa – Fonte: Camargo Corrêa Industrial S.A.

Ensaaios físicos	
Massa específica	2,22 g/cm ³
Superfície específica	20,00 m ² /g
Diâmetro médio	0,20 µm

3.2.3 Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo areia quatzosa, com massa específica 2,63 g/cm³, determinada segundo a NBR 9776 (ABNT, 1987), dimensão máxima característica igual a 4,8 mm e módulo de finura 2,50, conforme a NBR 7217 (ABNT, 1987), e classificada como areia média (zona 3), segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983).

A distribuição granulométrica e classificação do agregado miúdo são apresentadas no quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Distribuição granulométrica e classificação do agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média retida acumulada (%)	Zona 3 NBR 7211/83 (%)
4,8	0	0	0 a 11
2,4	6	6	0 a 25
1,2	14	21	10 a 45
0,6	22	42	41 a 65
0,3	40	82	70 a 92
0,15	17	99	90 a 100
< 0,15	1	100	100
Total		250	211 a 338

Dimensão máxima = 4,8 mm

Módulo de finura = 2,50

Areia média $2,11 < 2,50 < 3,38$

3.2.4 Água

A água utilizada foi potável, disponível na rede de abastecimento onde se realizou o trabalho.

3.3 Metodologia

A chapa de compensado onde foi montado o quadro para a execução da placa de argamassa simulando um reforço, conforme descrito no item 3.1, foi fixada firmemente a uma estrutura rígida na posição vertical, de modo a não sofrer vibrações quando do impacto da argamassa, representando uma situação próxima da realidade de reforço em pilar (figura 3.1).

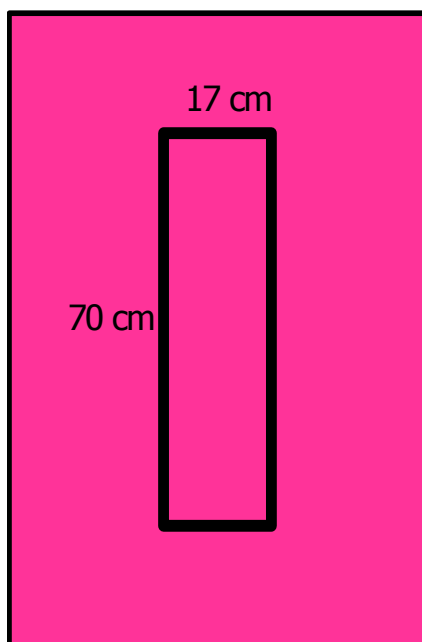


Figura 3.1 - Dispositivo para execução da placa

O traço adotado para a argamassa, em massa, foi 1(cimento):3(areia), com adição de 10% de sílica ativa sobre a massa de cimento, com uma relação água/aglomerante de 0,50, baseado nas recomendações de Schuler (1998), conforme item 2.3.

Foi feita uma mistura de $4,0 \text{ dm}^3$ em uma betoneira de laboratório, de eixo vertical, suficiente para preenchimento da placa e corpos-de-prova cilíndricos e eventuais perdas durante a execução da placa.

O lançamento da argamassa foi executado por um funcionário do laboratório, com colher de pedreiro (fig. 3.2), tendo-se o cuidado de antes umedecer a superfície que receberia a argamassa. O preenchimento da placa foi feito da base para o topo e dos bordos para o centro, tendo sido posteriormente desempenada.



Figura 3.2 - Aplicação da argamassa na placa

A única forma de adensamento a que a argamassa ficou submetida foi devido ao impacto de cada porção de argamassa lançada contra a chapa de compensado, alguma pressão exercida pelo funcionário durante o desempenamento e o peso das camadas de argamassa que iam se sobrepondo.

Após o desempenamento, a placa foi envolvida por um plástico de forma a evitar a evaporação da água de amassamento até que ocorresse o fim da pega da argamassa e, após, foi retirado o plástico e envolvida por um saco de aniagem molhado e, por sobre este, um plástico, com o intuito de diminuir ao máximo a evaporação da água de molhagem. Este conjunto foi molhado por 3 vezes, em um período de 7 dias. Foi feita uma medição da umidade relativa por sob o saco de aniagem antes de ser novamente molhado e verificou-se um índice de 97%, confirmando a eficiência do método de cura adotado.

Tendo-se concluído a cura, a placa foi desformada e dividida em 3 partes em relação à altura (fig. 3.3), cada uma com $\frac{1}{3}$ da altura da placa e, em 6 partes em relação à largura, cada uma com $\frac{1}{6}$ da largura da placa. Foram marcados os corpos-de-prova, sua posição na placa de forma que quando ensaiados à compressão, no caso dos corpos-de-prova cúbicos, não houvesse a possibilidade de aplicação de carga perpendicularmente à direção que o reforço atuaria na prática, identificados por números e extraídos através de corte por disco

diamantado, tendo suas faces inferior e superior lixadas. Após foram medidos com paquímetro para verificação de suas reais dimensões já que o processo de corte dos corpos-de-prova não é totalmente preciso, gerando variações nas dimensões das amostras.



Figura 3.3 – Placa e corpos-de-prova cilíndricos

Os corpos-de-prova prismáticos foram ensaiados aos 28 dias (fig. 3.4 e 3.5), tendo sido usada uma placa de couro de 40x40 mm e 3 mm de espessura entre os pratos da prensa e a base e topo dos mesmos, procurando desta forma atenuar o atrito e concentrações de tensões devido a irregularidades na superfície de contato. A velocidade de carregamento para ruptura das amostras foi de 1000 N por segundo.

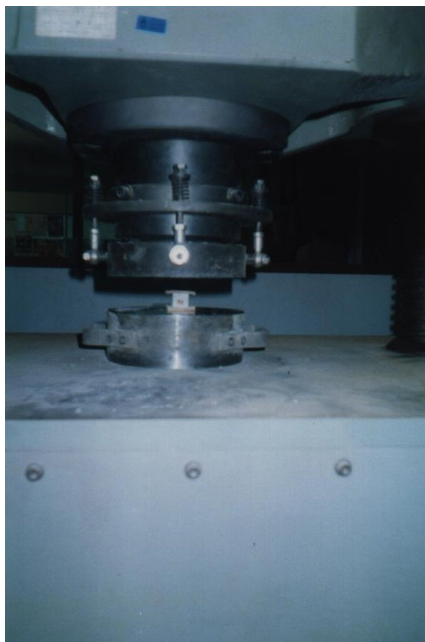


Figura 3.4 - Ensaio dos corpos-de-prova cúbicos (25x25x25 mm)

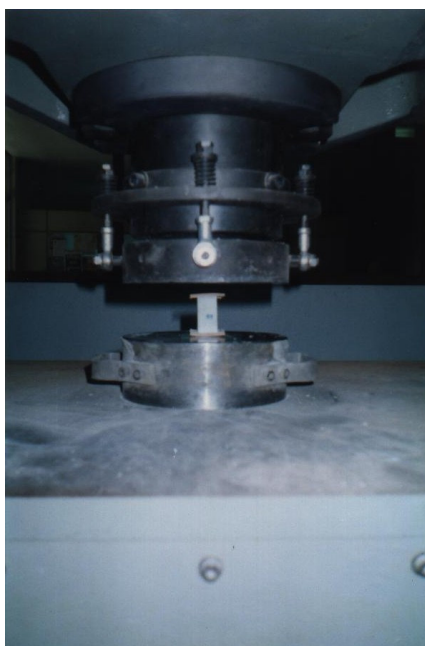


Figura 3.5 - Ensaio dos corpos-de-prova prismáticos de seção quadrada (25x25x50 mm)

Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados e ensaiados (fig. 3.6) conforme a NBR 13279 (ABNT, 1995), com exceção da cura, onde o procedimento adotado foi semelhante ao do utilizado para a cura da placa. Após moldagem, os corpos-de-prova foram envolvidos por um plástico até o fim da pega, desmoldados e envolvidos por um saco de aniagem molhado e, por sobre este, um plástico, tentando evitar ao máximo a evaporação da água, sendo molhados da mesma forma que a placa, por um mesmo período. A ruptura dos mesmos foi efetuada com a idade de 28 dias.

Devido a perda de argamassa acima da estimada durante a execução da placa, não foi possível moldar quatro corpos-de-prova como preconiza a norma, sendo moldado somente três.

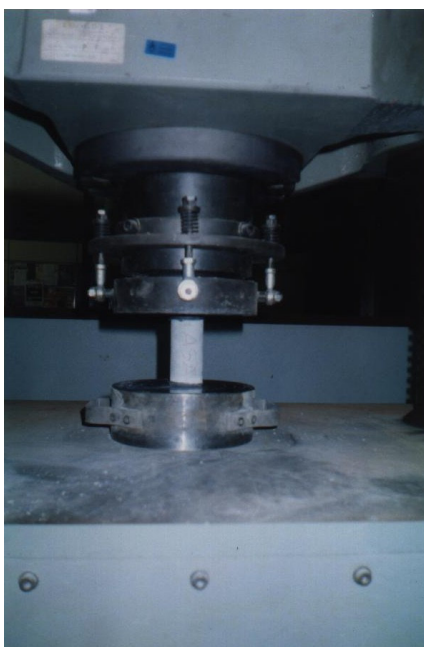


Figura 3.6 - Ensaio dos corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm)

A figura 3.7 apresenta a localização das amostras na placa.

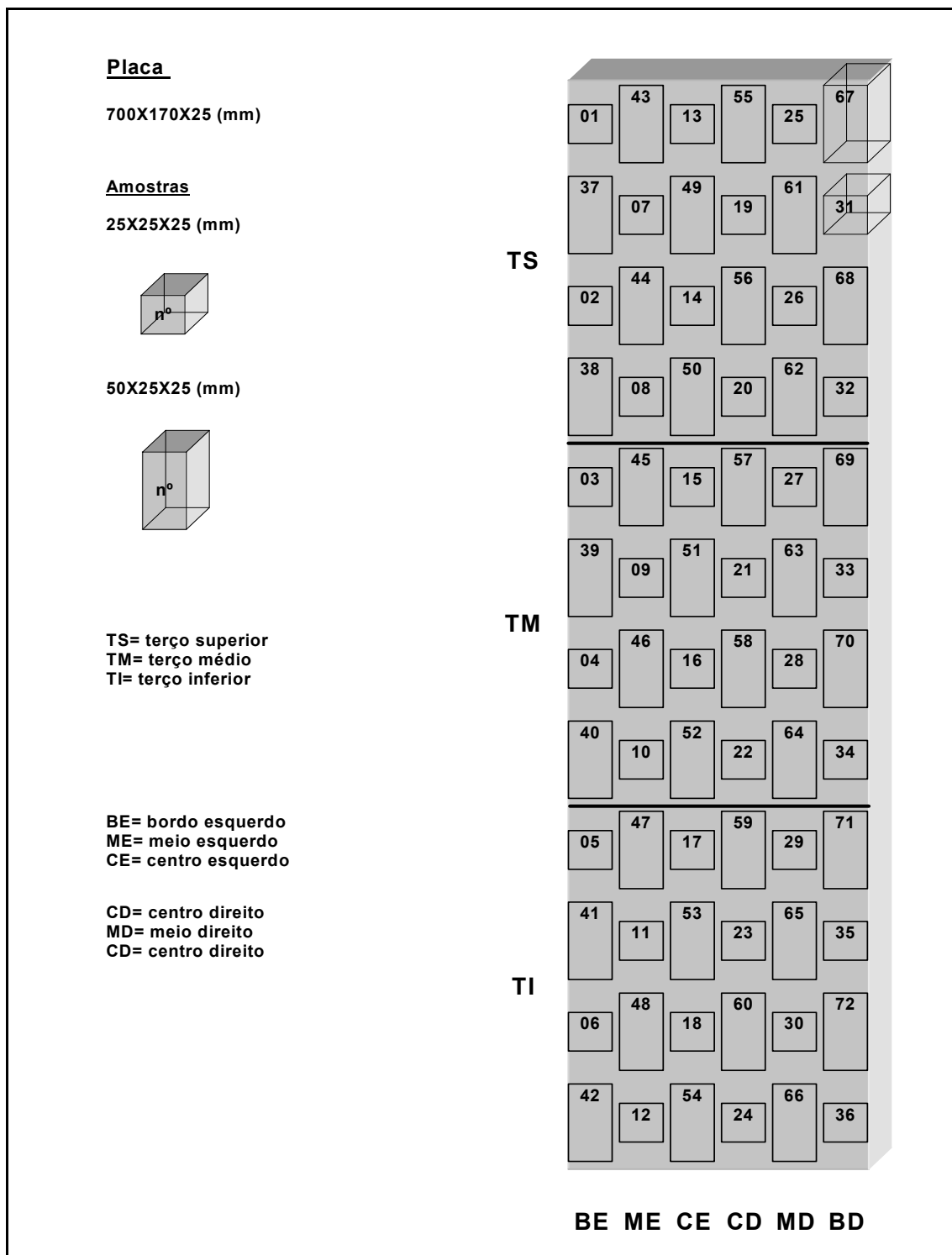


Figura 3.7 - Localização das amostras na placa

3.4 Resultados obtidos

A tabela 3.1 apresenta as resistências à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos.

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de controle da argamassa

CP	Carga (kN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
1	76,00	1963,50	38,71	43,71	4,85	11,09
2	86,50	1963,50	44,05			
3	95,00	1963,50	48,38			

As tabelas 3.2 e 3.3 e figura 3.8 a seguir apresentam as dimensões, cargas de ruptura e resistências obtidas para os corpos-de-prova prismáticos de razão altura/lado igual a um (1 a 36) e razão altura/lado igual a dois (37 a 72), respectivamente.

As figuras 3.9 e 3.10 apresentam gráficos comparativos das resistências de ruptura de amostras de razão altura/lado igual a 1 e igual a 2, e resistências médias das amostras prismáticas e cilíndricas, respectivamente.

Tabela 3.2 - Amostras razão altura/lado=1

Amostra (n°)	Altura (mm)	Seção (mm)			Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
		a	b	Área (mm ²)					
01	24,95	24,83	24,87	617,52	20,50	33,20	32,52	4,03	12,39
02	24,56	24,86	24,85	617,77	18,50	29,95			
03	24,79	24,80	24,90	617,52	16,00	25,91			
04	24,75	24,89	24,88	619,26	22,50	36,33			
05	24,68	24,78	24,85	615,78	20,00	32,48			
06	24,70	24,78	24,83	615,29	20,50	33,32			
07	24,68	24,80	24,93	618,26	23,00	37,20			
08	24,86	24,89	24,82	617,77	19,00	30,76			
09	24,77	24,83	24,80	615,78	22,50	36,54			
10	24,84	24,78	24,75	613,31	17,00	27,72			
11	24,71	24,84	24,89	618,27	20,00	32,35			
12	24,69	24,83	24,88	617,77	22,00	35,61			
13	24,72	24,90	24,85	618,77	20,00	32,32			
14	24,75	24,86	24,80	616,53	24,00	38,93			
15	24,98	24,85	24,75	615,04	21,00	34,14			
16	24,71	24,79	24,85	616,03	24,50	39,77			
17	24,88	24,82	24,84	616,53	19,00	30,82			
18	24,89	24,78	24,79	614,30	18,50	30,12			
19	24,87	24,85	24,80	616,28	20,50	33,26			
20	24,87	24,86	24,76	615,53	20,00	32,49			
21	24,82	24,87	24,80	616,78	20,00	32,43			
22	24,81	24,78	24,83	615,29	19,50	31,69			
23	24,78	24,82	24,75	614,30	20,50	33,37			
24	24,92	24,90	24,84	618,52	17,50	28,29			
25	24,69	24,84	24,80	616,03	19,00	30,84			
26	24,87	24,76	24,80	614,05	19,50	31,76			
27	24,92	24,83	24,85	617,03	15,50	25,12			
28	24,84	24,77	24,78	613,80	18,00	29,33			
29	24,77	24,78	24,80	614,54	21,50	34,99			
30	24,88	24,82	24,79	615,29	21,50	34,94			
31	24,80	24,78	24,76	613,55	25,50	41,56			
32	24,73	24,80	24,78	614,54	20,50	33,36			
33	24,81	24,80	24,76	614,05	16,50	26,87			
34	24,90	24,84	24,75	614,79	14,00	22,77			
35	24,94	24,90	24,87	619,26	22,00	35,53			
36	24,82	24,83	24,88	617,77	21,50	34,80			

Tabela 3.3 – Amostras razão altura/lado=2

Amostra (n°)	Altura (mm)	Seção (mm)			Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
		a	b	Área (mm ²)					
37	50,08	24,87	24,86	618,27	17,50	28,30	28,44	4,42	15,54
38	50,19	24,75	24,85	615,04	18,00	29,27			
39	50,01	24,78	24,83	615,29	15,50	25,19			
40	50,23	24,84	24,84	617,03	20,00	32,41			
41	50,20	24,79	24,76	613,80	16,50	26,88			
42	50,15	24,82	24,78	615,04	19,00	30,89			
43	50,29	24,77	24,77	613,55	21,00	34,23			
44	50,16	24,80	24,78	614,54	20,00	32,54			
45	50,01	24,78	24,85	615,78	16,50	26,80			
46	50,18	24,79	24,77	614,05	18,00	29,31			
47	50,38	24,82	24,88	617,52	20,00	32,39			
48	50,42	24,77	24,84	615,29	12,50	20,32			
49	50,10	24,84	24,77	615,29	17,00	27,63			
50	50,00	24,75	24,76	612,81	17,00	27,74			
51	50,17	24,82	24,77	614,79	23,00	37,41			
52	50,36	24,77	24,75	613,06	11,50	18,76			
53	50,02	24,79	24,77	614,05	20,00	32,57			
54	50,05	24,78	24,83	615,29	15,00	24,38			
55	50,04	24,79	24,80	614,79	17,50	28,46			
56	50,10	24,81	24,79	615,04	18,00	29,27			
57	50,00	24,85	24,77	615,53	14,50	23,56			
58	50,08	24,84	24,74	614,54	20,00	32,54			
59	50,03	24,79	24,78	614,30	17,50	28,49			
60	50,05	24,85	24,80	616,28	18,50	30,02			
61	50,04	24,80	24,98	619,50	21,00	33,90			
62	50,11	24,85	24,75	615,04	14,50	23,58			
63	50,03	24,78	24,79	614,30	16,00	26,05			
64	50,14	24,83	24,78	615,29	15,00	24,38			
65	50,17	24,77	24,76	613,31	13,00	21,20			
66	50,16	24,85	24,80	616,28	14,50	23,53			
67	50,01	24,94	24,90	621,01	24,00	38,65			
68	50,19	24,93	24,88	620,26	18,50	29,83			
69	50,28	24,78	24,90	617,02	17,50	28,36			
70	50,04	24,82	24,88	617,52	17,50	28,34			
71	50,58	24,80	24,79	614,79	18,00	29,28			
72	50,21	24,88	24,88	619,01	17,00	27,46			

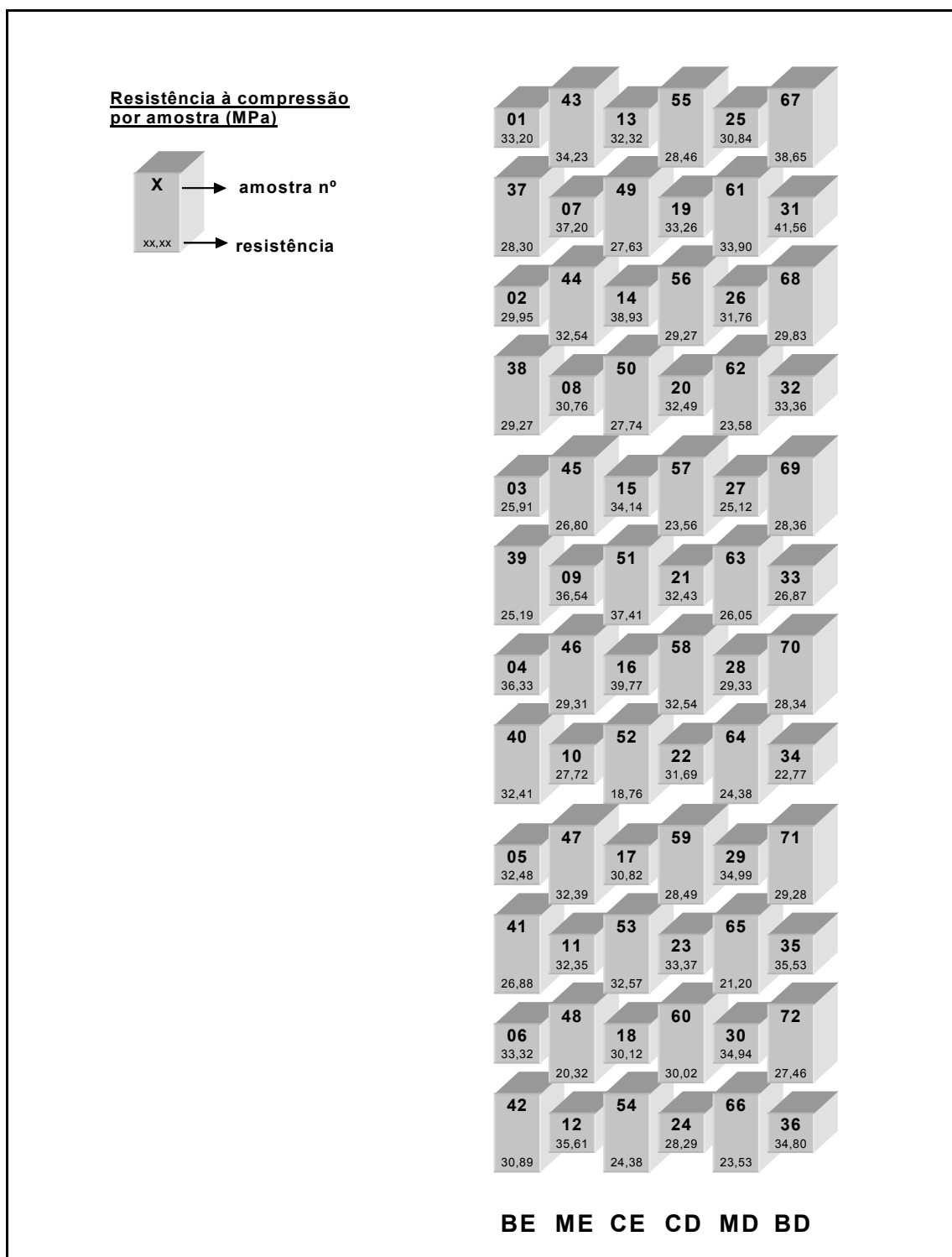


Figura 3.8 – Resistência à compressão das amostras

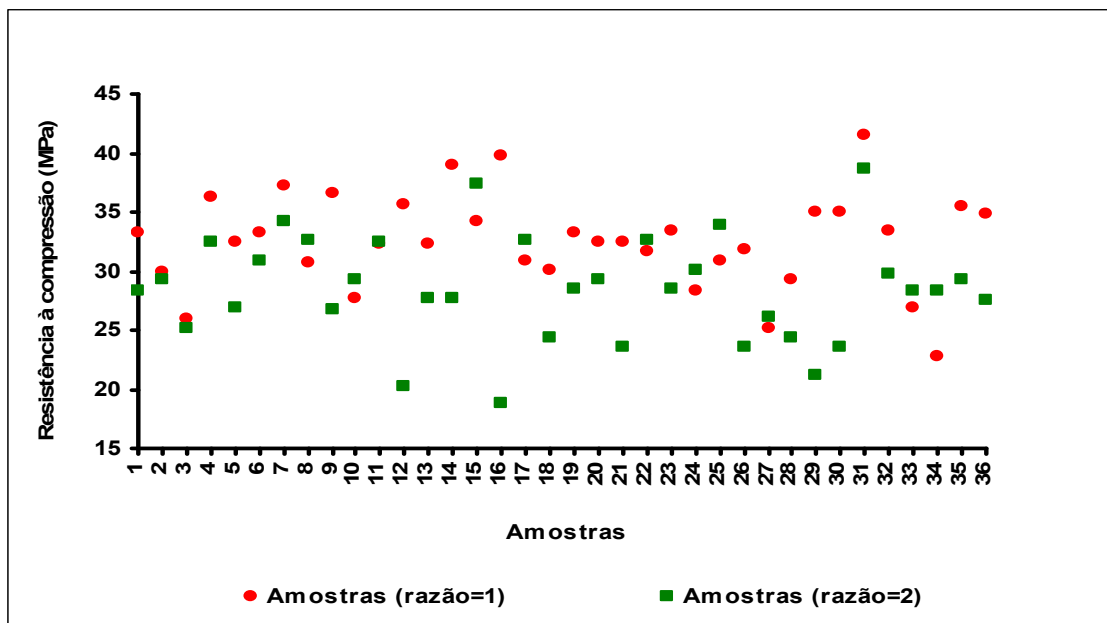


Figura 3.9 – Resistências das amostras de razão altura/lado igual a 1 e igual a 2

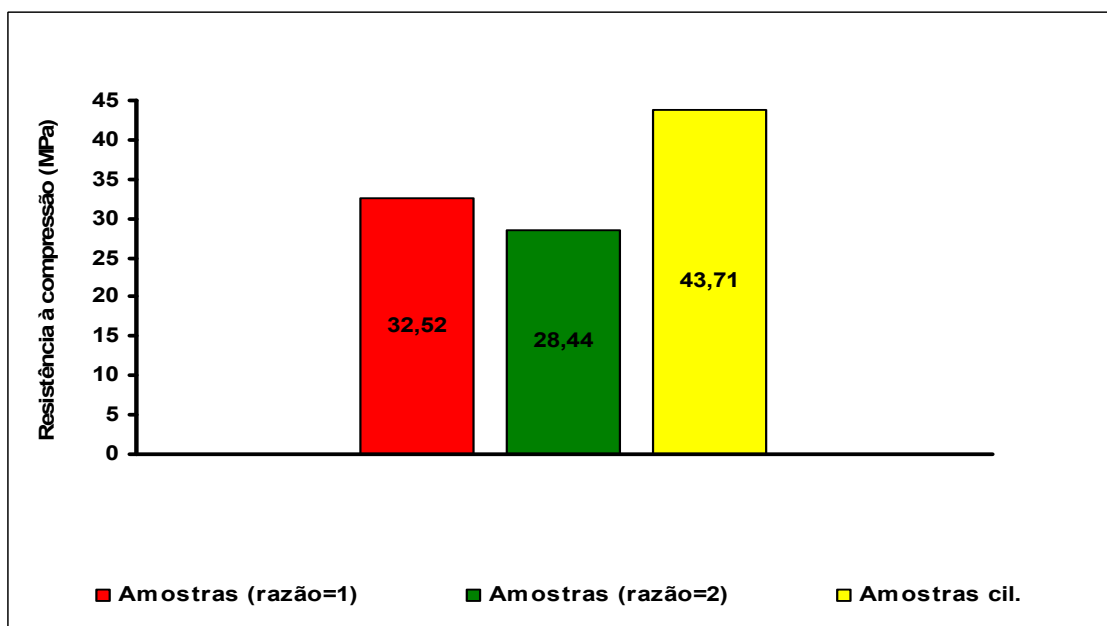


Figura 3.10 – Resistências médias

3.5. Análise dos resultados

Numa primeira análise dos dados das amostras retiradas da placa, verifica-se que os coeficientes de assimetria não são significativos, isto é, as resistências estão simetricamente distribuídas com respeito à média. Considera-se que para a distribuição normal o coeficiente de assimetria $g_1 \approx 0$ (NANNI e RIBEIRO, 1992).

Os coeficientes de curtose (achatamento) também não são significativos, considerando que para a distribuição normal o coeficiente de curtose $g_2 \approx 3$ (NANNI e RIBEIRO, 1992).

O coeficiente de variação das amostras prismáticas e cilíndricas é satisfatório. Em geral um coeficiente de variação igual a 25% é aceito como um limite para se considerar uma amostra aceitável (NANNI e RIBEIRO, 1992), porém, no caso específico de concretos a NBR 6118/82 estipula um coeficiente de variação máximo de 20%.

Realizou-se uma análise estatística dos resultados obtidos para a resistência à compressão das amostras prismáticas através da análise de variância, ANOVA, que permite comparar grupos de valores considerando a variabilidade das médias entre os grupos com a variabilidade das observações dentro dos grupos, baseado na distribuição de Fischer, com um F tabelado para o nível de significância de 5% e, $F(n_i, n_e)$, sendo n_i = número de graus de liberdade do efeito e n_e = número de graus de liberdade do erro.

Foram consideradas como variáveis, que são os fatores que podem influenciar a propriedade em estudo, a largura da placa dividida em seis faixas, a altura dividida em três terços e a razão em relação às alturas entre as amostras, bem como as interações entre as variáveis consideradas.

A partir dos resultados da ANOVA (tabela 3.4), verifica-se que a relação entre a altura/lado das amostras têm influência significativa na resistência à compressão, sendo que os demais fatores, bem como as interações entre eles, não apresentaram influência significativa.

Tabela 3.4 – Análise de variância para resistência à compressão das amostras prismáticas

FONTE	SQ	GL	MQ	F calc	F tab	EFEITO
A (altura)	97,89588	2	48,94794	2,56406	3,259444	não significativo
B (largura)	82,54917	5	16,50983	0,864841	2,477165	não significativo
C (razão)	299,9604	1	299,9604	15,71295	4,113161	<i>significativo</i>
AB (axl)	161,3172	10	16,13172	0,845034	2,106056	não significativo
AC (axr)	26,51012	2	13,25506	0,694345	3,259444	não significativo
BC (lrx)	39,08636	5	7,817273	0,409495	2,477165	não significativo
ABC (axlrx)	157,6304	10	15,76304	0,825722	2,106056	não significativo
ERRO	687,24047	36	19,09001	-	-	-
TOTAL	1552,19	71	-	-	-	-

Neville (1982), com relação a corpos-de-prova cilíndricos, recomenda a escolha da relação altura/diâmetro igual a dois como adequada, não só porque o efeito dos topos é eliminado e existe uma região de compressão uniaxial no interior do corpo-de-prova, mas também porque o valor da resistência obtida não é significativamente influenciado por um pequeno afastamento dessa proporção e, no caso de corpos-de-prova prismáticos, a influência da relação da altura sobre a menor dimensão transversal também é válida.

As figuras 3.11 e 3.12 apresentam as distribuições das resistências (função de Gauss) das amostras de razão altura/lado igual a 1 e igual a 2, respectivamente.

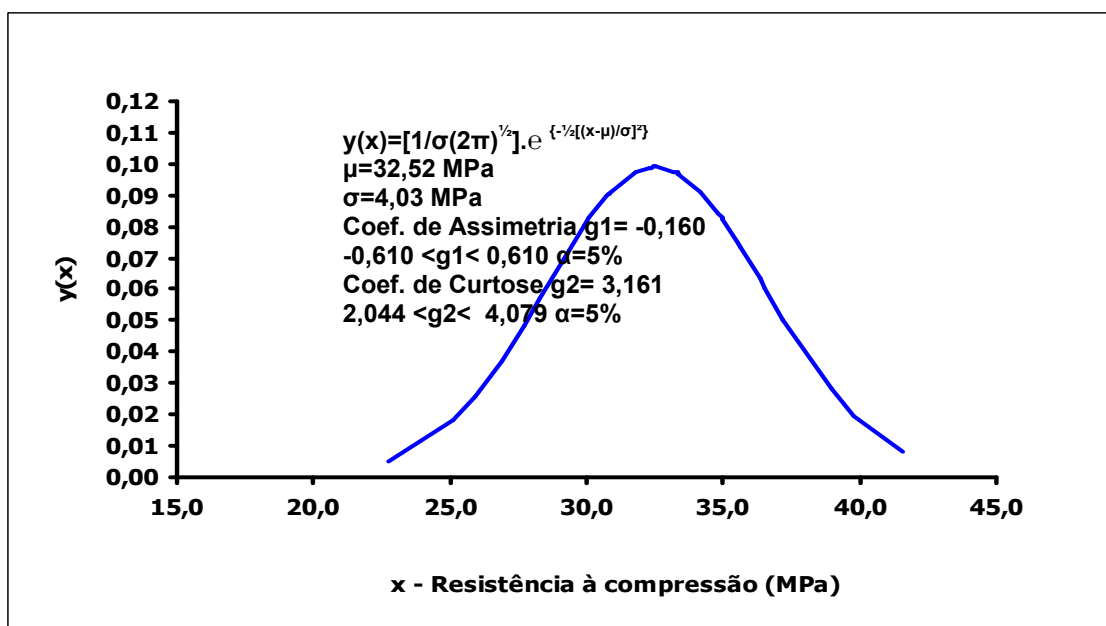


Figura 3.11 – Distribuição das resistências das amostras razão altura/lado=1

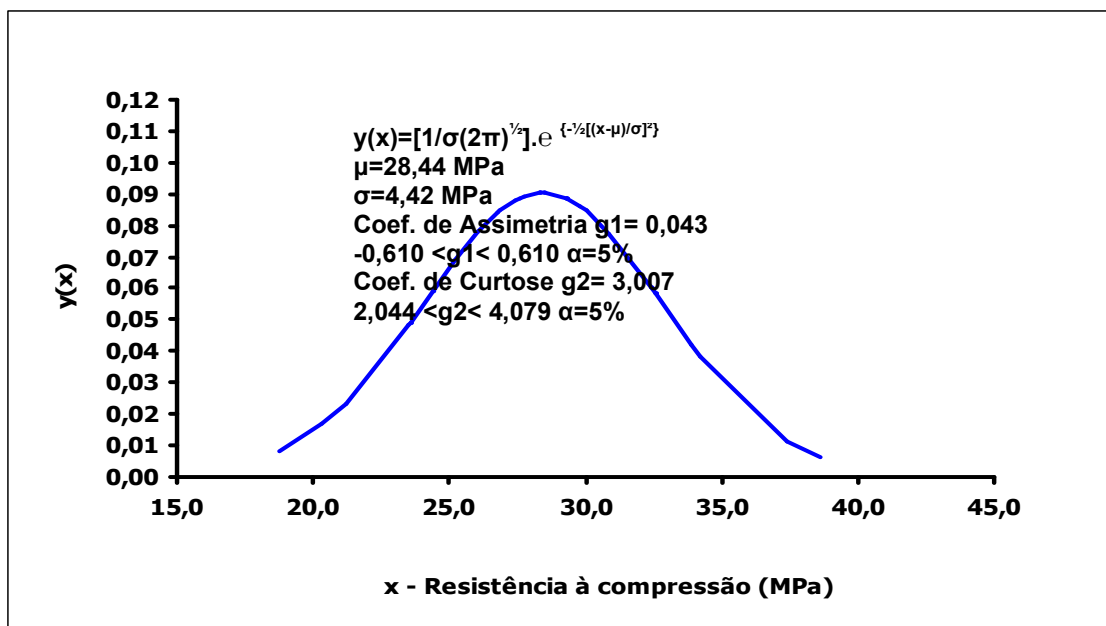


Figura 3.12 – Distribuição das resistências das amostras razão altura/lado=2

Mehta e Monteiro (1994) informam que, em comparação com o corpo-de-prova padrão, razão altura/diâmetro igual a dois, os corpos-de-prova com razão altura/diâmetro igual a um apresentam resistência aproximadamente 15% maior.

Considerando que corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos possuem um comportamento similar às mudanças de geometria, altura/diâmetro e altura/lado, pode-se assim comparar a resistência média obtida pelos corpos-de-prova com relação altura/lado igual a um e igual a dois e constatar que os corpos-de-prova com razão altura/lado igual a um obtiveram resistência média aproximadamente 14% superior à dos corpos-de-prova com razão altura/lado igual a dois, verificando-se que o comportamento apresentado segue o esperado.

Tomando-se o fator resultante da razão entre as médias, $32,52/28,44$, e corrigindo as resistências obtidas dos corpos-de-prova de razão altura/lado igual a um por este fator, obtem-se uma nova distribuição de resistências para estas amostras que passa a ter uma resistência média igual à resistência média dos corpos-de-prova de razão altura/lado igual a dois.

Considerando que a resistência média da placa seja a média das médias das amostras estudadas, tem-se como média da placa 28,44 MPa.

As figuras 3.13 e 3.14 apresentam gráficos comparativos das resistências de ruptura de amostras de razão altura/lado igual a 1 corrigidas, razão altura/lado igual a 2 e resistência média da placa, e resistências médias das amostras prismáticas, placa e amostras cilíndricas, respectivamente.

As figuras 3.15 e 3.16 apresentam as distribuições das resistências (função de Gauss) das amostras de razão altura/lado igual a 1 corrigidas, e as amostras de razão altura/lado igual a um corrigidas e igual a dois como uma amostra única de 72 elementos.

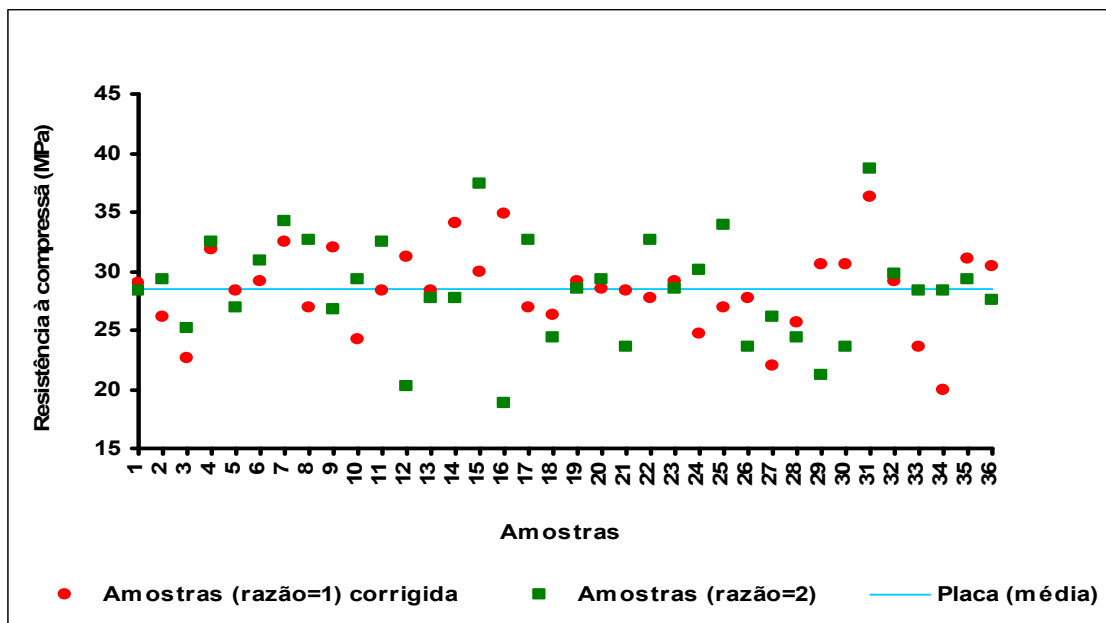


Figura 3.13 – Resistências das amostras de razão altura/lado igual a 1 corrigidas, razão altura/lado igual a 2 e resistência média da placa

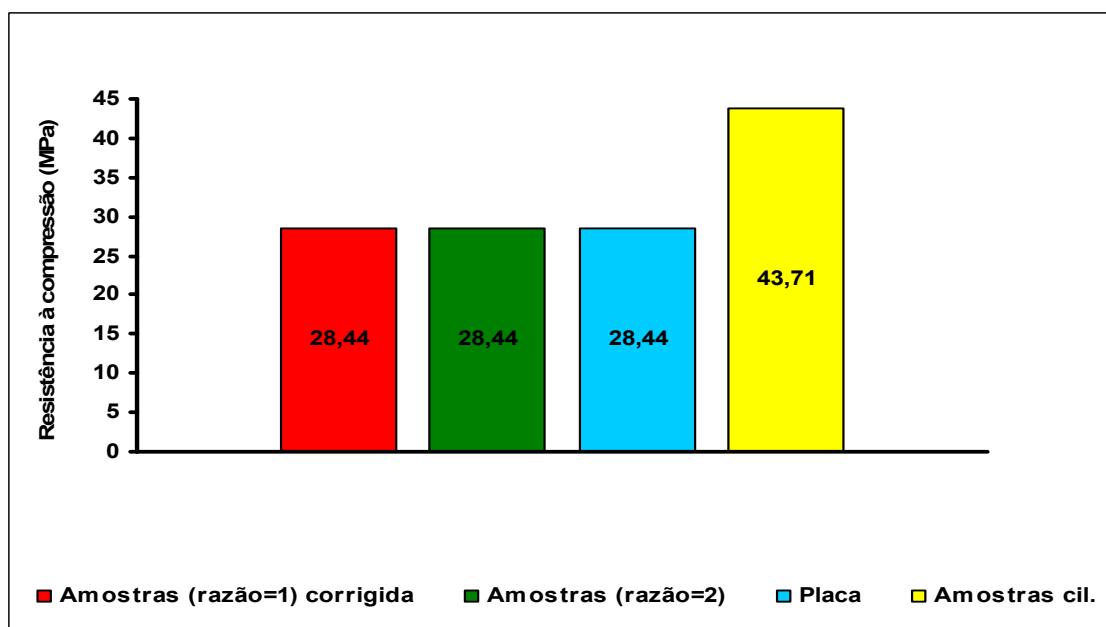


Figura 3.14 – Resistências médias

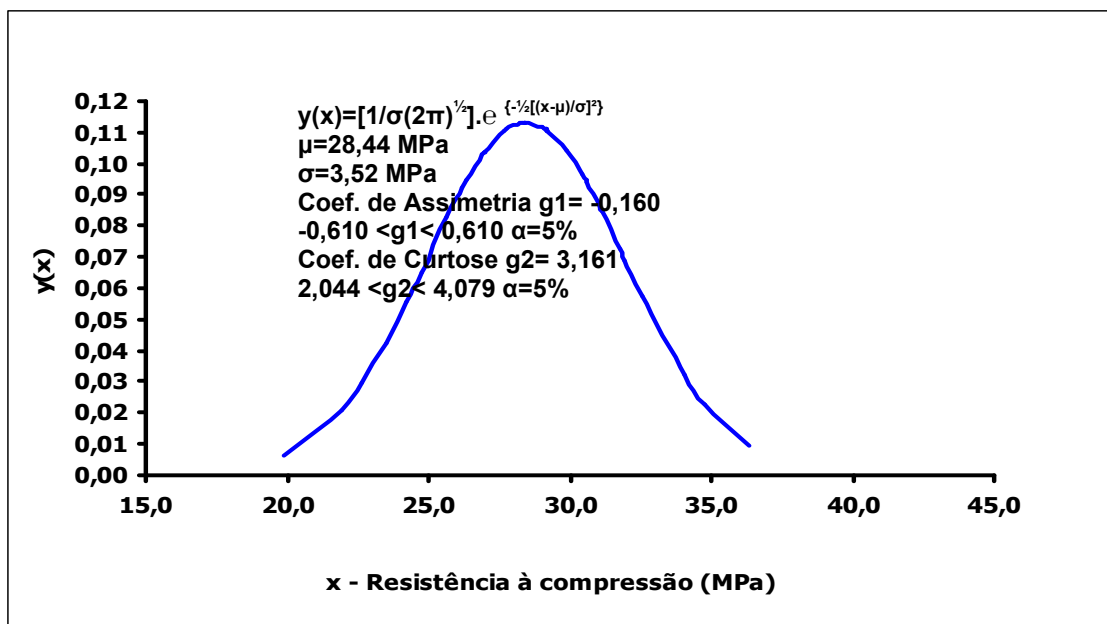


Figura 3.15 – Distribuição das resistências das amostras razão altura/lado=1 corrigidas

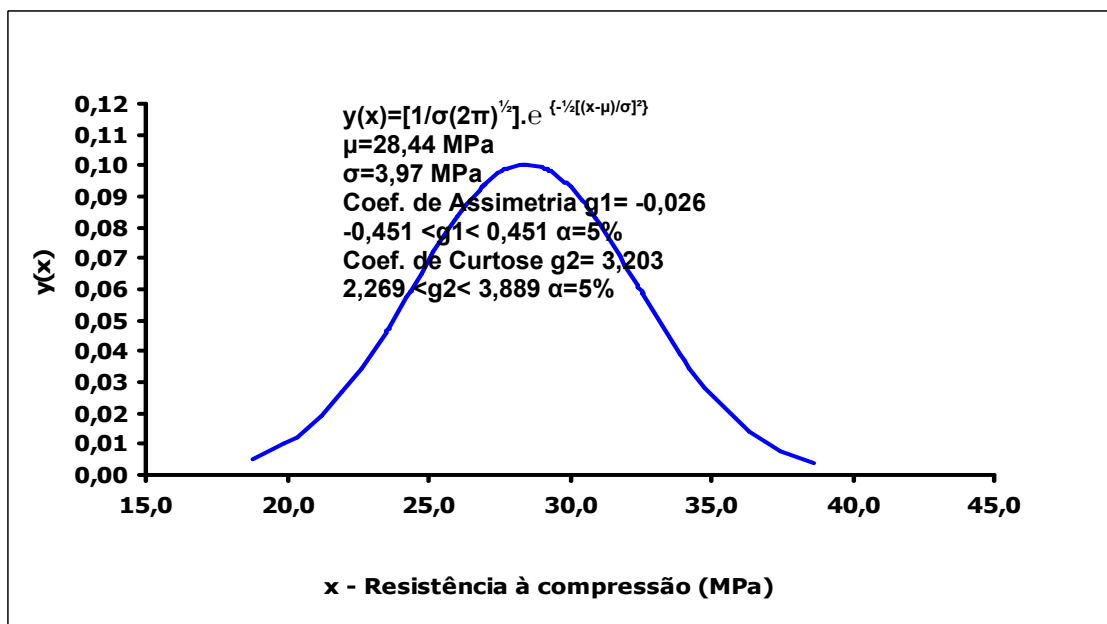


Figura 3.16 – Distribuição das resistências na placa

Constata-se que os coeficientes de assimetria e curtose também se enquadram dentro dos limites para que uma determinada distribuição seja considerada normal, assim como o coeficiente de variação da nova amostra, 13,95 %, é aceitável.

A tabela 3.5 apresenta o resultado da nova análise de variância da amostra total.

Tabela 3.5 – Análise de variância para resistência à compressão das amostras prismáticas (com as amostras razão=1 corrigidas)

FONTE	SQ	GL	MQ	F calc	F tab	EFEITO
A (altura)	86,11702	2	43,05851	2,446395	3,259444	não significativo
B (largura)	75,1004	5	15,02008	0,853375	2,477165	não significativo
C (razão)	0	1	0	0	4,113161	não significativo
AB (axl)	133,0322	10	13,30322	0,755831	2,106056	não significativo
AC (axr)	23,69118	2	11,84559	0,673014	3,259444	não significativo
BC (lrx)	37,09279	5	7,418557	0,42149	2,477165	não significativo
ABC (axlrx)	129,8082	10	12,98082	0,737513	2,106056	não significativo
ERRO	633,62869	36	17,6008	-	-	-
TOTAL	1118,47	71	-	-	-	-

As variáveis altura, largura e a interação entre elas continuam sem efeito significativo e a variável razão, com a correção das amostras de razão altura/lado=1, passa a não ter mais efeito.

Nas figuras 3.17, 3.18 e 3.19 pode-se visualizar os gráficos das distribuições transversais, longitudinais e de superfície de resistências, para uma melhor compreensão do comportamento das resistências pela placa, considerando-se as resistências das amostras com relação altura/lado igual a um corrigidas. As denominações BE, ME, CE, CD, MD e BD são as mesmas que se encontram na figura 3.7 “localização das amostras na placa”.

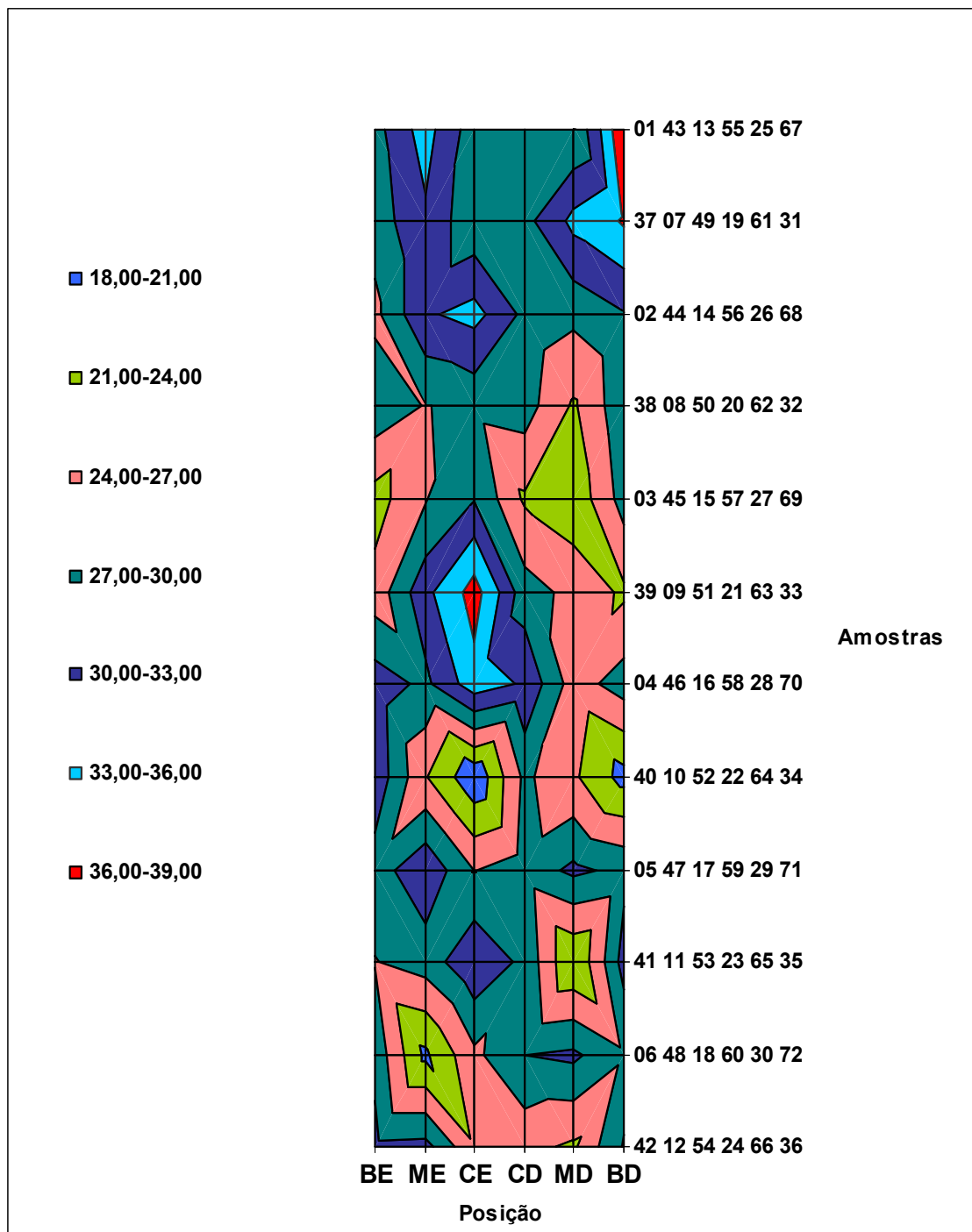


Figura 3.19 – Distribuição das resistências na placa (MPa)

Após as considerações com relação às amostras prismáticas extraídas da placa de argamassa simulando um reforço, e tomando a resistência média de 28,44 MPa como sendo

representativa desta placa, pode-se fazer uma correlação com a resistência média obtida pelas amostras cilíndricas.

A resistência média obtida pelos corpos-de-prova cilíndricos, moldados com a mesma argamassa com que foi executada a placa, foi de 43,71 MPa. Quando comparada com a resistência média à compressão das amostras prismáticas extraídas da placa, 28,44 MPa, esta apresenta uma redução em relação à resistência média à compressão resultante dos corpos-de-prova cilíndricos da ordem de 35%.

A redução observada deve-se, provavelmente, a um adensamento menos eficiente, e consequentemente uma maior quantidade de ar incorporado, que a argamassa fica sujeita quando do lançamento no substrato em relação ao adensamento padrão efetuado na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.

Na execução de um reforço, cada porção de argamassa que é lançada sofre um adensamento que varia em função da energia com que colide com o substrato, gerando, desta forma, pontos de diferentes resistências por toda a extensão do reforço, refletindo diretamente sobre a resistência do reforço como um todo, que por sua vez define a nova capacidade portante do elemento estrutural em questão.

A energia que uma determinada porção de argamassa possui quando lançada e transfere na forma de adensamento, varia em função da massa da porção de argamassa, velocidade que esta porção é lançada e o ângulo com que colide com o substrato, fatores estes que somados aos outros fatores que determinam a resistência de argamassas e concretos, justificam as variações de tensões encontradas.

3.6 Conclusões

Em se tratando de uma técnica de reforço para estruturas em concreto armado, executada de forma manual com todas as variáveis intrínsecas que um processo desta natureza envolve e materiais constituintes comuns, conclui-se que mesmo com a perda de resistência observada na placa em relação aos corpos-de-prova cilíndricos, obteve-se uma resistência média superior à maioria das resistências encontradas em concretos de obras correntes.

A execução da placa através de um processo mecanizado onde a argamassa fosse lançada de forma mais uniforme provavelmente seja a maneira de se reduzir à variabilidade de resultados encontrados conforme apresentado nos gráficos 3.17, 3.18 e 3.19.

Observa-se que o uso de amostras prismáticas de relação altura/lado igual a dois é plenamente aceitável ante a análise da razão em relação às alturas das amostras realizada, facilitando a extração, manuseio e ensaio das amostras e não necessitando qualquer correção dos resultados, sendo, portanto tal relação sugerida para futuros trabalhos.

Considerando que a resistência à compressão das amostras da placa é uma variável aleatória contínua que obedece a distribuição normal e, conhecendo-se o parâmetro de tendência central que é a média aritmética das resistências das amostras e o parâmetro de dispersão, que é o desvio padrão, pode-se determinar uma resistência característica da argamassa “ f_{ak} ” que é um valor particular da distribuição cuja probabilidade de ser ultrapassado é de 95% e conseqüentemente, com 5% de probabilidade de não se atingido.

Sendo o valor da resistência característica “ f_{ak} ” correspondente ao quartil de 5% da distribuição, pode-se com auxílio da tabela de valores da distribuição normal, calcular “ f_{ak} ” em função da resistência média e do desvio padrão, onde $f_{ak} = 28,44 - 1,65 \times 3,97 = 21,89$ MPa seria a resistência para fins de dimensionamento mais apropriada a se adotar.

Quanto a adotar-se a resistência média de um reforço como sendo da ordem de 65% da resistência média das amostras cilíndricas de controle, é demasiadamente prematuro, sendo necessário o estudo de mais placas de tal forma que se possa comprovar de maneira mais efetiva a relação estabelecida na presente pesquisa. Porém, a título de experimentação, será também usada esta relação na determinação da resistência da argamassa usada no reforço dos elementos comprimidos.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL – Parte 2: Aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto

Este capítulo apresenta uma descrição dos protótipos quanto ao número de peças, sua geometria, modelo teórico para o cálculo da capacidade última da peça, materiais utilizados em suas concretagens e reforços, procedimentos executivos, execução dos reforços, sistema de aquisição de dados e procedimentos de ensaios.

4.1 Modelos estruturais

Os protótipos estudados quanto ao desempenho dos reforços executados com argamassa aditivada com sílica ativa foram idealizados de forma que pudessem ser ensaiados com a infra-estrutura disponível.

As seções dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados foram definidas com as dimensões de 12X12 cm, seções estas adotadas no intuito de não se obter carregamentos excessivos e a altura dos protótipos foi adotada em função da capacidade do curso útil da prensa, ficando essa dimensão com 70 cm.

Foram executados ao todo seis protótipos com seção transversal de 12 x 12 cm e comprimento de 70 cm. Destes seis, três protótipos de 12x12 cm foram reforçados com 2,5 cm de argamassa em todas as faces e os demais utilizados como testemunhos.

Os seis protótipos executados foram divididos em dois grupos, conforme o quadro 4.1 e figura 4.1.

Quadro 4.1- Denominação dos protótipos

Protótipo	Denominação
PT 01 - PT 02 - PT 03	Pilares testemunhos
PR 01 - PR 02 - PR 03	Pilares reforçados

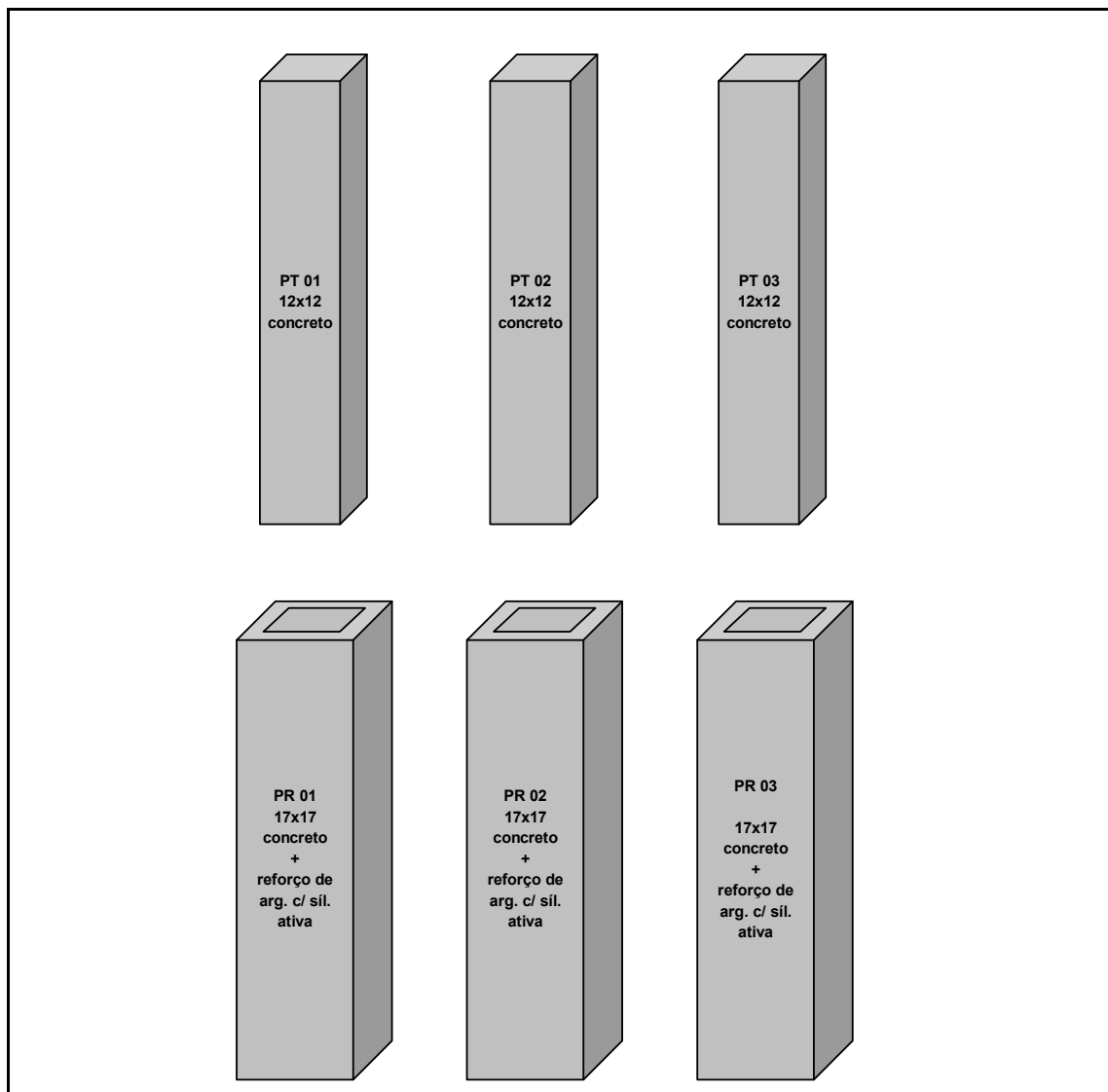


Figura 4.1 - Pilares testemunhos e reforçados

Considerando que:

b – largura

h – menor lado do retângulo mais estreito circunscrito à seção

i – raio de giração

ℓ_e – comprimento de flambagem

I – momento de inércia

λ – índice de esbeltez

Para a seção de 12X12 cm tem-se:

$$i = (I/A_c)^{1/2}$$

$$i = (bh^3/12/bh)^{1/2}$$

$$i = (h^2/12)^{1/2} \text{ e } h = 12 \text{ cm}$$

$$i = 3,46 \text{ cm}$$

$$\lambda = \ell_e/i$$

$$\lambda = 70/3,46$$

$$\lambda = 20,23 < 40 \text{ (pilar curto)}$$

Para a seção 17X17 cm tem-se:

$$i = (I/A_c)^{1/2}$$

$$i = (bh^3/12/bh)^{1/2}$$

$$i = (h^2/12)^{1/2} \text{ e } h = 17 \text{ cm}$$

$$i = 4,91 \text{ cm}$$

$$\lambda = \ell_e/i$$

$$\lambda = 70/4,91$$

$$\lambda = 14,26 < 40 \text{ (pilar curto)}$$

Ante a infra-estrutura disponível para a realização dos ensaios e a seção transversal mínima adotada nos protótipos, os mesmos apresentam índice de esbeltez, λ , menor ou igual a 40.

4.2 Modelo teórico para o cálculo da capacidade última da peça

As seguintes hipóteses foram consideradas para os elementos comprimidos:

- i) a capacidade resistente da peça é igual à soma das capacidades resistentes do concreto e da argamassa que a constituem;
- ii) toda a seção de concreto e argamassa contribui para a formação da capacidade última da peça.

4.2.1 Cálculo da capacidade última da peça

A introdução de algumas notações faz-se necessário para uma melhor compreensão da metodologia de cálculo adotada.

Desta forma, tem-se:

A_c – área da seção transversal de concreto

A_a – área da seção transversal de argamassa de reforço

N – força normal

R_{cc} – resultante da resistência à compressão no concreto

R_{ac} – resultante da resistência à compressão da argamassa de reforço

γ_c – coeficiente de minoração da resistência do concreto

γ_a – coeficiente de minoração da resistência da argamassa de reforço

γ_f – coeficiente de majoração da força normal

Para os pilares submetidos à compressão axial, o estado limite último ocorrerá quando o encurtamento unitário do concreto, em todos os pontos da seção transversal, atingir o valor $\varepsilon_{cc} = 2 \text{ ‰}$.

Santos (1983) relata que vários ensaios mostraram, de maneira inequívoca, que a ruptura do concreto, quando o carregamento é centrado, dá-se com deformações da ordem de 2‰.

Fundamentalmente, a força normal N deve equilibrar-se com a soma das resistências dos dois materiais concreto e argamassa, as quais, consideradas no estado limite último, seriam respectivamente:

$$\text{Resultante da resistência do concreto } (R_{cc}) = 0,85 f_c/\gamma_c A_c$$

onde: 0,85 é um coeficiente que leva em conta o efeito Rüschi

$$\text{Resultante da resistência da argamassa de reforço } (R_{ac}) = f_a/\gamma_a A_a$$

Montando o equilíbrio à translação tem-se:

$$N \gamma_f = 0,85 f_c/\gamma_c A_c + f_a/\gamma_a A_a$$

$$N = (0,85 f_c/\gamma_c A_c + f_a/\gamma_a A_a)/\gamma_f$$

Com as resistências à compressão dos materiais e considerando todos os coeficientes de segurança igual a 1 e desprezando o efeito Rüschi, pode-se determinar a carga teórica estimada de ruptura da peça.

4.3 Materiais utilizados

4.3.1 Cimento

Foi utilizado como aglomerante hidráulico o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), com massa específica $3,13 \text{ kg/dm}^3$, que desenvolve grande resistência nos primeiros dias de idade, proporcionando desta maneira uma rápida desforma dos pilares concretados e preparação, após a cura cuidadosa, das superfícies que receberiam reforços.

Outro fator para a escolha do cimento Portland ARI é por ser um tipo de cimento que possui um mínimo de adição em sua composição, sendo a sílica ativa a única adição pozolânica da argamassa NBR 5733 (ABNT, 1991).

As características químicas e físicas do cimento são apresentadas nos quadros 3.1 e 3.2. do capítulo 3.

4.3.2 Sílica ativa

Utilizou-se sílica ativa coletada em fábrica de silício metálico, comercializado puro, em pó, não densificado, com massa específica $2,22 \text{ g/cm}^3$.

As características químicas e físicas da sílica ativa são apresentadas nos quadros 3.3 e 3.4. do capítulo 3.

4.3.3 Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo areia quatzosa, com massa específica $2,63 \text{ g/cm}^3$, determinada segundo a NBR 9776 (ABNT, 1987), dimensão máxima característica igual a 4,8 mm e módulo de finura 2,50, conforme a NBR 7217 (ABNT, 1987), e classificada como areia média (zona 3), segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983).

A composição granulométrica e a classificação do agregado miúdo são apresentadas no quadro 3.5. do capítulo 3.

4.3.4 Agregado graúdo

Foi utilizado como agregado graúdo brita basáltica, com massa específica $2,75 \text{ g/cm}^3$, determinada segundo a NBR 9937 (ABNT, 1987), dimensão máxima característica igual a 19

mm e módulo de finura 6,89, conforme a NBR 7217 (ABNT, 1987), e classificada como brita 1, segundo a NBR 7211 (ABNT, 1983).

A distribuição granulométrica do agregado graúdo e classificação são apresentadas no quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Distribuição granulométrica e classificação do agregado graúdo

Abertura das peneiras (mm)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média retida acumulada (%)	Graduação 1 NBR 7211/83 (%)
76	0	0	0
38	0	0	0
19	1	1	0 a 10
9,5	87	88	80 a 100
4,8	12	100	95 a 100
2,4	0	100	95 a 100
1,2	0	100	95 a 100
0,6	0	100	95 a 100
0,3	0	100	95 a 100
0,15	0	100	95 a 100
< 0,15	0	100	100
Total		689	650 a 710
Dimensão máxima = 19 mm			
Módulo de finura = 6,89			
Brita 1 6,50 < 6,89 < 7,10			

4.4 Proporcionalamento do concreto e da argamassa

4.4.1 Proporcionalamento do concreto dos pilares

Foi utilizado para a dosagem do concreto o método experimental IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992).

Após os ajustes, o traço definitivo adotado para o concreto atingir uma resistência de 30 MPa foi 1 (cimento): 2,9 (agregado miúdo): 3,6 (agregado graúdo) em massa, com uma relação água/cimento de 0,58, apresentando as características que constam no quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Características do concreto

Teor de argamassa seca	a =	52,00 %
Relação água/ materiais secos	H =	7,73 %
Consumo de cimento	C =	302,00 kg/m ³
Consumo de agregado miúdo	a =	875,80 kg/m ³
Consumo de agregado graúdo	p =	1087,20 kg/m ³
Consumo de água	ag =	175,16 kg/m ³

4.4.2 Proporcionalamento da argamassa dos reforços

O traço inicialmente adotado para a execução da placa foi modificado para a execução dos reforços na sua relação água/aglomerante de 0,50 para 0,45, procurando adequar a consistência da argamassa, já que durante a execução da placa a argamassa com relação água/aglomerante de 0,50 gerou uma certa dificuldade de execução, sendo esta correção solicitada pelo funcionário do laboratório.

O traço adotado para a argamassa, baseado nas recomendações de Schuler (1998), para a execução dos reforços, em massa, foi 1 (cimento) : 3 (agregado miúdo) + 10% da massa de cimento de sílica ativa, com uma relação água/aglomerante de 0,45, apresentando os seguintes consumos, conforme quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Consumos da argamassa

Consumo de cimento	C=	499,95 kg/m ³
Consumo de sílica ativa	s=	49,99 kg/m ³
Consumo de agregado miúdo	a=	1499,84 kg/m ³
Consumo de água	ag=	247,47 kg/m ³

4.5 Formas

Foram confeccionadas formas de compensado plastificado (fig. 4.2), com espessura de 20 mm, com alta rigidez, evitando, desta forma, possíveis deformações durante a concretagem dos pilares. Foi utilizado um sistema de encaixes e barras de aço galvanizado com rosca para o fechamento dos 4 painéis da forma através de porcas tipo borboleta, procurando obedecer com a máxima fidelidade as dimensões especificadas e facilitando, posteriormente, a desforma das peças.

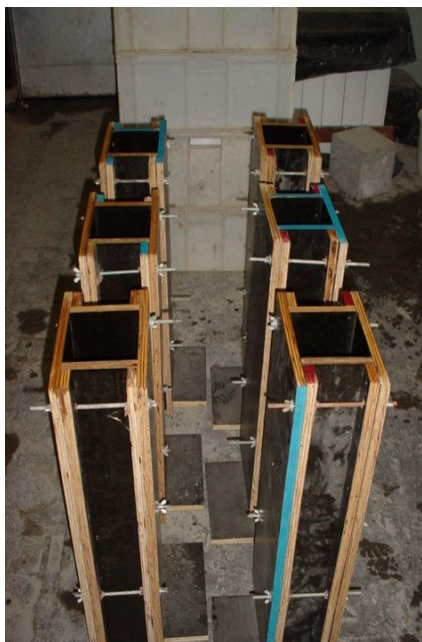


Figura 4.2: Formas dos pilares

As formas foram executadas com uma placa de compensado em sua base, permitindo estabilidade para a concretagem dos pilares em posição vertical.

Foram executadas três formas com 12 x 12 cm de seção transversal, três formas com 12,2 x 12,2 cm de seção transversal, todas com 70 cm de altura, proporcionando a concretagem dos pilares de uma só vez, com uma única mistura de concreto e sendo ensaiados todos com a mesma idade.

Com relação às três formas executadas com seção transversal de 12,2 x 12,2 cm, estas dimensões foram adotadas de tal forma que, após o preparo das faces dos pilares para recebimento da argamassa de reforço, pelo apicoamento das mesmas, a seção transversal resultante fosse 12x12 cm, não havendo perda de seção do núcleo em relação aos pilares testemunhos de seção 12x12 cm e, conseqüentemente, aumento da área de reforço, tendo em vista que a área do núcleo e a área de reforço foram dimensionadas para que fossem idênticas.

4.6 Concretagem dos pilares

Todos os pilares foram concretados na posição vertical (fig. 4.3), procurando representar de maneira mais real possível o modo executivo, em sua grande maioria, destes elementos estruturais nas obras.



Figura 4.3 - Concretagem dos pilares

A mistura dos materiais foi feita de forma mecanizada, através de betoneira intermitente de queda livre e eixo inclinado, com pás fixas à cuba.

Todos os materiais foram dosados em massa, sendo feita uma única mistura para concretagem dos seis protótipos e doze corpos-de-prova de controle (fig. 4.4).



Figura 4.4 - Moldagem dos corpos-de-prova de controle do concreto

Após a homogeneização da mistura, foi determinada a consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme a NBR 7223 (ABNT, 1992), tendo sido obtido o valor de 45 mm.

Após concluída a mistura, foram feitas descargas parciais do concreto em um carrinho de mão, para o transporte do mesmo até junto às formas, em curta distância, evitando desagregação ou segregação dos materiais constituintes.

Antes do lançamento do concreto nas formas, foi aplicado óleo desmoldante, facilitando posteriormente a desforma das peças.

Dispensou-se a molhagem com água uma vez que as formas foram confeccionadas com compensado plastificado, não absorvendo água de amassamento.

O concreto foi lançado nas fôrmas através de pás, em camadas de não mais do que $\frac{3}{4}$ da altura do vibrador.

O adensamento do concreto foi mecânico através de vibrador de imersão, com 420 mm de comprimento e 25,4 mm de diâmetro, com frequência de 3450 vibr./min.

Terminado o adensamento do concreto dos pilares e corpos-de-prova de controle, iniciou-se o processo de cura dos mesmos, cobrindo as superfícies expostas com sacos de

aniagem úmidos e por sobre os mesmos, sacos de plástico, objetivando diminuir os efeitos da retração do concreto pela evaporação da água de amassamento, permanecendo assim por vinte e quatro horas.

Após o período inicial de cura, fez-se a retirada das formas. O uso de cimento de alta resistência inicial, aliado a um modelo de forma de fácil desmontagem, permitiu uma rápida desforma sem que as peças sofressem qualquer dano.

Tão logo os pilares foram sendo desformados, os mesmos passavam a ser envolvidos, individualmente, com sacos de aniagem úmidos e por sobre eles, sacos de plástico, dando continuidade assim ao processo de cura, permanecendo desta maneira por mais seis dias (figs. 4.5, 4.6 e 4.7).



Figura 4.5 – Pilar sendo envolvido por saco de aniagem úmido e saco plástico para cura



Figura 4.6 - Pilares e corpos-de-prova de controle em cura



Figura 4.7 – Pilares e corpos-de-prova após a cura

Da mesma forma, após as primeiras vinte e quatro horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e em seguida agrupados e envolvidos com saco de aniagem úmido e por sobre o mesmo, saco de plástico, dando continuidade assim ao processo de cura, permanecendo desta maneira por mais seis dias, num processo similar ao da cura dos pilares.

O controle tecnológico do concreto foi realizado através da moldagem de 12 corpos-de-prova cilíndricos de 9,5 cm de diâmetro por 19 cm de altura, sendo 3 para ensaio de resistência à compressão aos 7 dias, 3 para 28 dias e 6 na data de ensaio dos pilares, sendo 3 testados quanto à resistência à compressão e 3 quanto ao módulo de deformação, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 1994b) e ensaiados conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994) e NBR 8522 (ABNT, 1984).

Os resultados obtidos nos ensaios para determinação da resistência à compressão dos corpos-de-prova são apresentados no quadro 4.5 e fig. 4.8.

Quadro 4.5 - Resultados dos ensaios à compressão dos corpos-de-prova de controle do concreto

Idade - 7 dias

CP	Carga (kN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
TP-01	157,00	7088,22	22,15	23,84	1,55	6,49
TP-02	171,50	7088,22	24,20			
TP-03	178,50	7088,22	25,18			

Idade - 28 dias

CP	Carga (kN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
TP-04	208,00	7088,22	29,34	31,63	2,00	6,33
TP-05	230,00	7088,22	32,45			
TP-06	234,50	7088,22	33,08			

Idade - 56 dias

CP	Carga (kN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
TP-07	226,50	7088,22	31,95	33,20	1,06	3,20
TP-08	230,00	7088,22	32,45			
TP-09	234,50	7088,22	33,08			
TP-10	235,50	7088,22	33,22			
TP-11	237,00	7088,22	33,44			
TP-12	248,50	7088,22	35,06			

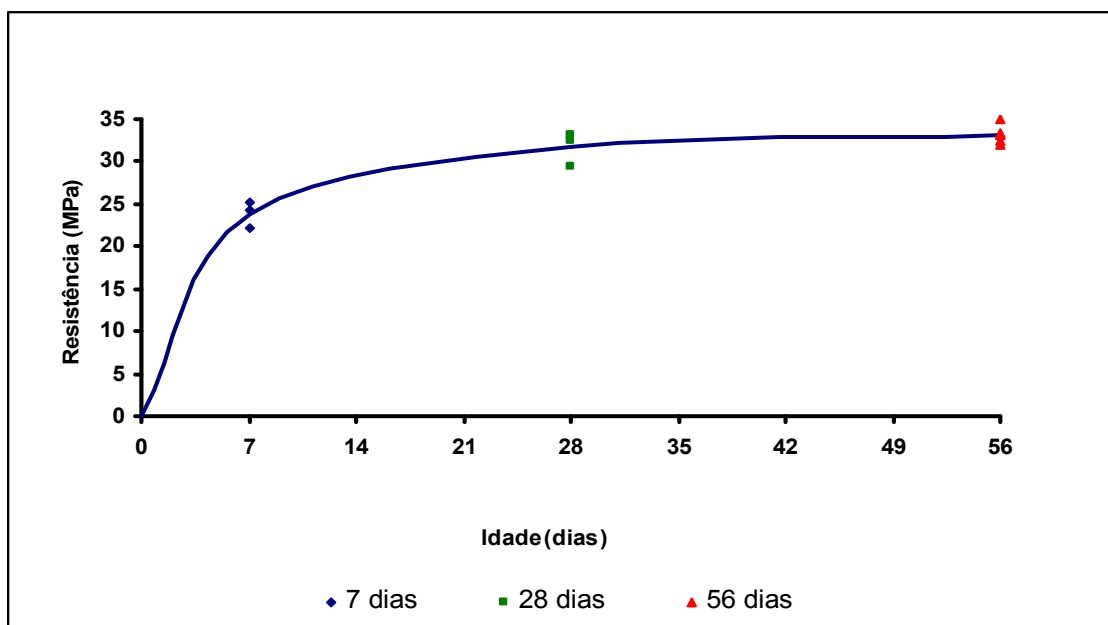
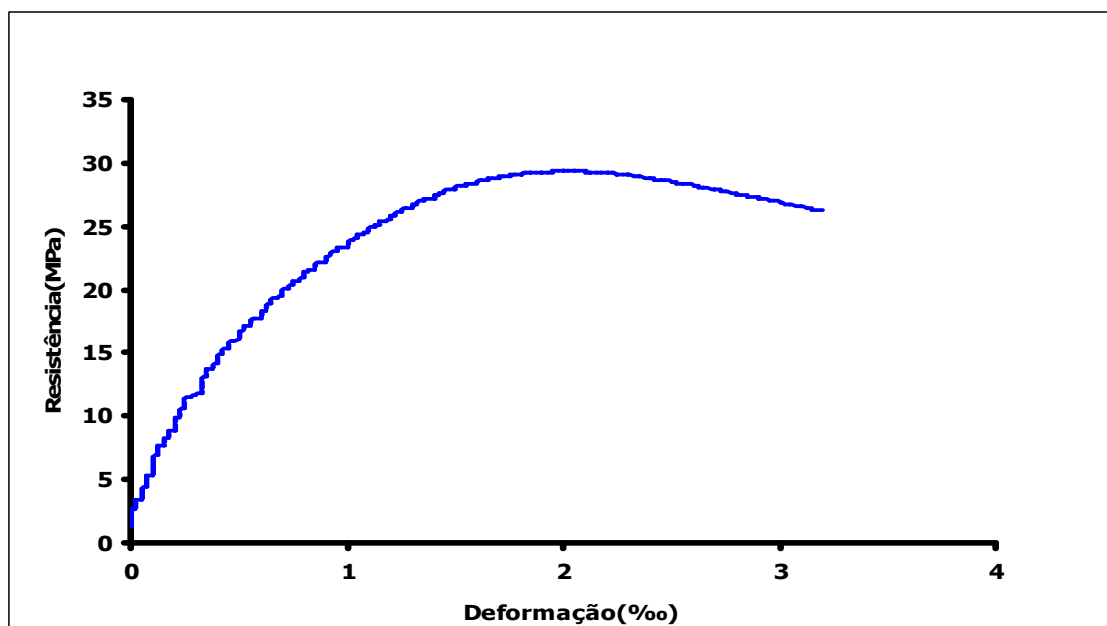


Figura 4.8 - Gráfico resistência x idade do concreto dos pilares

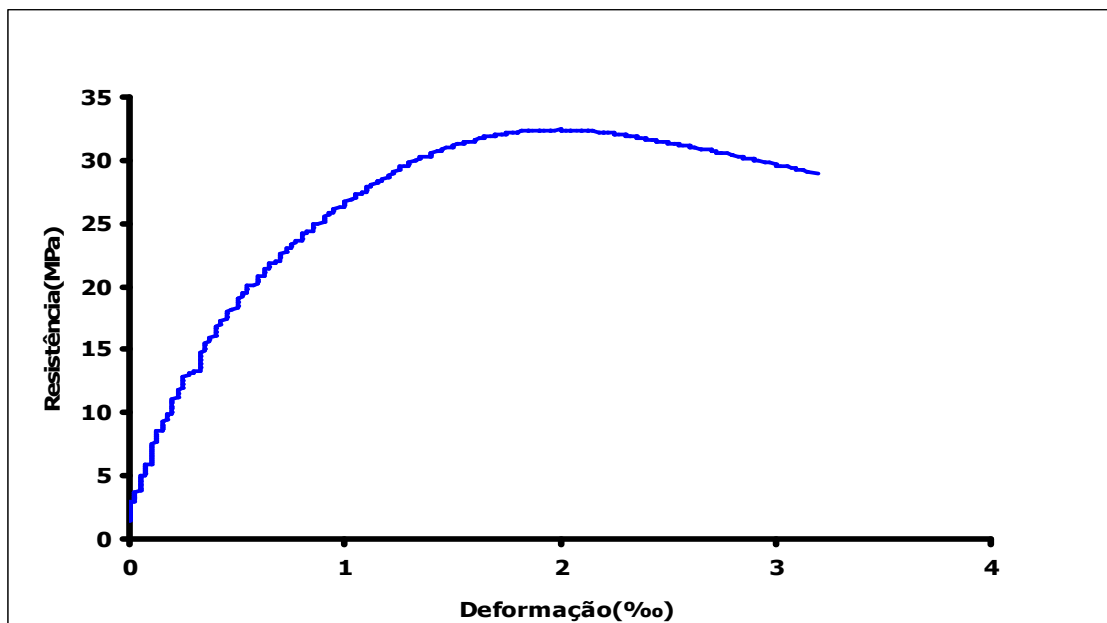
Nas figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 apresenta-se o ensaio e os gráficos resistência x deformação dos corpos-de-prova para a idade de 28 dias e no quadro 4.6 os módulos de deformação das amostras.



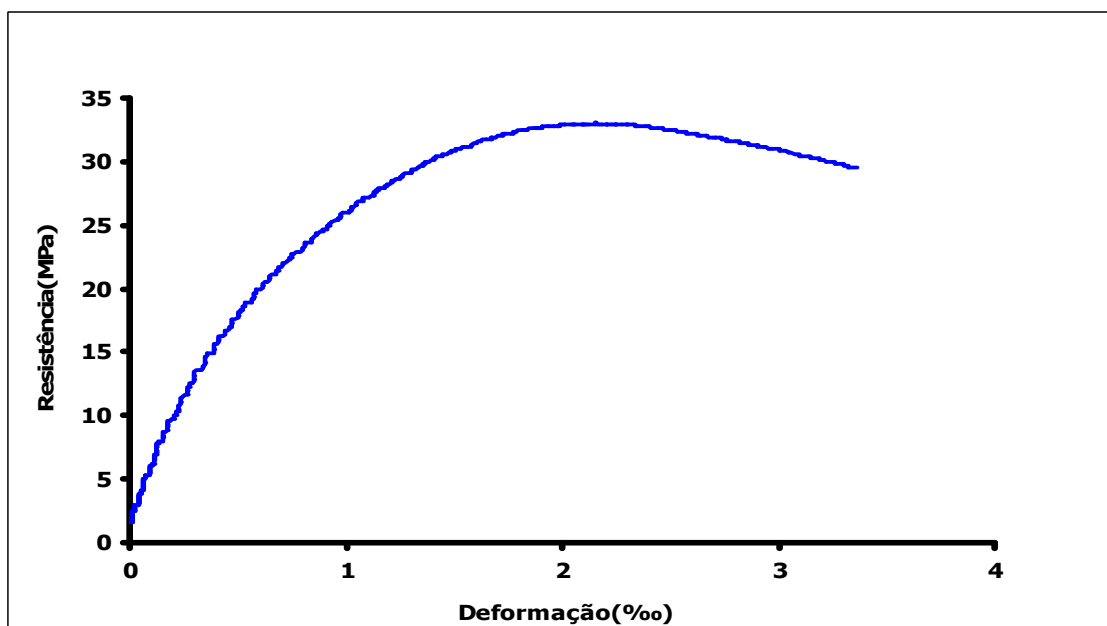
Figura 4.9 - Ensaio de corpo-de-prova de concreto instrumentado para leitura de cargas e deformações



Figuras 4.10 - Curvas resistência x deformação do corpo-de-prova TP 04 aos 28 dias



Figuras 4.11 - Curvas resistência x deformação do corpo-de-prova TP 05 aos 28 dias



Figuras 4.12 - Curvas resistência x deformação do corpo-de-prova TP 06 aos 28 dias

Quadro. 4.6 - Módulo de deformação das amostras aos 28 dias de idade

CP	Carga (kN)	Área (mm²)	Resistência (MPa)	E (MPa)	E Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
TP-04	208,00	7088,22	29,34	26866,14	33067,73	5413,39	16,37
TP-05	230,00	7088,22	32,45	35490,23			
TP-06	234,50	7088,22	33,08	36846,80			

4.7 Reforço dos pilares

Todos os pilares que receberiam reforços foram gradativamente preparados e reforçados ao mesmo tempo, com uma única mistura de argamassa e sendo ensaiados todos com a mesma idade.

O processo de reforço com emprego de argamassa com adição sílica ativa é bastante simples. Mesmo não havendo necessidade de mão-de-obra qualificada, é de suma importância uma supervisão criteriosa durante todas as etapas de execução para o sucesso da técnica.

4.7.1 - Preparação para o lançamento da argamassa de reforço dos pilares PR 01, PR 02 e PR 03

Os pilares, anteriormente com dimensões de 12,2 x 12,2 cm, tiveram suas 4 faces laterais preparadas para o lançamento da argamassa de reforço.

Primeiramente foi feito o apicoamento mecânico (fig. 4.13) utilizando um martelo elétrico e ponteiro com a extremidade em forma de batedor, retirando a camada mais externa do concreto das peças, composta principalmente por nata de cimento, tornando com isto a superfície rugosa e irregular, melhorando a aderência entre o concreto antigo e a argamassa de reforço.



Figura 4.13 - Apicoamento do pilar

O apicoamento deu-se por uma espessura de 1 mm em cada face do pilar, controlando-se através de um gabarito (fig. 4.14), resultando em uma seção transversal final da peça de 12x12 cm (fig. 4.15).



Figura 4.14 - Gabarito para controle da seção



Figura 4.15 - Pilar apicoado pronto para receber o reforço de argamassa

4.7.2 Execução dos reforços

O traço adotado para a argamassa de reforço dos pilares foi o estabelecido conforme o item 4.4.2.

A mistura dos materiais foi feita de forma mecanizada (fig. 4.16), através de betoneira intermitente forçada de cuba móvel (betoneira de contracorrente).

Após a homogeneização da mistura, foi determinada a consistência da argamassa através do índice de consistência (fig.4.17), conforme a NBR 7215 (ABNT, 1991), tendo este índice obtido um valor médio, após três medições, de 280 mm.

Todos os materiais foram dosados em massa, sendo feita uma única mistura para o reforço dos três protótipos (PR 01, PR 02 e PR 03) e 16 corpos-de-prova de controle (fig. 4.18).



Figura 4.16 - Mistura da argamassa de reforço



Figura 4.17 - Determinação do índice de consistência da argamassa



Figura 4.18 - Moldagem dos corpos-de-prova de controle da argamassa de reforço

O quadro 4.7 apresenta as resistências à compressão obtidas nos ensaios dos corpos-de-prova de controle da argamassa de reforço aos 28 dias de idade, com desvio padrão de 8,98 MPa e coeficiente de variação de 19,88%.

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova de controle da argamassa de reforço aos 28 dias

CP	Carga (kN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
1	55,00	1963,50	28,01	45,15	8,98	19,88
2	65,50	1963,50	33,36			
3	69,50	1963,50	35,40			
4	71,50	1963,50	36,41			
5	77,00	1963,50	39,22			
6	86,00	1963,50	43,80			
7	86,50	1963,50	44,05			
8	91,00	1963,50	46,35			
9	91,50	1963,50	46,60			
10	92,00	1963,50	46,86			
11	93,50	1963,50	47,62			
12	97,50	1963,50	49,66			
13	101,00	1963,50	51,44			
14	109,50	1963,50	55,77			
15	115,00	1963,50	58,57			
16	116,50	1963,50	59,33			

Os pilares foram colocados num dispositivo formado por 4 sarrafos de madeira presos a duas placas também de madeira (fig. 4.19), de tal forma que fosse possível o lançamento e a regularização da argamassa de reforço nas 4 faces em uma única etapa, gerando uma camada de espessura uniforme de 2,5 cm por toda a superfície, e resultando numa seção transversal final do conjunto núcleo+reforço de 17x17 cm.



Figura 4.19 - Pilar pronto para receber argamassa de reforço

Antes da aplicação da argamassa foi feita uma molhagem das superfícies, evitando absorção da água de amassamento da mesma.

A aplicação da argamassa foi feita manualmente, com colher de pedreiro, à superfície apicada do elemento estrutural, em posição vertical. O acabamento final foi dado com desempenadeira.

As figuras 4.20 e 4.21 mostram os pilares sendo reforçados e, após a conclusão dos reforços, prontos para iniciar a cura da argamassa.



Figura 4.20 - Pilares sendo reforçados



Figura 4.21 - Pilar reforçado

Quando da execução do reforço, um dos protótipos, após as quatro faces já terem recebido praticamente toda a quantidade de argamassa necessária para formação da camada

de 2,5 cm de espessura, recebeu uma porção de argamassa lançada de forma mais enérgica pelo funcionário do laboratório que fez com que parte da argamassa de duas faces adjacentes se desprendessem.

Ante o acontecido, optou-se por retirar toda a argamassa das quatro faces e refazer o reforço integralmente, sem limpar a fina camada de nata de cimento aderida ao substrato, e desta forma, verificar se haveria comprometimento da aderência entre a nova argamassa e o substrato e conseqüentemente ao monolitismo do conjunto núcleo+reforço.

Este protótipo foi devidamente identificado e recebeu a denominação de PR 03.

Terminada a execução dos reforços, cada pilar foi envolvido com saco de aniagem úmido e, sobre o mesmo, saco plástico, permanecendo assim por 7 dias (fig. 4.22).



Figura 4.22 - Cura dos pilares reforçados

Concluída a cura dos reforços, todos os 6 pilares receberam um capeamento em suas bases e topos de argamassa de cimento e areia com traço 1:1 em massa, com areia de dimensão máxima característica de 0,3, produzindo superfícies lisas e perpendiculares aos eixos longitudinais das peças.

Após 28 dias da execução dos reforços com argamassa e 56 dias de concretagem, os protótipos foram ensaiados. A apresentação e análise dos resultados constam no capítulo 5.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados:

- a) os resultados teóricos das cargas de ruptura dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados;
- b) os resultados experimentais das cargas de ruptura dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados;
- c) comparação entre os resultados teóricos e resultados experimentais das cargas de ruptura dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados;

5.1 Cargas de ruptura teóricas

Para a determinação das cargas de ruptura teóricas utilizou-se as considerações e procedimentos analíticos apresentados no capítulo 3 e resistências médias à compressão do concreto e argamassa de reforço provenientes dos ensaios realizados e apresentados no capítulo 3 e 4.

O quadro 5.1 apresenta os valores utilizados para a determinação das cargas teóricas, o quadro 5.2 apresenta as cargas calculadas e a figura 5.1 um gráfico comparativo das cargas.

Quadro 5.1 - Valores adotados para a determinação das cargas teóricas de ruptura

resistência média à compressão do concreto	33,20	MPa
resistência média à compressão da argamassa	45,15	MPa
área de concreto do núcleo	14400,00	mm ²
área de argamassa do reforço	14400,00	mm ²

Quadro 5.2 - Cargas teóricas de ruptura dos protótipos com resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 33,20 MPa

protótipo	núcleo(kN)	reforço(kN)	total(kN)
	concreto	argamassa	
PT	478	-	478
PR	478	650	1128

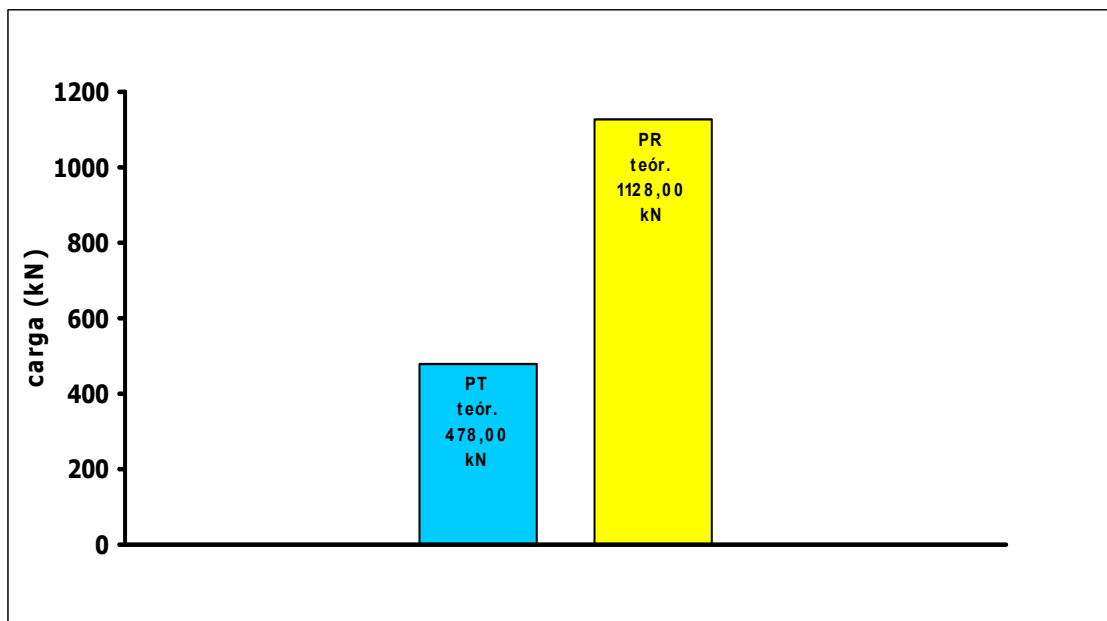


Figura 5.1: - Cargas teóricas de ruptura com resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 33,20 MPa

Considerando-se o estudo da resistência à compressão da argamassa de reforço realizado no capítulo 3 e empregando-se o coeficiente redutor de 0,65, tem-se para a resistência da argamassa o valor de 29,35 MPa. Para este valor da resistência da argamassa e com os demais valores mantidos, pode-se calcular novas cargas teóricas para os protótipos reforçados conforme o quadro 5.3 e figura 5.2.

Quadro 5.3 - Cargas teóricas de ruptura dos protótipos com resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 33,20 MPa

protótipo	núcleo(kN)	reforço(kN)	total(kN)
	concreto	argamassa	
PT	478	-	478
PR	478	423	901

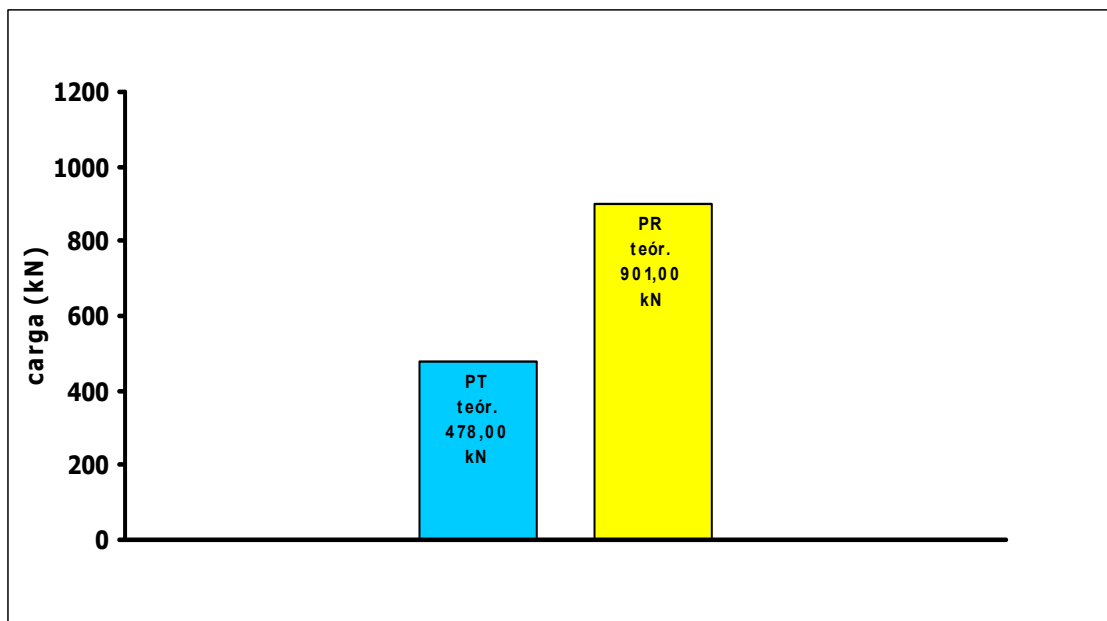


Figura 5.2: - Cargas teóricas de ruptura com resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 33,20 MPa

Estes dois grupos de cargas teóricas serão comparados às cargas de ruptura experimentais dos protótipos, verificando se a redução da resistência da argamassa se comporta como proposto.

5.2 Cargas de ruptura experimentais

Após 28 dias da execução dos reforços com argamassa e 56 dias da concretagem, os protótipos foram ensaiados.

Foi utilizada uma prensa hidráulica marca Shimadzu com célula de carga com capacidade de 200 toneladas. Para a aquisição dos dados provenientes da célula de carga, utilizou-se uma ponte multicanal computadorizada, System 5000, que realiza a aquisição dos dados automaticamente e os armazena em arquivos de saída de dados.

A prensa foi ciclada 3 vezes, sendo utilizado um fundo de escala de 2000 kN e uma velocidade de ensaio de 0,1 do fundo de escala.

Os protótipos foram posicionados entre os pratos da prensa, procurando coincidir o máximo possível o eixo de aplicação da carga com o eixo longitudinal da peça.

Todos os protótipos foram ensaiados na mesma posição, de modo que a aplicação da carga pela prensa se desse sempre no topo dos pilares, posição esta marcada nas peças quando da desforma dos mesmos.

O quadro 5.4 apresenta as cargas de ruptura dos modelos experimentais e a figura 5.3 um gráfico comparativo destas cargas.

Quadro 5.4 - Cargas de ruptura dos modelos experimentais

Protótipo	Carga de Ruptura (kN)	Carga de Ruptura Média (kN)
PT 01	550,00	572,00
PT 02	574,50	
PT 03	591,50	
PR 01	967,00	983,00
PR 02	999,00	
PR 03*	758,00	

* Para o cálculo da carga de ruptura média do grupo de protótipos PR, não foi considerado a carga do protótipo PR 03.

Devido à forma como foi reforçado, conforme já exposto no capítulo 4, o protótipo PR 03 apresentou perda da capacidade de carga quando comparado aos outros dois protótipos do grupo, evidenciando que houve perda de aderência entre a argamassa de reforço e o substrato, comprometendo o comportamento monolítico desejado.

Com relação aos protótipos PR 01 e PR 02, ante o desempenho similar e nível da capacidade de carga alcançado, conforme estimado teoricamente, fica demonstrada a

aderência adequada entre o substrato e a argamassa de reforço, caracterizando a solidariedade entre os materiais concreto e argamassa, comprovando o seu funcionamento como um todo, como um sistema integrado, ou seja, um comportamento monolítico conforme esperado e apresentando um aumento médio na capacidade de carga de 72,0 % quando comparados aos protótipos testemunhos PT.

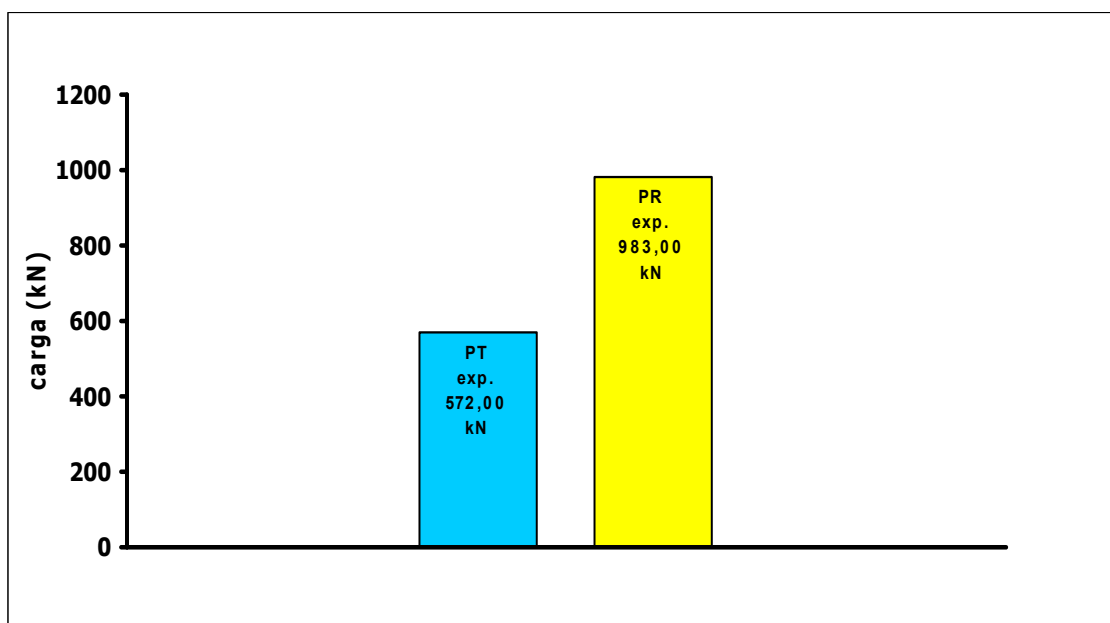


Figura 5.3 - Cargas experimentais de ruptura

As figuras 5.4 a 5.9 apresentam os pilares após já terem atingido a carga de ruptura e a figura 5.10 apresenta uma vista geral de todos os pilares.



Figura 5.4 - Ruptura do pilar testemunho PT 01



Figura 5.5 - Ruptura do pilar testemunho PT 02



Figura 5.6 - Ruptura do pilar testemunho PT 03



Figura 5.7 - Ruptura do pilar reforçado PR 01



Figura 5.8 - Ruptura do pilar reforçado PR 02



Figura 5.9 - Ruptura do pilar reforçado PR 03



Figura 5.10 - Vista geral dos pilares após ruptura

5.3 Comparação entre os resultados teóricos e resultados experimentais das cargas de ruptura

As figuras 5.11 e 5.12 apresentam gráficos comparativos entre as cargas teóricas e experimentais, sendo que as cargas teóricas foram calculadas com dois valores de resistências médias para a argamassa obtidos dos corpos-de-prova cilíndricos de controle e após aplicação do coeficiente redutor de 0,65, ou seja, 45,15 e 29,35 MPa, respectivamente.

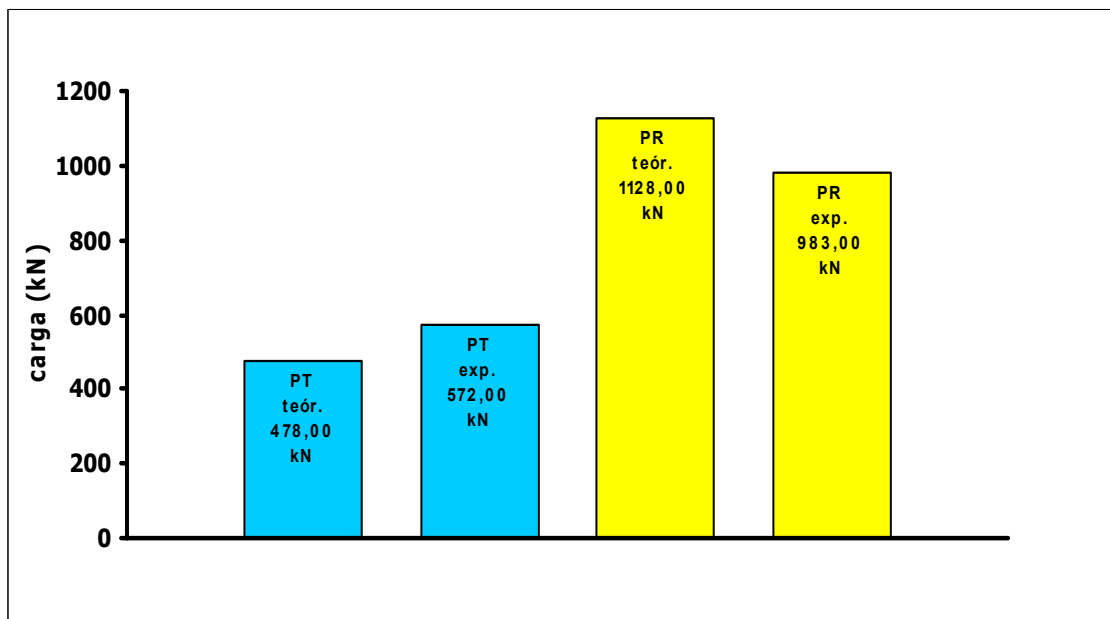


Figura 5.11 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 33,20 MPa

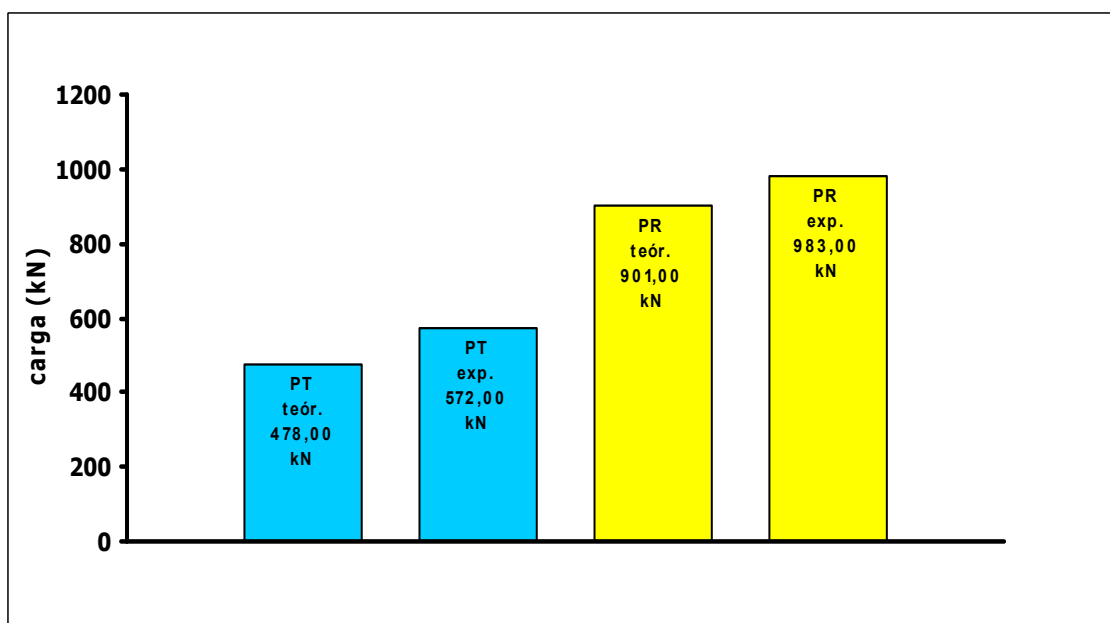


Figura 5.12 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 33,20 MPa

Os protótipos testemunhos PT apresentaram carga de ruptura experimental média de 572,00 kN, representando um aumento de 20,0 % com relação à carga de ruptura teórica estimada de 478,00 kN, indicando que a resistência à compressão do concreto dos protótipos foi superior à encontrada nos corpos-de-prova de controle, resultando numa resistência média de 39,72 MPa.

Os protótipos reforçados PR apresentaram carga de ruptura experimental média de 983,00 kN, representando uma redução de 13,0 % com relação a carga de ruptura teórica estimada de 1128,00 kN, considerando a resistência média à compressão do concreto de 33,20 MPa e a resistência à compressão média da argamassa de 45,15 MPa.

Considerando a mesma resistência média à compressão da argamassa de 45,15 MPa e adotando a resistência média do concreto obtida dos protótipos testemunhos de 39,72 MPa, temos uma nova carga de ruptura teórica estimada de 1222,00 kN, representando uma redução da carga experimental agora de 20,0 % conforme figura 5.13.

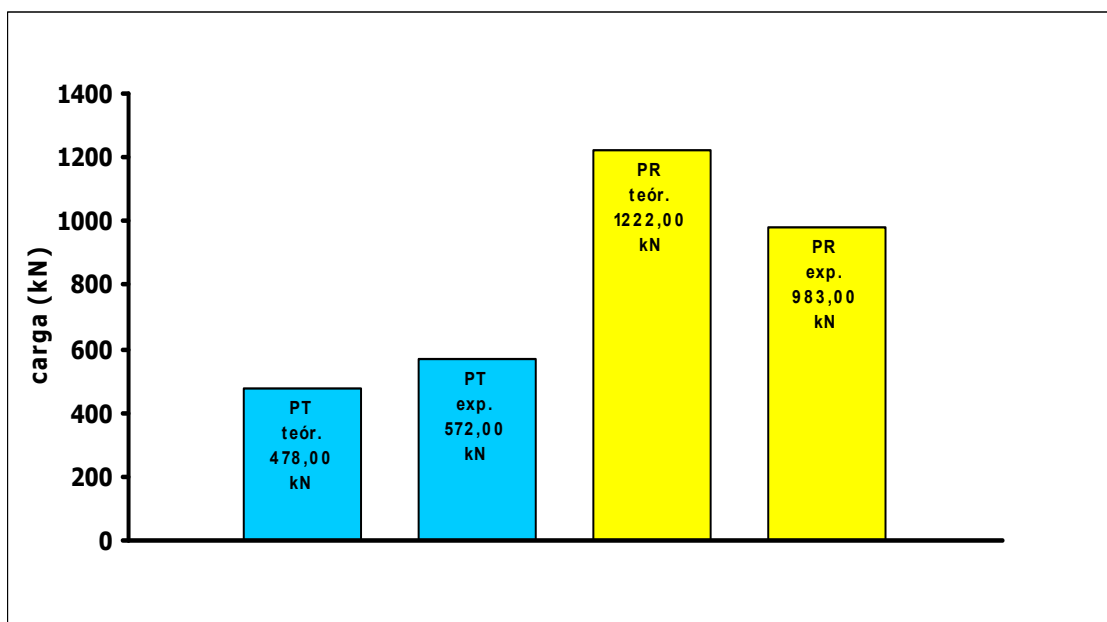


Figura 5.13 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 45,15 MPa e concreto de 39,72 MPa

Da mesma forma, estimando-se a carga teórica de ruptura dos protótipos PR com a resistência à compressão média da argamassa de 29,35 MPa e resistência média à compressão do concreto de 33,20 MPa, a mesma passa a ser de 901,00 kN, com a carga de ruptura experimental média de 983,00 kN apresentando um aumento de 9,0 % com relação a esta nova carga teórica de ruptura.

Finalmente, considerando a resistência média da argamassa de reforço de 29,35 MPa e a resistência média à compressão do concreto de 39,72 MPa, a carga teórica de ruptura passa a ser de 988,00 kN, praticamente igual a carga experimental de ruptura de 983 kN conforme figura 5.14.

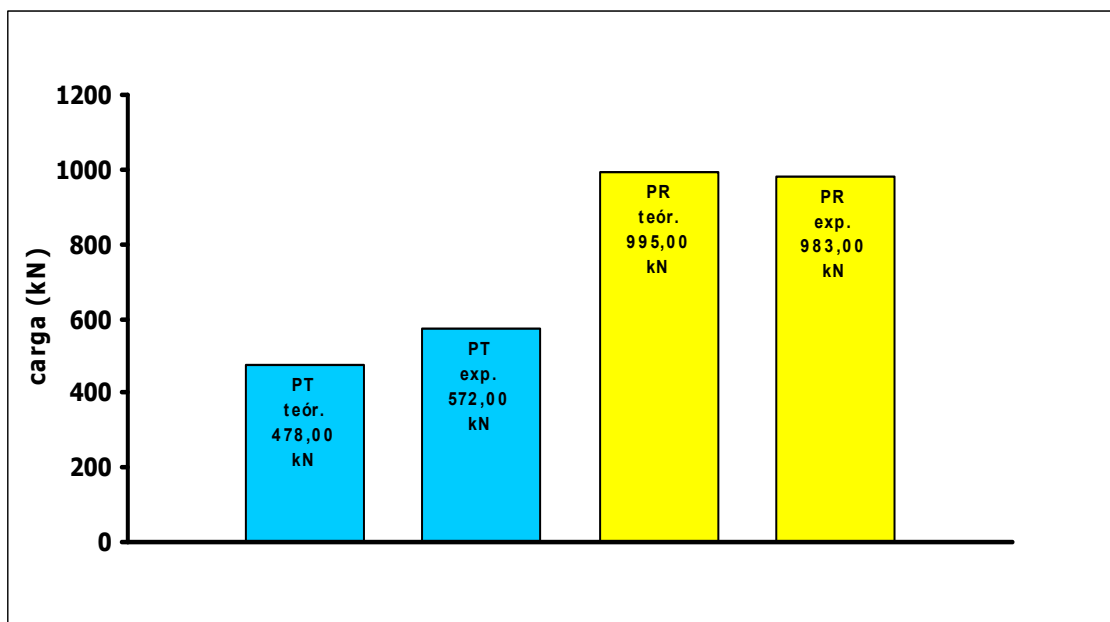


Figura 5.14 – Cargas teóricas e experimentais para a resistência à compressão da argamassa de 29,35 MPa e concreto de 39,72 MPa

Fixando-se a resistência à compressão do concreto, pode-se verificar qual a parcela de contribuição na capacidade portante dos pilares provenientes do reforço com argamassa e estimar a resistência à compressão média desta argamassa.

Para os protótipos PR com carga de ruptura média de 983,00 kN, sendo a parcela de carga suportada pelo concreto de 478,00 kN, considerando a resistência à compressão do

concreto a obtida dos corpos-de-prova de controle, tem-se para a argamassa uma parcela de contribuição de 505,00 kN com uma resistência à compressão de 35,07 MPa, o que representa uma redução 22,0 % quando comparada a resistência à compressão da argamassa obtida dos corpos-de-prova de controle.

Da mesma forma, considerando a carga de ruptura média de 983,00 kN dos protótipos PR e a parcela de carga suportada pelo concreto de 572,00 kN obtida diretamente dos ensaios dos protótipos PT, tem-se para a argamassa uma parcela de contribuição de 411,00 kN com uma resistência à compressão de 28,54 MPa, o que resulta numa redução de 37,0 % quando comparada a resistência à compressão da argamassa obtida dos corpos-de-prova de controle, concordando bastante bem com a redução de 35,0 % encontrada no estudo da argamassa realizado no capítulo 4.

Observa-se que ao se tomar a resistência à compressão do concreto obtida dos pilares testemunhos e a resistência a compressão da argamassa obtida dos corpos-de-prova de controle, porem com a redução proposta, tem-se a melhor combinação possível de resultados, com a ressalva que, geralmente, as resistências do concreto dos elementos estruturais são menores que as obtidas dos corpos-de-prova de controle, ficando os valores encontrados restritos ao presente trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Limitações de ordem financeira e prazo, fatores determinantes em qualquer pesquisa tornaram inviável a execução de mais placas e protótipos que assegurassem uma maior quantidade de dados para estudo.

Mesmo assim, obteve-se informações indicativas quanto ao desempenho da argamassa de reforço no incremento de carga, da relação entre a resistência à compressão da argamassa aplicada ao substrato e em corpos-de-prova de controle, aderência ao substrato, e verificação do comportamento das peças reforçadas como um modelo estrutural monolítico.

6.1 Conclusões

Os protótipos reforçados com argamassa com sílica ativa PR apresentaram carga experimental média 72,0 % superior a carga experimental média obtida pelos protótipos testemunhos PT.

As propriedades mecânicas da argamassa quando se adiciona sílica ativa não se evidenciam muito, porém os maiores efeitos estão relacionados à durabilidade, traduzidos em termos de porosidade e permeabilidade a agentes agressivos às estruturas. À adição de sílica ativa proporciona uma melhora considerável destas propriedades, justificando sua utilização.

Quanto a comparação dos resultados teóricos e experimentais das cargas de ruptura dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados fazendo-se uso das resistências obtidas dos corpos-de-prova de controle, testemunhos e resistência da argamassa de controle porém com a redução proposta de 35 %, podemos resumir conforme os quadros 6.1 e 6.2 a seguir:

Quadro 6.1 – Resistências à compressão

resistência à compressão (MPa)	corpos-de-prova	pilar testemunho	redução de 35 %
concreto	33,20	39,72	-
argamassa	45,15	-	29,35

Quadro 6.2 – Cargas teóricas de ruptura x experimental

carga (kN)	resistência à compressão argamassa corpos-de- prova	% em relação a carga experimental de 983 kN	resistência à compressão argamassa redução de 35 %	% em relação a carga experimental de 983 kN
resistência à compressão concreto corpos-de-prova	1128	-13	901	9
resistência à compressão concreto pilar testemunho	1222	-20	995	-1

Pode-se observar, independente da resistência a compressão do concreto que se adote que os resultados demonstram que há redução da resistência à compressão da argamassa de reforço quando lançada no substrato, porém somente com mais placas de argamassa e protótipos reforçados é possível determinar com maior segurança um coeficiente de minoração para a resistência à compressão da argamassa em relação aos corpos-de-prova de controle.

Considerando o desempenho similar e o nível da capacidade de carga alcançado pelos protótipos PR 01 e PR 02, conforme estimado teoricamente, fica demonstrada a aderência adequada entre o substrato e a argamassa de reforço, caracterizando a solidariedade entre os materiais concreto e argamassa, comprovando o seu funcionamento como um todo, como um sistema integrado, ou seja, um comportamento monolítico conforme esperado.

A aderência entre a argamassa de reforço e o substrato é extremamente importante para o sucesso da técnica, e não basta somente o apicoamento da superfície ser bem feito, mas à superfície resultante deve estar isenta de qualquer substância que possa vir a comprometer esta aderência, e conseqüentemente a capacidade resistente do conjunto núcleo-reforço, como ficou evidente pelo comportamento apresentado pelo protótipo PR 03.

Quanto ao modelo teórico proposto para os protótipos reforçados PR, este retratou bem o comportamento dos protótipos, ainda que, no cálculo das cargas teóricas seja

considerado somente as resistências à compressão e as seções transversais resistentes, não levando em consideração a esbeltez, módulo de deformação dos materiais e deformações e deslocamentos que possam advir destas variáveis.

Os procedimentos para a execução dos reforços são simples, sendo as atividades de apicoamento, colocação de mestras para reguar as superfícies, lançamento da argamassa no substrato e desempenamento, comuns e corriqueiras no canteiro de obra, sem necessidade de equipamento e mão-de-obra especializada, e os materiais utilizados cimento, areia, sílica e aço são de comportamento e desempenho conhecidos, fácil aquisição e baixo custo quando comparado aos materiais utilizados por outras técnicas de reforço.

6.2 Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestão para futuros trabalhos recomenda-se a adoção de armaduras de aço na execução dos protótipos testemunhos e nos que servirão como núcleo, caracterizando uma situação mais real do uso deste tipo de elemento estrutural que, na sua grande maioria, são executados em concreto armado, bem como na execução do reforço com argamassa, quase sempre associado ao emprego de armaduras.

Outra sugestão seria a de reforçar pilares pré-carregados sem alívio do carregamento, simulando situações onde o pilar é o último elemento de sustentação da estrutura antes das fundações, localizando-se nos pavimentos inferiores de edifícios altos, onde o descarregamento é inviável economicamente e o reforço é feito sem que haja o descarregamento do pilar.

A comparação entre os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova extraídos de uma placa executada através de um processo mecanizado, onde a argamassa fosse lançada de forma mais uniforme, e uma placa executada de forma manual, seria interessante para estudar o comportamento da variabilidade dos resultados encontrados determinando uma forma de execução que assegure-se maior confiabilidade dos resultados pretendidos.

Outro estudo proposto seria a comparação entre a argamassa quando moldada em corpos-de-prova normatizados e quando aplicada ao substrato, verificando variações quanto as suas propriedades relacionadas à durabilidade (carbonatação, penetração de íons cloretos).

Execução de várias placas de argamassa de mesmo traço sendo cada uma executada por uma mão de obra diferente, verificando se o comportamento das variáveis altura, largura e interações entre elas continuam apresentando um efeito não significativo.

Fazer várias combinações entre núcleos de protótipos com diferentes resistências a compressão do concreto (20, 30, 40, 60 MPa) e a argamassa de reforço de mesmo traço usado neste trabalho, verificando o comportamento monolítico do protótipo reforçado e a aderência da argamassa ao substrato ante os diferentes módulos de deformação envolvidos.

Refazer o presente trabalho porem com um número maior de protótipos testemunhos e reforçados e protótipos somente de concreto de seção 17x17 cm aumentado não só a representatividade dos dados obtidos, mas também novos dados para efeito de comparação e análise.

O estudo de pilares esbeltos com índice de esbeltez $40 \leq \lambda \leq 80$, representando a grande maioria destes elementos estruturais nas obras correntes, também é uma sugestão de pesquisa, dando continuidade lógica a este trabalho introdutório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado para concreto**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados - **Determinação da composição granulométrica**. NBR 7217. 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. **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão**. NBR 13279. Rio de Janeiro, 1995.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. NBR 7215. Rio de Janeiro, 1993.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland de alta resistência inicial**. NBR 5733. Rio de Janeiro, 1991.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação**. NBR 8522. Rio de Janeiro, 1984.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto e execução de obras de concreto armado**. NBR 6118. Rio de Janeiro, 1982.
- AKÖZ, F., TÜRKER, F., KORAL, S., YÜZER, N. **Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume**. Yýldýz Technical University, Faculty of Civil Engineering Department of Construction Materials, 80750, Istanbul, Turkey. Akdeniz University, Technical Sciences, Campus, Antalya, Turkey. *Cement and Concrete Research* 29 (1999), 537–544.
- **ASTM** – American Society for Testing and Materials. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in or [50-mm] cube specimens)¹. C 109/C 109M. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, 1998.
- BÁGEL, L. **Strength and pore structure of ternary blended cement mortars containing blast furnace slag and silica fume**. Institute of Construction and Architecture of the Slovak Academy of Sciences, Du'bravska' cesta 9, 84220 Bratislava, Slovak Republic. *Cement and Concrete Research*, 28 (1998), 1011–1020.
- 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, 413 – 426.
- BODDY, A. M., HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A. **The effect of product form of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction**. Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4. *Cement and Concrete Research* 30 (2000), 1139-1150.
- BODDY, A. M., HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A. **The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction**. Department of Civil Engineering, University of Toronto, 35 St. George Street, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4. *Cement and Concrete Research* 33 (2003), 1-6.
- 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.

- BUIL, M., PAILLÈRE, A. M., ROUSSEL, B. **High strength mortars containing condensed silica fume**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 58, Bd Lefebvre 75015 Paris, France. Cement and Concrete Research. 14 (1984), 693-704.
- CAMPAGNOLO, J. L., SILVA, L. C. P., BEBER, J. A. **Técnicas de reforço e recuperação de estruturas de concreto armado**. Caderno Leme/08, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- CAMPAGNOLO, J. L. et al. **Reforço de vigas à flexão com argamassa aditivada**. Relatório de Pesquisa. CPGEC. UFRGS, 1996.
- CAMPAGNOLO, J. L., DAL MOLIN, D. C. C. **Reforço de lajes de concreto armado com argamassa de alto desempenho (com adição de microssílica)**. Relatório de pesquisa. CPGEC. UFRGS, 1994.
- CAMPAGNOLO, J. L., DAL MOLIN, D. C. C., SILVA FILHO, L. C. P. **Estudo comparativo de técnicas para aumento da capacidade portante de estruturas degradadas**. Seminário Tiradentes, 2003, UFF.
- CARNEIRO, L. A. V., SHEHATA, I. A. M., SHEHATA, L. C. D. **Avaliação da resistência de colunas curtas de concreto confinadas externamente com fibras de carbono**. XXIX Jornadas Sul-americanas de engenharia estrutural , Punta del Este, Uruguai, 2000
- CARRAZEDO, R., HANAI, J. B., TAKEUTI, A. R. **Efeitos do confinamento em pilares circulares de concreto armado encamisados com compósito de fibra de carbono**. 44º Congresso Brasileiro do concreto, Ibracon 2002, Belo Horizonte, MG.
- DAL MOLIN, D. C. C., SCHULER, A. **Estudo a respeito da aderência de argamassas com adição de microssílica sobre o concreto endurecido, suas propriedades mecânicas e possibilidade de uso em reforços estruturais**. Relatório de Pesquisa. CPGEC. UFRGS, 1993.
- GAO, J. M., QIAN, C. X., WANG, B., MORINO, K. **Experimental study on properties of polymer-modified cement mortars with silica fume**. Department of Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China. Department of Civil

Engineering, Aichi Institute of Technology, Toyoya 470-03, Japan. Cement and Concrete Research 32 (2002), 41–45.

- HELENE, P., TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. PINI, 1992. São Paulo.
- KULAKOWSKI, M.P. **Argamassa com adição de microssílica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos**. Dissertação de Mestrado. PPGEC. UFRGS, 1994.
- KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. Tese de Doutorado. PPGEC. UFRGS, 2002.
- 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. PINI, 125-172.
- MAILVAGANAM. N. P., DEANS, J. J. **Materials, selection, and handling**. Repair and protection of concrete structures. Boca Raton: CRC Press, 1992a, 27-42.
- MAILVAGANAM. N. P., DEANS, J. J. **Materials, selection, and handling**. Repair and protection of concrete structures. Boca Raton: CRC Press, 1992b, 43-86.
- MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Gordon e Breach. Ottawa, 1996.
- MATTOS, F. V., CALMON, J. L., LORDÊLLO, F. S. S. **Um estudo comparativo entre argamassas de recuperação estrutural**. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. 2002. Universidade de Brasília, DF.
- MEHTA, P. K. **Durability of concrete – fifty years of progress?** In: Seminário de Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto, 1993, Porto Alegre, RS. PPGEC, NORIE, UFRGS.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Editora Pini, São Paulo, 1994.

- 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, 1991.
- MORGAN, D. R. **Compatibility of concrete repair materials and systems**. Construction and Building Materials, 10, 1996.
- NANNI, L. F., RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Caderno de Engenharia. CPGEC. UFRGS, 1992.
- NEVILLE, A. M., **Propriedades do concreto**. Editora Pini, São Paulo, 1982.
- 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. PINI, 67-82.
- PAILLERE, A. M., PLATRET, G., ROUSSEL, P., GAWSEWITCH, J. **Influence of curing time on behaviour in seawater of high-strength mortar with silica fume**. In: International Conference on Durability of Concrete, 2, Montreal. Proceedings... Detroit, American Concrete Institute, 1991, 559 – 575.
- RAO, G. A. **Development of strength with age of mortars containing silica fume**. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India. Cement and Concrete Research 31 (2001), 1141–1146.
- RAO, G. A. **Influence of silica fume on long-term strength of mortars containing different aggregate fractions**. Department of Civil Engineering, Indian. Institute of Science, Bangalore 560 012, India. Cement and Concrete Research 31 (2001), 7- 12.
- RAO, G. A. **Influence of silica fume replacement of cement on expansion and drying shrinkage**. Department of Civil Engineering, Indian. Institute of Science, Bangalore 560 012, India. Cement and Concrete Research 28 (1998)., 1505–1509,
- RAO, G. A. **Role of water-binder ratio on the strength development in mortars incorporated with silica fume**. Department of Civil Engineering, Indian. Institute of Science, Bangalore 560 012, India. Cement and Concrete Research 31 (2001), 443-447.

- ROY, D. M., ARJUNAN, P., SILSBEE, M. R. **Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete.** Materials Research Laboratory, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA. Cement and Concrete Research 31 (2001), 1809–1813.
- SANTAROSA, D., CAMPOS Fº, A., BEBER, A. J., CAMPAGNOLO, J. L. **Avaliação do desempenho de pilares curtos de concreto confinados com mantas flexíveis de fibra de carbono.** 3º Congresso internacional sobre o comportamento de estruturas danificadas, Damstruc 2002, Rio de Janeiro, RJ.
- SANTOS, L. M., **Cálculo de concreto armado.** Editora LMS, São Paulo, 1983.
- SCHULER, A. **Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas em concreto armado.** Dissertação de Mestrado. CPGEC. UFRGS, 1998.
- SELLEVOLD, E. J., NILSEN, T. **Condensed silica fume in concrete: a world review.** In: **Supplementary cementing material for concrete.** Ottawa. CANMET, 1987, 167 – 243.
- SHANNAG, M. J. **High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume.** Department of Civil Engineering, Jordan University of Science and Technology, Irbid 22110, Jordan. Cement e Concrete Composites 22 (2000), 399-406.
- SILVA Jr., J. Z. R. **Argamassas para reparo de estruturas de concreto.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
- SOUZA, A. V. L., CLÍMACO, J. C. T. S., MELO, G. S. **Reforço de pilares curtos de concreto armado de seção quadrada com mantas de polímero reforçado com fibras de carbono.** XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. 2002. Universidade de Brasília, DF.
- SOUZA, V. C. M. e RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** Editora Pini, São Paulo, 1998.
- TAKEUTI, A. R., HANAI, J. B. **Comportamento estrutural de pilares de concreto armado reforçados por encamisamento com concreto de alto desempenho.** 2º

Congresso internacional sobre o comportamento de estruturas danificadas, Damstruc 2000, Rio de Janeiro, RJ.

- TORII, K., KAWAMURA, M. **Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume**. Department of Civil Engineering, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa, 920 Japan. Cement e Concrete Composites 16 (1994), 279-286.
- VIEIRA, F. M. P., KULAKOWSKI, M. P., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. F. **Adição de sílica ativa ao concreto: efeito benéfico ou prejudicial na corrosão das armaduras desencadeada por carbonatação?** 45º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon 2003.
- WARNER, J. **Selection of repair materials**. Concrete Construction, nº 8, 1984, 865-868.
- WILLRICH, F. L., LIMA Jr, H. C. **Valuation of the load capacity of concrete columns strengthened by reinforced concrete jacket**. 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon 2002, Belo Horizonte, MG.
- WOLF, J., DAL MOLIN, D. C. C., **Carbonatação de argamassas e concretos – fatores intervenientes**. In: Simpósio sobre patologia das edificações: prevenção e recuperação, Porto Alegre, 1989. Anais... UFRGS, 1989, 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, 527 – 558.
- ZAIN, M. F. M., YUSOF, K. M., MATSUFUJI, Y. **The influence of medium temperature environments on the water permeability of high performance mortar**. Department of Civil and Structural Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Kebangsaan, Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia. Department of Architecture, Kyushu University, Fukuoka, Japan. Cement and Concrete Research 29 (1999), 785–788.
- ZANATO, A. G. **Desempenho de reforços em pilares esbeltos de concreto armado: análise numérico-experimental**. Dissertação de Mestrado. CPGEC. UFRGS, 1999.