

# Aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto

*Application of mortar with silica fume addition as a reinforcement material for compressed concrete elements*

Nei Ricardo Vaske  
João Luiz Campagnolo  
Denise Carpena Coitinho Dal Molin

## Resumo

Nei Ricardo Vaske  
Núcleo Orientado para Inovação  
da Edificação  
Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º  
andar, Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Tel.: (51) 3308-3518  
E-mail: nei.vaske@ufrgs.br

João Luz Campagnolo  
Laboratório de Ensaios e  
Modelos Estruturais  
Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Av. Osvaldo Aranha, 99, térreo  
Centro  
Porto Alegre - RS - Brasil  
CEP 90035-190  
Tel.: (51) 3308-3333  
E-mail: campagnolo@ufrgs.br

Denise Carpena Coutinho  
Dal Molin  
Núcleo Orientado para Inovação  
da Edificação  
Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
E-mail: dmolin@ufrgs.br

Recebido em 16/01/07  
Aceito em 20/10/08

**E**ste artigo apresenta os resultados de um estudo sobre pilares de concreto reforçados com argamassa com adição de sílica ativa submetidos à compressão normal. Foram moldados seis pilares de concreto, sendo três reforçados com argamassa com adição de sílica ativa e os outros três como referência. Após a ruptura dos pilares foram analisados os resultados teóricos e os resultados experimentais das cargas de ruptura, o comportamento do sistema núcleo mais reforço e a redução de resistência à compressão observada nos ensaios preliminares da argamassa. Os resultados mostram a eficiência da técnica de reforço quanto ao aumento da capacidade de carga, da ordem de 72%, a aderência adequada entre o substrato e a argamassa de reforço, e a confirmação da redução da resistência à compressão da argamassa de reforço nos níveis propostos.

**Palavras-chave:** Argamassa. Sílica ativa. Reforço.

## Abstract

*This paper presents the results a study of on concrete columns strengthened with silica fume mortar submitted to normal compression. Six columns of concrete were cast, being three strengthened with silica fume mortar and the others three as reference specimens. After to the rupture of the columns were analyzed the theoretical and experimental results of the rupture loads, behavior of the nucleus+reinforcement system and the reduction of compressive strength observed in the preliminary tests of the mortar. Results showed the efficiency of the reinforcement technical regarding the increase of the load capacity, of the order of 72%, adequate adherence between substratum and the reinforcement mortar and confirmation of the reduction of compressive strength of the mortar in the proposed levels.*

**Keywords:** Mortar. Silica fume. Reinforcement.

## Introdução

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 restaurem a resistência original da peça ou que até incrementem a resistência da peça, excedendo a capacidade original.

Campagnolo *et al.* (1999) salientam que, independentemente da técnica de reforço empregada, um dos principais requisitos do sistema composto (existente mais reforço) é a capacidade de funcionar como um todo, como um sistema integrado. Isso pode ser alcançado somente quando se proporciona uma adequada aderência entre o elemento de concreto preexistente e o reforço. A força de aderência deve ser tal que a estrutura composta apresente um comportamento monolítico. Essa ligação deve ser resistente e durável. Nesse contexto, a noção de durabilidade do reforço subentende a coexistência de dois materiais diferentes em um sistema composto durante um período determinado no projeto de reforço ou recuperação.

Frangou *et al.* (1995) estudaram uma técnica de reforço utilizando tiras de metal de 12,7 mm de largura por 0,5 mm de espessura ao redor dos protótipos, espaçadas em 0 mm, 12,7 mm e 25,4 mm, pós-tensionadas. Para os espaçamentos estudados, foram encontrados incrementos de carga da ordem de 48%, 29% e 19% respectivamente.

Zanato (1999) estudou o desempenho de reforços em pilares esbeltos de concreto armado submetidos a flexocompressão normal usando argamassa com adição de sílica ativa, perfis metálicos, chapas de aço coladas com resina epóxi e parafusos espaçados em 21 cm, chapas de aço coladas com resina epóxi e parafusos espaçados em 38 cm, chapas de aço coladas com resina epóxi, chapas de aço e parafusos espaçados em 21 cm, e concreto armado nas quatro faces. Os incrementos de carga médios em relação à carga média de colapso dos pilares testemunhos, que foi 101 kN, foram respectivamente 306%, 44%, 77%, 116%, 117%, 62% e 331%. Verificou-se que a carga de colapso do reforço utilizando-se argamassa com adição de sílica ativa foi apenas 5,7% inferior à carga de colapso do reforço executado com concreto armado e consideravelmente superior às demais técnicas estudadas. Para os diversos tipos de técnicas utilizadas, ficou evidenciado o comportamento monolítico entre o núcleo e o reforço ante o desempenho similar entre as deformações das armaduras.

Takeuti e Hanai (2000) estudaram o desempenho de pilares reforçados com a utilização de camisas de reforço usando telas soldadas em uma e duas camadas e concreto de alta resistência com fibras metálicas. Os resultados demonstraram incrementos de carga médios variando de 216% a 356% em relação aos pilares testemunhos.

Carneiro *et al.* (2000) avaliaram a resistência de colunas curtas de concreto com seção transversal circular, quadrada e retangular, confinadas externamente com fibras de carbono variando quanto ao número de camadas de reforço. Verificou-se que os maiores ganhos médios de resistência de colunas reforçadas em relação às não reforçadas foram para colunas de seção transversal circular: 71%, para colunas reforçadas com uma camada, e 133%, para o caso de duas camadas. Nas colunas de seção quadrada, esses ganhos passaram para 16% e 54% e nas de seção retangular, para 9% e 40%. Com relação ao aumento médio de resistência das colunas reforçadas com duas camadas de fibra, em relação às colunas de uma camada de fibra, foi em torno de 30% a 35%.

Santarosa *et al.* (2002) avaliaram o desempenho de pilares curtos de concreto confinados com mantas flexíveis de fibra de carbono obtendo resultados expressivos principalmente para orientações das fibras de reforço dispostas transversalmente ao eixo longitudinal das peças, com incrementos de carga da ordem de 175% em relação aos testemunhos.

Carrazedo *et al.* (2002) pesquisaram os efeitos de confinamento em pilares circulares de concreto armado encamisados com compósito de fibra de carbono, variando as taxas volumétricas de armadura transversal e o número de camadas de fibra de carbono. Observaram significativos ganhos de capacidade resistente com o aumento do número de camadas de fibras de carbono, para todas as taxas de armadura transversal. Os ganhos na capacidade resistente dos pilares foram da ordem de 31% a 105%.

Souza *et al.* (2002) estudaram o reforço de pilares curtos de concreto armado de seção quadrada com mantas de polímero reforçado com fibras de carbono. Os pilares reforçados obtiveram significativo ganho na capacidade resistente com relação aos sem reforço, com acréscimo de 40% a 51%. Relatam a ruptura dos exemplares reforçados no núcleo de concreto, em todos os exemplares, sem a ruptura das mantas de CFRP, ressaltada a eficiência do trespasse das mantas para ancoragem do sistema. Durante os ensaios, as mantas não se

soltaram do substrato, tampouco romperam nas quinas, previamente arredondadas, dos pilares de seção quadrada, indicando o bom desempenho do sistema.

Hadi (2005) estudou o comportamento de colunas circulares de concreto sobre carga de compressão excêntrica reforçadas com CFRP e GFRP. Em cada grupo de colunas, todas foram envolvidas horizontalmente com três camadas de material, e na vertical, variaram em 0, 1 e 3 camadas. As colunas reforçadas com GFRP obtiveram incrementos de carga da ordem de 12% a 58%, e as colunas reforçadas com CFRP obtiveram incrementos de carga da ordem de 55% a 125%.

Kumutha *et al.* (2007) investigaram o comportamento de colunas de seção transversal retangular carregadas axialmente e reforçadas com GFRP, variando a razão entre os lados em 1, 1,25 e 1,66, e o número de camadas de reforço, em 0, 1 e 2. Para a razão entre lados igual a 1, o acréscimo de carga axial foi de cerca de 2,6% e 22,6%, para uma e duas camadas respectivamente. Para uma razão entre os lados de 1,25, o acréscimo de carga axial foi de cerca de 2,93% e 22,67%, para uma e duas camadas respectivamente, e para a razão entre os lados de 1,66, o acréscimo de carga axial foi de cerca de 4,05% e 16,22% respectivamente. O uso de GFRP produz um acréscimo na capacidade de carga, porém é fortemente influenciada pelo aspecto da seção transversal da peça. A capacidade de carga diminui com o aumento da razão entre os lados.

Entre as diversas técnicas utilizadas no reparo ou reforço de elementos estruturais em concreto (protensão, pós-tensão, perfis metálicos, concreto armado, concreto de alto desempenho, chapas metálicas coladas com resina epóxi, compósitos de fibra de carbono, compósitos de fibra de vidro e argamassa com adição de sílica ativa), a técnica empregada no presente trabalho foi a argamassa com adição de sílica ativa, por apresentar como vantagens de sua utilização emprego de materiais simples, baixo custo, simplicidade de execução e mão-de-obra de um pedreiro profissional do próprio canteiro de obra, devidamente orientado e fiscalizado.

Observa-se que existem várias pesquisas sobre reforços de pilares com as diversas técnicas mencionadas, porém nenhuma que trate especificamente de reforço de argamassa com adição de sílica ativa.

Ante o exposto, este trabalho tem 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.

## Reforço de argamassa com adição de sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto oriundo 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 desses materiais, ocorrem reações químicas e se tem como uma das conseqüências a produção de vapor de SiO<sub>2</sub> como uma “fumaça” de sílica. Essa “fumaça” oxida e condensa, em zonas de baixa temperatura, partículas esféricas extremamente pequenas de sílica amorfa. Essas 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 20.000 m<sup>2</sup>/kg a 25.000 m<sup>2</sup>/kg (MALHOTRA; MEHTA, 1996; NEVILLE, 1982; SELLEVOLD; NILSEN, 1987).

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

O efeito físico é devido à forma esférica das partículas e sua extrema finura, com um diâmetro médio 100 vezes menor que o do cimento, que atua como um microfíler, com preenchimento dos espaços vazios deixados durante a hidratação do cimento e diminuição da capilaridade, o que proporciona maior densificação 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 endurecida.

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

Mailvaganam e Deans (1992) 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 entre água e 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 entre água e aglomerante, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência. Para as relações entre água e 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%. Para a relação entre água e 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 entre água e aglomerante 0,35 e 0,40, e relativamente superior para 0,45. Para 0,50, apresentou o maior desenvolvimento de resistência à compressão para qualquer idade e com todos os conteúdos de sílica ativa.

Buil *et al.* (1984) estudaram a adição de sílica ativa em argamassas com relações entre sílica ativa e cimento de 0,40 e entre superplastificante e cimento de 2,4%, e verificaram resistência à compressão cerca de 2 a 2,7 vezes maior 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 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 aumenta inicialmente e, então, gradualmente diminui com o aumento do tamanho do grão da areia, sendo a melhor resistência observada com grãos de tamanho entre 1,5 mm e 2,0 mm.

Dal Molin e Schuler (1993), avaliando 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 sem e com sílica ativa, verificou que as argamassas com sílica ativa, para uma mesma idade, não obedecem à lei de Abrams de

uma mesma forma, tendo em vista os ganhos de resistência nas primeiras idades em função da reação pozolânica.

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 entre água e aglomerante de 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, de 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 à 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 entre água e aglomerante de 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 entre água e aglomerante quanto o aumento no teor de adição de sílica ativa são estatisticamente significativos com relação à penetração de íons cloreto, obtendo aumentos de até 6 vezes na resistência à penetração de íons cloreto com adições de 15% de sílica ativa.

Torii e Kawamura (1994) relataram 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 µm e uma redução dos poros grandes maiores que 0,1 µm. A argamassa com sílica ativa mostrou uma permeabilidade a íons cloreto menor do que a das argamassas comuns tanto nas primeiras idades quanto nas idades posteriores.

Gao *et al.* (2002) estudaram as propriedades de argamassas com sílica ativa e emulsão de éster poliacrílico, e verificaram diminuição da porosidade e difusão de íons cloreto e aumento da densidade. Também constataram aumento na resistência à compressão e resistência à flexão das argamassas.

Paillere *et al.* (1991) destacaram 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 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) estudaram a permeabilidade à água de argamassas sem e com adição de sílica ativa para diferentes temperaturas de cura, e observaram 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) estudou a evolução da profundidade de carbonatação em argamassas com adição de sílica ativa, recomendando o emprego de argamassas com até 10% de adição como material passivador das armaduras, fato recentemente corroborado por Vieira *et al.* (2003) em estudo sobre o efeito da adição de sílica ativa, em concreto, na corrosão das armaduras desencadeada por carbonatação.

Aköz *et al.* (1999) estudaram o comportamento de argamassas com sílica ativa sob a ação de soluções de sulfato de sódio e sulfato de magnésio, em temperaturas de 20 °C e 40 °C, por um período de 300 dias, e verificaram que não houve aceleração da deteriorização das argamassas com o aumento da temperatura das soluções de sulfato e que 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 hidrocloreto, 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) estudaram 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, e constataram que a substituição de 12% de sílica ativa não densificada e sílica ativa densificada apresentaram melhores resultados.

Boddy *et al.* (2003) estudaram o conteúdo de SiO<sub>2</sub> da sílica ativa em argamassas e verificaram que teores de SiO<sub>2</sub> 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 entre água e aglomerante seja significativamente mais baixa.

Rao (1998) relatou que argamassas com sílica ativa apresentaram altos valores de retração por secagem e concluiu que a adição de sílica ativa aumenta 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, salientaram o aumento da durabilidade, facilidade e rapidez de execução desse 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) ressaltaram 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, quando 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 entre água e aglomerante de 0,55 como o que mais reúne aspectos favoráveis ao emprego em reparos de estruturas em concreto armado.

Com base nessas 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.

## Programa experimental

Este item 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.

### 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 12 cm x 12 cm, seções estas adotadas no intuito de não se obterem carregamentos excessivos. 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 cm x 12 cm e comprimento de 70 cm. Desses seis, três protótipos de 12 cm x 12 cm foram reforçados com 2,5 cm de argamassa em todas as faces, e os demais foram utilizados como testemunhos.

Ante a infra-estrutura disponível para a realização dos ensaios e a seção transversal mínima adotada nos protótipos, estes apresentam índice de esbeltez,  $\lambda$ , menor ou igual a 40.

Os seis protótipos executados foram divididos em dois grupos, conforme o Quadro 1 e a Figura 1.

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

Quadro 1 - Denominação dos protótipos

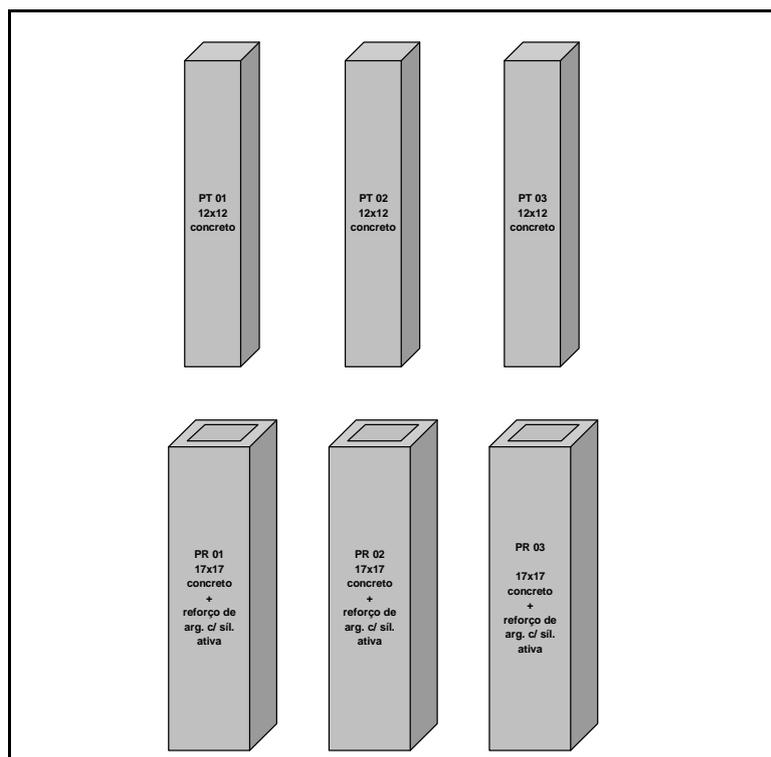


Figura 1 - Pilares testemunhos e reforçados

### Modelo teórico para o cálculo da capacidade última da peça

Na determinação da capacidade resistente dos pilares reforçados, utilizou-se a equação de equilíbrio das forças verticais, supondo-se a perfeita solidariedade entre o núcleo e o reforço.

As seguintes hipóteses foram consideradas para os elementos comprimidos:

- (a) a resistência total da peça é igual à soma das resistências do concreto e da argamassa que a constituem; e
- (b) toda a seção de concreto e argamassa contribui uniformemente para a formação da capacidade última da peça.

### Cálculo da capacidade última da peça

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

Dessa 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;

$\gamma_c$  – coeficiente de minoração da resistência do concreto;

$\gamma_a$  – coeficiente de minoração da resistência da argamassa de reforço; e

$\gamma_f$  – 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  $\epsilon_{cc} = 2\%$ .

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:

- (a) 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; e

(b) 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, considerando todos os coeficientes de segurança iguais a 1 e desprezando o efeito Rüsçh, pode-se determinar a carga teórica estimada de ruptura da peça.

## Materiais utilizados

### Cimento

Foi utilizado como aglomerante hidráulico o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI), com massa específica de 3,13 kg/dm<sup>3</sup>, que desenvolve grande resistência nos primeiros dias de idade, proporcionando, dessa 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).

### Sílica ativa

Utilizou-se sílica ativa coletada em fábrica de silício metálico, comercializado puro, em pó, não densificado, com massa específica de 2,22 g/cm<sup>3</sup>.

### Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo areia quatzosa, com massa específica de 2,63 g/cm<sup>3</sup>, determinada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2003c), dimensão

máxima característica igual a 4,8 mm e módulo de finura de 2,50, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003b).

### Agregado graúdo

Foi utilizado como agregado graúdo brita basáltica, com massa específica de 2,75 g/cm<sup>3</sup>, determinada segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2003d), dimensão máxima característica igual a 19 mm e módulo de finura de 6,89, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003b).

### Água

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

## Dosagem do concreto e da argamassa

### Dosagem do concreto dos pilares

Foi utilizado para a dosagem do concreto o método experimental IPT/EPUSP (HELENE; 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 entre água e cimento de 0,58, apresentando as características que constam no Quadro 2.

### Dosagem da argamassa dos reforços

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) mais 10% da massa de cimento de sílica ativa, com uma relação entre água e aglomerante de 0,45, apresentando os consumos conforme o Quadro 3.

Teor de argamassa seca	$\alpha=$	52%
Relação água/materiais secos	$H=$	7,73%
Consumo de cimento	$c=$	302,00 kg/m <sup>3</sup>
Consumo de agregado miúdo	$a=$	875,80 kg/m <sup>3</sup>
Consumo de agregado graúdo	$p=$	1087,21 kg/m <sup>3</sup>
Consumo de água	$ag=$	175,16 kg/m <sup>3</sup>
Consistência pelo abatimento do tronco de cone	$A=$	45 mm

Quadro 2 - Características do concreto

Consumo de cimento	c=	499,95 kg/m <sup>3</sup>
Consumo de sílica ativa	s=	49,99 kg/m <sup>3</sup>
Consumo de agregado miúdo	a=	1.499,84 kg/m <sup>3</sup>
Consumo de água	ag=	247,47 kg/m <sup>3</sup>
Consistência através do índice de consistência	I=	280 mm

Quadro 3 - Consumos da argamassa

## Formas

Foram confeccionadas formas de compensado plastificado, com espessura de 20 mm, com alta rigidez, evitando, dessa 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 quatro painéis da forma através de porcas do tipo borboleta, procurando obedecer com a máxima fidelidade às dimensões especificadas e facilitando, posteriormente, a desforma das peças.

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

Foram executadas três formas com 12 cm x 12 cm de seção transversal e três formas com 12,2 cm 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 cm x 12,2 cm, as dimensões foram adotadas de tal forma que, após o preparo das faces dos pilares para recebimento da argamassa de reforço, pelo apicoamento delas, a seção transversal resultante fosse de 12 cm x 12 cm, não havendo perda de seção do núcleo em relação aos pilares testemunhos de seção 12 cm x 12 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.

## Concretagem dos pilares

Todos os pilares foram concretados na posição vertical, procurando representar da maneira mais real possível o modo executivo, em sua grande maioria, desses elementos estruturais nas obras.

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 dos doze corpos-de-prova de controle.

Após a homogeneização da mistura, foi determinada a consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), 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 dele 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, o que facilitou a desforma posterior 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 formas com pás, em camadas de não mais do que três quartos 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 3.450 vibr./min.

Terminado o adensamento do concreto dos pilares e corpos-de-prova de controle, iniciou-se o processo de cura deles, 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 24 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 iam sendo desformados, 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 dessa maneira por mais seis dias (Figura 2).



Figura 2 - Pilar sendo envolvido por saco de anagem úmido e saco plástico para cura

Da mesma forma, após as primeiras 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e em seguida agrupados e envolvidos com saco de anagem úmido e, por sobre o mesmo, saco de plástico, dando continuidade ao processo de cura, permanecendo dessa 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, moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003a) e ensaiados conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994).

Os resultados obtidos nos ensaios para determinação da resistência à compressão dos corpos-de-prova são apresentados na Tabela 1.

### 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.

### 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 cm x 12,2 cm, tiveram suas quatro faces laterais preparadas para o lançamento da argamassa de reforço.

Primeiramente foi feito o apicoamento mecânico (Figura 3) utilizando-se um martelo elétrico e ponteiro com a extremidade em forma de batedor, retirando a camada mais externa do concreto das peças, composta principalmente de nata de cimento, tornando com isso a superfície rugosa e irregular, para melhor a aderência entre o concreto antigo e a argamassa de reforço.

O apicoamento deu-se por uma espessura de 1 mm em cada face do pilar, controlando-se através de um gabarito, o que resultou em uma seção transversal final da peça de 12 cm x 12 cm.

### Execução dos reforços

O traço adotado para a argamassa de reforço dos pilares foi o estabelecido no item 3.4.2.

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

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 dos 16 corpos-de-prova de controle.

Após a homogeneização da mistura, foi determinada a consistência da argamassa através do índice de consistência conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), tendo esse índice obtido um valor médio, após três medições, de 280 mm.

A Tabela 2 apresenta as resistências à compressão obtidas nos ensaios dos corpos-de-prova de controle da argamassa de reforço aos 28 dias de idade conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), com desvio padrão de 8,98 MPa e coeficiente de variação de 19,88%.

Os pilares foram colocados num dispositivo formado por quatro sarrafos de madeira presos a duas placas também de madeira, de tal forma que fossem possíveis o lançamento e a regularização da argamassa de reforço nas quatro 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 e reforço de 17 cm x 17 cm.

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

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

As Figuras 4 e 5 mostra um pilar sendo reforçado e, após a conclusão do reforço, pronto para iniciar a cura da argamassa.

Quando da execução do reforço, um dos protótipos, após as quatro faces já terem recebido praticamente toda a quantidade de argamassa necessária para a formação da camada de 2,5 cm de espessura, recebeu uma porção de argamassa lançada de forma mais enérgica pelo pedreiro, 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 dessa forma verificar se haveria comprometimento da aderência entre a nova argamassa e o substrato e, conseqüentemente, ao monolitismo do conjunto núcleo e reforço.

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

Terminada a execução dos reforços, cada pilar foi envolvido com saco de anagem úmido e, sobre o mesmo, saco plástico, permanecendo assim por 7 dias (Figura 6).

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, procurando produzir superfícies lisas e perpendiculares aos eixos longitudinais das peças.

#### Idade - 7

CP	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
01	157,0	22,1	23,8	1,5	6,5
02	171,5	24,2			
03	178,5	25,5			

#### Idade - 28

CP	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
04	208,0	29,3	31,6	2,0	6,3
05	230,0	32,4			
06	234,5	33,1			

#### Idade - 56

CP	Carga (kN)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
07	226,5	32,0	33,2	1,1	3,2
08	230,0	32,4			
09	234,5	33,1			
10	235,5	33,2			
11	237	33,4			
12	248,5	35,1			

Tabela 1 - Resultados dos ensaios à compressão dos corpos-de-prova de controle do concreto



Figura 3 - Apicoamento do pilar

CP	Carga	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Var. (%)
01	55,0	28,0	45,2	9,0	19,9
02	65,5	33,4			
03	69,5	35,4			
04	71,5	36,4			
05	77,0	39,2			
06	86,0	43,8			
07	86,5	44,1			
08	91,0	46,3			
09	91,5	46,6			
10	92,0	46,9			
11	93,5	47,6			
12	97,5	49,7			
13	101,0	51,4			
14	109,5	55,8			
15	115,0	58,6			
16	116,5	59,3			

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova de controle da argamassa de reforço aos 28 dias



Figura 4 - Pilar sendo reforçado

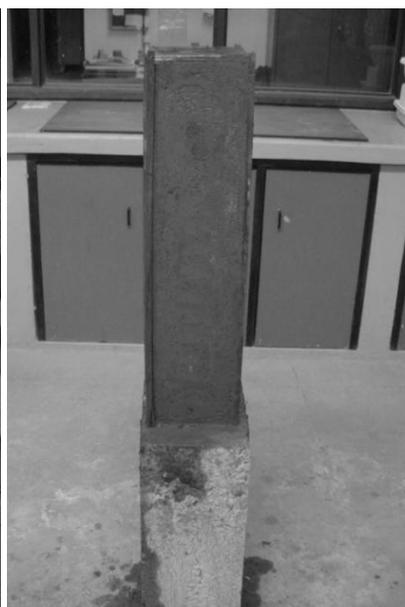


Figura 5 - Pilar reforçado



Figura 6 - Cura dos pilares reforçados

## Análise dos Resultados

Neste item são apresentados os resultados teóricos das cargas de ruptura dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados, os resultados experimentais das cargas de ruptura dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados e a comparação entre os resultados teóricos e resultados experimentais das cargas de ruptura dos protótipos testemunhos e protótipos reforçados;

## Cargas de ruptura teóricas

Para a determinação das cargas de ruptura teóricas utilizaram-se as considerações e procedimentos analíticos apresentados no item Programa Experimental e as resistências médias à compressão do concreto e argamassa de reforço provenientes dos ensaios realizados e apresentados nos itens Concretagem dos pilares e Reforço dos pilares.

A Tabela 3 apresenta os valores utilizados para a determinação das cargas teóricas, e a Tabela 4 apresenta as cargas calculadas.

Considerando-se o estudo da resistência à compressão da argamassa de reforço realizado em Vaske (2005) e empregando-se o coeficiente redutor de 0,65, tem-se para a resistência média da argamassa o valor de 29,4 MPa. Para esse valor da resistência da argamassa e com os demais valores mantidos, pode-se calcular novas cargas teóricas para os protótipos reforçados, conforme a Tabela 5.

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

### 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 três vezes, sendo utilizado um fundo de escala de 2.000 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 deles.

A Tabela 6 apresenta as cargas de ruptura dos modelos experimentais.

Resistência média à compressão de concreto	33,2	MPa
Resistência média à compressão de argamassa	45,2	MPa
Área de concreto do núcleo	14.400,00	mm <sup>2</sup>
Área de argamassa do reforço	14.400,00	mm <sup>2</sup>

Tabela 3 - Valores adotados para a determinação das cargas teóricas de ruptura

Protótipo	Núcleo (kN)	Reforço (kN)	Total (kN)
	Concreto	Argamassa	
PT	478	-	478
PR	478	650	1.128

Tabela 4 - Cargas teóricas de ruptura dos protótipos com resistência à compressão da argamassa de 45,2 MPa e do concreto de 33,2 MPa

Protótipo	Núcleo (kN)	Reforço (kN)	Total (kN)
	Concreto	Argamassa	
PT	478	-	478
PR	478	423	901

Tabela 5 - Cargas teóricas de ruptura dos protótipos com resistência à compressão da argamassa de 29,4 MPa e do concreto de 33,2 MPa

Protótipo	Carga de ruptura (kN)	Carga de Ruptura média (kN)
PT 01	550,0	572,0
PT 02	574,5	
PT 03	591,5	
PR 01	967,0	983,0
PR 02	999,0	
PR 03*	758,0	

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

Tabela 6 - Cargas de ruptura dos modelos experimentais

Devido à forma como foi reforçado, conforme já exposto no item 3, 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, o que comprometeu o comportamento monolítico desejado.

Com relação aos protótipos PR 01 e PR 02, ante o desempenho similar e o 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 seu funcionamento como um todo, como um sistema integrado, ou seja, um comportamento monolítico, conforme esperado, apresentando um aumento médio na capacidade de carga de 72,0% quando comparados aos protótipos testemunhos PT.

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

As cargas teóricas foram calculadas com dois valores de resistências médias para a argamassa obtidos dos corpos-de-prova cilíndricos de controle e após a aplicação do coeficiente redutor de 0,65, ou seja, 45,2 MPa e 29,4 MPa respectivamente.

Os protótipos testemunhos PT apresentaram carga de ruptura experimental média de 572,0 kN, representando um aumento de 20,0% em relação à carga de ruptura teórica estimada de 478,0 kN, o que indica que a resistência à compressão do concreto dos protótipos é superior à encontrada nos corpos-de-prova de controle, resultando numa resistência média de 39,7 MPa.

Os protótipos reforçados PR apresentaram carga de ruptura experimental média de 983,0 kN, o que representa uma redução de 13,0% em relação à carga de ruptura teórica estimada de 1.128,0 kN, considerando a resistência média à compressão do concreto de 33,2 MPa e a resistência à compressão média da argamassa de 45,2 MPa.

Considerando a mesma resistência média à compressão da argamassa de 45,2 MPa e adotando a resistência média do concreto obtida dos protótipos testemunhos de 39,7 MPa, temos uma nova carga de ruptura teórica estimada de 1.222,0 kN, representando uma redução da carga experimental agora de 20,0%.

Da mesma forma, estimando-se a carga teórica de ruptura dos protótipos PR com a resistência à compressão média da argamassa de 29,4 MPa e resistência média à compressão do concreto de 33,2 MPa, a mesma passa a ser de 901,0 kN, com a carga de ruptura experimental média de 983,0 kN, apresentando um aumento de 9,0% em relação a essa nova carga teórica de ruptura.

Finalmente, considerando a resistência média da argamassa de reforço de 29,4 MPa e a resistência média à compressão do concreto de 39,7 MPa, a carga teórica de ruptura passa a ser de 995,0 kN, praticamente igual à carga experimental de ruptura de 983,0 kN.

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 dessa argamassa.

Para os protótipos PR com carga de ruptura média de 983,0 kN, sendo a parcela de carga suportada pelo concreto de 478,0 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 505,0 kN, com uma resistência à compressão de 35,1 MPa, o que representa uma redução de 22,0% quando comparada à resistência à compressão da argamassa obtida dos corpos-de-prova de controle.

Da mesma forma, considerando a carga de ruptura média de 983,0 kN dos protótipos PR e a parcela de carga suportada pelo concreto de 572,0 kN obtida diretamente dos ensaios dos protótipos PT, tem-se para a argamassa uma parcela de contribuição de 411,0 kN, com uma resistência à compressão de 28,5 MPa, o que resulta numa redução de 37,0% quando comparada à 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 em Vaske (2005).

## Conclusões

Os protótipos reforçados com argamassa com sílica ativa PR apresentaram carga experimental média 72,0% superior à 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. A adição de sílica ativa proporciona uma melhora considerável dessas propriedades, justificando sua utilização.

Independentemente do valor considerado para a resistência à compressão do concreto, 33,2 MPa, obtida dos corpos-de-prova de controle, ou 39,7 MPa, obtida diretamente dos ensaios dos protótipos PT, resultando para o valor da resistência à compressão da argamassa aplicada ao substrato de 35,1 MPa e 35,8 MPa respectivamente, é sugestiva a redução da resistência à compressão da argamassa de reforço quando lançada no substrato.

Considerando o desempenho similar e o nível da capacidade de carga alcançado pelos protótipos PR 01 e PR 02, há indícios de aderência adequada entre o substrato e a argamassa de reforço, devido ao comportamento monolítico observado durante os ensaios.

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 também que a superfície resultante esteja isenta de qualquer substância que possa vir a comprometer essa aderência e, conseqüentemente, a capacidade resistente do conjunto núcleo e reforço, como ficou evidente pelo comportamento apresentado pelo protótipo PR 03.

Quanto ao modelo teórico proposto para os protótipos reforçados PR, ele retratou bem o comportamento dos protótipos, ainda que no cálculo das cargas teóricas sejam consideradas somente as resistências à compressão e as seções transversais resistentes, não levando em consideração esbeltez, módulo de deformação dos materiais e deformações e deslocamentos que possam advir dessas variáveis.

Os procedimentos para a execução dos reforços são simples, sendo as atividades de apicoamento, colocação de mestras para regular 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, de fácil aquisição e de baixo custo quando comparados aos materiais utilizados por outras técnicas de reforço.

## Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 2003c.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003d.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de

paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

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**, n. 29, p. 537-544, 1999.

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**, n. 28, p. 1011-1020, 1998.

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**, n. 30, p. 1139-1150, 2000.

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**, n. 33, p. 1-6, 2003.

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**, n. 14, p. 693-704, 1984.

CAMPAGNOLO, J. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Reforço de lajes de concreto armado com argamassa de alto desempenho (com adição de microssilica)**. Relatório de pesquisa. CPGEC, UFRGS, 1994.

CAMPAGNOLO, J. L. *et al.* **Reforço de vigas à flexão com argamassa aditivada**. Relatório de Pesquisa. CPGEC, UFRGS, 1996.

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.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA FILHO, L. C. P. **Estudo comparativo de**

**técnicas para aumento da capacidade portante de estruturas degradadas**. Seminário Tiradentes, UFF, 2003.

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. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 29., Punta del Este. **Anais...** 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. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte: Ibracon, 2002.

DAL MOLIN, D. C. C.; SCHULER, A. **Estudo a respeito da aderência de argamassas com adição de microssilica sobre o concreto endurecido, suas propriedades mecânicas e possibilidade de uso em reforços estruturais**. Relatório de Pesquisa. CPGEC, UFRGS, 1993.

FRANGOU, M.; PILAKOUTAS, K.; DRITSOS, S. Structural repair/strengthening of RC columns. Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield, S1 3JD, UK. Department of Civil Engineering, University of Patras, Patras, Greece. **Construction and Building Materials**, n. 9, 1995.

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**, n. 32, p. 41-45, 2002.

HADI, M. N. S. Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong Northfields Avenue, Wollongong, NSW 2522, Australia. **Composite Structures**, n. 77, p. 92-96, 2007.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

KULAKOWSKI, M. P. **Argamassa com adição de microssilica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

KUMUTHA, R.; VAIDYANATHAN, R.; PALANICHAMY, M.S. Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP. Department of Civil Engineering, Mepco Schlenk Engineering College, Sivakasi-626 005, TN, India and Vice-Chancellor, TamilNadu Open University, Chennai, TN, India. **Cement & Concrete Composites** (2007)

MAILVAGANAM, N. P.; DEANS, J. J. **Materials, selection, and handling**: repair and protection of concrete structures. Boca Raton: CRC Press, 1992.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Ottawa: Gordon e Breach, 1996.

MATTOS, F. V.; CALMON, J. L.; LORDÊLLO, F. S. S. Um estudo comparativo entre argamassas de recuperação estrutural. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., **Anais...** Universidade de Brasília, DF, 2002.

MEHTA, P. K. Durability of concrete: fifty years of progress? In: SEMINÁRIO DE QUALIDADE E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. **Anais...** Porto Alegre, RS. PPGEC, NORIE, UFRGS, 1993.

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.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982.

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. p. 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**, n. 31, p. 1141-1146, 2001.

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**, n. 31, p. 7-12, 2001.

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**, n. 28, p. 1505-1509, 1998.

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**, n. 31, p. 443-447, 2001.

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**, n. 31, p. 1809-1813, 2001.

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. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE O COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DANIFICADAS, 3., Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: Damstruc, 2002.

SANTOS, L. M. **Cálculo de concreto armado**. São Paulo: LMS, 1983.

SCHULER, A. **Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas em concreto armado**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SELLEVOLD, E. J.; NILSEN, T. Condensed silica fume in concrete: a world review. In: Supplementary cementing material for concrete. Ottawa. **CANMET**, p. 167-243, 1987.

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**, n. 22, p. 399-406, 2000.

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. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., **Anais...** Universidade de Brasília, DF. 2002

TAKEUTI, A. R.; HANAI, J. B. Comportamento estrutural de pilares de concreto armado reforçados por encamisamento com concreto de alto desempenho. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE O COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DANIFICADAS, 2., Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: Damstruc, 2000.

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**, n. 16, p. 279-286, 1994.

VASKE, N.R. **Contribuição ao Estudo da Argamassa com Adição de Sílica Ativa em Reforços de Elementos Comprimidos de Concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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? In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45., Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte, MG, Ibracon, 2003.

WILLRICH, F. L.; LIMA Jr, H. C. Valuation of the load capacity of concrete columns strengthened by reinforced concrete jacket. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte, MG, Ibracon, 2002.

WOLSIEFER, J. T. Silica fume concrete: a solution to steel reinforcement corrosion in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 2., Montreal. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1991. p. 527-558

YAO, J.; LI, X.; LI, Z. Experimental study of a circular concrete column reinforced with a composite tube. **Composites Science and Technology**, v. 61, n. 13, Oct. 2001.

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**, n. 29, p. 785-788, 1999.

ZANATO, A. G. **Desempenho de reforços em pilares esbeltos de concreto armado: análise numérico-experimental**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.