

Relationship between the compressive strength of silica fume mortar applied to the substratum and the one obtained in standardized cylindrical test specimens

Relação entre a resistência à compressão da argamassa com adição de sílica ativa aplicada ao substrato e àquela obtida em corpos-de-prova cilíndricos normatizados

N. R. VASKE ^a
nei.vaske@ufrgs.br

J. L. CAMPAGNOLO ^b
campagnolo@ppgec.ufrgs.br

D. C. C. DAL MOLIN ^c
dalmolin@ppgec.ufrgs.br

Abstract

Compressive strength values obtained from standardized tests are adopted in the use of silica fume mortar as a reinforcement material, however, they usually do not represent the compressive strength of mortar applied to the substratum. In a reinforcement procedure, each portion of mortar applied to the substratum undergoes densification according to the energy with which it collides with the substratum, resulting in different compressive strength values along the reinforcement; this affects the overall strength of the reinforcement as a whole, which, in turn, defines the new loading capacity of the reinforced structural element. In order to verify the actual behavior of a reinforcement mortar, a silica fume mortar plate dimensionally similar to a reinforced column face was executed, and prismatic samples extracted from the mortar plate were submitted to compression tests. The average compressive strength obtained was compared with the average compressive strength observed in cylindrical test specimens, molded from the same material used in the mortar plate. The prismatic samples' average compressive strength presented a reduction of 35% in this particular case.

Keywords: mortar, silica fume, reinforcement.

Resumo

No uso de argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço adotam-se valores de resistência à compressão provenientes de ensaios normatizados, que tendem a não representar a resistência à compressão da argamassa após lançada ao substrato. 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 à compressão 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 que esta sendo reforçado. Procurando verificar o comportamento real 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. Deste ensaio foi determinada uma resistência à compressão média que, comparada com a resistência à compressão média obtida de corpos-de-prova cilíndricos, moldados com a mesma argamassa com que foi executada a placa, demonstrou que a resistência à compressão média das amostras prismáticas extraídas da placa apresenta, particularmente neste estudo, uma redução em relação à resistência à compressão média resultante dos corpos-de-prova cilíndricos da ordem de 35%.

Palavras-chave: argamassa, sílica ativa, reforço.

^a Engenheiro Civil, Espec., M. Sc., Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar, 90.035-190, Porto Alegre – RS, nei.vaske@ufrgs.br.

^b Engenheiro Civil, M. Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar, 90.035-190, Porto Alegre – RS, campagnolo@ppgec.ufrgs.br.

^c Engenheira Civil, M. Sc., Dr^a, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha, 99, 3º andar, 90.035-190, Porto Alegre - RS, dalmolin@ppgec.ufrgs.br.

1. Introdução

Independente de se fazer um reforço para alteração de função da estrutura, em que se tem o aumento da carga de utilização, ou se fazer um reforço devido a danos sofridos pela estrutura, onde este passa a ser uma intervenção de recuperação, faz-se necessário a elaboração preliminar de um cálculo estrutural, sendo necessário o conhecimento de algumas características do material a ser empregado como reforço.

Tanto para um serviço de reforço ou recuperação, é da máxima importância o conhecimento da resistência à compressão que este material apresenta a fim de se 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 resistência à compressão é feita baseada em procedimentos normatizados, cujos valores tendem a não representar a resistência à compressão da argamassa após lançada ao substrato.

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.

Este trabalho procura estabelecer uma relação entre a resistência média à compressão da argamassa utilizada no reforço após lançada ao substrato e a resistência média obtida na ruptura de corpos-de-prova de referência desta argamassa, no presente caso, com adição de sílica ativa.

2. Argamassa de reforço 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 destes materiais, ocorrem reações químicas e se tem como uma das conseqüências a produção de vapor de SiO₂ 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 m²/kg (Neville [1]; Sellevold e Nilsen [2]; Malhotra e Mehta [3]).

Com relação ao diâmetro médio das partículas e superfície específica da sílica ativa, Kulakowski [4] 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 m²/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 extre-

ma finura, com um diâmetro médio da ordem de 100 vezes menor que o do cimento, atuando como um microfiller, 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 [5]). Mehta [6] 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. É o que se observa em diversas pesquisas desenvolvidas com materiais contendo sílica ativa

Mailvaganam e Deans [7], 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.

Buil et al. [8], estudaram a adição de sílica ativa em argamassas com relações sílica ativa/cimento de 0,40 e superplastificante/cimento de 2,4%, e verificaram **resistência à compressão** cerca de 2 a 2,7 vezes maiores em relação à argamassa de referência, aos 28 dias de idade.

Dal Molin e Schuler [9], estudaram a resistência à compressão de argamassas com adição de sílica ativa, e obtiveram um ganho da ordem de 15% quando se passa de níveis de teor de adição de sílica ativa de 0 a 10%.

Shannag [10], 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 [11], 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.

Mirza [12], 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.

Dal Molin e Schuler [9], 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.

Schuler [13], 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.

Mattos et al. [14], estudaram as 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, e 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 [15] para argamassa de reparo.

Mirza [12], observou 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.

Paillere et al. [16], estudaram aspectos relativos à **durabilidade** de argamassas, e 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%.

Kulakowski [17], relata 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 [18], 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.

Schuler [13], 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. [19] em estudo sobre o efeito da adição de sílica ativa, em concreto, na corrosão das armaduras desencadeada por carbonatação.

Aköz et al. [20], 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 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 algumas propriedades das argamassas apresentaram melhoras significativas.

Zain et al. [21], 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.

Gao et al. [22], estudaram as propriedades de argamassas com sílica ativa e emulsão de éster poliacrílico, e verificaram a diminuição da porosidade e difusão de íons cloretos e aumento da densidade. Também constataram aumento na resistência à compressão e resistência à flexão das argamassas.

Kulakowski [4], 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.

Campagnolo e Dal Molin [23], 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. [24], 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 [13], 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.

Campagnolo et al. [25], 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. 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

Esse item trata sobre os ensaios realizados com a argamassa com adição de sílica ativa. Determinou-se a resistência à compressão média da argamassa através da ruptura de corpos-de-prova prismáticos extraídos do substrato e a resistência à compressão média da argamassa pela ruptura de corpos-de-prova cilíndricos normalizados de referência. Determinada essas resistências, obteve-se a razão entre elas procurando-se estabelecer um coeficiente que expressas-se essa relação, indicando o comportamento da resistência à compressão da argamassa quando lançada ao substrato frente a resistência à compressão obtida de corpos-de-prova cilíndricos normalizados.

3.1 Ensaios realizados

Devido à falta de uma norma brasileira que recomende amostras prismáticas para determinação da resistência à compressão de argamassas, fez-se uso da norma americana ASTM C 109/C 109M [26] 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 adotadas amostras prismáticas retangulares 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.

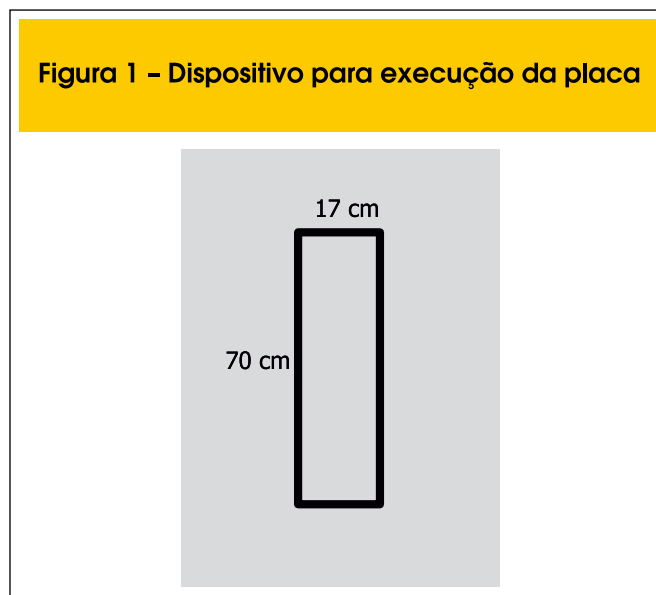
Com relação aos corpos-de-prova cilíndricos, a determinação da resistência à compressão baseou-se nas recomendações da NBR 13279 [27].

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 kg/dm³, que desenvolve grande resistência nos primeiros dias de idade. Outro fator para a escolha do cimento Portland CPV-ARI é por ser um

Figura 1 – Dispositivo para execução da placa



tipo de cimento que possui um mínimo de adição em sua composição, sendo a sílica ativa a única adição pozolânica da argamassa (NBR 5733 [28]).

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.

3.2.3 Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo areia quatzosa, com massa específica 2,63 g/cm³, determinada segundo a NBR NM 52 [29], dimensão máxima característica igual a 4,8 mm e módulo de finura 2,50, conforme a NBR NM 248 [30].

3.2.4 Água

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

3.3 Metodologia

Sobre uma chapa de compensado de 14 mm de espessura, foram pregadas duas ripas de madeira com seção de 2,5 x 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 12 x 12 cm e altura de 70 cm (Figura 1). A chapa de compensado 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.

O traço adotado para a argamassa, em massa, foi 1(cimento):

Figura 2 - Aplicação da argamassa na placa



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 [13], conforme item 2.

Foi feita uma mistura de 4,0 dm³ 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 (Figura 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.

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 anagem 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 anagem 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, cada uma com 1/3 da altura da placa e, em 6 partes em relação à largura, cada uma com 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 ao sentido que o reforço atuaria na prática, identificados por números (Figura 3) 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.

Os corpos-de-prova prismáticos foram ensaiados aos 28 dias, tendo sido usada uma placa de couro de 40 x 40 mm e 3 mm de espessura entre os pratos da prensa e a base e topo dos mesmos, procurando desta forma evitar 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.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados e ensaiados conforme a NBR 13279 [26], 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 anagem molhado e, por sobre este, um plástico, tentan-

Figura 3 - Localização das amostras na placa

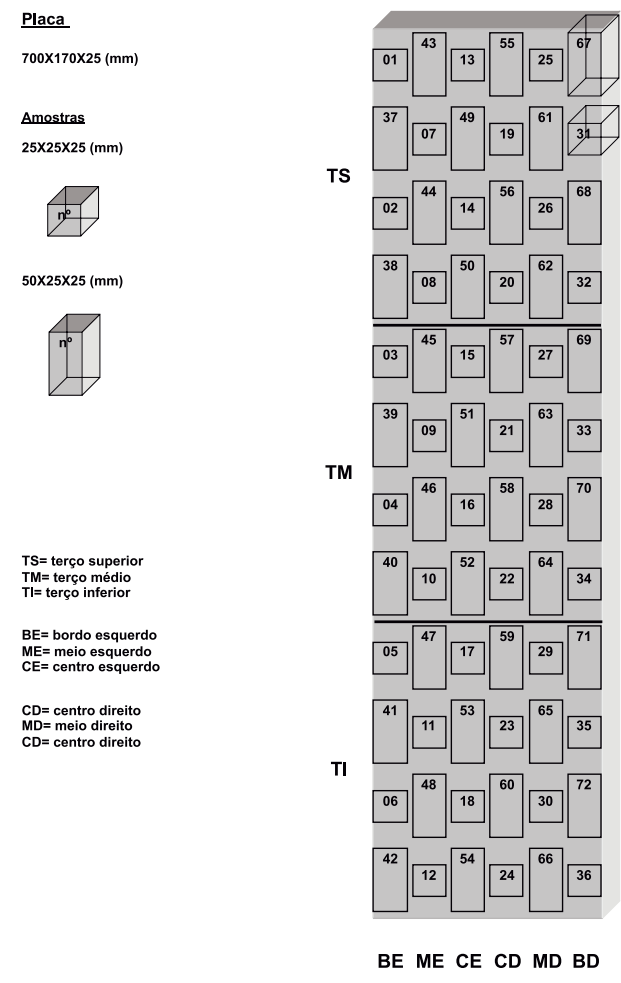


Tabela 1 - Resultados dos ensaios à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de controle da argamassa

Amostra (n°)	Carga (kN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)
1	76,00	1963,50	38,7
2	86,50	1963,50	44,1
3	95,00	1963,50	48,4
Resistência Média (MPa)			43,7
Desvio Padrão (MPa)			4,85
Coeficiente de Variação (%)			11,1

Tabela 2 - Amostras razão altura/lado=1

Amostra (n°)	Altura (mm)	Seção (mm)			Carga (kN)	Resistência (MPa)
		a	b	Área (mm ²)		
1	24,95	24,83	24,87	617,52	20,5	33,2
2	24,56	24,86	24,85	617,77	18,5	29,9
3	24,79	24,80	24,90	617,52	16,0	25,9
4	24,75	24,89	24,88	619,26	22,5	36,3
5	24,68	24,78	24,85	615,78	20,0	32,5
6	24,70	24,78	24,83	615,29	20,5	33,3
7	24,68	24,80	24,93	618,26	23,0	37,2
8	24,86	24,89	24,82	617,77	19,0	30,8
9	24,77	24,83	24,80	615,78	22,5	36,5
10	24,84	24,78	24,75	613,31	17,0	27,7
11	24,71	24,84	24,89	618,27	20,0	32,3
12	24,69	24,83	24,88	617,77	22,0	35,6
13	24,72	24,90	24,85	618,77	20,0	32,3
14	24,75	24,86	24,80	616,53	24,0	38,9
15	24,98	24,85	24,75	615,04	21,0	34,1
16	24,71	24,79	24,85	616,03	24,5	39,8
17	24,88	24,82	24,84	616,53	19,0	30,8
18	24,89	24,78	24,79	614,30	18,5	30,1
19	24,87	24,85	24,80	616,28	20,5	33,3
20	24,87	24,86	24,76	615,53	20,0	32,5
21	24,82	24,87	24,80	616,78	20,0	32,4
22	24,81	24,78	24,83	615,29	19,5	31,7
23	24,78	24,82	24,75	614,30	20,5	33,4
24	24,92	24,90	24,84	618,52	17,5	28,3
25	24,69	24,84	24,80	616,03	19,0	30,8
26	24,87	24,76	24,80	614,05	19,5	31,8
27	24,92	24,83	24,85	617,03	15,5	25,1
28	24,84	24,77	24,78	613,80	18,0	29,3
29	24,77	24,78	24,80	614,54	21,5	35,0
30	24,88	24,82	24,79	615,29	21,5	34,9
31	24,80	24,78	24,76	613,55	25,5	41,6
32	24,73	24,80	24,78	614,54	20,5	33,4
33	24,81	24,80	24,76	614,05	16,5	26,9
34	24,90	24,84	24,75	614,79	14,0	22,8
35	24,94	24,90	24,87	619,26	22,0	35,5
36	24,82	24,83	24,88	617,77	21,5	34,8
Resistência Média (MPa)						32,5
Desvio Padrão (MPa)						4,0
Coef. Var. (%)						12,4

do 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.

3.4 Resultados obtidos

A Tabela 1 apresenta as resistências à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos de controle da argamassa de reforço.

As Tabelas 2 e 3 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 4 e 5 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.

3.5 Análise dos resultados

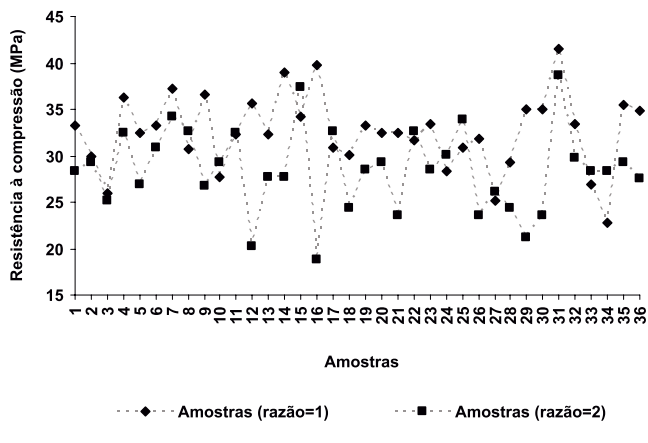
O coeficiente de variação das amostras prismáticas e cilíndricas é satisfatório. Em geral um coeficiente de variação igual a 25 % é aceito como um limite para se considerar uma amostra aceitável (NANNI e RIBEIRO, [31]).

Realizou-se uma análise estatística dos resultados obtidos para

Tabela 3 – Amostras razão altura/lado=2

Amostra (n°)	Altura (mm)	Seção (mm)			Carga (kN)	Resistência (MPa)
		a	b	Área (mm ²)		
37	50,08	24,87	24,86	618,27	17,5	28,3
38	50,19	24,75	24,85	615,04	18,0	29,3
39	50,01	24,78	24,83	615,29	15,5	25,2
40	50,23	24,84	24,84	617,03	20,0	32,4
41	50,20	24,79	24,76	613,80	16,5	26,9
42	50,15	24,82	24,78	615,04	19,0	30,9
43	50,29	24,77	24,77	613,55	21,0	34,2
44	50,16	24,80	24,78	614,54	20,0	32,5
45	50,01	24,78	24,85	615,78	16,5	26,8
46	50,18	24,79	24,77	614,05	18,0	29,3
47	50,38	24,82	24,88	617,52	20,0	32,4
48	50,42	24,77	24,84	615,29	12,5	20,3
49	50,10	24,84	24,77	615,29	17,0	27,6
50	50,00	24,75	24,76	612,81	17,0	27,7
51	50,17	24,82	24,77	614,79	23,0	37,4
52	50,36	24,77	24,75	613,06	11,5	18,8
53	50,02	24,79	24,77	614,05	20,0	32,6
54	50,05	24,78	24,83	615,29	15,0	24,4
55	50,04	24,79	24,80	614,79	17,5	28,5
56	50,10	24,81	24,79	615,04	18,0	29,3
57	50,00	24,85	24,77	615,53	14,5	23,6
58	50,08	24,84	24,74	614,54	20,0	32,5
59	50,03	24,79	24,78	614,30	17,5	28,5
60	50,05	24,85	24,80	616,28	18,5	30,0
61	50,04	24,80	24,98	619,50	21,0	33,9
62	50,11	24,85	24,75	615,04	14,5	23,6
63	50,03	24,78	24,79	614,30	16,0	26,0
64	50,14	24,83	24,78	615,29	15,0	24,4
65	50,17	24,77	24,76	613,31	13,0	21,2
66	50,16	24,85	24,80	616,28	14,5	23,5
67	50,01	24,94	24,90	621,01	24,0	38,6
68	50,19	24,93	24,88	620,26	18,5	29,8
69	50,28	24,78	24,90	617,02	17,5	28,4
70	50,04	24,82	24,88	617,52	17,5	28,3
71	50,58	24,80	24,79	614,79	18,0	29,3
72	50,21	24,88	24,88	619,01	17,0	27,5
Resistência Média (MPa)						28,4
Desvio Padrão (MPa)						4,4
Coef. Var. (%)						15,5

Figura 4 – Resistências das amostras de razão altura/lado igual a 1 e igual a 2

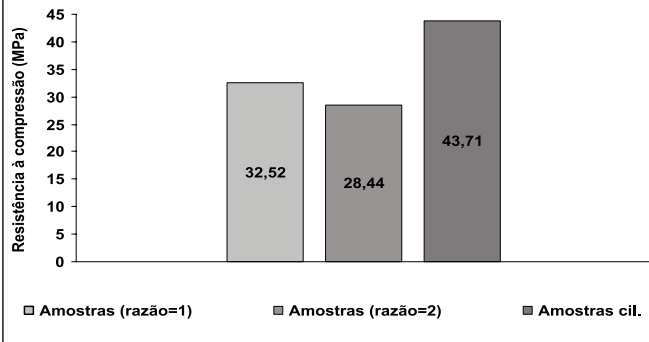


a resistência à compressão das amostras prismáticas através da análise de variância, ANOVA, que permite comparar grupos de valores considerando a variabilidade das médias entre os grupos com a variabilidade das observações dentro dos grupos, baseado na distribuição de Fischer, com um F tabelado para 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. O modelo de análise de variância assume que as observações são independentes, normalmente distribuídas e mesma variância para cada tratamento. A validade dessas suposições foi verificada por meio de análise de resíduos.

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 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.

Figura 5 – Resistências médias



Neville [1], 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.

Mehta e Monteiro [32] 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 a 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, obtém-se uma

Tabela 4 – Análise de variância para resistência à compressão das amostras prismáticas

Fonte	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	p-valor	Efeito
A (altura)	97,90	2,00	48,95	2,56	3,26	9,10%	não significativo
B (largura)	82,55	5,00	16,51	0,86	2,48	51,41%	não significativo
C (razão)	299,96	1,00	299,96	15,71	4,11	0,03%	significativo
AB (axl)	161,32	10,00	16,13	0,85	2,11	59,00%	não significativo
AC (axr)	26,51	2,00	13,26	0,69	3,26	50,60%	não significativo
BC (lrx)	39,09	5,00	7,82	0,41	2,48	83,90%	não significativo
ABC (axlrx)	157,63	10,00	15,76	0,83	2,11	60,69%	não significativo
Erro	687,24	36,00	19,09				
Total	1552,19	71,00					

Obs: Se $F_{calc} > F_{tab}$ concluir ao nível de significância $\alpha = 5\%$ que as médias dos tratamentos são diferentes - efeito significativo

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.

Figura 6 – Resistências das amostras de razão altura/lado igual a 1 corrigidas, razão altura/lado igual a 2 e resistência média da placa

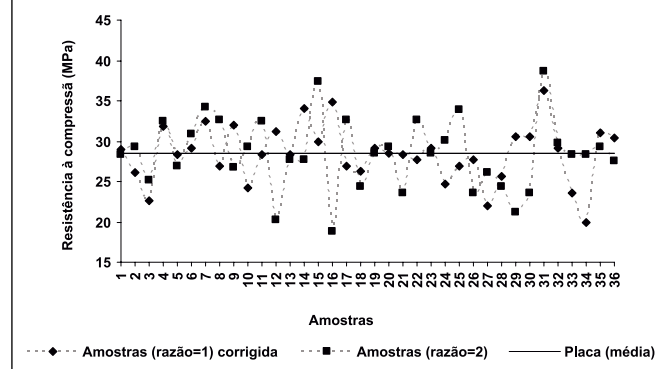
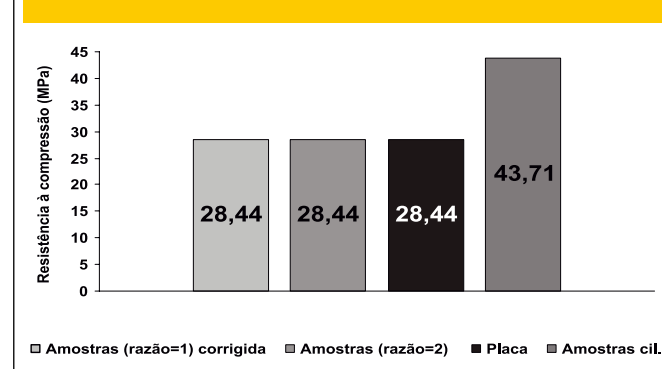


Figura 7 – Resistências médias



Considerando que a resistência média da placa seja a média das médias das resistências das amostras estudadas, tem-se como média da placa 28,44 MPa e desvio padrão igual a 3,97 MPa.

As Figuras 6 e 7 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.

A Tabela 5 apresenta o resultado da nova análise de variância da amostra total.

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 igual a 1, passa a não ter mais efeito como era de se esperar.

Nas Figuras 8, 9 e 10 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 “Localização das amostras na placa”.

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 conseqüentemente uma maior quantidade de ar aprisionado, 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

Tabela 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}	p-valor	Efeito
A (altura)	86,12	2,00	43,06	2,45	3,26	9,39%	não significativo
B (largura)	75,10	5,00	15,02	0,85	2,48	51,68%	não significativo
C (razão)	0,00	1,00	0,00	0,00	4,11	100,00%	não significativo
AB (axl)	133,03	10,00	13,30	0,76	2,11	67,00%	não significativo
AC (axr)	23,69	2,00	11,85	0,67	3,26	51,34%	não significativo
BC (lrx)	37,09	5,00	7,42	0,42	2,48	83,23%	não significativo
ABC (axlrx)	129,81	10,00	12,98	0,74	2,11	68,69%	não significativo
Erro	633,63	36,00	17,60				
Total	1118,47	71,00					

Obs: Se $F_{calc} > F_{tab}$ concluir ao nível de significância $\alpha = 5\%$ que as médias dos tratamentos são diferentes - efeito significativo

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.

4. 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 a variabilidade dos resultados encontrados.
- 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 realizadas, facilitando a extração, manuseio e ensaio das amostras e não necessitando qualquer correção dos resultados, sendo, portanto tal relação sugerida para futuros trabalhos.
- Sendo a resistência à compressão das amostras 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 ser atingido.
- Considerando a redução de 35% observada da resistência média à compressão das amostras prismáticas extraídas da

Figura 8 – “Seções transversais” da placa

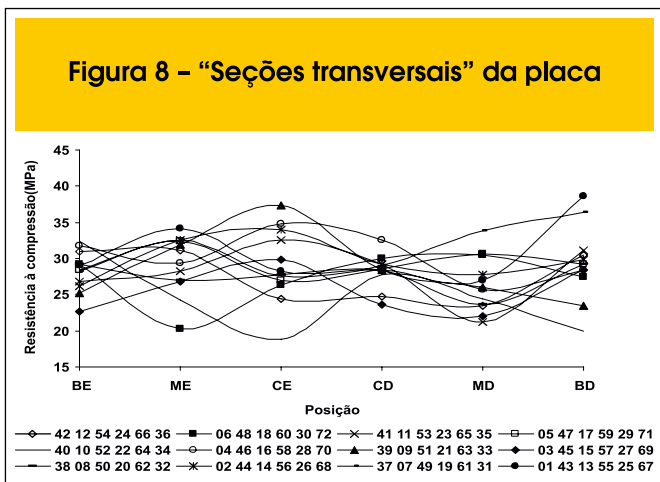


Figura 9 – “Perfis longitudinais” da placa

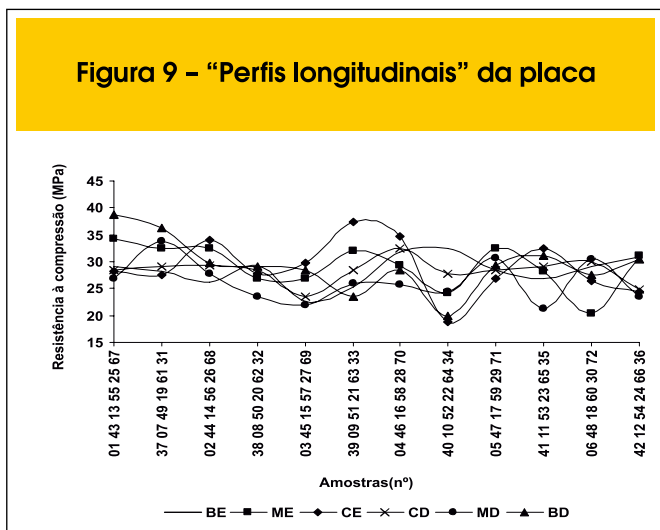
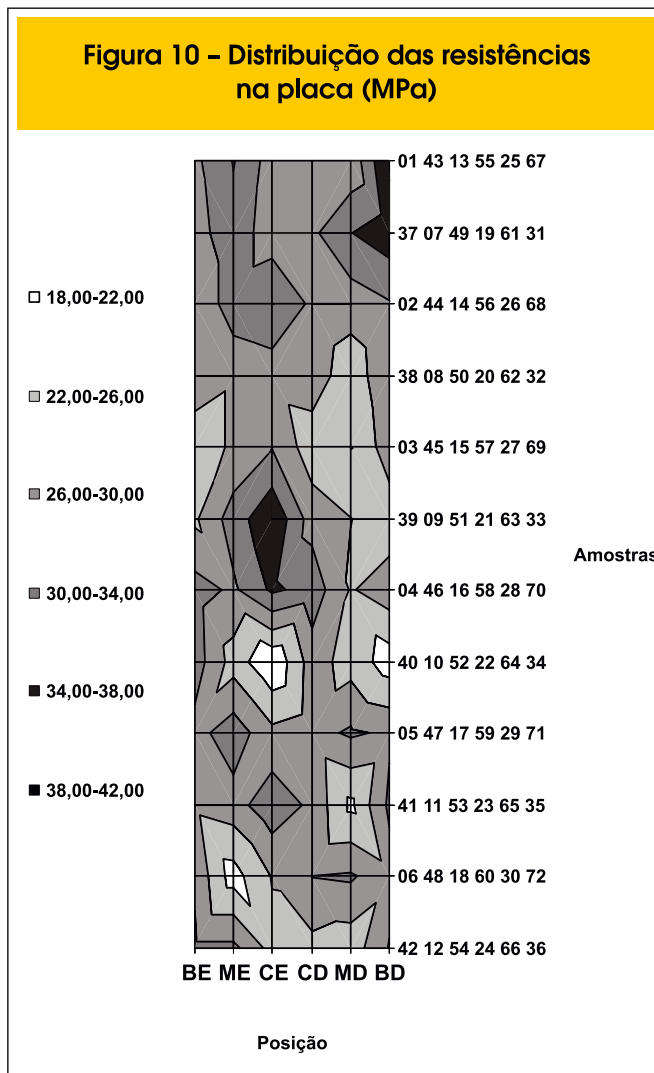


Figura 10 – Distribuição das resistências na placa (MPa)



placa em relação à resistência média à compressão resultante dos corpos-de-prova cilíndricos, a média e desvio padrão amostrais dos corpos-de-prova cilíndricos e 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 $f_{ak} = (43,71 \times (1-0,35)) - 1,65 \times 4,85 = 20,41$ MPa seria a resistência para fins de dimensionamento mais apropriada a se adotar.

- Quanto se tomar 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 no presente estudo.

5. Referências Bibliográficas

- [01] NEVILLE, A. M., Propriedades do concreto. Editora Pini, São Paulo, 1982.
- [02] SELLEVOLD, E. J.; NILSEN, T. Condensed silica fume in concrete: a world review. In: Supplementary cementing material for concrete. Ottawa. CANMET, 1987, 167 – 243.
- [03] MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. Pozzolan and cementitious materials. Gordon e Breach. Ottawa, 1996.
- [04] KULAKOWSKI, M.P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. Tese de Doutorado. PPGEC. UFRGS, 2002.
- [05] 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.
- [06] 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.
- [07] MAILVAGANAM. N. P.; DEANS, J. J. Materials, selection, and handling. Repair and protection of concrete structures. Boca Raton: CRC Press, 1992b, 43-86.
- [08] 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.
- [09] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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) - PPGEC. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [14] MATTOS, F. V., CALMON, J. L., LORDÉLLO, F. S. S. Um estudo comparativo entre argamassas de recuperação estrutural. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. 2002. Universidade de Brasília, DF.
- [15] SILVA Jr., J.Z.R. Argamassas para reparo de estruturas de concreto. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
- [16] 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.
- [17] KULAKOWSKI, M.P. Argamassa com adição de microssilica para reparos estruturais: estudo da penetração de cloretos. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - PPGEC. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] CAMPAGNOLO, J. L.; DAL MOLIN, D. C. C.
Reforço de lajes de concreto armado com
argamassa de alto desempenho (com adição de
microsilica). Relatório de pesquisa. CPGEC.
UFRGS, 1994.
- [24] CAMPAGNOLO, J. L.; DAL MOLIN, D. C. C.
Reforço de vigas à flexão com argamassa
aditivada. Relatório de Pesquisa. CPGEC.
UFRGS, 1996.
- [25] 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.
- [26] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND
MATERIALS (ASTM). C 109/C 109M: Standard
test method for compressive strength of hydraulic
cement mortars (Using 2-in or [50-mm] cube
specimens)¹. Philadelphia, 1998.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS
TÉCNICAS (ABNT). NBR 13279: Argamassa para
assentamento e revestimento de paredes e tetos –
Determinação da resistência à compressão.
Rio de Janeiro, 1995.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS
TÉCNICAS (ABNT). NBR 5733: Cimento Portland
de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS
TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 52: Agregados -
Determinação da massa específica de agregados
miúdos por meio do Frasco de Chapman.
Rio de Janeiro, 2003.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS
TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248: Agregados -
Determinação da composição granulométrica.
Rio de Janeiro, 2003.
- [31] NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. Planejamento e
avaliação de experimentos. Caderno de Engenharia.
CE – 17/87. 2ª Ed. CPGEC. UFRGS, 1992.
- [32] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto:
estrutura, propriedades e materiais. Editora Pini,
São Paulo, 1994.