

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil



ISSN 0103-9830

BT/PCC/107

**Concreto Projetado
com Adição de
Microssílica**

**Maristela Gomes da Silva
Paulo Helene**

São Paulo - 1993

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada pela Eng^a Maristela Gomes da Silva, sob orientação do Prof. Dr. Paulo Helene: "Concreto projetado com adição de microsilica".

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia Civil da Escola Politécnica/USP.

Silva, Maristela Gomes da
Concreto projetado com adição de microsilica
/ M.G. da Silva, P.R. do L. Helene. -- São Paulo :
EPUSP, 1993.
27p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica
da USP. Departamento de Engenharia de Construção
Civil, BT/PCC/107)

1.Concreto projetado 2.Concreto com microsilica
I.Helene, Paulo Roberto do Lago II.Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Construção Civil III.Título IV.Série

CDU 691.32

CONCRETO PROJETADO COM ADIÇÃO DE MICROSSÍLICA DRY-MIX SHOTCRETE WITH SILICA FUME

Eng^a Maristela Gomes da Silva
UFES/EPUSP

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene
EPUSP

RESUMO

A utilização da microssílica no concreto projetado tem se difundido devido aos resultados positivos e às inúmeras modificações observadas na reologia e microestrutura de concretos convencionais.

Porém, a análise dos trabalhos publicados mostra que os estudos desenvolvidos nesta área se restringem a determinação da resistência à compressão nas altas idades e medidas do índice de reflexão de misturas padronizadas.

Então, este trabalho pretende avaliar a influência da adição de microssílica ao concreto projetado via-seca (processo de produção e propriedades físicas e mecânicas).

No estudo experimental foi definido um traço e confeccionou-se painéis de concreto projetado via-seca. Avaliou-se, então, algumas propriedades e parâmetros do concreto projetado com microssílica, com base na determinação dos índices de consistência e de reflexão, do fator água-materiais secos, na evolução da resistência à compressão, massa específica, absorção, volume de vazios permeáveis e permeabilidade.

Constatou-se, que o teor de 8% (em massa) de adição de microssílica em substituição ao cimento foi o de melhor resultado. Verificou-se, ainda, que esta adição não alterou o fator água/materiais secos, diferente do observado no concreto convencional. Por outro lado, a adição de microssílica permitiu a redução dos índices de reflexão, acréscimos nos índices de coesão, diminuição da absorção e do volume de vazios permeáveis, além de verificarem-se acréscimos nas resistências à compressão iniciais e finais.

ABSTRACT

The use of silica fume in shotcrete has increased due to its successful performance in cast concrete and some changes benefits to the properties of the plastic and hardened shotcrete.

However, the results showed in most of work published in this field are limited to studies where the performance of some mix proportions is measured in terms of strength and rebound.

Thus, this work deals with the influence of the silica fume addition on dry-mix shotcrete general performance (production process and mechanical and physical properties). Some mix proportions were defined and shotcrete test panels were sprayed. Some properties and parameters such stiffness, rebound,

water/dry materials ratio, strength development, permeable voids volume, boiling absorption, specific gravity and water permeability were evaluated.

The best results were found replacing 8% of cement by silica fume. Moreover, the use of silica fume did not increase the necessary amount of water to achieve the same stiffness, in opposition to what is observed in cast concrete. Otherwise, this addition led to reduction of rebound, increase of cohesiveness, decrease of boiling absorption and permeable voids volume. Initial and final strength improvements were observed too.

1 - INTRODUÇÃO

O concreto projetado vem sendo largamente empregado em serviços de reparo e reforço de estruturas de concreto, contenção de encostas, revestimento de túneis, etc.. Apesar disso, uma simples revisão bibliográfica comprova a grande quantidade de lacunas a serem pesquisadas e os grandes problemas a serem contornados para implementação e racionalização desta tecnologia de aplicação de concreto.

O ACI (American Concrete Institute) através do comitê 506 apresenta algumas áreas para pesquisa e desenvolvimento em concreto projetado, incluindo a linha de estudo de *materiais*, que engloba o emprego mais racionalizado dos materiais disponíveis, bem como a avaliação da possibilidade de utilizar-se novos materiais.

A microssílica, em particular, vem sendo empregada em concreto desde a década de 70, sendo que vários pesquisadores descrevem inúmeras modificações observadas na sua reologia e microestrutura, com reflexos positivos na coesão, resistência mecânica, permeabilidade, resistência química e durabilidade do concreto.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência da adição de microssílica ao concreto projetado via-seca, fundamentando-se esta análise na revisão bibliográfica e nos inúmeros ensaios desenvolvidos e resultados obtidos no decorrer de três anos de intensivos estudos experimentais.

2 - PROPRIEDADES DO CONCRETO PROJETADO COM ADIÇÃO DE MICROSSÍLICA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Coesão e Aderência

Uma das principais diferenças entre um concreto com e sem adição de microssílica é a diminuição considerável da exsudação e o aumento da coesão (*SELLEVOLD e NIELSEN, 1987*), sendo esta propriedade decorrente do efeito de estabilização (redução dos diâmetros dos canais através dos quais dá-se o fenômeno de exsudação) e do aumento do número de pontos de contato sólido x sólido (*MEHTA, 1986_a*).

A coesão do concreto projetado é particularmente interessante quando da utilização do processo via-úmida, pois o

aumento da coesão tem influência positiva sobre o índice de reflexão.

Uma outra situação onde a coesão pode ser avaliada como uma das propriedades prioritárias se enquadra nos serviços em que o concreto projetado estará submetido a variações de maré, ondas, etc., onde a água tende a lavar as partículas dos aglomerantes. Essa aplicação é citada por LOLAND (1981).

Com relação à aderência, sabe-se que nos concretos em que o cimento é empregado sem nenhum tipo de adição mineral, tem-se constatado que a zona de transição pasta-agregado é constituída por uma porosidade maior e que os cristais são bem mais desenvolvidos do que na pasta densa.

MEHTA (1986_b) analisa as modificações na zona de transição pasta-agregado advindas da adição de microssílica ao concreto. Inicialmente, a redução na permeabilidade do concreto fresco promove uma diminuição na exsudação interna (*internal bleeding*) o que resulta numa redução de bolsões de água ao redor dos agregados e num decréscimo considerável da porosidade da zona de transição pasta-agregado. Posteriormente, em vários pontos de nucleação dos cristais de CH, a presença das finíssimas partículas de microssílica impedem a formação de cristais grandes, e preferencialmente orientados. Ao longo do tempo, as reações pozolânicas entre as partículas de microssílica e o CH resultaria na formação de C-S-H. Conseqüentemente, como resultado do refinamento dos poros e dos grãos na zona de transição pasta-agregado, a resistência mecânica é aumentada e a permeabilidade sofre considerável redução.

A microssílica também influencia na espessura da zona de transição. Com incorporação de 5% de microssílica ao concreto (em massa e em substituição ao cimento), observa-se que, na idade de 30 dias, a espessura da zona de transição é reduzida de 32 para 14 micrômetros (MONTEIRO, 1985).

No caso específico do concreto projetado, há tendência em empregar-se agregados com menores dimensões máximas características (normalmente pedrisco) e com relações água/cimento (em massa) geralmente variando de 0,4 (via-seca) a 0,55 (via-úmida). Estas características certamente trazem modificações benéficas na zona de transição pasta-agregado.

Em resumo, a incorporação da microssílica ao concreto projetado, promove modificações na zona de transição pasta-agregado, com reflexos positivos em propriedades como aderência, resistência mecânica e durabilidade. Enquanto, o aumento na aderência ao substrato resulta em decréscimo no índice de reflexão.

2.2 - Índice de Reflexão

A projeção do concreto a alta velocidade contra uma superfície promove a reflexão das partículas maiores de agregados até que ocorra a formação de uma película de pasta de cimento com espessura suficiente para envolver e reter essas partículas (HOFFMEYER, 1965). Os índices de reflexão podem variar de 5 a 50% dependendo das condições, tipo e posição de projeção.

TEICHERT (1981) faz uma vasta apreciação sobre a interferência de determinados fatores na reflexão do concreto projetado. Inicialmente, caracteriza o material refletido como sendo basicamente constituído pelos grãos maiores dos agregados, apresentando também uma parcela pequena de partículas menores e cimento. A quantidade e composição do material refletido dependem da espessura aplicada, pois o material é de granulometria mais grossa no início da projeção, tendendo a mais fino com o prosseguimento da operação. Porém, o material refletido é sempre mais pobre em cimento do que a mistura projetada. Além disso, a partir de determinada espessura aplicada, a quantidade e a composição do material refletido mantêm-se constantes, desde que outros fatores não interfiram nesse fenômeno.

É importante lembrar a importância da aplicação correta do concreto projetado no que tange a distância e ângulo de inclinação do bico de projeção, bem como a umidade ideal da mistura na contribuição para redução dos índices de reflexão.

A adição da microssílica, por aumentar a coesão e a aderência do concreto projetado, acaba por promover uma redução considerável dos índices de reflexão, sobretudo no concreto projetado via-seca (MORGAN, 1986 e DANIELSSEN, 1986). O índice de reflexão medido em projeção *over-head* numa espessura de 50 mm no processo via-seca foi reduzido de 40% (em massa) para 25% (em massa) após incorporação de microssílica (MORGAN, 1986).

Para o processo via-úmida, os índices de reflexão também sofrem decréscimos por adição de microssílica (CORWINE, 1984).

Essa redução na reflexão, por significar diminuição do desperdício de material e aumento de material retido na superfície, tem implicações financeiras significativas. Além disso, consegue-se diminuir a retração do concreto projetado através de maior incorporação de agregado graúdo, com reflexos positivos para a durabilidade do revestimento.

2.3 - Espessuras de Aplicação

Os estudos desenvolvidos por MORGAN (1986) demonstram que no concreto projetado via-seca convencional não se consegue ultrapassar espessuras de 50 a 75 mm em *over-head* sem que ocorra o deslocamento do revestimento. Mas, esses valores podem ser ampliados para 400 mm, mesmo sem o emprego de aceleradores, quando a microssílica é adicionada ao concreto projetado. Isto é conseguido porque a microssílica melhora a coesão e aderência. É importante salientar que essa característica se reverte em aumento de produtividade, sobretudo em revestimentos de túneis, com conseqüências positivas de ordem econômica.

2.4 - Resistência à Abrasão/Erosão

Estudos desenvolvidos por BERRA et al. (1989) comprovaram a eficiência da microssílica em aumentar a resistência à erosão de argamassas empregadas em reparos de estruturas hidráulicas. sendo que as argamassas que continham cimento com escória de alto forno, microssílica, fibras de aço e superplastificantes, apresentaram desempenhos equivalentes a algumas resinas.

No projeto de reparo da barragem de KINZUA, utilizou-se concreto de alta resistência com microssílica (HOLLAND et al., 1986). Os resultados prévios de laboratório foram animadores e os reparos desenvolvidos em 1983; após um ano da recuperação, o concreto apresentava desempenho conforme o especificado.

Apesar de não haver muitos trabalhos que avaliem o comportamento do concreto projetado com adição de microssílica frente às solicitações de erosão e abrasão, MORGAN (1986) relata seu bom desempenho no que diz respeito ao arraste pela água, sendo, portanto, indicado para situações em que o concreto, ainda fresco, esteja sujeito a movimentações da maré.

Essa característica foi uma das condicionantes na seleção do concreto projetado com adição de fibras de aço e microssílica na recuperação do porto de *Saint John*, Canadá, tendo em vista as possibilidades de arrebentação de ondas (GILBRIDE et al., 1988).

2.5 - Resistência à Compressão

A resistência à compressão do concreto projetado é, na maioria das vezes, inferior à de um concreto convencional com agregados de dimensões máximas características variando de 0 a 30 mm e que apresente um consumo de cimento equivalente, apesar de nunca atingir níveis de resistência à compressão aos 28 dias de idade inferiores a 35 MPa (TEICHERT, 1981). Além disso, o concreto projetado possui uma resistência mecânica praticamente igual a solicitações perpendiculares e paralelas à direção de projeção, desde que as especificações quanto à correta aplicação sejam rigorosamente obedecidas (TEICHERT, 1981).

Dados da THEMAG, cujos engenheiros desenvolveram um amplo estudo em várias obras brasileiras (Itaipu, Central do Paraná, túneis da SABESP) e dados do IPT permitem constatar uma tendência da resistência à compressão do concreto projetado aos 28 dias de idade em situar-se entre 15 e 40 MPa.

A incorporação de microssílica (em adição ao cimento) ao concreto convencional com superplastificante, não promove nenhum efeito deletério nas resistências à compressão iniciais (i.e., resistências à compressão nas idades entre 1 e 3 dias), além de apresentar um acréscimo considerável na resistência à compressão entre 3 e 28 dias de idade (sob cura úmida) (SELLEVOLD e RADJY, 1983 e ACI COMMITTEE 226, 1987).

SANDVIK e GJORV (1989) estudaram a influência da microssílica na evolução da resistência à compressão de concretos convencionais e concluíram que, a evolução da resistência à compressão até os 7 dias de idade não sofreu decréscimos com a adição de microssílica, apesar da redução no consumo de cimento; esses resultados comprovam o efeito acelerador da microssílica na hidratação do cimento (SELLEVOLD et al. (1982), MEHTA (1983), DIAMOND (1983), HJORTH (1984), ROY (1988) e LARBI et al. (1990).

Um outro aspecto importante nesse estudo de SANDVIK e GJORV (1989) é a menor taxa de crescimento até os 5 dias de idade apresentada pelo concreto com 20% de microssílica, justificado por esses pesquisadores pelo

fato da taxa acelerada de evolução de hidratação do cimento promovida pela microssilica não conseguir compensar a diminuição no consumo de cimento.

Mas, aos 28 dias de idade, a substituição do cimento por até 20% de microssilica aumenta a resistência à compressão em até 43% (em relação ao concreto de referência), e, aos 90 dias em até 55% (*SANDVIK e GJORV, 1989*).

Na opinião de *DANIELSSEN (1986)* não se verifica uma diferença muito grande na resistência à compressão de concretos projetados com ou sem adição de microssilica, em virtude do concreto projetado com microssilica apresentar uma maior incorporação de agregado graúdo na superfície projetada. Nesse caso, o concreto da superfície se torna um pouco mais pobre em comparação à projeção do mesmo concreto sem adição de microssilica.

MORGAN (1986) traz em seu trabalho resultados de resistência à compressão do concreto projetado com adição de microssilica e aceleradores não alcalinos. Observou-se a obtenção de resistência à compressão a 8 horas e aos 28 dias de idade de 6 e 55 MPa, respectivamente. Esses níveis de resistência à compressão foi possível alcançar devido a ação de microssilica em concretos (*efeito micro-filler e efeito pozolânico*) e ao fato dos aceleradores alcalinos não promoverem perdas de resistência à compressão do concreto nas altas idades.

Com essas constatações, espera-se aumentar a resistência à compressão inicial do concreto projetado, por incorporação de um teor adequado de microssilica. Essas conclusões adquirem particular interesse quando se analisa que a aplicação do concreto projetado em revestimentos de túneis é, em grande parte, condicionada pela necessidade de se obter resistências à compressão elevadas nas primeiras horas de idade, assegurando, porém, a resistência à compressão aos 28 dias de idade especificada em projeto.

2.6 - Durabilidade do Concreto Projetado

O concreto projetado via-seca vem sendo utilizado em aplicações estruturais por 70 anos, enquanto que, em recuperações estruturais, essa tecnologia vem sendo empregada há 40 anos aproximadamente. Na lista das diversas obras recuperadas constam estruturas danificadas por gelo-degelo, agentes químicos e fogo, estando relatado o êxito conseguido quando da aplicação de concreto projetado nesses serviços (*MORGAN, 1989 e GEBLER, 1989*).

A preocupação com a durabilidade do concreto projetado aplicado como material estrutural é particularmente importante quando se cogita da sua utilização como revestimento definitivo de túneis. O concreto projetado é geralmente empregado como revestimento primário do túnel, sendo executado em paralelo à escavação no processo NATM (*New Austrian Tunnelling Method*) (*FIGUEIREDO e DANTAS, 1991*). Nesse sentido, *SIMONDI et al. (1982)* relatam a execução de dois túneis em solo, no qual a inspeção após 40 meses comprovava que o concreto projetado como revestimento definitivo apresentava bom desempenho.

READING (1981) também apresenta inúmeras aplicações que remontam à Primeira Guerra Mundial, citando situações no estado de Michigan que indicavam ser o concreto projetado a melhor opção para os serviços de recuperação estrutural. *FIGUEIREDO e DANTAS (1991)* também relatam o emprego do concreto projetado para recuperação de estruturas, apontando como ponto de particular interesse de estudo a aplicação do concreto projetado no reparo e reforço de estruturas marítimas. Alguns pesquisadores descrevem a eficiência do concreto projetado com adição de microssilica nesses serviços (*MORGAN, 1986* e *GILBRIDE et al., 1988*).

Apesar dos inúmeros resultados positivos obtidos em aplicações com concreto projetado, alguns desempenhos insatisfatórios também foram encontrados, mas poucos ensaios laboratoriais foram realizados para avaliação da durabilidade desse material. Muitos desses casos apontados se reportam a serviços onde houve falha de controle ou técnicas de aplicação inadequadas ou, ainda, problemas de aderência com a superfície (*READING, 1981*). Assim, independente do processo de projeção empregado, a utilização crescente do concreto projetado, às vezes em situações muito agressivas, vem levantando dúvidas quanto ao que realmente se conhece a respeito da durabilidade desse material.

As características do cimento e agregados influenciam a durabilidade do concreto projetado da mesma forma que no concreto convencional. A relação água/cimento reduzida, o consumo elevado de cimento (aproximadamente 500 kg/m³) e boa compactação do concreto projetado acabam por contribuir para aumentar o desempenho frente a vários níveis de agressividade, apesar do concreto projetado ser vulnerável a laminações e bolsões de areia, que promoverão reflexos negativos na sua durabilidade (*READING, 1981* e *SCHRADER e KADEN, 1987*). Além disso, a técnica correta de projeção influenciam diretamente a qualidade do concreto e, conseqüentemente, sua durabilidade (*SCHRADER e KADEN, 1987, GLASSGOLD, 1989* e *FIGUEIREDO e DANTAS, 1991*).

Assim, por tudo o que foi descrito até o momento, a avaliação da durabilidade frente ao meio agressivo, juntamente com o estudo de outras propriedades, tem assumido grande importância. A permeabilidade constitui uma das propriedades mais estudadas, uma vez que está diretamente ligada à durabilidade desse material (*SHRADER e KADEN, 1987* e *GLASSGOLD, 1989*).

Na maioria dos casos históricos de aplicação do concreto projetado, foi possível constatar que sua permeabilidade é muito reduzida, além de não apresentar uma retração muito significativa. Acrescentam a essa lista de características favoráveis a resistência aos ciclos de gelo-degelo e a possibilidade de obter-se elevadas resistência mecânicas (*LITVIN e SHIDELER, 1966, TEICHERT, 1981* e *SCHRADER e KADEN, 1987*). Essa característica poderia ser justificada pela baixa permeabilidade da pasta de cimento (água/cimento = 0,37 no processo via-seca) e utilização de agregados de pequenas dimensões, que acabam por promover melhorias na zona de transição pasta-agregado. Associado a todas essas características, constata-se, ainda, um reduzido volume de

poros capilares e ausência de fissuras no concreto projetado, desde que convenientemente curado.

Alguns pesquisadores consideram ser a permeabilidade do concreto projetado mais elevada na direção paralela às camadas, pois é nessa direção que existe uma maior probabilidade de formação de zonas de heterogeneidade (defeitos, bolsões de areia, etc.) como consequência inerente à tecnologia de aplicação do concreto projetado (TEICHERT, 1981). Esses defeitos ou zonas de alta permeabilidade são freqüentemente mais importantes do que a permeabilidade média, daí a importância do controle da operação de projeção (LITVIN e SHIDELER, 1966 e TEICHERT, 1981). Nesse contexto, o controle da velocidade de projeção adquire particular importância, tendo em vista a sua influência na compactação do concreto projetado (GLASSGOLD, 1989).

Encontram-se nos artigos consultados dados de coeficiente de permeabilidade da ordem de 6 a 20×10^{-10} cm/s (TEICHERT, 1981) e da ordem de 3×10^{-8} a 3×10^{-11} cm/s, para níveis de resistência à compressão que variam de 21 a 83 MPa (SCHRADER e KADEN, 1987). O concreto convencional com os mesmos níveis de resistência à compressão apresentaria uma permeabilidade similar ou, ainda, ligeiramente superior. Porém, a existência de fissuras como as que podem surgir como consequência da retração do concreto projetado, pode drasticamente aumentar esse mesmo coeficiente de permeabilidade para valores da ordem de 3×10^{-1} a 3×10^{-4} cm/s. Alguns pesquisadores, constataram, ainda, que o concreto projetado com agregados graúdos apresentava maior permeabilidade do que uma argamassa projetada, devido, provavelmente à influência negativa da zona de transição pasta-agregado graúdo (LITVIN e SHIDELER, 1966).

DANTAS e TANGO (1990) realizaram estudos comparativos do coeficiente de permeabilidade do concreto projetado e do concreto convencional. Concluíram que o concreto convencional, em geral, apresentou-se mais permeável do que o concreto projetado à idade de 28 dias, apesar de ter alcançado maiores resistências à compressão (35.0 MPa para o concreto convencional e 28.5 MPa para o concreto projetado). Aos 93 dias de idade, apesar da grande dispersão observada nos resultados, o concreto projetado apresentava um coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-11} cm/s. Esses pesquisadores também ressaltam a importância do parâmetro homogeneidade do concreto projetado na redução da permeabilidade.

LITVIN e SHIDELER (1966) com base em amplo estudo, no qual foram confeccionados painéis de concreto projetado (via-seca e via-úmida) utilizando diferentes equipamentos de projeção e variando as dimensões máximas características do agregado, o traço e a relação água/cimento do concreto, concluíram que a absorção do concreto projetado varia de 8 a 11%.

SEEGEBRECHT et al. (1989) desenvolveram estudos laboratoriais com o propósito de avaliar a durabilidade do concreto projetado via-seca. Concluíram entre outras coisas que:

- (i) dois entre três painéis de concreto projetado apresentavam distribuição de vazios similar à de um concreto com ar incorporado, apesar do volume total de ar do

concreto projetado ser menor do que o de um concreto com ar incorporado (ASTM C-457);

(ii) a permeabilidade do concreto projetado a cloretos (AASHTO T259) foi considerada muito baixa, e

(iii) a massa específica, absorção e volume de vazios permeáveis (ASTM C-642) foram de 2,49 g/cm³, 5,5% e 12,0%, respectivamente, considerados consistentes com a baixa permeabilidade a cloretos observada.

FIGUEIREDO e DANTAS (1991) acrescentam que o volume de vazios do concreto projetado é maior do que o de um concreto convencional, como consequência do aprisionamento de bolhas de ar inerente ao seu processo de aplicação, apesar de não se verificar aumento da permeabilidade quando comparado a um concreto convencional.

Com o objetivo de melhorar a durabilidade do concreto projetado, alguns pesquisadores vêm estudando a possibilidade de adição de microssílica, através da avaliação da sua interferência na permeabilidade. Sabe-se que dois fatores são de grande influência nas propriedades de resistência e permeabilidade do concreto, qual seja a presença de grandes poros na pasta e as microfissuras existentes na zona de transição pasta-agregado (*MEHTA, 1983*). Assim, o refinamento de grãos e poros, bem como as modificações observadas na zona de transição pasta-agregado associados à adição de microssílica, acabam por favorecer a diminuição da permeabilidade do concreto projetado (*HUSTAD e LOLAND, 1981, LOLAND, 1981 e HJORTH, 1984*).

O concreto com incorporação de microssílica também apresenta um bom desempenho frente ao ataque de agentes agressivos, sendo que vários estudos vêm comprovando um aumento na resistência a sulfatos, bem como uma menor incidência de casos de corrosão de armadura (*HJORTH, 1984*). Essa propriedade é particularmente interessante em concreto projetado para revestimento de túneis em solos urbanos e nos serviços de reparo e reforço de estruturas de concreto.

Realmente, os estudos desenvolvidos por *BURGE (1986)* concluem que a permeabilidade do concreto projetado com adição de microssílica comparado com o concreto projetado convencional foi reduzida por um fator variando de 4 a 11 vezes.

MORGAN (1986) e *DANIELSSEN (1986)* também verificaram redução na permeabilidade do concreto projetado com microssílica, como resultado de uma maior densificação do concreto fresco, além da atividade pozolânica da microssílica e consequente refinamento da estrutura dos poros no concreto endurecido.

A adição de 11% (em massa) de microssílica densificada em substituição ao cimento tem possibilitado aumentar a resistência mecânica, resistência aos ciclos gelo-degelo (ASTM C-666) e diminuir a permeabilidade a cloretos (AASHTO 277) do concreto projetado via-seca (*GLASSGOLD, 1989*).

Por tudo que foi apresentado, pode-se constatar que a incorporação de microssílica pode promover consideráveis benefícios à durabilidade do concreto projetado via-seca e via-úmida. Essa característica permite que o concreto projetado com microssílica se transforme numa importante alternativa nos

serviços de recuperação de estruturas marinhas ou outros meios altamente agressivos, onde a durabilidade merece atenção especial por parte de projetistas, empreiteiras, fabricantes de materiais e produtores de equipamentos. Com o desenvolvimento de pesquisas nessa área, poder-se-ia melhor avaliar as propriedades do concreto projetado com microssílica e possibilitar a ampliação de sua faixa de aplicação, por aumentar a durabilidade, com reflexos na diminuição dos custos de manutenção e reparo de estruturas.

3 - METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1 - Objetivos

O objetivo principal deste estudo é determinar alguns parâmetros e propriedades do concreto projetado via-seca com adição de microssílica.

Assim, com base nas informações obtidas de dados publicados e nos resultados do estudo experimental em pastas e concretos convencionais, o estudo experimental em concreto projetado com adição de microssílica foi desenvolvido através da determinação do índice de consistência, índice de reflexão, fator água/materiais secos, evolução da resistência à compressão, massa específica, absorção, volume de vazios permeáveis e permeabilidade à água de painéis de concreto projetado com adição de microssílica (ou de testemunhos extraídos dos mesmos).

Nos ensaios em concreto projetado é empregado 01 (um) acelerador líquido à base de aluminato de sódio (*ADITIVO 2*) e 02 (dois) aceleradores à base de carbonato de sódio (*ADITIVOS 3 e 5*), cimento CP II 32, pedrisco ($D_{max} = 9.5$ mm), areia ($MF = 2.4$), 2 (duas) microssílicas fornecidas por empresas diferentes (*MICROSSÍLICAS A e B*) e água da rede de abastecimento. O traço (massa e materiais secos) utilizado foi 1: 2.5: 1.85: 0.37 (cimento: areia: pedrisco: água).

3.2 - Moldagem dos Painéis

Neste estudo optou-se por seguir a sugestão de *CORDEL (1976)* e os painéis de madeira utilizados apresentam dimensões de (500 x 500) mm e espessura de 160 mm, conforme Figura 1.

Nos ensaios em concreto projetado foi utilizado o sistema de pré-umidificação (conhecido como via semi-úmida) nas projeções de concreto. Neste processo de produção, o aumento do tempo de contato entre a mistura seca e água contribui para redução da poeira. Assim sendo, a entrada de água no mangote se dá a 4 (quatro) metros do bico de projeção. No caso de utilização de aditivos aceleradores líquidos, esses são adicionados juntamente com a água. O equipamento utilizado para projeção foi a *CP-6*, fabricada pela *ESTE*.

3.3 - Determinação do Índice de Consistência

O objetivo deste ensaio é detectar através da consistência erros no proporcionamento da água do concreto projetado.

Seguindo a recomendação de FIGUEIREDO et al. (1991_a) a determinação da consistência é realizada imediatamente após a moldagem dos painéis, executando no mínimo 6 (seis) penetrações com a *agulha de PROCTOR* (ASTM C-403) até a profundidade de 2.5 cm e distanciadas de pelo menos 20 cm. A velocidade de penetração é mantida constante, isto é, num tempo aproximado de 1 (um) segundo.

Os resultados deste ensaio correspondem à média de 4 (quatro) leituras, isto é, elimina-se a maior e a menor das seis; é denominado índice de consistência médio (FIGUEIREDO et al., 1991) e estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

3.4 - Determinação do Fator Água/Materiais Secos

Tendo em vista as dificuldades de se quantificar a relação água/cimento do concreto projetado da estrutura, a determinação do teor de água/materiais secos adquire um papel fundamental por possibilitar uma avaliação da umidade do concreto recém projetado.

Assim, imediatamente após a moldagem dos painéis, coleta-se de diversos pontos e profundidades uma amostra de concreto com massa mínima de 1 (um) quilograma para a determinação da umidade por secagem em frigideira.

O fator água/materiais secos ($H\%$) é, então, calculado pela expressão (FIGUEIREDO et al., 1991_a):

$$H\% = \frac{(m_i - m_f)}{m_f} \times 100 \quad (\text{eq. 1})$$

onde:

$H\%$ = fator água/materiais secos

m_i = massa do material úmido

m_f = massa do material seco

Os resultados do fator/água materiais secos ($H\%$) estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

3.5 - Determinação do Índice de Reflexão

Para a determinação do índice de reflexão, o painel de projeção, com massa conhecida (mt), é posicionado contra um apoio, distante do anteparo de pelo menos 1,5 m ($d1$) (conforme Figura 2); o ângulo entre o plano do fundo da placa e a vertical é mantido entre 5 e 15°.

Uma lona plástica de dimensões mínimas iguais a (1200 x 1200) mm (conforme recomendações de PARKER et al., 1976) é disposta estendida no chão, sob a placa, de forma a poder-se coletar todo o material refletido.

A moldagem do painel, é feita com a distância do bico de projeção ($d2$) compreendida entre 1,5 e 2 m. A operação de projeção encerra-se quando o concreto ultrapassa toda a extensão do plano definido pela borda da placa. O ensaio somente é

considerado válido se o concreto não ultrapassa o plano da borda em mais de 5 cm em nenhum ponto.

Após a moldagem da placa, é recolhido e pesado o material refletido (*mr*) retido na lona plástica.

Quando a placa apresenta a resistência adequada ($IP > 67$ na agulha de Meynadier) é pesada com o material projetado (*mpt*).

O índice de reflexão (*IR*) é calculado pela expressão (eq. 2):

$$IR = \frac{mr}{(mpt + mr - mt)} \times 100 \quad (\text{eq. 2})$$

onde:

IR = índice de Reflexão

mr = massa do material refletido

mpt = massa do painel de concreto projetado

mt = massa do painel de projeção

Os resultados de índice de reflexão estão apresentados nas Tabela 3.

3.6 - Evolução da Resistência à Compressão e Compatibilidade Cimento-Microssílica-Aditivo Acelerador

Após a consagração do NATM (*New Austrian Tunneling Method*) como uma das técnicas de execução de túneis, o concreto projetado passou a desempenhar um papel estrutural muito importante, mesmo nas baixas idades. Nos serviços de recuperação, a estabilidade e segurança estrutural adquirem grande importância, sobretudo em obras marinhas. Desses fatos, pode-se justificar a necessidade da avaliação da resistência inicial do concreto projetado, o que foi feito neste estudo.

PRUDÊNCIO JR. () vem realizando estudos com o objetivo de avaliar e propor técnicas de ensaios de campo para o monitoramento de evolução da resistência à compressão do concreto projetado, incluindo faixas que se estendem desde as baixíssimas idades até as idades mais avançadas.

Assim, com base em dados publicados e no trabalho de PRUDÊNCIO JR. (), os procedimentos para avaliação da resistência à compressão do concreto projetado com adição de microssílica compreenderam a utilização do *penetrômetro de Meynadier* (Figura 3), o *penetrômetro de energia constante* (Figura 4) e a ruptura de corpos-de-prova. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6.

3.6.1 - Determinação da resistência à compressão à baixa idade: Método do *Penetrômetro de Meynadier*

O objetivo é o monitoramento da resistência à compressão do concreto projetado logo após a sua aplicação na faixa compreendida entre 0,2 e 0,8 MPa, conseguindo, com isso, o controle da homogeneidade do concreto projetado, contribuindo também para avaliação da compatibilidade cimento-aditivo acelerador (PRUDÊNCIO JR., 1990).

O equipamento utilizado é o *penetrômetro de Meynadier* (Figura 3) que mede a resistência oferecida pelo concreto à penetração de uma agulha padrão.

O ensaio consiste em realizar, nas placas, 12 (doze) penetrações em pontos distanciados em no mínimo 4 cm, que devem ser periodicamente repetidas em intervalos de tempo não superiores a 20 minutos. A penetração deve ser de 15 mm em um tempo de aproximadamente 1 segundo. A justificativa para o estabelecimento de um número mínimo de penetrações está no fato de a presença do agregado graúdo promover uma maior dispersão dos resultados de penetração.

Os valores lidos na escala do equipamento não são interpolados sendo que, para uma leitura intermediária, sempre adota-se o maior valor. Os índices de penetração são registrados em planilha.

O valor registrado em planilha para cada tempo t é média das leituras, eliminados dois valores maiores e menores.

PRUDÊNCIO JR. () também estabeleceu curvas de correlação entre a profundidade de penetração e a respectiva resistência à compressão do concreto projetado.

3.6.2 - Determinação da resistência à compressão à baixa idade: Método do *penetrômetro de energia constante*.

O objetivo desse ensaio é avaliar a resistência à compressão do concreto projetado na faixa compreendida entre 1 e 10 MPa, permitindo o controle da homogeneidade do concreto projetado.

Utiliza-se o *penetrômetro de energia constante* (PEC) proposto por *PRUDÊNCIO JR.* (), apresentado na Figura 4.

O ensaio consiste em realizar 10 (dez) penetrações nas placas de concreto projetado em distâncias não inferiores a 4 cm. Essas penetrações são repetidas, periodicamente, em intervalos de tempo não superiores a 60 minutos, sendo que a primeira penetração acontece quando os índices de penetração determinados pela *agulha de Meynadier* forem superiores a 67. Os resultados parciais são, então, registrados em planilha.

Os valores médios correspondem à média dos resultados parciais num tempo t , eliminando-se, porém, os 2 (dois) resultados parciais maiores e menores, registrados na respectiva coluna da planilha. *PRUDÊNCIO JR.* () também propõe curva de correlação entre a penetração e a respectiva resistência à compressão.

3.6.3 - Extração de testemunhos e ruptura de corpos-de-prova de painéis de concreto projetado.

O objetivo deste estudo é obter os valores de resistência à compressão nas idades mais avançadas (por exemplo, 7 e 28 dias).

Para a extração dos testemunhos de concretos é definida uma área afastada de 5 cm das bordas da forma (conforme Figura 5), para garantir a homogeneidade da amostra. Os testemunhos são extraídos paralelamente à direção de projeção (Figura 5) afastados entre si de no mínimo 1 (um) diâmetro.

Após a extração dos testemunhos, procede-se à serragem dos seus topos de modo a torná-los planos e perpendiculares ao eixo de extração. Em seguida, os corpos-de-prova de (75 x 150) mm são mantidos em câmara úmida até a idade de ruptura. Atingida a idade do ensaio, os corpos-de-prova de concreto são retirados da câmara úmida e capeados com mistura de enxofre, cimento, pó de pedra, etc.. Após capeados, determina-se o diâmetro (pela média de duas medidas ortogonais) e a altura.

Na ruptura, é observada a perfeita centralização dos corpos-de-prova de concreto e o carregamento com velocidade aproximadamente constante (variando de 0,3 a 0,8 MPa/s). Dado registrado, carga máxima de ruptura.

O resultado médio corresponde à média dos valores individuais em cada idade.

3.7 - Massa Específica, Absorção e Volume de Vazios

Após a moldagem dos painéis de concreto projetado e posterior, extração de testemunhos de concreto (Figura 5), preparação e cura dos corpos-de-prova (75 x 150) mm, determina-se a massa específica, absorção e volume de vazios permeáveis seguindo-se a metodologia recomendada pela ASTM C-642. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 7 e 8.

3.8 - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade

O procedimento mais adequado à determinação da permeabilidade à água do concreto projetado é a determinação do coeficiente de permeabilidade através da *Lei de Darcy* (TEICHERT, 1981).

DANTAS e TANGO (1990) também estudaram o coeficiente de permeabilidade do concreto projetado com o objetivo de comparar a permeabilidade do concreto projetado e a do concreto convencional (moldado) utilizando uma adaptação no procedimento original do *U.S. Bureau of Reclamation*. O equipamento empregado é o permeâmetro IPT, cujo esquema está apresentado na Figura 6.

Com base na metodologia proposta por DANTAS e TANGO (1990), avaliou-se a permeabilidade do concreto projetado com adição de microssilica, seguindo os passos abaixo citados:.

(i) moldagem dos painéis de concreto projetado no traço 1:2.5:1.85:x (massa e materiais secos) utilizando a *MICROSSÍLICA B* (melhores resultados em ensaios anteriores) nos teores (em massa e em substituição ao cimento) de 0%, 4% e 8%, cimento CP II E 32_B, pedrisco e areia;

(ii) extração de testemunhos de concreto na direção paralela e perpendicular à direção de projeção (Figura 7), procurando evidenciar o efeito da laminação;

(iii) revestimento dos corpos-de-prova de (100 x 100) mm com uma película de resina epóxi para direcionar o fluxo de percolação de água;

(iv) condições de ensaio:

- o gás nitrogênio, comprimido a uma pressão de até aproximadamente 15 MPa, sai da garrafa para o

reservatório que contem água, sendo a pressão do gás regulada por meio de uma válvula redutora de pressão;

- a água sob pressão de 2,1 MPa (210 m.c.a) é enviada a um centro de distribuição e desse para os recipientes (campânulas) contendo os corpos-de-prova de concreto a serem ensaiados. A água percolada através do corpo-de-prova de concreto é coletada e conduzida por meio de um funil para um frasco graduado.

(v) quando o fluxo atinge regime permanente, é determinada a vazão média da água percolada, e

(vi) o coeficiente de permeabilidade é determinado pela equação da *Lei de Darcy*:

$$K = \frac{Q.L}{A.H} \quad (\text{eq. 3})$$

onde:

K = coeficiente de permeabilidade

Q = vazão média

L = altura do corpo-de-prova

A = área

H = pressão manométrica do ensaio

A análise dos resultados obtidos consta do item 4.

3.9 - Análise Estatística

Os dados obtidos são tratados, estatisticamente, dentro da teoria das pequenas amostras (*DIXON & MASSEY, Jr., 1983*), de modo a expressar os resultados através da média e seu respectivo intervalo de confiança de dispersão, a um nível de significância (alfa) de 0.05.

A homogeneidade das amostras é verificada pelo teste bilateral de F , para (alfa) = 0.025. Nos casos das amostras serem homocedásticas, a diferença entre as médias foi testada através da análise de variância, sendo a diferença mínima significativa (*D.M.S.*) determinada pelo teste de *Turckey* (*VIEIRA, 1986*), para (alfa) = 0.05.

Para as amostras heterocedásticas, as médias amostrais são testadas duas a duas, pela diferença entre seus intervalos de confiança não sobrepostos entre si, para (alfa) = 0.05 (*DIXON & MASSEY, Jr., 1983*).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 1, observa-se que não há alteração na demanda de água do concreto projetado com adição de microssilica. Constata-se, porém, um aumento na coesão do concreto projetado com esta adição.

Analisando a Tabela 2, observa-se que o índice de consistência do concreto projetado com *MICROSSÍLICA B* é superior ao do concreto projetado com *MICROSSÍLICA A* com os mesmos aceleradores. Esta característica se refletirá em aumento das

resistências à compressão iniciais e diminuição do índice de reflexão.

Observa-se na Tabela 3, a redução nos índices de reflexão do concreto projetado com adição de microssílica (sobretudo com a *MICROSSÍLICA B*) e aceleradores à base de carbonato.

Com base na Tabela 4 e Figura 8, conclui-se que o teor de 8% promove os maiores acréscimos de resistência à compressão. Na Tabela 5 e Figura 9, observa-se que a microssílica (sobretudo a *MICROSSÍLICA B*) promove acréscimo na resistência à compressão do concreto projetado mesmo nas primeiras horas de idade. Além disso, através da Tabela 6 e Figura 10 conclui-se que a microssílica pode ser utilizada para compensar as perdas de resistência à compressão em idades avançadas observadas no concreto projetado em decorrência do emprego de aceleradores.

Nas Tabelas 7 e 8 observa-se a influência reduzida da microssílica nos resultados de massa específica, absorção e volume de vazios do concreto projetado, provavelmente devido as características do traço de concreto utilizado (relação água/cimento reduzida e consumo elevado de cimento) e tecnologia de aplicação do concreto projetado. Constata-se, também, a tendência dos aceleradores em prejudicar essas propriedades.

Nos ensaios para a determinação do coeficiente de permeabilidade, verificou-se que dos 12 (doze) corpos-de-prova submetidos ao ensaio apenas 3 (três) (correspondente aos extraídos na direção perpendicular à projeção permitiram a percolação de água, em função da existência de defeitos internos. Esses corpos-de-prova não foram analisados neste estudo.

Os outros 9 (nove) corpos-de-prova não permitem a determinação de vazão, uma vez que não houve percolação de água. Assim, apesar de não ser possível calcular o coeficiente de permeabilidade, com base nos estudos de *DANTAS* e *TANGO (1990)*, estima-se que este valor seja inferior a 10^{-11} cm/s (coeficiente de permeabilidade possível de ser determinado pelo Permeômetro IPT).

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o programa experimental, constatou-se que o teor de 8% de *MICROSSÍLICA B* em substituição a massa de cimento foi o de melhores resultados nos índices de reflexão, volume de vazios permeáveis absorção e evolução de resistência à compressão do concreto projetado, provavelmente devido as características morfológicas desta microssílica.

Um outro aspecto relevante observado neste trabalho é que não foi possível identificar mudanças substanciais no fator água/materiais secos do concreto projetado após a incorporação de microssílica, pois a reologia do concreto projetado com esta adição diferencia-se da observada no concreto convencional, onde ocorrem acréscimos no consumo de água à medida em que se aumentam os teores de microssílica.

A adição de microssílica propiciou, também, um aumento na coesão e redução do índice de reflexão, que pode também promover aumentos nas espessuras de aplicação de concreto projetado. Além disso, a incorporação de microssílica influenciou positivamente

as curvas de evolução de resistência à compressão do concreto projetado, inclusive nas baixas idades.

Observou-se, ainda, melhor compatibilidade cimento-aditivo acelerador quando da adição da microssílica ao concreto projetado, sendo que esta adição proporcionou as menores perdas de resistência à compressão no concreto projetado com aditivo acelerador.

Soma-se a esta extensa lista de propriedades melhoradas do concreto projetado via-seca com adição de microssílica a diminuição da absorção e do volume de vazios permeáveis, além da provável redução do coeficiente de permeabilidade, com resultados positivos na durabilidade do concreto projetado.

Concluiu-se que a adição de microssílica justifica-se do ponto de vista técnico em situações onde propriedades como durabilidade e resistências à compressão (iniciais e finais) sejam importantes. A justificativa econômica baseia-se na possibilidade de se diminuir os teores de aditivos aceleradores, fator que tem contribuição considerável na composição de custos, além desses aditivos comprometerem as propriedades resistência à compressão e durabilidade do concreto projetado a longo prazo. A esta lista acrescenta-se a diminuição dos índices de reflexão, que no Brasil atingem níveis de até 50%, contribuindo para a diminuição do desperdício de material na construção de túneis, além de possibilitar a projeção de maiores espessuras de concreto de uma única vez, com reflexos positivos na produtividade.

Em resumo, estas constatações comprovam a eficiência da adição de microssílica em melhorar algumas das propriedades do concreto projetado, ampliando, com isso, as suas potencialidades já consagradas. Porém, várias linhas de pesquisas ainda precisam ser desenvolvidas para consolidar esta aplicação, entre elas pode-se citar a elaboração de ensaios para o controle de qualidade e metodologias de dosagem do concreto projetado com adição de microssílica, avaliação dos reflexos da utilização de aditivos aceleradores na permeabilidade do concreto projetado e desenvolvimento de aditivos aceleradores que permitam a obtenção de níveis de resistências à compressão nas baixas idades (5 horas), sem, contudo, comprometerem as propriedades do concreto projetado a longo prazo (a partir dos 28 dias), avaliação da permeabilidade do concreto projetado com microssílica nas baixas idades, a avaliação do desempenho do concreto projetado com microssílica em meios agressivos e influência desta adição nas propriedades do concreto projetado com fibras.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI COMMITTEE 226*. Silica Fume In Concrete. *ACI Materials Journal*. v.84. n.2. Detroit, USA. 1987. p.158-166.
- BERRA, M.; FERRARA, G. e TAVANO, S.* Behaviour of High Erosion Resistant Silica Fume Mortars for Repair of Hidraulic Structures. In: *FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE*. ACI Publication SP-114. Trondheim, Norway. 1989. Proceedings. p.827-845.

- BURGE, T.** Fiber Reinforced High-Strength Shotcrete with Condensed Silica Fume. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. ACI Publication SP 91-57. Madrid, Spain. 1986. **Proceedings.** p.1153-1169.
- CORDEL, R.** Shotcrete for Ground Support Past Experience of EDF. In: SHOTCRETE FOR GROUND SUPPORT. ACI Publication SP-54. Detroit, USA. 1976. **Proceedings.** p.373-397.
- CORWINE, J. H.** Steel Fiber Reinforced Shotcrete with Microsilica - application and procedure. **The Construction Specifier.** 1984. p.44-48.
- DANIELSSEN, T.** Dry Shotcrete Method with Microsilica. Elkem a/s chemicals report. Noruega. 1986. 7p.
- DANTAS, F. A. S. e TANGO, C. E. S.** Estudo do Coeficiente de Permeabilidade em Concreto Projetado. In: 32^a REUNIÃO DO IBRACON. Fortaleza, CE. 1990. **Anais.** p.467-480.
- DIAMOND, S.** Effects of Microsilica (Silica Fume) on Pore-solution chemistry of Cement Pastes. **Journal of the American Ceramic Society.** v.66. n. 5. s.l. . 1983. p.82-84.
- DIXON, W. J. e MASSEY Jr., F. J.** Introduction to Statistical Analysis. McGraw Hill. 4th Edition. s.l.. 1983. 678p. (International Student Edition)
- FIGUEIREDO, A. D. e DANTAS, F. A. S.** Durabilidade do Concreto Projetado. In: COLÓQUIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO ESTRUTURAL. (IBRACON). Santos, SP. 1991. **Anais.** p.153-162.
- FIGUEIREDO, A. D. et al.** Concreto Projetado para Túneis - Manual Técnico (Versão Preliminar). v.2. (Convênio EPUSP-IPT-CBPO). São Paulo, SP. 1991. p.104-205.
- GEBLER, S. H.** Durability of Dry-Mix Shotcrete Containning Regulated-Set Cement. **Concrete International.** 1989. p.56-58.
- GILBRIDE, P.; MORGAN, D. R. and BREMNER, T. W.** Deterioration and Rehabilitation of Berth Faces in Tidal Zones at the Port of Saint John. In: CONCRETE IN MARINY ENVIROMENT. Detroit, USA. ACI Publication SP-109. Oct. 1988. **Proceedings.** p.199-225.
- GLASSGOLD, I. L.** Shotcrete Durability: An Evaluation. **Concrete International.** Aug. 1989. p.78-85.
- HILLS, D. L.** A review of Sprayed concrete - Part 1. **Concrete.** Feb. 1980. p.17-21.
- HJORTH, L.** Microsilica in Concrete. In: FIRST SEMINAR - ELKEM MICROSILICA TECHNOLOGY. São Paulo, SP. 1984. **Proceedings.** p.1-18.
- HOFFMEYER, T. A.** Wet-Mix Shotcrete Practice. In: SHOTCRETING. ACI PUBLICATION SP-14. Detroit, USA. 1965. **Proceedings.** p.59-74.
- HOLLAND, T. C. et al.** Use of Silica Fume Concrete to Repair Abrasion Eroson Damage in the Kinzua Dam Stilling Basin. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. ACI Publication SP-91. v.2. Madrid, Spain. 1986. **Proceedings.** p.841-863.

- HUSTAD, T. e LOLAND, K. E. Silica in Concrete: Permeability. Report of Cement and Concrete Research Institute. Trondheim, Norway. 1981. 14p.
- LARBI, J. A. et al. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems. Cement and Concrete research. v.20. 1990. p.506-516.
- LITVIN, A. e SHIDELER, J. J. Laboratory Study of Shotcrete. In: SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. Detroit, USA. 1966. Proceedings. p.165-184.
- LOLAND, K. E. Silica Fume in Concrete. Report of Cement and Concrete Research Institute. Trondheim, Norway. 1981. 33p.
- MEHTA, P. K. Pozzolanic and Cementitious By-Products as Mineral Admixtures for Concrete - A Critical Review. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG & OTHER MINERAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE. ACI Publication SP-79. Canada. 1983. Proceedings. p.1-46.
- MEHTA, P. K. Condensed Silica Fume. In: SWAMY, R. N. Cement Replacement Materials. London, Surrey University, 1986_a, v.3, p. 134-170.
- MEHTA, P. K. Influence of Pozzolanic Admixtures on the Transition Zone in Concrete. In: Durability of concrete: Aspects of Admixtures and Industrial Byproducts. Swedish Council for Building Research. Stockholm, Sweden. 1986_b. p.67-81.
- MONTEIRO, P. J. M. Microstructure of Concrete and its Influence on the Mechanical Properties. 1985. Tese (Doutorado) - University of California. Berkeley, California.
- MORGAN, D. R. Dry Mix Silica Fume in Western Canada. Concrete International. v.10. n.1. Jan. 1988. p.24-32.
- PRUDÊNCIO Jr., L. R. Dosagem e Métodos para controle de Qualidade do concreto Projetado. Tese (Doutorado - em andamento). EPUSP. São Paulo, SP.
- READING, T. J. Shotcrete as a construction Material. In: SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. Detroit, USA. Mar. 1965. Proceedings. p.1-13.
- READING, T. J. Corps of engineers Studies of Shotcrete. In: SHOTCRETING. ACI Publication SP-14. Detroit, USA. 1965. Proceedings. p.263- 275.
- ROY, D. M. Fly Ash and Silica Fume Chemistry and Hidration. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE USE OF FLY ASH, SLAG, SILICA FUME AND OTHER SILICEOUS MATERIALS IN CONCRETE. Australia. 1988. Proceedings. 19p.
- SANDVIK, M. e GJORV, O. E. Effect of Condensed Silica Fume on the Strength Development of Concrete. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE. ACI Publication SP-91. Detroit, USA. 1989. Proceedings. p.893-901.
- SCHRADER, E. e KADEN, R. Durability of Shotcrete Concrete Durability. ACI Publication SP-100. Detroit, USA. 1987. Proceedings. p.1071-1101.

- SELLEVOLD, E. J.; BAGER, D. H. e JENSEN, E. K. Silica fume-cement pastes: hydration and pore structure. Report of Norwegian Institute of Technology. Trondheim, Norway. 1982. 19p.
- SELLEVOLD, E. J. e NILSEN, T. Condensed Silica Fume in Concrete: A World Review. In: SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS. Canada. 1987. Proceedings. p.167-246.
- SEEGBRECHT, G. W.; LITVIN, A.; GEBLER, S. H. Durability of Dry-Mix Shotcrete. Concrete International. Oct. 1989. p.47-50.
- SELLEVOLD, E. J. e RADJY, F. F. Condensed Silica Fume (Microsilica) in Concrete: Water Demand and Strength Development. In: FLY ASH, SILICA FUME, SLAG & OTHER MINERAL BY-PRODUCTS. ACI Publication SP-79. Montebello, Canada. Aug. 1983. Proceedings. p.677-694.
- SIMONDI, S.; NEGRO Jr., A. e KUPERMAN, S. C. Utilização de Concreto Projetado como Revestimento Definitivo de Túnel Escavado em Solo. In: COLÓQUIO SOBRE CONCRETO EM FUNDAÇÕES E OBRAS SUBTERRÂNEAS. (IBRACON). São Paulo, SP. Jul. 1982. Anais. 49p.
- TEICHERT, P. ALIVA Hormigón Projectado. Avegno, Suíça. 1981. 89p.
- VIEIRA, S. Introdução à Bioestatística. 4.ed. Ed. Campus. Rio de Janeiro, RJ. 1986. 294p.



FIG. 1 - Esquema dos painéis de projeção (FIGUEIREDO et al., 1991_a).

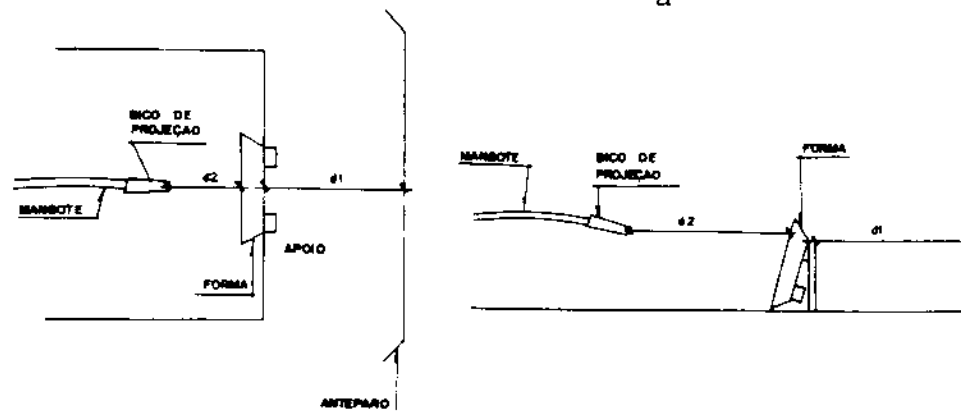


FIG. 2 - Disposição dos equipamentos para projeção (FIGUEIREDO et al., 1991_a).

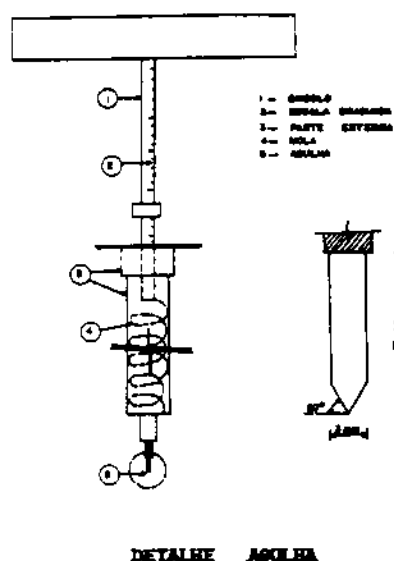


FIG. 3 - Penetrômetro de Meynadier.

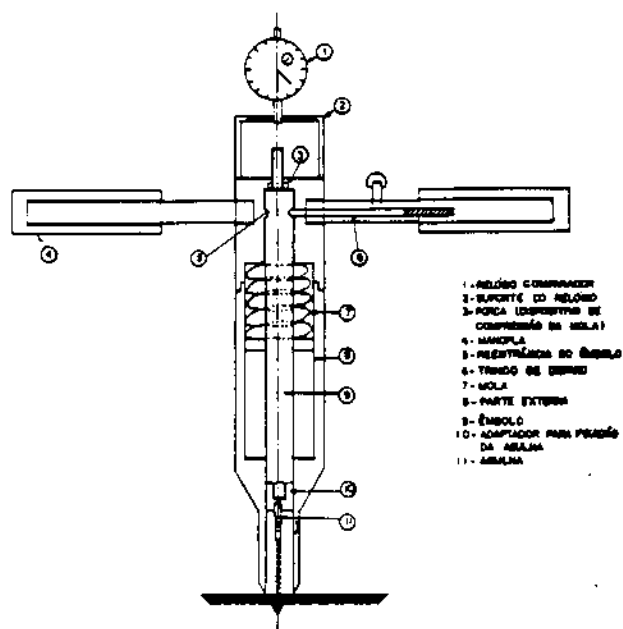


FIG. 4 - Penetrômetro de Energia Constante (PEC)
(FIGUEIREDO et al., 1991_a).

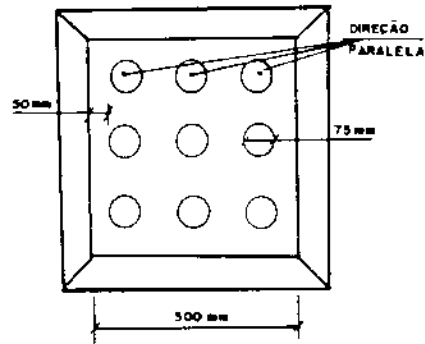


FIG. 5 - Esquema da posição de extração de testemunhos na direção paralela à direção de projeção.

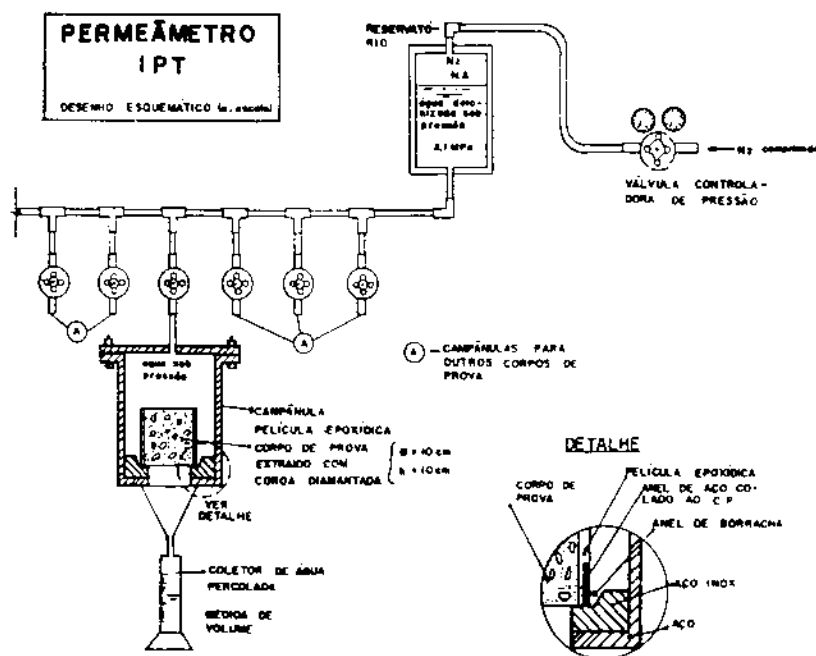


FIG. 6 - Esquema do Permeômetro IPT (US. Bureau of Reclamation).

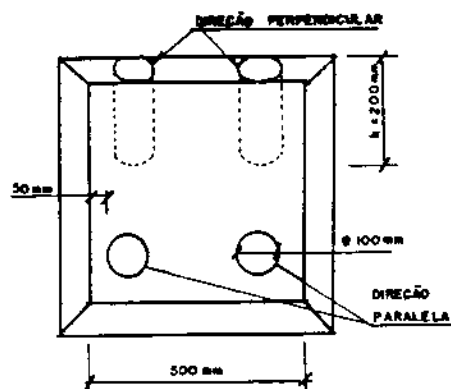


FIG. 7 - Esquemas de extração de testemunhos para determinação do coeficiente de permeabilidade.

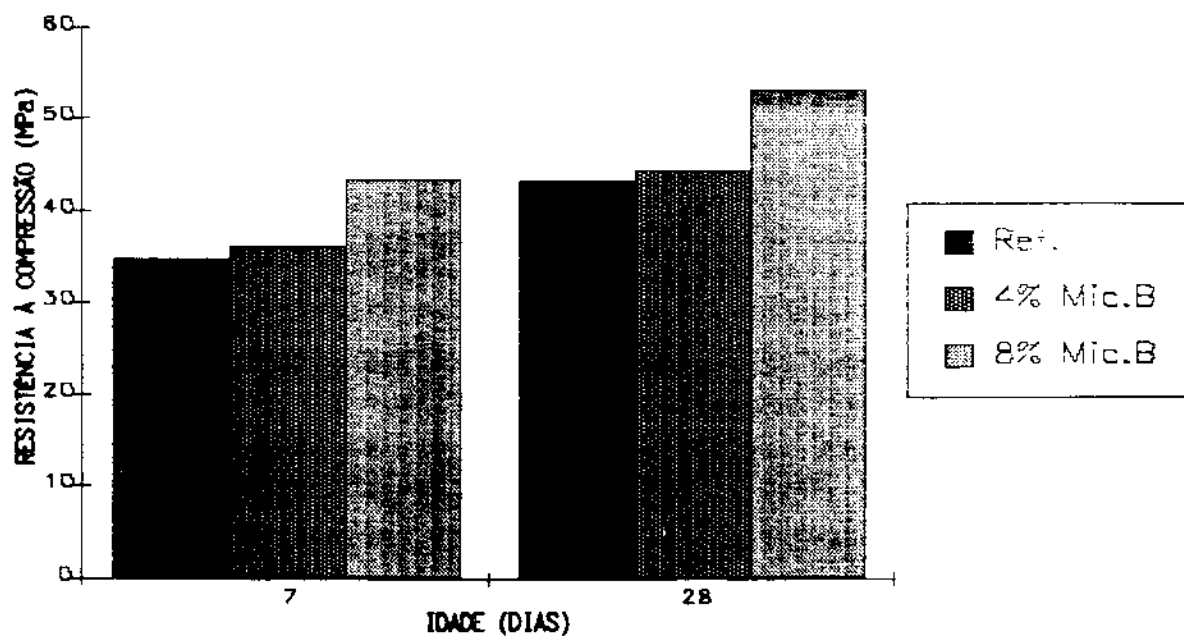


FIG. 8 - Resistência à compressão do concreto projetado com MICROSSILICA B.

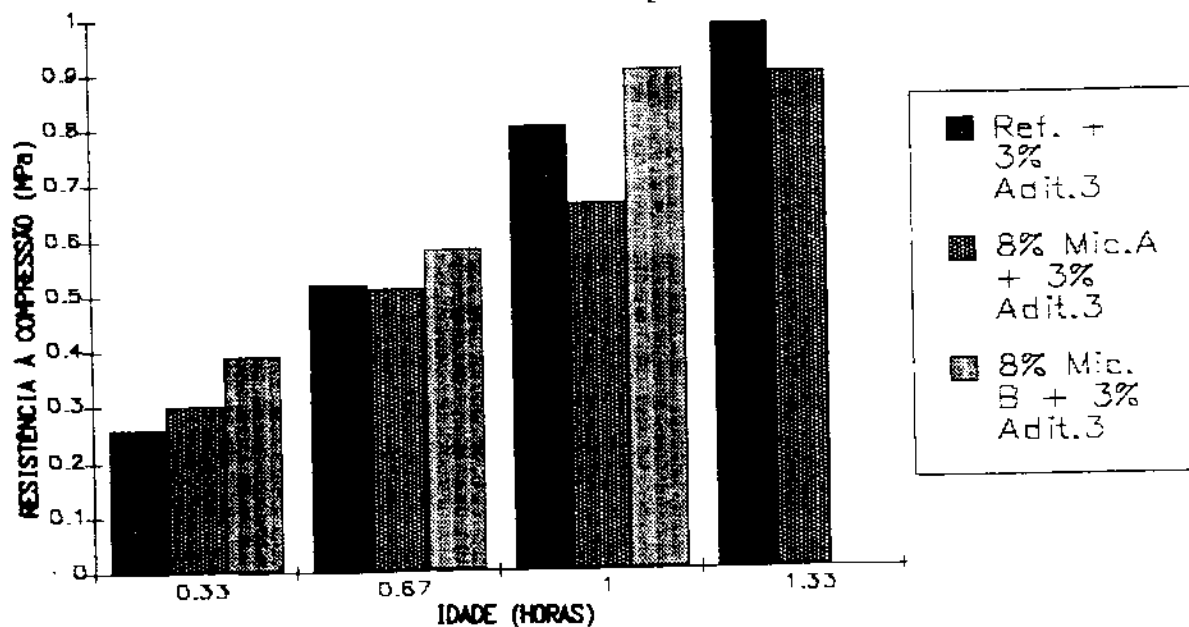


FIG. 9 - Resistência à compressão iniciais do concreto projetado com as *MICROSSÍLICAS A e B*.

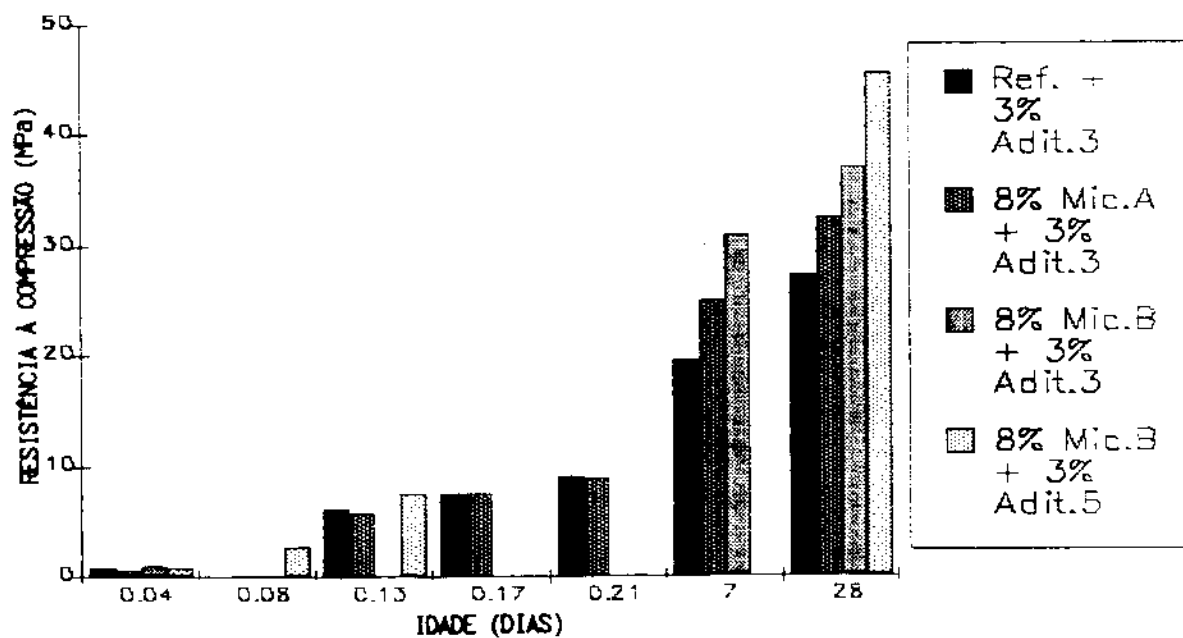


FIG. 10 - Evolução da resistência à compressão do concreto projetado com as *MICROSSÍLICAS A e B*.

TAB. 1 - Fator água-materiais secos (H%) e índice de consistência do concreto projetado com *MICROSSÍLICA B*.

Cimento CP II E 32_B

Traço: 1: 2.5: 1.85: x

CARACTERIZAÇÃO	H (%)	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA
REFERÊNCIA (S/ADIT.)	9.6	28
4% MICROSSÍLICA B	9.6	32
8% MICROSSÍLICA B	9.2	38

TAB. 2 - Fator água/materiais secos (H%) e índice de consistência do concreto projetado com as *MICROSSÍLICAS A e B e o ADITIVO 3*.

Cimento CP II E 32_B

Traço: 1: 2.5: 1.85: x

CARACTERIZAÇÃO	H (%)	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA
REFERÊNCIA (S/ADITIVO)	9.6	28
8% MICROSSÍLICA A + 2% ADITIVO 3	11.1	25
8% MICROSSÍLICA A + 3% ADITIVO 3	11.0	35
8% MICROSSÍLICA A + 4% ADITIVO 3	10.9	43
8% MICROSSÍLICA B + 3% ADITIVO 3	10.9	80

TAB. 3 - Fator água/materiais secos (H%) e índice de reflexão do concreto projetado com as *MICROSSÍLICAS A e B e o ADITIVO 3*.

Cimento CP II E 32_B

Traço: 1: 2.5: 1.85: x

CARACTERIZAÇÃO	H (%)	ÍNDICE DE REFLEXÃO
REFERÊNCIA (S/ADITIVO)	9.6	38 %
8% MICROSSÍLICA A + 2% ADITIVO 3	11.1	32 %
8% MICROSSÍLICA A + 3% ADITIVO 3	11.0	22 %
8% MICROSSÍLICA A + 4% ADITIVO 3	10.9	28 %
8% MICROSSÍLICA B + 3% ADITIVO 3	10.9	19 %

TAB. 4 - Resistência à compressão do concreto projetado com *MICROSSÍLICA B*.
Cimento CP II E 32_B Traço: 1: 2.5: 1.85: x

DESCRIÇÃO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	
	7 dias	28 dias
REF. (S/ADIT)	34.8 ± 2.6	43.2 ± 1.3
14% <i>MICROSSÍLICA B</i>	36.2 ± 1.8	44.3 ± 7.0
8% <i>MICROSSÍLICA B</i>	43.5 ± 3.7	53.0 ± 1.1

TAB. 5 - Resistência à compressão iniciais do concreto projetado com as *MICROSSÍLICAS A e B*.
Cimento CP II E 32_B Traço: 1: 2.5: 1.85: x

IDADES	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)		
	CARACTERIZAÇÃO		
	TRAÇO ₂	TRAÇO _{1,1}	TRAÇO ₄
0.33h	0.26 ± 0.03	0.30 ± 0.05	0.39 ± 0.04
0.66h	0.52 ±	0.51 ± 0.03	0.58 ± 0.05
1.00h	0.80 ± 0.06	0.66 ± 0.04	0.90 ± 0.04
1.33h	0.98 ± 0.03	0.89 ± 0.04	-

Obs: TRAÇO₂ → REFERÊNCIA + 3.0% ADITIVO 3
TRAÇO_{1,1} → 8% *MICROSSÍLICA A* + 3% ADITIVO 3
TRAÇO₄ → 8% *MICROSSÍLICA B* + 3% ADITIVO 3

TAB. 6 - Evolução da resistência à compressão do concreto projetado com as *MICROSSÍLICAS A e B*.
Cimento CP II E 32_B Traço: 1: 2.5: 1.85: x

IDADES	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)			
	CARACTERIZAÇÃO			
	TRAÇO ₂	TRAÇO _{1,1}	TRAÇO ₄	TRAÇO ₃
0.04d	0.80 ± 0.05	0.66 ± 0.04	0.90 ± 0.04	0.80 ± 0.05
0.08d	-	-	-	2.60 ± 0.04
0.13d	6.20 ± 2.80	5.75 ± 2.45	-	7.50 ± 1.50
0.17d	7.50 ± 1.50	7.50 ± 2.50	-	-
0.21d	9.00	8.70 ± 0.30	-	-
7.00d	19.50 ± 1.40	24.80 ± 0.90	30.70 ± 1.40	-
28.00d	27.00 ± 1.20	32.3 ± 0.90	36.70 ± 3.30	45.20 ± 1.60

Obs: TRAÇO₂ → REFERÊNCIA + 3% ADITIVO 3
TRAÇO_{1,1} → 8% *MICROSSÍLICA A* + 3% ADITIVO 3
TRAÇO₄ → 8% *MICROSSÍLICA B* + 3% ADITIVO 3
TRAÇO₃ → 8% *MICROSSÍLICA B* + 3% ADITIVO 5

TAB. 7 - Fator água/materiais secos (H%), absorção, volume de vazios permeáveis e massa específica do concreto projetado com *MICROSSÍLICA B*.

Cimento CP II E 32_B

Traço: 1: 2.5: 1.85: x

CARACTERIZAÇÃO	H (%)	ABSORÇÃO (%)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS(%)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
REF. (S/ADITIVO)	9.7	4.97 ± 0.37	11.07 ± 0.73	2353.0 ± 54.6
4% <i>MICROSSÍLICA B</i>	9.6	5.26 ± 0.48	12.12 ± 1.08	2343.0 ± 57.3
8% <i>MICROSSÍLICA B</i>	9.7	4.66 ± 0.31	10.38 ± 0.70	2346.0 ± 50.7

TAB. 8 - Fator água/materiais secos (H%), absorção, volume de vazios permeáveis e massa específica concreto projetado com *MICROSSÍLICAS A e B* e *ADITIVO 3*.

Cimento CP II E 32_B

Traço: 1: 2.5: 1.85: x

CARACTERIZAÇÃO	H (%)	ABSORÇÃO (%)	VOLUME DE VAZIOS PERMEÁVEIS(%)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)
TRAÇO _R	9.4	5.19 ± 0.08	11.42 ± 0.02	2327.0 ± 55.8
TRAÇO ₁₀	11.1	6.15 ± 0.59	13.37 ± 1.10	2326.0 ± 66.4
TRAÇO ₁₁	11.0	6.10 ± 0.21	13.33 ± 0.41	2332.0 ± 66.0
TRAÇO ₁₂	10.9	6.27 ± 0.17	13.66 ± 0.37	2329.0 ± 67.8
TRAÇO ₄	10.9	5.49 ± 0.40	12.17 ± 0.83	2355.0 ± 60.5

Obs: TRAÇO_R → REFERÊNCIA (S/ADITIVO)

TRAÇO₁₀ → 8% *MICROSSÍLICA A* + 2% *ADITIVO 3*

TRAÇO₁₁ → 8% *MICROSSÍLICA A* + 3% *ADITIVO 3*

TRAÇO₁₂ → 8% *MICROSSÍLICA A* + 4% *ADITIVO 3*

TRAÇO₄ → 8% *MICROSSÍLICA B* + 2% *ADITIVO 3*