

Viabilização do emprego de concretos de alta resistência e alta durabilidade para construção de estruturas marinhas

Thiago Catoia¹ & Jefferson Liborio² & Samir C. Fagury³ & José A. Salvador Filho⁴

¹Curso de Engenharia Civil-EESC-USP – Iniciação Científica – thiagocatoia@eesc.usp.br

²Prof. Dr. Coordenador do Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento –

e-mail: liborioj@sc.usp.br

^{3,4}Doutorandos Área: Engenharia de Estruturas - fagury@sc.usp.br; americo@sc.usp.br

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS – EESC-USP

RESUMO:

As estruturas de concreto em contato com a água do mar em geral sofrem deteriorações ocasionadas pela penetração de cloretos, promovendo assim a corrosão das armaduras, diminuindo sua vida útil. A execução de concretos, com a porosidade refinada, e resistentes à ação de cloretos, é muito fácil de ser executada atualmente. Esses concretos ultrapassam qualquer recomendação normalizada e vai além das expectativas previstas em várias recomendações existentes. O objetivo deste trabalho é de demonstrar a viabilidade da execução de concretos que atendam as exigências das diversas normas, utilizando materiais facilmente encontrados no mercado. Estes concretos são obtidos a partir da relação ótima entre os agregados, o que permite um índice de vazios mínimo já anterior à mistura do concreto, proporcionando altas resistências com consumo de cimento relativamente baixo.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto de Alta Resistência, dosagem, durabilidade, porosidade, sílica ativa, CAD.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto armado, localizadas em ambiente marinho, podem ter sua vida útil diminuída devido a manifestações patológicas, principalmente pela corrosão das armaduras. Isto ocorre devido à penetração de íons cloreto, ou por sua introdução nos materiais que compõem o concreto, que podem reagir com o C₃A formando monocloroaluminatos, que permitem modificar favoravelmente a microestrutura do concreto, mas pode também atingir as armaduras, corroendo-as rapidamente.

A tecnologia dos concretos avançou de forma significativa, permitindo a produção de concretos com porosidade refinada, que impede a penetração de agentes agressivos, tornando a deterioração nas estruturas marítimas muito menos intensa. Por outro lado, pouco se tem feito no sentido de se utilizar um concreto com requisitos de alta resistência e alto desempenho, isso devido a um impasse no meio técnico empresarial: o empreiteiro não faz uso dessa nova técnica, pois os calculistas e projetistas não especificam esse material por acharem que as usinas de concreto não estão aptas a produzir e entregar um concreto com características de alta resistência e alto desempenho, entretanto as usinas alegam que não há problema em produzi-lo e entregá-lo se especificado, mas ressaltam que haverá um custo

adicional pela necessidade de controlar na obra a aplicação, tendo em vista que o empreiteiro não está familiarizado com esses novos materiais.

Portanto nota-se a necessidade das partes se reciclarem e produzirem projetos com concepção diferenciada dos concretos convencionais.

O presente trabalho tem como objetivo divulgar a utilização do concreto de alta resistência e alto desempenho junto à comunidade técnica empresarial como uma possibilidade de realização de estruturas mais duráveis e mais econômicas que aquelas atualmente praticadas. A pesquisa também tem por objetivo a reciclagem técnica de engenheiros e arquitetos, através da demonstração da facilidade de uso da tecnologia do concreto de alto desempenho (CAD) com os materiais existentes regionalmente.

Primeiramente são apresentados os estudos de alguns traços com agregados comerciais que alcançaram resistência de 92 MPa aos 28 dias de idade, com traço em massa 1:m, $m = 3,5$. Também são apresentados resultados obtidos de traços um pouco mais elaborados a partir dos mesmos materiais, cujas resistências chegam a $f_{c28} = 129,0$ MPa na mesma idade. Também é apresentada a facilidade de se produzir esses concretos, mesmo que ainda em betoneiras estacionárias, de pequena capacidade. A durabilidade é justificada através de outros trabalhos efetuados pelo grupo, como também de outros centros de pesquisas de vários países.

2. CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O concreto de alto desempenho deve ser entendido como um material, cientificamente produzido, que atende as expectativas do cliente do ponto de vista estrutural, da estética e de durabilidade frente ao meio ambiente atual e futuro, para fins pré-determinados. Deve ser econômico (custo/benefício) e propiciar vantagens frente a outras alternativas tecnológicas (evitar a panacéia).

2.1. Propriedades dos Concretos

Dentre outras características [28], os concretos podem ser constituídos com as seguintes propriedades:

- Alta resistência;
- Durabilidade:
 - Resistência à ação de cloretos;
 - Resistência à ação de dióxido de carbono;
 - Resistência à abrasão;
 - Resistência à ação de sulfatos;
- Melhoria da zona de interface:
 - Concreto novo x Concreto velho;
 - Reparos;
 - Continuidade de concretagem;
- Calor de hidratação;
- Resistência ao impacto;
- Resistência à tração;
- Baixa permeabilidade;
- Baixa porosidade;
- Resistividade, etc.

Na Figura 1 é apresentada a variação da permeabilidade para diversos tipos de concreto, em função da relação água/cimento (a/c). Uma das características do CAD geralmente é a baixa relação a/c, a fim de obtê-lo com permeabilidade reduzida.

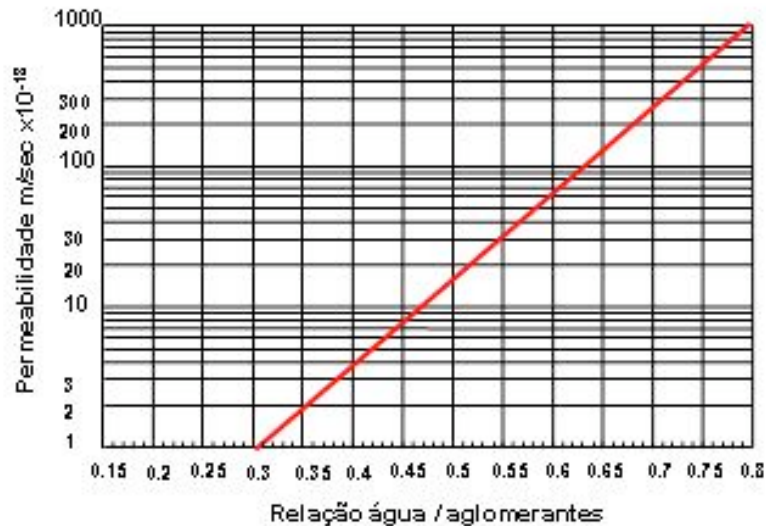


Figura 1 – Permeabilidade do concreto em função da relação água/cimento [26, 28]

3. DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA E DURABILIDADE PARA EXECUÇÃO EM OBRAS

Serão apresentados os critérios de dosagem estabelecidos no trabalho de Iniciação Científica [23] para a execução em obras, realizado no Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento (LMABC – SET – EESC – USP). Primeiramente foram coletados agregados comuns na região e familiares às usinas de concreto, assim facilitando a divulgação e utilização dos resultados da presente pesquisa no meio técnico empresarial.

Os agregados foram caracterizados para se obter um melhor conhecimento e proporcionar uma melhor utilização. Também foi determinada a melhor composição entre os agregados grãos com a finalidade de diminuir os vazios existentes entre eles e conseqüentemente diminuir o consumo de argamassa.

O teor ótimo de argamassa foi determinado visando preencher os vazios existentes entre os agregados grãos sem ocorrer excesso de argamassa e conseqüentemente desperdício.

A relação água/aglomerante e o teor de aditivo superplastificante foram determinados com o objetivo de obter alta resistência mecânica e uma boa plasticidade (trabalhabilidade). Buscando um concreto de alta resistência e de fácil aplicação sem o aumento excessivo do custo.

Uma adequada ordem de inserção de materiais para mistura em betoneira foi determinada, com o objetivo de promover-se uma padronização no procedimento de execução dos concretos, com isso, proporcionou-se uma homogeneidade na mistura, e uma melhor atuação dos componentes, já que a ordem determinada apresenta influência direta no comportamento reológico dos concretos.

3.1. Seleção dos materiais utilizados

Para se obter o aproveitamento máximo dos materiais na composição de concretos de alta resistência e durabilidade, faz-se necessária uma criteriosa seleção de modo que se obtenha máxima sinergia entre estes. Os agregados graúdos são escolhidos e dosados de modo que se obtenha uma pequena quantidade de vazios a ser preenchida pela argamassa, evitando excessos ou desperdícios. Também são utilizados aditivos superplastificantes compatíveis com os materiais aglomerantes para que seu desempenho seja máximo, reduzindo ao mínimo a quantidade de água utilizada na mistura.

3.1.1. Agregados miúdos

A areia utilizada foi escolhida pelo seu bom coeficiente de forma, que proporciona a utilização de menos água de amassamento comparada a um agregado semelhante com menor qualidade em seu coeficiente de forma. Esta areia é a quartzosa de cava (Itaporanga) retirada de uma jazida próxima à cidade de São Carlos, cuja curva granulométrica é apresentada na figura 2.

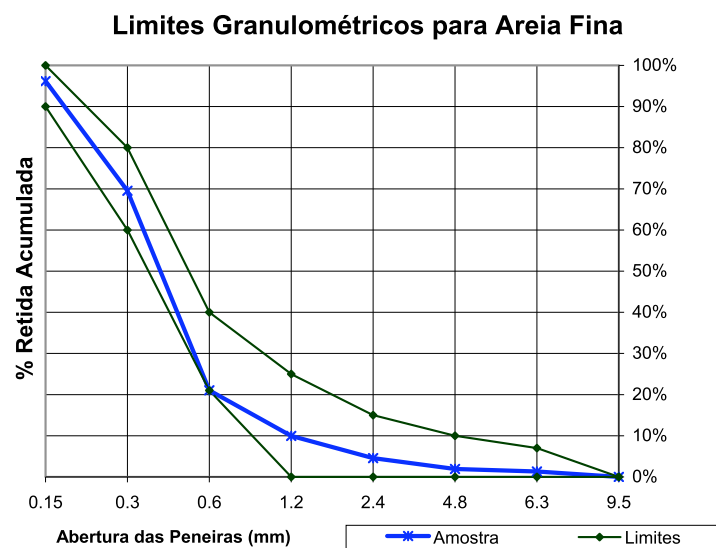


Figura 2 – Distribuição granulométrica areia Itaporanga - NBR 7217 [8].

A análise da Figura 2 permite concluir que a areia se enquadra na zona 2 (fina) da especificação brasileira NBR 7211 [7]. As características deste material são apresentadas a seguir:

Constantes físicas:

- Massa específica - NBR 9776 [17] igual a 2,63 g/cm³;
- Massa unitária no estado solto - NBR 7251 [15] é de 1,58 kg/dm³;
- Dimensão máxima característica igual a 2,4 mm;
- Módulo de finura igual a 2,11.

Teores de materiais deletérios:

- Teor de argilas em torrões é igual a 0,1% - NBR 7218 [8];
 - Teor de materiais pulverulentos é igual a 0,75% - NBR 7219 [8];
 - Índice de matéria orgânica menor que 300 partes por milhão - NBR 7220 [11].
- Os teores de substâncias nocivas atendem as exigências da NBR 7211 [7].

3.1.2. Agregados graúdos

As britas nº 1 e nº 2 ($D_{máx}=19$ mm e $D_{máx}=25$ mm, respectivamente), também encontrados na região de São Carlos, apresentam as seguintes características:

- Massa específica 2,86 e 2,86 g/cm^3 - NBR 9937 [18];
- Massa unitária no estado solto 1,49 e 1,46 kg/dm^3 - NBR 7251 [15];
- Massa unitária no estado compactado 1,63 e 1,58 kg/dm^3 - NBR 7810 [16];
- Teor de material pulverulento 1,0 e 0,8% - NBR 7219 [10].

A dimensão máxima característica da Brita nº 1 é 19 mm e da Brita nº 2 é 25 mm e os módulos de finura são 6,81 e 7,20, respectivamente. As curvas de distribuição granulométrica são apresentadas a seguir:

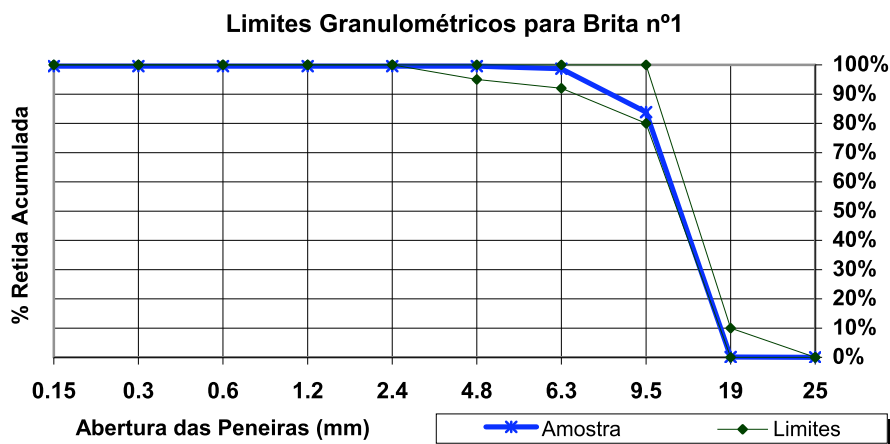


Figura 3 – Distribuição granulométrica Brita nº 1.

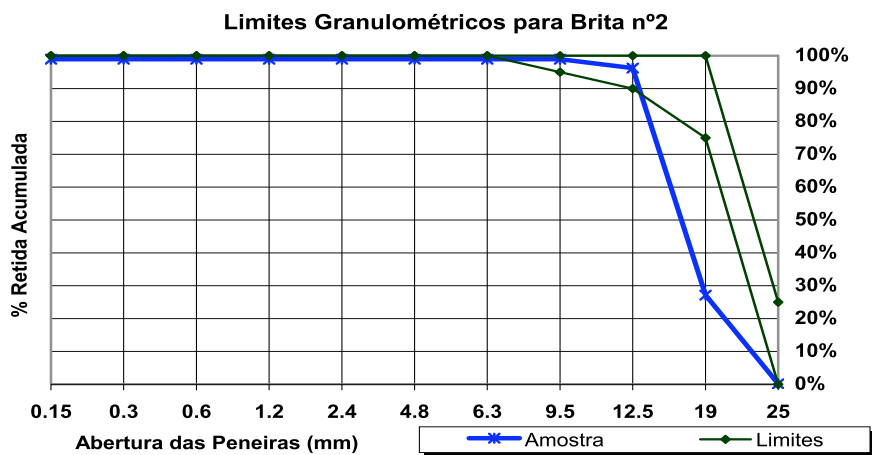


Figura 4 – Distribuição granulométrica Brita nº 2.

Analisando a Figura 4, nota-se que apesar deste agregado ser classificado como Brita nº 2, por sua dimensão máxima característica de 25 mm, sua distribuição granulométrica não atende rigorosamente os limites especificados pela NBR 7211 [7]. Porém, a utilização deste agregado se justifica pela intenção de execução de concretos de alto desempenho e alta resistência utilizando materiais disponíveis na região.

Para a determinação do índice de forma foi utilizada a norma francesa AFNOR P-18-301 [20]. O método consiste em determinar um coeficiente volumétrico médio de uma amostra obtida a partir do quarteamento de um lote representativo de agregado, até obter-se uma massa de 250 g. Calcula-se o volume dos agregados, por exemplo, pelo deslocamento de um líquido de volume previamente estabelecido, obtendo-se então o valor V , que é o volume da amostra. A seguir, faz-se a medida dos diâmetros “ d ” de cada partícula, e a seguir calcula-se o coeficiente volumétrico C_v .

$C_v = 1$, se $V_{partícula} = (\pi d^3/6)$, isto é, uma esfera.

O coeficiente volumétrico médio é dado pela Equação 1 a seguir.

$$C_{v,médio} = \frac{V}{\frac{\pi}{6} \sum d^3} \geq 0,2 \quad (1)$$

O Coeficiente volumétrico médio da brita nº 1 foi de 0,21 e da brita nº 2 foi de 0,20 ficando portanto no limite inferior segundo a norma adotada. Outros agregados da região de São Carlos também foram analisados, mas o resultado não se alterou. O dado material, portanto, por apresentar um alto índice de angulosidade, exige mais água para uma mesma trabalhabilidade.

3.2. Determinação da composição dos agregados graúdos (britas nº 1 e 2)

A determinação da composição dos agregados graúdos foi feita de modo prático e simples, sem a necessidade de muitos cálculos ou de curvas granulométricas, e tem a finalidade de diminuir o custo do concreto. Utilizou-se o método da massa unitária no estado compactado seco, feita individualmente em cada composição de acordo com as prescrições da NBR 7810 [16]. A Figura 5 mostra graficamente a escolha da composição ideal entre as britas nº 1 e 2, onde a massa unitária atinge o valor máximo dentre as demais composições.

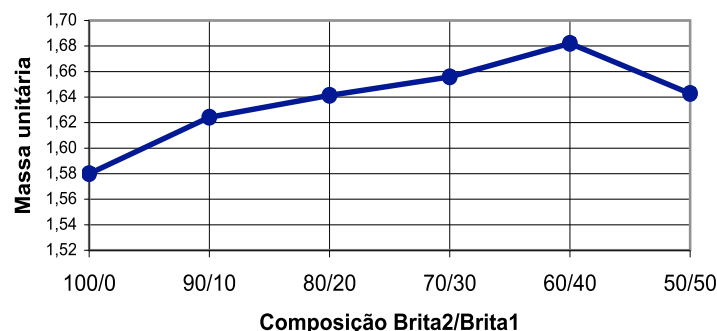


Figura 5 – Determinação da composição “ideal” entre britas nº 1 e 2, por meio da massa unitária no estado compactado seco.

Portanto, como a composição de 60% de brita nº 2 e 40% de brita nº 1 possui a maior massa unitária que as demais composições, essa é a melhor composição por possuir menos vazios entre os agregados e assim o concreto consome menos argamassa, ou seja, menos cimento. A figura 6 a seguir apresenta a granulometria da composição das Britas nº 1 e 2 (40% e 60%).

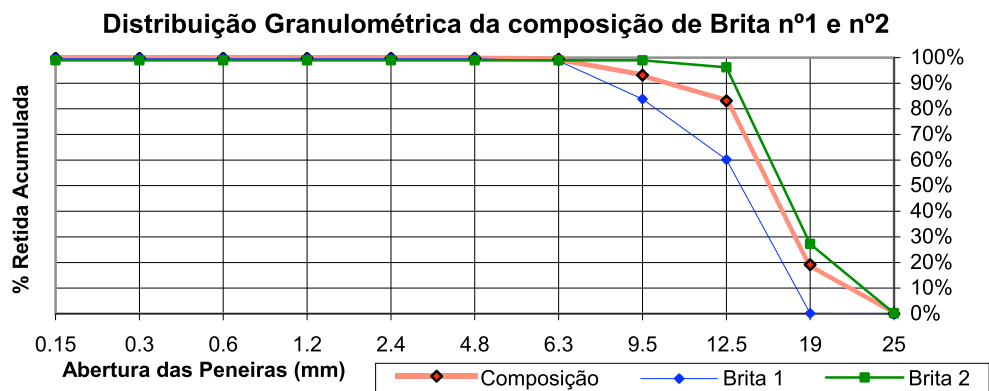


Figura 6 – Distribuição granulométrica Brita nº 1 e 2 (40% e 60%).

A Figura 6 demonstra como se apresenta a distribuição granulométrica da composição (40% de brita 1 e 60% de brita 2) comparada às distribuições das britas nº 1 e 2.

O comportamento intermediário da curva da composição representa a presença de uma faixa maior de diferentes tamanhos de grãos, o que contribui para um melhor desempenho do concreto por ser esta uma distribuição melhor do que se fosse utilizado somente brita nº 1 ou brita nº 2.

3.3. Escolha do cimento

Inicialmente foi utilizado o cimento CP IV 32, mas durante a mistura dos materiais foi detectada uma incompatibilidade entre esse cimento e o aditivo superplastificante utilizado, que foi confirmada posteriormente através do ensaio de Kantro [22]. Devido a essa incompatibilidade foi necessária uma quantidade elevada de água no concreto, o que acarreta uma redução na resistência mecânica do mesmo. Assim, o cimento adotado foi o cimento CP V ARI RS devido a sua compatibilidade com esse tipo de aditivo, e também por ser um cimento já voltado para CAD.

3.4. O uso da sílica ativa de ferro silício

Devido à sua finura, as partículas de sílica ativa podem preencher os vazios entre as partículas maiores do cimento e reduzir tanto a exsudação interna como superficial da mistura.

Além disso, as partículas de sílica ativa têm um efeito fluidificante sobre traços com relação água/aglomerante muito baixa, os quais, de outra forma, são muito viscosos. Essas

partículas deslocam uma parte da água presente entre os grãos flocculados do cimento, aumentando assim a quantidade de água disponível para fluidificar o concreto.

A sílica ativa aumenta a resistência à compressão do concreto, especialmente entre 7 e 28 dias. E como reduz a porosidade da pasta de cimento na sua interface com o agregado, a permeabilidade do concreto é muito reduzida, aumentando também sua durabilidade.

No presente estudo foi adotado o uso de 10% de sílica ativa (em adição) por apresentar bons resultados em concretos realizados no LMABC, e por não representar um aumento excessivo no custo do concreto.

3.5. Escolha do aditivo superplastificante

A eficiência dos superplastificantes com relação aos outros materiais utilizados é regida por uma série de parâmetros físico-químicos cujas propriedades são de difícil observação. A melhor maneira de estudar a compatibilidade de superplastificantes é verificar diretamente as características reológicas de uma pasta ou concreto, em relação ao cimento e superplastificante. Por isso foram realizados ensaios de miniabatimento (Kantro) com o intuito de verificar qual o melhor aditivo a ser utilizado.

O LMABC faz uso do ensaio de miniabatimento desde 1988 [22], cujo método consiste em fazer um ensaio de abatimento com uma pequena quantidade de pasta.

Primeiro preparou-se a pasta com 500 g, de cimento e 50 g de sílica ativa e com relação água/aglomerante de 0,35. Realizou-se o ensaio com vários teores de aditivo superplastificante (teores relativos à massa de cimento) para se analisar a variação de plasticidade devido à variação do teor de aditivo.

Após misturar a pasta usou-se uma placa de vidro, sob base nivelada, untada com óleo mineral sobre a qual o minitronco de cone foi apoiado. Após o enchimento desse minitronco de cone com os aglomerantes e sua retirada, realizaram-se medidas do material espalhado a fim de se estabelecer um diâmetro médio (Figura 7). Esse espalhamento foi medido nos tempos de 10, 20, 30, 40, e 60 minutos, a fim de se identificar a eficiência do aditivo ao longo do tempo, através da perda de plasticidade da pasta.

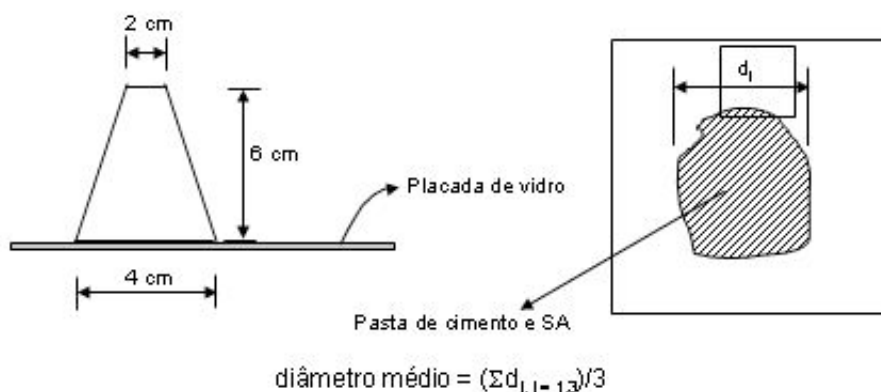


Figura 7 – Esquematização do ensaio de Kantro.

Entre os aditivos superplastificantes avaliados, a título de ilustração, dois foram pré-escolhidos para esta análise por apresentarem bom desempenho em concretos realizados no

LMABC. São eles, os aditivos Glenium[®] 51 e Muraplast[®] FK61, cujo comportamento é apresentado nos gráficos abaixo:

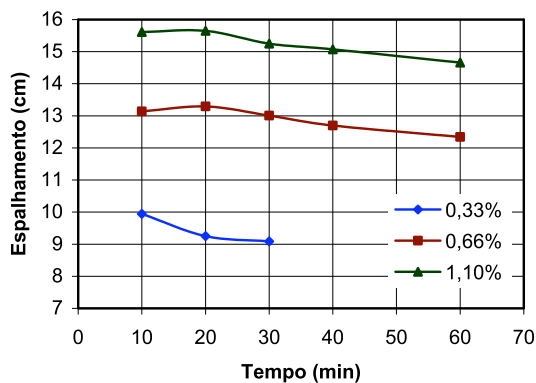


Figura 8 – Comportamento do aditivo Glenium[®] 51

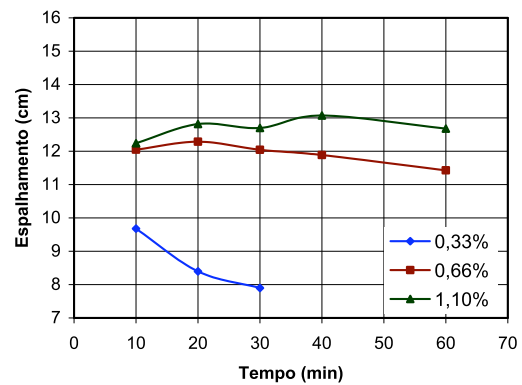


Figura 9 – Comportamento do aditivo Muraplast[®] FK61

Vale a pena lembrar que essa eficiência deve ser testada, em cada lote, e isso poderá variar. A avaliação aqui apresentada, de modo algum representa que um aditivo é melhor que o outro, e é válido para uma determinada amostra de cimento. Como as matérias primas para a fabricação do clínquer podem variar, os resultados podem eventualmente se alterar.

Observando os gráficos das Figuras 8 e 9, que comparam o espalhamento em relação ao tempo para avaliar o desempenho de cada um dos aditivos com os aglomerantes utilizados (CP V ARI RS e Sílica Ativa), concluiu-se que, no caso, o superplastificante Glenium[®] 51 apresentou um espalhamento maior que o Muraplast[®] FK61 e, conseqüentemente, foi o aditivo superplastificante escolhido para essa pesquisa. Outras pesquisas, realizadas no LMABC-SET-EESC-USP, propiciaram resultados análogos com o Muraplast[®] FK61.

4. COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA E DURABILIDADE

4.1. A mistura dos materiais

Para iniciar o procedimento de determinação dos traços de concreto, foi determinada uma ordem de mistura dos materiais para execução do concreto buscando homogeneidade e uma melhor atuação dos componentes.

Primeiro adicionou-se a brita, a sílica ativa e dois terços da água na betoneira e misturou-se por cerca de 5 minutos, quando se acrescentou o cimento, a areia e o restante da água, voltando a misturar por cerca de 3 minutos. Então se adicionou 50% do aditivo superplastificante e, continuou-se a misturar por mais 3 minutos, e por fim adicionou-se o restante do aditivo superplastificante e misturou-se por outros 3 minutos. Isso proporciona uma correta homogeneidade do concreto, evitando aglomeração dos componentes mais finos, e possibilita a atuação do aditivo como superplastificante, plastificando o concreto sem aumentar o consumo de água estabelecendo uma maior eficiência e resistência mecânica.

4.2. Determinação do teor “ideal” de argamassa

A argamassa é a parte de materiais finos (mais água e aditivos) que compõe o concreto, cuja falta pode ocasionar porosidade ou falhas na aplicação deste, e o excesso, apesar de melhorar a aparência, aumenta o risco de fissuração e o custo do mesmo.

O teor “ideal” de argamassa do concreto é o mínimo possível de modo a preencher os vazios existentes entre os agregados graúdos. O método utilizado para a determinação do melhor teor de argamassa foi o método indicado por HELENE, P.R.L. & TERZIAN, P. [24] em “Manual de Dosagem e Controle do Concreto”. Depois de estabelecido um traço, varia-se o teor de argamassa até o instante em que se determina experimentalmente e visualmente a qualidade do concreto.

O teor de argamassa α é definido como a relação entre a quantidade de cimento, sílica e areia com relação ao traço total.

$$\alpha = \frac{(1 + a + SA)}{(1 + a + SA + p)} \quad (2)$$

onde:

a → agregado miúdo;

SA → sílica ativa;

p → agregado graúdo.

Iniciou-se a mistura do concreto com 41% de argamassa e foi-se acrescentando argamassa até um teor de argamassa de 51% quando se pôde verificar um concreto com uma boa coesão, bom aspecto superficial e sem vazios entre os agregados graúdos. Portanto o teor de argamassa “ideal” encontrado foi de 51%.



Figura 10 – Exemplo de concreto com falta de argamassa.



Figura 11 – Exemplo de concreto com “ideal” teor de argamassa.

Na Figura 10, a superfície do concreto apresenta-se bastante áspera, indicando claramente a falta de argamassa. Já na Figura 11, a superfície do concreto é compacta e sem vazios, indicando um concreto com boa proporção de argamassa.



Figura 12 – Exemplo de análise da superfície do concreto



Figura 13 – Exemplo de Análise da coesão do concreto.

Na Figura 12, após avaliação prática do concreto com a colher de pedreiro, observa-se uma superfície vertical compacta, sem apresentar vazios, indicando um teor adequado de argamassa. Na Figura 13, após a retirada de uma porção do concreto com auxílio de uma colher de pedreiro, observa-se um concreto coeso, sem desprendimento de agregado graúdo.

4.3. Determinação da relação água/aglomerante e da porcentagem de aditivo superplastificante em conjunto com a medida de consistência do concreto pelo abatimento de tronco de cone

Segundo a Lei de Abrams a resistência do concreto é inversamente proporcional à relação água/aglomerante. A partir disso foi usado o aditivo superplastificante no intuito de diminuir o consumo de água mantendo o concreto com uma boa plasticidade. Porém, o uso do aditivo é um dos fatores de aumento de custo do concreto.

A determinação da relação água/aglomerante e do teor de superplastificante utilizados foram feitos conjuntamente de modo a se buscar um concreto de elevado desempenho, com uma boa plasticidade para facilidade de aplicação sem aumento excessivo no custo.

Portanto, o teor de superplastificante foi fixado em 0,6% em todos os traços, e a relação água/aglomerante foi de 0,37 para o traço médio (1:5), 0,26 e 0,55 para os traços forte (1:3,5) e fraco (1:6,5), respectivamente.

Para esses traços citados acima foi determinado um abatimento de tronco de cone de 130 ± 20 mm, que garante uma boa plasticidade para o lançamento desse concreto.

4.4. Moldagem dos corpos-de-prova

Para cada traço determinado, foram moldados 04 corpos-de-prova para ensaios à compressão simples, sendo que 02 destes também utilizados para ensaios de módulo de elasticidade, e 02 corpos-de-prova para ensaios à tração por compressão diametral para cada idade. Os ensaios serão realizados às idades de 3, 7, 28 e 63 dias, totalizando 24 corpos-de-prova por traço de concreto.

A moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm foi feita de acordo com a NBR 5738 [5]. Os corpos foram moldados em duas camadas, socadas com 15 golpes cada, com haste de aço padronizada.

Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e imediatamente encaminhados para cura em câmara úmida (U.R. de 95%) no LMABC.

Os ensaios de corpos-de-prova cilíndricos de diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm foram feitos de acordo com a NBR 5739 [6] e NBR 7222 [12]. Os corpos foram ensaiados até a ruptura em prensa servo-hidráulica com velocidade de carregamento de 0,6 MPa/s para compressão simples e de 0,06 MPa/s para tração por compressão diametral.

4.5. Resultados obtidos

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os materiais, as características das dosagens utilizadas, assim como os resultados dos ensaios.

Tabela 1 – Características das dosagens utilizadas - CP V ARI RS.

| Traço em massa | 1:m | 1:3,5 | 1:5,0 | 1:6,5 |
|--|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | 1:as:a:p ₁ :p ₂ | 1:0,10:1,20:0,88:1,33 | 1:0,10:1,96:1,18:1,7 | 1:0,10:2,73:1,47:2,21 |
| Teor de argamassa | | 51% | 51% | 51% |
| Relação água/aglomerante | | 0,27 | 0,35 | 0,45 |
| Teor de aditivo: Glenium® 51 | | 0,6% | 0,6% | 0,6% |
| Consistência (mm) – tronco de cone (NBR 7223) | | 130 ± 20 | 130 ± 20 | 130 ± 20 |
| Massa específica (kg/m ³) | | 2581 | 2527 | 2508 |
| Consumo de materiais por m ³ de concreto (kg) | CP V ARI RS | 541,09 | 397,95 | 315,47 |
| | Água | 146,09 | 139,28 | 141,96 |
| | Areia | 646,60 | 779,99 | 859,66 |
| | Brita 1 | 477,24 | 467,99 | 463,74 |
| | Brita 2 | 715,86 | 701,99 | 695,62 |
| | Sílica Ativa | 54,11 | 39,80 | 31,55 |
| | Aditivo | 3,25 | 2,39 | 1,89 |

Tabela 2 – Resultados dos ensaios

| Data de moldagem | | 19/05/03 | 31/03/03 | 20/05/03 |
|---|---------|----------|----------|----------|
| Resistência compressão axial simples (MPa) | 3 dias | 62,9 | 48,6 | 31,7 |
| | 7 dias | 76,4 | 60,3 | 43,2 |
| | 28 dias | 91,8 | 73,6 | 55,2 |
| | 63 dias | 96,8 | 78,0 | 60,2 |
| Resistência à tração por compressão diametral (MPa) | 3 dias | 4,6 | 4,5 | 3,2 |
| | 7 dias | 6,1 | 5,4 | 4,1 |
| | 28 dias | 6,4 | 6,0 | 5,0 |
| | 63 dias | 6,2 | 5,9 | 5,0 |
| Módulo de elasticidade (GPa) | 3 dias | 36,0 | 32,1 | 28,7 |
| | 7 dias | 38,3 | 34,7 | 32,4 |
| | 28 dias | 42,0 | 39,0 | 37,7 |
| | 63 dias | 49,7 | 43,9 | 42,1 |

A seguir, apresenta-se o diagrama de dosagem correlacionando alguns parâmetros determinados na faixa de concretos estudados. Dentre eles citam-se a resistência característica de dosagem, fator água/aglomerante, teor de materiais secos e o consumo de cimento por metro cúbico. Desta forma é possível realizar quaisquer dosagens para concretos presentes na faixa de traços estudados.

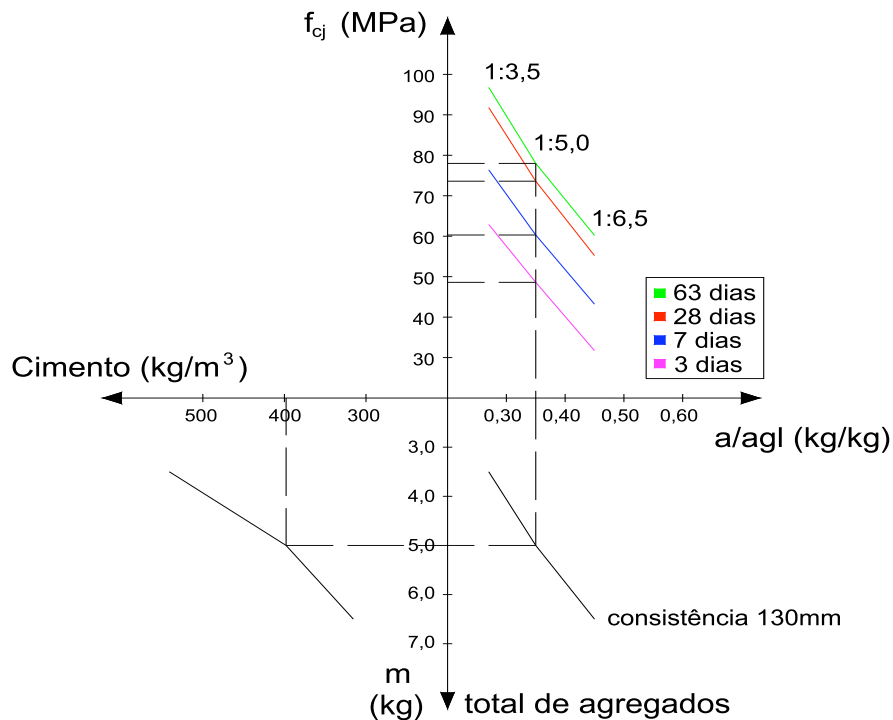


Figura 14 – Diagrama de dosagem do concreto estudado

5. CONCRETOS DE MAIORES RESISTÊNCIAS

O Prof. J. Liborio tem utilizado a metodologia análoga ao procedimento descrito no item anterior para a produção de concretos com características especiais. Está apresentada a seguir a composição de outro concreto cujas maiores resistências interessavam na idade de 14 dias.

Para a dosagem deste concreto, foram utilizados os mesmos materiais apresentados anteriormente, com exceção da brita nº 2, que foi substituída pelo pedrisco ($D_{máx.} = 6,5$ mm). Desta forma, foi determinada a composição Ideal dos agregados graúdos a partir do método da massa unitária no estado compactado seco. A Figura 15 mostra que a composição de 20% da brita nº 1 e 80% de pedrisco atinge o valor máximo dentre as demais composições.

Figura 15 – Determinação da composição “ideal” entre brita nº 1 e pedrisco, por meio da massa unitária no estado compactado seco.

Como o objetivo era apenas conseguir alcançar uma grande resistência aos 14 dias, não houve a preocupação de fixar um determinado valor de abatimento do concreto. Desta forma, foi adicionada à mistura a quantidade máxima de aditivo superplastificante recomendada pelo fabricante (0,8 litros para cada kg de material cimentante) e água suficiente para obter a

plasticidade necessária para a moldagem dos corpos de prova, $a/aglomerantes = 0,17$. O valor da resistência atingida aos 14 dias, 125,5 MPa. O desenvolvimento de resistência, obtido em idade mais avançadas, e as características do traço estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Características da dosagem utilizada e resultados

| | | |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| Traço em massa | 1:m | 1:2,8 |
| | 1:as:a:p ₀ :p ₁ | 1:0,10:1,44:1,08:0,27 |
| Teor de argamassa | | 51% |
| Relação água/aglomerante | | 0,17 |
| Teor de aditivo: Glenium® 51 | | 0,88% |
| Consumo de materiais por m ³ de concreto (kg) | CP V A R I R S | 599,45 |
| | Água | 122,95 |
| | Areia | 865,55 |
| | Pedrisco | 648,25 |
| | Brita 1 | 162,06 |
| | Sílica Ativa | 59,95 |
| | Aditivo | 5,80 |
| Data de moldagem | | 13/05/03 |
| Resistência compressão axial simples (MPa) | 3 dias | 80,5 |
| | 7 dias | 112,3 |
| | 14 dias | 125,5 |
| | 28 dias | 129,4 |
| | 63 dias | 131,2 |

6. DISCUSSÃO

Os materiais utilizados na confecção dos concretos produzidos nesta pesquisa são os encontrados na região da cidade de São Carlos, e a composição desses materiais foi realizada com o intuito de se criar características especiais a estes concretos, viabilizando desta forma a utilização de concretos de alto desempenho.

Analisando então os resultados apresentados, verifica-se que é possível realizar e utilizar concretos com características de alta resistência e alto desempenho na região. A alta resistência e o alto desempenho estão relacionados porque com o uso da sílica ativa (material bem mais fino que o cimento) diminui-se a porosidade preenchendo os vazios existentes entre as partículas de cimento, e com o uso de aditivo redutor de água diminui-se a permeabilidade, com isso aumenta-se a resistência e a durabilidade frente a agentes agressivos.

Os processos de execução dos concretos apresentados neste estudo foram de fácil e metódico encaminhamento. Assim sendo, é de grande valia a divulgação dessa tecnologia de produção do CAD no meio técnico empresarial.

Contudo, é válido também ressaltar que para cada tipo e/ou composição de materiais utilizados executa-se um determinado concreto com características e desempenho diferentes. Tomando-se como exemplo o concreto do presente estudo, é possível melhorar suas características e desempenho se estudado e aplicado um mesmo componente de melhor qualidade. Lembra-se que os agregados graúdos utilizados, apesar de atenderem às classificações das normas adotadas, têm seu índice de forma com alta angulosidade, o que acarreta numa maior necessidade de água de amassamento para uma mesma trabalhabilidade que a de outro agregado graúdo com menor angulosidade. Desta forma, algumas

características do concreto podem ser melhoradas devido a uma simples diferença no índice de forma do agregado graúdo.

Pode-se verificar que o concreto assim produzido permite a produção de concretos com porosidade refinada, bloqueando a penetração de agentes agressivos. Estes concretos são adequados para a fabricação de elementos estruturais localizados em ambientes marinhos, que sofrem a ação de íons cloreto, provocando corrosão das armaduras.

Analisando os resultados dos ensaios de resistência do concreto verifica-se um crescimento acentuado na resistência mecânica às primeiras idades, este fato ocorre devido ao tipo de cimento utilizado (ARI = Alta Resistência Inicial) que por apresentar uma elevada finura, alta quantidade de alita, dentre outras características, promove um efeito acelerador nas reações de hidratação, levando o concreto atingir rapidamente grande parte de sua resistência esperada nas primeiras idades.

Em uma análise comparativa entre os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral às idades de 28 dias e 63 dias, percebe-se pouca variação a partir da idade de 28 dias.

A evolução do módulo de elasticidade não acompanhou a evolução da resistência porque o módulo de elasticidade depende não somente da resistência mas também da deformação do concreto. O módulo de elasticidade tem grande importância no estudo da idade de desmoldagem de peças de concreto.

No diagrama de dosagem dos concretos em estudo, tendo a porcentagem de aditivo fixada em 0,6%, pode-se confirmar que o aumento da resistência mecânica do concreto aumenta com a diminuição da relação água/aglomerante e com o aumento da quantidade de cimento por metro cúbico.

7. Conclusões

A partir dos resultados obtidos conclui-se que:

- o concreto composto com o cimento CP V ARI RS apresentou características de alta resistência;
- durante o processo de moldagem de corpos-de-prova, o concreto composto com o cimento CP V ARI RS apresentou boa trabalhabilidade facilitando desta forma o lançamento e adensamento, não necessitando grandes vibrações;
- o concreto composto com o cimento CP V ARI RS apresenta um bom acabamento superficial, confirmando desta forma a correta determinação do teor ótimo de argamassa;
- o processo de produção dos concretos é considerado simples, sem restrições específicas para dosagens em canteiros de obra, já que o roteiro de confecção não difere do atualmente utilizado, entretanto as exigências para a obtenção de elevado desempenho requerem orientação técnica competente;
- o concreto em estudo pode ser melhorado com a utilização de agregados graúdos com melhores índices de forma;
- a utilização de um cimento de alta resistência inicial - CP V ARI RS – promoveu um rápido desenvolvimento na resistência mecânica dos concretos às primeiras idades;
- os resultados de ensaios mecânicos e da determinação do módulo de elasticidade realizados nos concretos apresentaram valores compatíveis com resultados de ensaios de concretos de alta resistência, presentes no banco de dados no LMABC;

- os diagramas de dosagem realizados nesta pesquisa apresentaram compatibilidade com diagramas de dosagem já realizados no LMABC;
- os resultados determinados através da utilização da planilha automatizada foram coerentes com resultados determinados através do método convencional;
- a utilização da planilha programada otimizou os cálculos referentes à realização de cada concreto, facilitando desta forma, a determinação de diversos parâmetros referentes aos concretos que se deseja produzir;
- o método adotado pelo LMABC, além de ser eficiente na obtenção de concretos com a estrutura refinada, pode ser adaptado para as diversas as mais necessidades, tais como obter concretos de alta resistência nas primeiras idades para reparos, concreto auto adensáveis, resistente a impactos, à abrasão e à penetração de agentes agressivos como os íons cloreto.
- O fato de se obter alta resistência, não significa obter durabilidade maior. O cimento utilizado, já vem sendo estudado desde 1992 e, uma ampla história de seu comportamento poderá ser obtida em outros trabalhos científicos, produzidos no LMABC e que também seguem as orientações dos trabalhos dos Profs. Jefferson Liborio e Paulo Helene, dentre outros referenciados nas citações seguintes, ao longo desses anos [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37].

12. BIBLIOGRAFIA

1. ABNT - Associação brasileira de normas técnicas NBR 5738/94 **Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos**, Rio de Janeiro.
2. _____ NBR 5733/91 **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**. Rio de Janeiro.
3. _____ NBR 5736/91 **Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro.
4. _____ NBR-NM-23/01 **Cimento Portland e Outros Materiais em Pó - Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro.
5. _____ NBR 5738/94 **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**, Rio de Janeiro.
6. _____ NBR 5739/94 **Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro.
7. _____ NBR 7211/83 **Agregado para concreto**. Rio de Janeiro.
8. _____ NBR 7217/87 **Determinação da Composição Granulométrica dos Agregados**, Rio de Janeiro.
9. _____ NBR 7218/87 **Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro.
10. _____ NBR 7219/87 **Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos**, Rio de Janeiro.
11. _____ NBR 7220/87 **Agregados - Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo**, Rio de Janeiro.
12. _____ NBR 7222/94 **Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro.
13. _____ NBR8522/84 **Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama - Tensão-deformação**. Rio de Janeiro.
14. _____ NBR 7223/92 **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro.

15. _____ NBR 7251/87 **Agregado em Estado Solto - Determinação da massa unitária**, Rio de Janeiro.
16. _____ NBR 7810/83 **Agregado em Estado Solto Compactado Seco - Determinação da Massa Unitária**, Rio de Janeiro.
17. _____ NBR 9776/87 **Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco Chapman**, Rio de Janeiro.
18. _____ NBR 9937/87 **Agregados - Determinação da absorção e da massa específica de agregado gráudo**, Rio de Janeiro.
19. _____ NBR 11578/91 **Cimento Portland Composto**, Rio de Janeiro.
20. AFNOR - Association française de normalisation P-18-301 **Determinação do índice de forma**.
21. AÏTCIN, P.C. **Concreto de Alto Desempenho** São Paulo, 2000. Pini, 637 p.
22. BUCHER, H. R. E. - **Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos**. 30ª REIBRAC, Rio de Janeiro, pp. 609-625, agosto 1988.
23. CATOIA T., FAGURY, S. M., LIBORIO, J. B. L. **Implantação regional de subsídios para utilização de concretos de alta resistência e alto desempenho**, Relatório de Iniciação Científica, 2003.
24. HELENE, P.R.L. & TERZIAN, P. (1992). **Manual de dosagem e controle do concreto**. Editora Pini, Brasília, DF.
25. LIBORIO, J.B.L. **Concreto de Alto Desempenho** In: Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, 14-16/03/2002, SOBRAL-CE.
26. LIBORIO, J.B.L. **Notas de aula - Disciplina: Construção Civil** Curso de graduação EESC - USP - 2002.
27. SALVADOR FILHO, J. A. A. **Dosagem de concreto de alta resistência**, Relatório da disciplina Fundamentos do Concreto Estrutural, SET-5879, EESC-USP, 2003.
28. LIBORIO, J.B.L. *Avanços na tecnologia do concreto estrutural*, Palestra Apresentada no evento em comemoração aos 30 anos do Instituto Brasileiro do Concreto. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 25/06/2002. São Paulo.
29. LIBORIO, J. HELELE, P., et al. *Desenvolvimento tecnológico dos concretos nos últimos 50 anos*. In: Concreto Colloquia 2003. Jubileu de Ouro da Escola de Engenharia de São Carlos, da USP. 14-16/05/2003. São Carlos.
30. MELO, Alúcio Bráz de (2000). *Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland*. São Carlos: Interunidade EESC, IFSC, IQSC. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo.
31. SILVA, I.J. (2000). *Contribuição ao estudo dos concretos de alto desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura*. São Carlos: Interunidade EESC, IFSC, IQSC. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo.
32. FAGURY, S.C. (2002). *Concretos e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concretos novo e velho, com tratamento da zona de interface*. São Carlos: Interunidade EESC, IFSC, IQSC. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo.

33. SILVA, V.M. (2002) *Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa*. São Carlos: Interunidade EESC, IFSC, IQSC. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo.
34. COSTENARO, F. L. (2003) *Desenvolvimento de concretos com adições de cinza e de cinza e sílica da casca de casca de arroz*. São Carlos: Interunidade EESC, IFSC, IQSC. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo.
35. SILVA, F. G. (2003) *Estudo da resistência à corrosão do concreto de alto desempenho frente à ação de cloretos*. São Carlos: Interunidade EESC, IFSC, IQSC. Doutorado em andamento (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo.
36. CASTRO, A. L. (2003) *Reologia do concreto de alto desempenho*. Doutorado em andamento (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo.
37. MELO, A. B. (1996) *Estudo da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré-moldados*. São Carlos: Área de Tecnologia do Ambiente Construído – Escola de Engenharia de São Carlos, da USP.