

CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO: CONCEITO, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

Romel Dias Vanderlei

Universidade Estadual de Maringá - Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

O estudo na área de materiais a base de cimento Portland vem se desenvolvendo a cada dia. Com isso o concreto teve uma grande evolução nos últimos anos com introdução de novos materiais em sua composição, como adições minerais e aditivos químicos. Surgiu então o concreto de alto desempenho, que apresenta uma microestrutura diferente dos concretos comumente utilizados na construção civil, apresentando melhores propriedades mecânicas de excelente desempenho no tocante a durabilidade do material quando em presença de agentes agressivos. Este trabalho faz um levantamento bibliográfico sobre o concreto de alto desempenho e tem por objetivo mostrar seu conceito, suas propriedades e algumas aplicações feitas com este material no Brasil e no Exterior.

1. INTRODUÇÃO

O estudo na área de materiais a base de cimento Portland vem se desenvolvendo a cada dia, com isso o concreto teve uma grande evolução nos últimos anos, com introdução de novos materiais em sua composição, como adições minerais e aditivos químicos. A utilização desses materiais na obtenção de concretos, proporcionou um grande avanço tecnológico na área, criando assim concretos com características especiais e voltados para aplicações específicas. Surgiu então o concreto de alto desempenho, que apresenta uma microestrutura diferente dos concretos comumente utilizados na construção civil, apresentando melhores propriedades mecânicas de excelente desempenho no tocante a durabilidade do material quando em presença de agentes agressivos.

1.1. Conceito de Concretos de Alto Desempenho

A designação "Concreto de Alto Desempenho - CAD" é atribuída ao concreto que reúna características especiais de desempenho, conforme CERF/ASCE(1993), as quais não poderiam ser obtidas comumente, usando apenas materiais convencionais, com procedimentos de misturas usuais. Estas características podem envolver por exemplo, as seguintes melhorias: facilidade de lançamento e adensamento sem segregação; resistências elevadas às pequenas idades; tenacidade; estabilidade de volume; durabilidade, alta densidade, baixa permeabilidade e resistência a agentes agressivos.

O termo "Concreto de Alta Resistência - CAR", é correntemente utilizado por diversos autores, já que a resistência à compressão é utilizada como parâmetro de comparação entre o concreto usual e o de alto desempenho, porém, fica subentendido que além da alta resistência mecânica este possui outras qualidades, como citado anteriormente (VANDERLEI, 1999).

Nos Estados Unidos e países da Europa, considera-se um concreto como de alta resistência se apresentar uma resistência característica à compressão entre 40MPa e 85MPa. No Brasil, conforme a NBR 8953/92, seriam os concretos C40 e C50 de Classe I, e Classe II (C55 - C80). Segundo AMARAL FILHO (1993), parece ser razoável adotar-se a classificação apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do concreto quanto à resistência

Classificação	Nível de resistência		
Baixa resistência		f_{ck}	< 25MPa
Média resistência	$25\text{MPa} \leq$	f_{ck}	< 50MPa
Alta resistência	$50\text{MPa} \leq$	f_{ck}	$\leq 80\text{MPa}$
Ultra alta resistência	$90\text{MPa} \leq$	f_{ck}	$\leq 400\text{MPa}$

Fonte: AMARAL FILHO(1993)

1.2. Vantagens

As vantagens do uso do concreto de alto desempenho englobam aspectos dos mais diversos. O CAD apresenta elevada resistência a baixas idades, o que é essencial para confecção de elementos pré-moldados e em obras emergenciais de reforço.

Apresenta uma grande adesividade aos substratos. Com isso, pode ser bem utilizado em obras de reparos e reforços. Com o uso de aditivos, apresenta melhor trabalhabilidade e facilidade de compactação. Tem baixa porosidade e permeabilidade, e, conseqüentemente, maior durabilidade e exsudação quase nula.

Por ser um material mais “rígido”, apresenta baixa deformabilidade. Com isso, as deformações por retração e fluência são bastante reduzidas. E por apresentar uma tensão resistente superior, possibilita a adoção de peças de seção transversal mais reduzida, possibilitando assim, além da economia em volume de concreto, utilizar menor área de forma, e reduzir a carga na fundação.

1.3. Microestrutura

Nos concretos convencionais, observa-se que a ruptura sempre se dá na pasta, contornando os agregados graúdos. Isto ocorre porque a dosagem utilizada confere à pasta uma resistência muito inferior à dos agregados. Para concretos de alta resistência, a porosidade da matriz é muito inferior à dos concretos convencionais. Seja pelo maior controle de dosagem e de execução, seja pela menor relação água/cimento, o fato é que o material torna-se mais homogêneo, desenvolvendo características mecânicas e de deformação diferentes das usuais.

A dosagem com maior consumo de cimento e menor quantidade de água aumenta a capacidade resistente da pasta. Com isso, as fissuras passam a “cortar” os agregados, e esses tornam-se os delimitadores da resistência do concreto. A pasta, entretanto, continua sendo um elemento heterogêneo e poroso, e suas propriedades serão decisivas para uma maior ou menor resistência.

2. MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO

A produção de concreto de alto desempenho exige uma seleção criteriosa dos materiais a serem utilizados, com o intuito de se garantir uma boa trabalhabilidade e uma resistência elevada. Em geral, a dosagem deste tipo de concreto é feita com o uso de cimento, agregados, adições minerais, aditivos químicos, e água.

2.1. Cimento

O cimento mais adequado para a produção de CAR é, de acordo com ACI 363R (1992), aquele que apresenta menor variabilidade em termos de resistência à compressão, não existindo critérios

específicos para tal.

A escolha do tipo de cimento, segundo PINTO JUNIOR (1992), para produção dos concretos de alta resistência depende de critérios reológicos e critérios de resistência mecânica. METHA e AITCIN (1990), comentam que "... com qualquer tipo de cimento é possível produzir concretos de alta resistência, sendo preferível, no entanto, o cimento Portland comum e aqueles com elevados teores de C_3S e C_2S ."

O cimento ARI requer mais água em comparação, por exemplo, com um cimento composto com cinza volante e para um mesmo abatimento. O consumo, usualmente empregado na obtenção do CAR, varia de 400 kg/m^3 a 600 kg/m^3 , conforme ACI 363R (1992), ALMEIDA (1990) e SHAH & AHMAD (1994).

2.2. Agregados

Os agregados usados em concretos de alta resistência podem ser materiais naturais (areia, pedregulho e pedra britada) ou artificiais (argila expandida).

Os agregados dividem-se em graúdo e miúdo, em função da dimensão máxima característica dos grãos, e ocupam 60% a 80% do volume de concreto. As características que mais influenciam na resistência à compressão dos concretos são: a resistência à compressão do agregado, módulo de deformação longitudinal da rocha mãe, granulometria, diâmetro máximo característico, módulo de finura, forma, textura superficial, natureza mineralógica e absorção.

2.2.1. Agregados graúdos

Os agregados graúdos apresentam uma maior influência na resistência dos concretos de alta resistência, pois devido ao fortalecimento da zona de transição a ruptura do concreto se dá no agregado graúdo, havendo assim uma relação entre a resistência da rocha mãe do agregado e a resistência do concreto.

Em relação à forma e textura superficial, é sabido que a forma angular e a superfície áspera, como a maioria das pedras britadas, geralmente resultam em maior aderência que a obtida em superfícies lisas e formas esféricas. A angulosidade excessiva deve ser evitada, pois provoca o aumento da quantidade de água necessária para obter a trabalhabilidade desejada. A forma ideal parece ser então a cúbica.

2.2.1. Agregados miúdos

Quanto ao agregado miúdo, tanto as areias naturais quanto as artificiais podem ser utilizadas para obtenção de concreto de alta resistência. No entanto é preferível que se use uma granulometria descontínua, apresentando preferivelmente um módulo de finura entre 2,7 e 3,2, ou seja, classificado como grosso. Segundo ALMEIDA (1990), isto é para que haja menor demanda de água de amassamento, e pelo fato deste tipo de concreto já apresentar grande quantidade de finos devido ao maior consumo de cimento e uso de sílica ativa.

2.3. Adições Minerais

Os concretos de alta resistência podem ser obtidos com as adições pozolânicas normalmente utilizadas, como cinza volante ou escória de alto forno. Entretanto, adições pozolânicas ultra-finas, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, têm-se mostrado mais efetivas no aumento da resistência, pois, além do efeito químico, atuam fisicamente densificando a matriz e a zona de transição.

Segundo a ASTM C1240 (1993), sílica ativa é um material pozolânico de alta finura composto basicamente de sílica amorfa, produzida a partir de fornos de arco voltaico, como subproduto decorrente da obtenção do ferro sílico ou silício metálico, que contem em sua composição química um percentual mínimo de 85% de dióxido de silício (SiO_2).

A zona de transição do concreto apresenta uma espessura média entre $10\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$, rica em hidróxido de cálcio CH e com maior concentração de poros. A sílica ativa atua basicamente na zona de transição, apresentando dois efeitos: o efeito micro-filler e o efeito pozolânico.

Como as partículas de sílica ativa são extremamente pequenas e de forma esférica, sua superfície específica é muito grande, $20\text{m}^2/\text{g}$, isto faz com que haja uma rápida reação com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), produzindo um gel resistente de cálcio hidratado semelhante ao formado na hidratação do cimento.

2.4. Aditivo Químicos

Aditivos são substâncias que modificam as propriedades do concreto quando incorporados a ele. No caso de CARs os aditivos fundamentais são os superplastificantes que são capazes de propiciar a obtenção conjunta de trabalhabilidade adequada com baixas relações água/cimento.

A maioria dos aditivos superplastificantes são obtidos através da polimerização por condensação do formaldeído com o naftaleno sulfonado ou com a melanina sulfonada, podendo ainda existir os formados por lignosulfonados modificados.

A ação dos superplastificantes é fundamentalmente de dispersão das partículas de cimento, as cadeias moleculares de alto massa se adsorvem às paredes dos grãos de cimento neutralizando suas cargas elétricas na periferia, causando a repulsão eletrostática entre os mesmos, e, atraindo ao mesmo tempo, através de suas ramificações aniônicas, moléculas de água que envolvem em todo o contorno o grão de cimento, DUCATTI (1993).

A quantidade de superplastificante é função da trabalhabilidade requerida, devendo-se optar por um consumo mínimo pensando na redução do custo do concreto. Os fornecedores indicam 3% do consumo de cimento como máximo de quantidade de superplastificante, em média utiliza-se 1,5%. Recomenda-se, também, que a parcela de água contida no superplastificante seja abatida da água utilizada, onde a quantidade de material sólido é em torno de 25% a 30%.

2.5. Água

A qualidade da água utilizada na produção de concreto de alto desempenho deve obedecer às mesmas especificações usadas nos concretos usuais, deve apresentar satisfatória isenção de matérias orgânicas e de substâncias estranhas e nocivas que possam provocar a deterioração do mesmo.

3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

3.1. Resistência à Compressão

A resistência à compressão é considerada geralmente a propriedade mais importante do concreto, pois fornece uma estimativa do desempenho do concreto no que diz respeito a resistência mecânica e indiretamente a sua durabilidade.

Essa resistência é obtida através da aplicação de forças em corpos-de-prova cilíndricos ou cúbicos de diferentes tamanhos, dependendo da normalização de cada país. No Brasil, a resistência à compressão do concreto é obtida através do ensaio padronizado pela NBR 5739/80, a partir de corpos-de-prova cilíndricos de 15cm x 30cm. Quando se trata de altas resistências, o uso destes geram dificuldades pela necessidade de grande capacidade da máquina de ensaio. A solução utilizada é a redução das dimensões dos corpos-de-prova, adotando-se 10cm x 20cm, mantendo-se a relação de duas vezes entre a altura e o diâmetro da base, e respeitando ainda a exigência do diâmetro do corpo-de-prova ser maior que quatro vezes o diâmetro máximo do agregado.

Os corpos-de-prova cilíndricos menores apresentam maior resistência se comparados com os maiores. METHA & MONTEIRO (1994) e SHAH & AHMAD (1994) indicam que essa correlação é em torno de 5%. CARRASQUILLO et al. (1981), em estudo feito sobre esse efeito, indica correlação de 10%. Nos Estados Unidos e na França, adotam-se o cilindro com dimensões de 15cm x 30cm e 16cm x 32cm, respectivamente. Na Alemanha e na Noruega são utilizados corpos-de-prova cúbicos com dimensões de 14cm e 10cm de aresta, respectivamente.

O acabamento dado no topo do corpo-de-prova é de grande importância para os resultados esperados nos ensaios. A capacidade resistente do material utilizado para o capeamento dos corpos-de-prova de CAR pode afetar os resultados obtidos no ensaio. Se a resistência à compressão ou módulo de deformação do material de capeamento for menor que o do corpo-de-prova de concreto, as ações aplicadas através do capeamento não serão transmitidas uniformemente, resultando em uma grande variabilidade nos resultados.

3.2. Resistência à Tração

Segundo DE LARRARD & MALIER (1992), o concreto atinge o valor máximo da resistência à tração por volta dos 14 dias de idade, ao contrário do valor da resistência à compressão, que pode crescer ainda 10% a 20% do seu valor aos 14 dias.

A resistência à tração apresenta uma relação com a resistência à compressão. Em geral aumentando-se a resistência à compressão, a resistência à tração também aumenta, mas a relação para CARs não é a mesma que para os concretos usuais.

A resistência à tração em corpos-de-prova cilíndricos por compressão diametral é calculada segundo a NBR 7222/82 da seguinte forma:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{p \cdot d \cdot L} \quad (1)$$

onde: $f_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, em MPa;
 F = força máxima obtida no ensaio, em kN;
 d = diâmetro do corpo-de-prova, em mm;
 L = altura do corpo-de-prova, em mm.

O Código Modelo - MC90 CEB-FIP (1991), para concreto com resistência à compressão entre 12MPa e 80MPa, em corpos-de-prova cilíndricos de 15cm x 30cm, indica a equação 2 para determinar a resistência característica à tração.

$$f_{ctk} = 0,30f_{ck}^{2/3} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

onde: f_{ctk} = resistência característica à tração;
 f_{ck} = resistência característica à compressão, obtida em ensaios de corpos-de-prova cilíndricos de 15cm x 30cm.

A norma norueguesa NS 3473E (1992), que é válida para concreto com resistência à compressão entre 20MPa e 94MPa, determinadas para corpos-de-prova cilíndrico de 15cm x 30cm, indica a equação 3 para cálculo da resistência à tração característica limitando um valor nominal máximo de 4MPa.

$$f_{tk} = 0,30f_{ck}^{0,6} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

onde: $f_{t,k}$ = resistência à tração;
 $f_{c,k}$ = resistência característica à compressão, obtida em ensaios de corpos-de-prova cúbicos de 10cm de aresta.

A resistência característica à tração axial é correspondente a 2/3 do valor obtido a partir do ensaio de compressão diametral.

CARRASQUILLO et al. (1981), baseando-se em resultados de ensaios à flexão em corpos-de-prova prismático, e com resultados de ensaios à compressão diametral em corpos de prova cilíndricos, propõe para a resistência à tração no concreto, para $21 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 83 \text{ MPa}$:

$$\begin{aligned} f_{tk} &= 0,94\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}), & \text{na flexão;} \\ f_{tk} &= 0,54\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}), & \text{na compressão diametral.} \end{aligned} \quad (4)$$

onde: $f_{t,k}$ = resistência à tração;
 $f_{c,k}$ = resistência à compressão medida em corpos de prova cilíndricos de 10cm x 20cm.

3.3. Módulo de Deformação Longitudinal

O aumento do módulo de deformação (E_c) do CAR em relação ao concreto convencional, é, æ-

gundo DE LARRARD & MALIER (1989), consequência da maior rigidez da argamassa e maior aderência pasta - agregado. Entretanto, o aumento do módulo de deformação não se dá com a mesma intensidade do aumento da resistência à compressão.

O módulo de elasticidade do CAR é fortemente afetado pelas propriedades elásticas do agregado graúdo. A boa aderência na interface entre o agregado graúdo e a argamassa resulta em um material composto, cujos componentes são a pasta de cimento e o agregado graúdo, DUCATTI (1993).

Na falta de determinação experimental, a previsão do módulo de deformação pode ser feita segundo as seguintes normas técnicas:

a) Pela NBR 6118 (2003), para concretos com $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ e massa específica entre 2000kg/m^3 e 2800kg/m^3 , o módulo de deformação longitudinal tangente pode ser estimado pela equação 5.

$$E_{ci} = 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

Nesta equação ainda não foi levado em conta os concretos de alta resistência, e a resistência característica à compressão é medida em corpos-de-prova cilíndricos de 15cm x 30cm. Para estimar o módulo de deformação longitudinal secante (E_c), a NBR 6118 (2003) reduz o módulo tangente em 15%.

$$E_c = 4760 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

b) O ACI 318 (1995), propõe para estimar o módulo de elasticidade do concreto com $f_{ck} \leq 41\text{MPa}$ e massa específica entre 1442kg/m^3 e 2442kg/m^3 a equação 7, onde a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) é medida em corpos-de-prova cilíndricos de 15cm x 30cm.

$$E_c = 4730 \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

c) O Código Modelo do CEB-FIP (1991), indica para o módulo de deformação longitudinal tangente a equação 8, para $f_{ck} \leq 80\text{MPa}$.

$$E_c = 10^4 \alpha_e (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (8)$$

onde: f_{ck} = resistência característica à compressão obtida em corpos-de-prova cilíndricos de 15cm x 30cm;

α_e = coeficiente para considerar o enfeito do tipo de agregado cujos valores estão apresentados na Tabela 2.

Para o estimar o módulo secante, reduz-se o módulo tangente em 15%, equação 9.

$$E_c = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad (\text{MPa}) \quad (9)$$

Tabela 2 - Efeito do tipo de agregado no módulo de deformação longitudinal

Tipo de agregado	α_e
Basalto	1,2
Quartzo	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

Fonte: MC90 CEB-FIP (1991)

d) A norma norueguesa NS 3473 (1992), estabelece a equação 10 para estimar o módulo de deformação longitudinal secante do concretos com resistências características à compressão entre 20MPa e 94MPa.

$$E_c = 9500 f_{ck}^{0,3} \quad (\text{MPa}) \quad (10)$$

onde: f_{ck} = resistência característica à compressão obtido em corpo-de-prova cilíndrico de 15cm x 30cm.

CARRASQUILLO et al. (1981) apresenta a equação 11, onde tal equação pode ser usada na análise de concretos com resistência à compressão entre 21MPa e 83MPa. A equação é função da resistência característica à compressão do concreto medida em corpos-de-prova cilíndricos de 10cm x 20cm.

$$E_c = 3320\sqrt{f_{ck}} + 6900 \quad (\text{MPa}) \quad (11)$$

3.4. Coeficiente de Poisson

A relação entre a deformação transversal e longitudinal ainda não está bem definida para concretos de resistência à compressão superior a 50MPa. De acordo com NEVILLE (1997), não está bem estabelecido de que maneira a idade, resistência ou outras propriedades do concreto afetam o coeficiente de Poisson (ν).

Para os concretos de resistência usual, NEVILLE (1997) indica que o coeficiente de Poisson situa-se na faixa de 0,15 e 0,20. Os concretos de alta resistência apresentam valores, para os coeficientes de Poisson, menores que os adotados para os concretos de resistências usuais.

Segundo DUCATTI (1993), em se tratando de CAR, há queda no coeficiente de Poisson de 0,23 para 0,20. Provavelmente isto é consequência da densificação do material, à medida que ele se aproxima de um sólido sem vazios. ALMEIDA (1990), indica que, embora com grande dispersão de resultados, o coeficiente de Poisson apresentou variação inversamente proporcional à da resistência à compressão.

4. APLICAÇÃO DO CAD

4.1. Aplicações em Edifícios

As primeiras pesquisas sobre o CAD surgiram na Noruega e na Dinamarca em 1976 e atualmente estão sendo desenvolvidas em vários outros países. As aplicações do CAD tiveram início na execu-

ção de pilares. Em COLACO (1985), Boletim 197 CEB-FIP(1990) e ACI 363R(1992) observa-se o uso do concreto de alto desempenho na execução de edifícios altos, variando de 30 a 79 andares, como é o caso do Water Tower Place de 1979 e South Wacker Tower de 1989, ambos em Chicago com 79 andares, e do Texas Commerce Plaza em Houston 1981 com 57 andares. As resistências empregadas variam de 45MPa a 115MPa, esta última usada no Two Union Square em Seattle com 58 andares.

Iniciadas em 1993 e concluídas em março de 1996, as *Petronas Towers*, mostradas na Figura 1, em Kuala Lumpur, capital da Malásia, com 452m de altura, são as maiores torres do mundo e estão entre as maiores obras de Engenharia do planeta, conforme SOUSA (1997). Foram erguidas em estrutura mista, que combina concreto e aço, tomando partido das melhores características dos materiais. As torres são interligadas por uma ponte metálica nos 41.º e 42.º andares. Optou-se por uma estrutura em concreto de alto desempenho com f_{ck} de 80MPa até o 60.º andar, ponto de transição para uma estrutura em aço-carbono. Os pilares de concreto são dispostos em círculo e interligados por vigas de aço, sobre as quais repousam lajes de concreto moldadas em fôrmas metálicas incorporadas à estrutura. Essa mesma solução foi aplicada até o 88.º pavimento. Nas fundações, foram usadas estacas-barrete sobre as quais se apoiaram blocos de concreto com f_{ck} de 60MPa. Segundo ROCHA (1997), o edifício do MASP, em São Paulo, Figura 2, pode ser considerado o pioneiro em concreto de alta resistência, sem utilização de aditivos, sílica ativa ou superplastificantes. Com resistência média em torno de 45MPa, exigiu um grande trabalho no estudo da dosagem e execução especial com relação à vibração e cura, com diversos operários vibrando o concreto ao mesmo tempo. A baixa relação água/cimento, em torno de 0,32, ajudou a obter essa resistência; a obra teve consumo de cimento de 565kg/m³.



Figura 1: Petronas Towers, Kuala Lumpur - Malásia. [SOUSA (1997)]

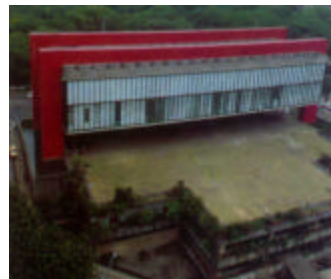


Figura 2: Edifício do MASP, São Paulo [ROCHA (1997)]

O Centro Empresarial Nações Unidas (Cenu), na cidade de São Paulo, mostrado a Figura 3, com 41 andares é formado por três torres, denominadas torres Oeste, Leste e Norte, e formam o maior edifício do país. A torre Norte, atualmente em construção, é a maior das torres; tem 84 mil m² de área construída e 158m de altura distribuídos em 36 pavimentos. De acordo com o responsável pelo projeto estrutural da obra, engenheiro Mário Franco, através do informativo Cimento Hoje abcp (1998), foi utilizado CAD nos pilares com f_{ck} igual a 60MPa e nas lajes de 35MPa possibilitando importantes ganhos no projeto. A torre Oeste já está pronta, mas, como sua construção foi a primeira a ser iniciada, ela não foi executada com CAD, pois essa tecnologia era pouco disseminada na época do projeto. Já a torre Leste, ainda em fase de fundação, vai usufruir da mesma tecnologia

empregada na torre Norte, e como ela é gêmea no formato da torre Oeste, economizou-se muito no consumo de armadura.

O CAD teve, no Brasil, maior aplicação em Salvador - BA a partir de 1992. A primeira obra foi o Centro Empresarial PREVINOR, que pode ser visto na Figura 4, formado por dois blocos de 18 andares cada, sendo que além dos pilares, o CAD foi usado nas lajes, na região dos pilares de canto, numa área de aproximadamente $1m^2$, visando absorver as tensões de cisalhamento em torno dos pilares.



Figura 3: Centro Empresarial Nações Unidas, São Paulo.



Figura 4: Centro Empresarial PREVINOR, Salvador/BA. [LEITE & MIRANDA (1997)]

4.2. Aplicação em Recuperação de Estruturas

A aderência do CAD ao concreto antigo e sua elevada compacidade, com resistência ao ataque de agentes agressivos, torna-o ideal para reparos. Como exemplo pode-se tomar os reparos no túnel da rodovia Carvalho Pinto, em São Paulo, onde a aderência dos 40 corpos-de-prova ensaiados foi de 100%. Há também, segundo ROCHA (1997), estudos para aplicação do CAD na recuperação do pavimento da ponte Rio-Niterói - RJ, com 12% de sílica ativa, resistência de 92MPa aos 28 dias e deformação na ruptura em torno de 0,5‰.

O CAD vem se destacando muito em serviços de restauração de edificações. Devido à sua maior capacidade de aderência e impermeabilidade, ele foi recentemente adotado na recuperação estrutural do setor conhecido como "Tobogã", no estádio do Pacaembú, em São Paulo (Figura 5). Foi adotado, também recentemente, na recuperação da Ponte dos Remédios, nas Marginais Tietê, São Paulo, onde era preciso atender às especificações de alta resistência nas primeiras horas, com f_{ck} igual a 18MPa em 24 horas.



Figura 5: Estádio do Pacaembú, São Paulo - SP. [ROCHA (1997)]

4.3. Aplicações em Obras de Arte

4.3.1. Ponte sobre o Rio Maranhão

Outra grande aplicação do CAD no Brasil, foi na ponte do rio Maranhão, no Estado de Goiás, mostrado na Figura 6. Com 585m de extensão, a ponte tem 10,40m de largura e duas faixas de tráfego com pavimento rígido em concreto com resistência à compressão de 30MPa. Ela é a primeira do País em que se empregou concreto de f_{ck} superior a 50MPa. A princípio era proposto o uso de concreto convencional, no entanto, no decorrer das obras de fundação, foram feitos alguns estudos comparativos de custos, e os resultados demonstraram que o concreto de alto desempenho no trecho em balanço significava uma boa economia: 2,4% em fôrmas, 2,3% em concreto, 21,3% em armadura passiva e 14,2% na protensão. Essa economia equivalia a 10% do total da obra.



Figura 6: Ponte sobre o rio Maranhão, Goiás.

4.4.2. Museu de Arte Contemporânea – Niterói / RJ

Projeto do arquiteto Oscar Niemeyer, projeto estrutural do engenheiro Bruno Contarini. A obra foi executada com concreto de 35MPa de resistência.



Figura 7: Museu de Arte Contemporânea – Niterói.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho faz um levantamento bibliográfico sobre o concreto de alto desempenho mostrando seu conceito, suas propriedades e algumas aplicações feitas com este material no Brasil e no Exterior.

As propriedades mecânicas são de grande importância para utilização destes concretos em elementos estruturais, onde a resistência à compressão corresponde uma das principais características deste concreto.

O concreto de alto desempenho se mostra um excelente material que pode ser aplicado em diversas situações na construção civil, tal como, elementos estruturais, recuperação de estruturas, obras es-

peciais, etc. Além de apresentar uma excelente durabilidade, o que pode levá-lo a ser o concreto do século XXI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, I. R. de (1990). *Bêões de alta resistência e durabilidade: composição e características*. Lisboa 740p. Tese (doutorado) Universidade Técnica de Lisboa.
- AMARAL FILHO, E. M. (1993). *Concreto de alta resistência*. São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland. 75p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363R (1992). *State of the art report on high strength concrete*. Detroit, 55p.
- _____. Committee 318R (1995). *Building code requirements for reinforced concrete*. Detroit.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1993). *Standard Specifications for Silica Fume for Use in Hydraulic-Cement and Mortar*. ASTM C 1240-93, Philadelphia.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2003) NBR 6118 – *Projeto e execução de obras de concreto armado*. Rio de Janeiro.
- _____. (1980) NBR 5739 - *Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto*. Rio de Janeiro.
- _____. (1982) NBR 7222 - *Argamassa e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- _____. (1992) NBR 8953 - *Concreto para fins estruturais: classificação por grupos de resistências*. Rio de Janeiro.
- CARRASQUILLO, P. M.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. (1981). *Properties of high strength concrete subject to short-term loads*. ACI Materials journal, p.171-181, May-June.
- CEB (1991). CEB-FIP model code 1990. *Bulletin d'Information*, n.203-205, July.
- CEB (1990). Working Group on High-strength Concrete (1990), *High strength concrete- state of the art report*. CEB Bulletin d'Information, n.197, ago.
- Cimento Hoje abcp (1998). *Informativo da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland*, Ano II Nº 19 Dezembro de 1998.
- CIVIL ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION.(1993). *High-performance construction materials and systems: an essential program for America and its infrastructure*. Washington, CERF/ASCE. Technical Report 93-5011
- COLACO, J. P. (1985). *75-Story Texas commerce plaza, Houston - the use of high-strength concrete*. In: RUSSEL, H. G., ed. Detroit, ACI. p.1-8 (SP-87)
- DAL MOLIN, D. C. (1995). *Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de sílica ativa*. São Paulo. 286P. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- DE LARRARD, F.; MALIER, Y. (1989). *Propriétés constructives des betons à très hautes performances: de la micro à la macrostructure*. Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Série: Beton 268, n.479, p.77-109, dec.
- DUCATTI, V. A. (1993). *Concreto de elevado desempenho - estudo de aderência com a armadura*. São Paulo. 374P. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- LEITE, M. F.; MIRANDA, M. (1997). *Estruturas Criativas*, Newsletter da Leite e Miranda Engenheiros Associados, Ltda., Salvador - BA. v2.1, mar.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994). *Concreto: estrutura, propriedade e materiais*. São Paulo, Pini, 573p.
- NEVILLE, A. M. (1997). *Propriedades do concreto*. São Paulo, Pini.
- NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. (1987). *Concrete Technology*. England: Longman Scientific & Technical, 439p.
- NS 3473 E (1992). *Concrete structures: design rules*. 4 ed. Oslo, Norway, nov.
- PINTO JUNIOR, N. O. (1992). *Flexão de vigas de concreto de alta resistência*. São Paulo. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ROCHA, S. (1997). *Desempenho medido na Prática*. Revista de tecnologia da construção - Téchn. São Paulo, n.29, p.14-22, jul-ago.
- SHAH, S. P.; AHMAD, S. H. (1994). *High performance concrete and applications*. London, Edward Arnold, 402 p.
- SOUSA, M. (1997). *As Torres Prateadas*. Revista de tecnologia da construção - Téchn. São Paulo, n.30, p.50-53, set-out.
- VANDERLEI, R. D. (1999). *Análise Experimental de Pilares de Concreto Armado de Alta Resistência Sob Flexo Compressão Reta*. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Endereço do autor:

Romel Dias Vanderlei (rdvanderlei@uem.br) Professor Assistente - Doutorando em Engenharia de Estruturas (EESC/USP).	Universidade Estadual de Maringá Departamento de Engenharia Civil Av. Colombo, 5790 CEP 87020-900, Maringá – Pr Telefone/Fax: (44) 261 -4322
--	--