téchne
www.revistatechne.com.br IMPRIMIR

REPORTAGEM

» Concretos de alta resistência

O concreto de alto desempenho já é uma realidade no Brasil e o emprego de concretos com resistências maiores que as usuais - de 40 a 50 MPa - tem se difundido muito nos últimos anos. As empresas de concreto pré-misturado, bem como os centros de pesquisa, estão capacitados a obter esses concretos usados principalmente em estruturas de edifícios, pontes e pré-moldados, reduzindo a seção de pilares e cargas nas fundações e aumentando a durabilidade. No entanto, ultrapassar a barreira dos 100 MPa com um concreto dosado em central e aplicado em uma estrutura real, com vantagens econômicas e técnicas foi, por muito tempo, um sonho a ser realizado pela engenharia nacional.

Esse foi o grande desafio que motivou construtores, consultores, calculistas, empreendedores e fornecedores de concreto a, no final de 2001, desenvolverem um concreto resistente e durável, capaz de romper a barreira dos 100 MPa em obra. A realidade foi muito além dessa resistência e levou o Brasil ao recorde mundial, com o uso do concreto colorido de alto desempenho fck 115 MPa, com resistência média de 125 MPa e máxima de 149,5 aos 28 dias e 155,5 MPa aos 63 dias.

A história da engenharia brasileira apresenta obras pioneiras e grandes recordes em estruturas de concreto entre os quais podem ser citados o Edifício A Noite, no Rio de Janeiro (1928), com recorde mundial em altura de 103 m. Em São Paulo, podem ser citados o Edifício Martinelli com 106 m, de 1929, e o Edifício Itália, de 1959, com 168 m de altura.

Outro recorde alcançado pelo Brasil foi o de maior vão livre em laje reta com o Masp (Museu de Arte de São Paulo), obra pioneira de concreto de alto desempenho (fck igual a 45 MPa) em 1968. No Edifício Cenu (Centro Empresarial Nações Unidas) o recorde foi de bombeamento do concreto com uma só bomba a uma altura de aproximadamente 158 m e o de maior volume de CAD já empregado em uma obra no Brasil - fck 50 MPa - considerado relativamente alto para os padrões até então empregados no País, com resistência média aos 28 dias de 60 MPa.

e-Tower

O e-Tower é um edifício comercial com 162 m de altura (do piso do 4o subsolo à cobertura), localizado na Vila Olímpia em São Paulo, em construção pela Tecnum.

O desafio seguinte foi a produção do CAD colorido. A dosagem e o estudo de laboratório foram desenvolvidos em conjunto pelo consultor de concreto e sua equipe e a empresa responsável pelo fornecimento do concreto.

O CAD como solução

O CAD foi a solução técnico-econômica apresentada à Tecnum para o edifício e-Tower, em decorrência da necessidade de se reduzir as dimensões dos pilares da fachada Norte que apresentavam elevada carga nos subsolos. O estudo inicial previa uma seção resistente da ordem de 0,80 m², algo em torno de 90 x 90 cm. Isto, para o fck, resistência característica à compressão de 40 MPa adotada para todo o edifício (já considerado um fck alto para os padrões brasileiros).

Mas a arquitetura solicitava que as dimensões máximas desses elementos estruturais não ultrapassassem 60 x 70 cm. Para tanto, aumentou-se o fck do concreto para 80 MPa e todo o cálculo estrutural foi refeito pela equipe do calculista estrutural Ricardo França. A figura 5 apresenta a solução adotada (fck 80 MPa) comparada a um pilar com fck 40 MPa.

O que condicionou o emprego do CAD, além da elevada durabilidade, foi a distância necessária entre pilares para permitir o encaixe de duas vagas médias: no mínimo 4,2 m, sendo o mais aconselhável 4,40 m - na cidade de São Paulo, o Código de Obras estabelece que a vaga média deve ter no mínimo 2,10 m de largura.

Além disso, para não prejudicar a circulação dos veículos nem desrespeitar o projeto aprovado na Prefeitura, os pilares deveriam facear o corredor de forma alinhada e a maior dimensão estar limitada a 70 cm.

O emprego do CAD de 80 MPa (fck de projeto) cumpriria com folga esses requisitos e ainda traria benefícios extras à estrutura tais como durabilidade, aumento da vida útil e maior módulo de elasticidade, além de ter a maior resistência à compressão característica já empregada em obra, 80 MPa, com resultados de fck de 115 MPa. Tal fato levou ao maior módulo de elasticidade já empregado em uma obra: 47,9 GPa, pelo que se tem notícias na literatura internacional.

Da concepção inicial à produção do CAD

Após a reformulação da condição inicial o passo seguinte foi a seleção criteriosa dos materiais e o rigoroso controle da qualidade: os concretos de alto desempenho, com resistência à compressão acima de 40 MPa requerem materiais constituintes de boa procedência e alta qualidade.

Foram utilizados, necessariamente, cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), como agregado miúdo, a areia de quartzo Itaporanga também conhecida como areia rosa. Como agregado graúdo foi empregada brita 1 basáltica, aditivos de última geração como hiperplastificante e estabilizador de hidratação, adições de sílica ativa e pigmento. Quanto à escolha dos agregados, levou-se em consideração para agregado miúdo aquele que necessitasse a menor quantidade possível de água para obter-se a máxima plasticidade ou fluidez do concreto fresco e que a brita escolhida apresentasse elevada resistência à compressão, baixo índice de abrasão Los Angeles, baixo teor de materiais friáveis, e boa aderência à pasta de cimento. Para tal escolha considerou-se que as maiores resistências são obtidas com basaltos e diabásios. O que levou ao basalto foi a disponibilidade no mercado.

Após a seleção, partiu-se para os estudos de dosagem do CAD realizado na Poli -USP e no laboratório da Engemix, empresa responsável pelo fornecimento do concreto. Até a definição do traço definitivo foram realizadas inúmeras moldagens, testes laboratoriais e ensaios e avaliações das propriedades do CAD em estudo.

Antes da concretagem propriamente dita, foram feitas simulações das condições reais de aplicação tais como tempo de mistura e transporte e também aplicação do CAD, para tanto foram concretados na própria obra alguns pilares para monitorar temperatura e comportamento do concreto, porém neste caso não foi empregado pigmento.

Os cuidados com a aplicação do CAD são relativamente simples e muito semelhantes aos concretos com resistências usuais. Para o controle da qualidade, porém, são necessários alguns cuidados extras como o capeamento adequado do corpo-de-prova. O capeamento com enxofre é recomendado para resistências menores que 60 MPa.

A prensa de ruptura dos corpos-de-prova deve atender à solicitação de carga imposta pela resistência elevadíssima do concreto, além da amostra estar protegida durante a realização do ensaio, pois a ruptura é explosiva, com estilhaçamento do concreto, diferente da ruptura mais dúctil, característica de concretos de menores resistências.

Assim, logo após o pico de carga aplicada, o concreto rompe-se de forma generalizada com menor tenacidade.

Figura 1 - *Edifício Martinelli: recorde de altura (106 m) na época da construção*

Figura 2 - *Centro Empresarial Nações Unidas com concreto fck 50 MPa: recorde brasileiro de bombeamento em altura e maior volume de CAD já empregado em obra no País*

Figura 3 - *O aumento de espaço no subsolo como conseqüência da redução das dimensões de alguns pilares e o emprego do CAD com resistência nunca antes empregada em obra possibilitou o uso da alta tecnologia de concreto. O primeiro desafio foi o desenvolvimento de um concreto com temperatura controlada, empregado no bloco de fundação (sapata principal). Tal solução foi adotada devido ao grande volume de concreto empregado, 805 m3, para o tamanho da peça: 14,60 x 26,90 m com altura de 2,30 m. Tal volume é decorrente da carga total recebida dos pilares que se apóiam nessa fundação: aproximadamente 27 mil t. O gelo empregado na mistura permitiu que a temperatura de lançamento não ultrapassasse os 21ºC. Sabe-se que em concretagens de grandes volumes há grande acúmulo do calor liberado pelas reações de hidratação do cimento que elevam a temperatura do concreto*

TABELA 1 - OS DEZ EDIFÍCIOS MAIS ALTOS DO BRASIL

Obra	Altura (m)	Ano	Pavimentos	Local
Zarzur Kogan Palace	189	1960	50	São Paulo
Edifício Conde Pereira Carneiro	172	1976	42	Rio de Janeiro
Edifício Itália	168	1956	45	São Paulo
Cenu – Torre Norte	167	1997	38	São Paulo
Universidade Cândido Mendes	165	1998	42	Rio de Janeiro
Rio Sul Center	164	1980	50	Rio de Janeiro
e-Tower	162	2004	42	São Paulo
Edifício Banespa	161	1947	35	São Paulo
Banco Central	150	1991	35	Brasília
Edifício Bank Boston Headquarters	145	2002	30	São Paulo

Fonte: www.skyscraperpage.com

Aplicação do CAD

A mistura do concreto foi realizada na Engemix de Taboão da Serra-SP, por ser um local de menor movimento de caminhões-betoneira, o que possibilitou um controle mais rigoroso dos materiais empregados. Foram controladas as temperaturas dos materiais e a umidade dos agregados em todas as concretagens.

O aditivo superplastificante e o estabilizador de hidratação foram dosados na central de concreto e toda a água do traço foi substituída por gelo, o que permitiu que a temperatura do concreto permanecesse em torno dos 21ºC na obra, onde a temperatura ambiente oscilou entre 25ºC e 31ºC (a maioria das concretagens foi executada no verão).

O transporte da central até a obra durava em torno de 50 minutos. Foram empregados dois caminhões-betoneira, cada um com 4 m3 de concreto, o que possibilitou a concretagem dos cinco pilares de cada pavimento por vez.

A concretagem dos pilares foi realizada com caçambas e gruas, o adensamento feito com vibrador mecânico de imersão e com martelos de borracha nas faces das fôrmas. Devido ao alto consumo de cimento, uso de sílica ativa ou metacaulim, pigmento e aditivo superplastificante e ainda de uma baixíssima relação água-cimento, esse concreto apresentou alto grau de coesão e em nenhum momento foi observada a segregação da mistura, permitindo, assim, a descarga do concreto sem interrupções. A figura 8 apresenta o lançamento do concreto com caçamba e grua.

O transporte, lançamento e adensamento de CAD devem seguir as recomendações básicas dos concretos convencionais com maior atenção no fato da enorme coesão das partículas, o que exige concretos de abatimento do tronco de cone um pouco maior que os usuais, ou seja, mais fluidos. No caso

do CAD do e-Tower o abatimento do concreto pelo Tronco de Cone apresentava entre 14 e 20 cm.

As fôrmas permaneceram por aproximadamente 72 horas e quando foram retiradas observou-se que nenhum pilar apresentou falhas de concretagem tais como bicheiras ou ninhos. A resistência à compressão obtida ficou acima de 45 MPa e dispensou qualquer tipo de cura.

A concretagem do encontro pilar-viga (cabeça dos pilares) foi executada em uma segunda etapa. As lajes e vigas foram concretadas com concreto de fck 40 MPa. A cabeça dos pilares, no entanto, precisava apresentar resistência mais alta - 80 MPa -, ou seja, compatível com a resistência empregada nos pilares para assegurar a monoliticidade da estrutura. Para tal, foi empregado o mesmo traço da concretagem dos pilares, porém sem pigmento.

Figuras 4 e 5 - *Pilar de alto desempenho HPCC do subsolo (à esquerda), comparado com pilar com fck 40 MPa também do subsolo. A redução da dimensão permitiu cumprir as exigências arquitetônicas e ganhar vagas nas garagens*

Figura 6 - *Lançamento do concreto*

Vantagens do CAD

Os concretos de alto desempenho destacam-se por apresentarem inúmeras vantagens em relação aos concretos convencionais, o que pode ser observado

na tabela 2, que apresenta o controle da qualidade realizado pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Foram moldados corpos-de-prova para a realização de ensaios nos concretos de alta resistência (fck de projeto de 80 MPa, que na realidade apresentou fck 115 MPa) e nos concretos de fck igual a 25 MPa (também empregados na obra e-Tower).

Da tabela 2 podem ser observadas as seguintes vantagens do CAD quando comparado a um concreto com resistência usual de 25 MPa:

- Altas resistências à compressão, tanto a baixas idades quanto a idades avançadas
- Reduzidíssima carbonatação e baixo coeficiente de difusão de cloretos levando a um aumento na vida útil da estrutura
- Reduzidíssima permeabilidade a gradientes de pressão de água e de gases
- Reduzido risco de corrosão de armaduras
- Elevado módulo de elasticidade, ou seja, pequenas deformações
- Ausência de exsudação
- Ausência de segregação no lançamento e adensamento
- Facilidade de execução
- Redução das cargas nas fundações
- Redução da seção dos pilares do subsolo. Como conseqüência tem-se uma redução do volume de concreto empregado, de fôrmas e armaduras e, ainda, diminuição de mão-de-obra. Na obra do e-Tower, o ganho foi de 16 vagas de estacionamento nos subsolos, o que representa aproximadamente US$ 80 mil pois cada vaga de estacionamento foi avaliada em US$ 5 mil

TABELA 2 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS PELA ABCP PARA OS CONCRETOS DE 125 MPa (f_{ck} 115 MPa) E 33 MPa (f_{ck} 25 MPa)

Propriedades		HPCC125 MPa (f_{ck} 115 MPa)	Concreto com 33 MPa (f_{ck} 25MPa)
Resistência à compressão axial NBR 5739	7 dias	111 MPa	18 MPa
	28 dias	125 MPa	33 MPa
	63 dias	141 MPa	37 MPa
	91 dias	155 MPa	40 MPa
Módulo de deformação NBR 7583	28 dias	47,9 GPa	33 GPa
Resistência à compressão diametral NBR 7222	28 dias	10 MPa	3,3 MPa
Profundidade de carbonatação 25°C, UR 65%, CO_2 5 %	91 dias	zero	28 mm
Determinação da absorção de água, massa específica e índice de vazios NBR 9778	Absorção após imersão (%)	0,35 %	5,1 %
	Absorção após imersão e fervura (%)	0,41 %	5,8 %
	Índice de vazios após saturação (%)	1,00 %	13,2 %
	Índice de vazios após saturação e fervura (%)	1,10 %	15,1 %
	Massa específica da amostra seca (kg/cm³)	2.500 kg/m³	2.320 kg/m³
Absorção de água por capilaridade NBR 9779	Absorção de água por capilaridade, após 72 h (kg/cm²)	1,20 kg/m²	12,0 kg/m²
	Ascensão capilar máxima interna, após 72h (mm)	zero	99 mm
Penetração de íons cloretos (ASTM C 1202) – Carga passante (C)		43 C	8.000 C
Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica (m/s) NBR 8802		4.950 m/s	3.250 m/s
Índice esclerométrico ASTM C 85		52 %	27 %

Fonte: Relatório ABCP

Figura 7 - *Encontro pilar-viga*

Conclusões

O CAD empregado foi dosado em uma central moderna de concreto, transportado e amassado em caminhão-betoneira típico e lançado em obra com gruas e caçambas usuais, adensado por vibradores comuns e curado com a manutenção da fôrma de madeira. Representa uma referência e um grande estímulo para o desenvolvimento da engenharia civil nacional no campo da qualidade das estruturas de concreto.

Tal feito é reconhecido nacional e internacionalmente. É mais uma vez o Brasil rompendo um recorde, dessa vez de resistência à compressão e módulo de

elasticidade de concreto em obra. Além do recorde ficaram evidenciados os benefícios técnicos e econômicos decorrentes da aplicação de um concreto com resistência à compressão característica de projeto de 80 MPa, que na prática foi de 115 MPa.

Paulo Helene
Professor titular da Poli-USP, presidente do Ibracon (Instituto Brasileiro do Concreto) e consultor em estruturas de concreto
Deputy Chairman of fib (CEB-FIP) Commission 5 "Structural Service Life Aspects" Chairman of Rede Rehabilitar

Carine T. Hartmann
M.Sc. Doutoranda da Poli-USP e engenheira do departamento técnico-comercial da Engemix
e-mail: carine.hartmann@poli.usp.br

Envie artigo para: techne@pini.com.br. O texto não deve ultrapassar o limite de 15 mil caracteres (com espaço). Fotos devem ser encaminhadas separadamente em JPG.