

Concreto de Elevado Desempenho

O Material para Construção das Obras no Ano 2000

Paulo R.L. Helene (*)

A partir do patenteamento do cimento Portland por Joseph Aspdin em 1824 na Inglaterra e a conseqüente difusão da fabricação mundial, o concreto tem sido o material de construção civil mais utilizado em todas as regiões do mundo. As estatísticas demonstram que o consumo de cimento médio mundial, per capita, tem aumentado progressivamente neste século, estando atualmente em torno de 210 kg/hab/ano, quase quatro vezes o consumo dos anos 50, conforme mostra a Tabela 1.

Ano/década	Consumo em kg/hab/ano
1920	19
1930	38
1940	40
1950	55
1960	104
1970	158
1980	203
1990	210

TABELA 1. Evolução do consumo médio mundial de cimento, per capita.

Essa enorme aceitação do concreto como um dos mais nobres materiais de construção civil se justifica pelas suas características excepcionais de versatilidade, durabilidade, economia e resistência. Através do emprego do concreto armado e posteriormente do concreto protendido tem sido

construída a maioria das obras de infra-estrutura dos países, assim como as edificações residenciais, comerciais e industriais.

Na última década e principalmente nesta, o concreto novamente vem demonstrando suas características de excepcional versatilidade. Enquanto na primeira norma brasileira de concreto, o "Regulamento para as Construções em Concreto Armado da Associação Brasileira de Concreto-ABC", publicado em 1931, a resistência máxima à compressão estava limitada em $f_{cd} \cdot 8$ MPa ($f_{c_{médio}} \cdot 26$ MPa), hoje em dia já é possível projetar no Brasil e no exterior estruturas com f_{cd} de 45 MPa ($f_{c_{médio}}$ de 65 MPa). Certamente no início do século vindouro será antieconômico projetar estruturas com concretos de $f_{cd} \cdot 50$ MPa, especialmente em edifícios altos, com mais de 35 andares e em pontes e viadutos de grande luz.

Essa evolução ocorrida a nível das características mecânicas dos concretos vem também, e principalmente, acompanhada de uma evolução positiva nas demais propriedades, especialmente aquelas relacionadas à durabilidade. É assim que a permeabilidade de concretos de alta resistência-CAR, chega a ser 10.000 vezes inferior à permeabilidade dos concretos convencionais. Outras propriedades e características tais como maior módulo, maior resistência à tração e ao cisalhamento, assim como reduzida carbonatação e difusão de cloretos são também observadas.

Por essas razões os concretos de elevada

As estatísticas demonstram que o consumo médio mundial de cimento está em torno de 210 kg/hab/ano



EXAME
EXAME S/C LTDA.-TECNOLOGIA

Matriz (Curitiba - Pr):
Fone/Fax: (041) 322-3020

Filial (Litoral do Pr):
Fone: 978-3514

Diretor - Eng.º Renato Claudio Keinert Jr.

- **Concreto:**
controle tecnológico, ensaios especiais, consultoria
- **Materiais:**
ensaios de qualificação e certificação.
- **Laudos:**
vistoria cautelar, patologias estruturais, perícias, auditoria de qualidade, sinistros.
- **Recuperação:**
diagnóstico, execução, perfurações, reforços e fiscalização.
- **Treinamento:**
cursos fechados e abertos, palestras, reuniões de grupos.

ARQUITETURA
COMPUTAÇÃO GRÁFICA

PERSPECTIVA E PLANTAS MOBILIADAS

- * POR COMPUTADOR
- * RAPIDEZ
- * RALISMO
- * PREÇO ACESSÍVEL
- * REALISMO
- * PAPEL FOTOGRÁFICO
- * TAMANHO ATÉ A0
- * FOLDER / PANFLETOS
- * BACKLIGHT EXTERNO



FERRARO

TEL.: (041) 322-3115

Rua Des. Motta, 2958 C/ta-PR CEP 80.430-200

O futuro e a consolidação do CED depende também de estudos em aditivos e adições que melhorem a estrutura da pasta e sua interface com os agregados

resistência são também denominados de concretos de elevado desempenho - CED¹, apropriados para os tempos atuais de tendência nítida de crescimento vertical das edificações, localizadas cada vez mais em atmosferas densamente urbanas ou industriais carregadas de agentes agressivos. O alto desempenho desses concretos abre também novas perspectivas de uso em obras industriais, tanques, reservatórios, obras enterradas em solo agressivo, canaletas e pisos sujeitos a produtos químicos ou elevada abrasão.

Por outro lado passar de uma resistência usual (cotidiana) de 16 MPa em 1940, para 25 MPa em 1990 e pelo menos 45 MPa no ano 2000, não é tão simples quanto parece. Há que convergir uma série de fatores conjunturais e técnicos, tais como: viabilidade econômica de estruturas mais esbeltas, solicitações mais elevadas, treinamento e especialização de mão-de-obra, uniformidade, controle e garantia da qualidade dos materiais componentes, equipamentos de mistura transporte e adensamento mais eficientes, desenvolvimento de aditivos, descoberta de adições ativas, refinamento dos métodos de introdução da segurança no projeto estrutural e nos correspondentes modelos de comportamento dos materiais, atualmente adotados.

O desenvolvimento tecnológico do CED ou HPC, também requer, entre outros, o uso de técnicas e equipamentos atualizados do tipo microscópio eletrônico de varredura, porosímetros de mercúrio e de gases, análises termodiferencial e de conhecimento profundo da físico-química do cimento, aditivos e adições que permitam entender os fenômenos em jogo, alterando-os na direção favorável. Assim, pesquisas no setor requerem trabalhos e esforços conjuntos de equipes multidisciplinares.

Por outro lado o CED ou HPC somente estará efetivamente à disposição do meio técnico a partir da existência de uma **norma brasileira** clara e atual, que confira a necessária tranquilidade aos projetistas e construtores em geral. A redação atual da "NB I da ABNT (NBR 6118) Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado", ainda não contempla concretos com resistência à compressão de projeto acima de $f_{cd} > 38$ MPa. Para alterar ou complementar essa norma há necessidade de responder, antes, várias questões técnicas através de estudos e pesquisas experimentais no Brasil e no mundo todo.

O Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo USP/PCC, ao lado de outras Instituições e grupos nacionais de pesquisa, tem procurado contribuir para o conhecimento dos parâmetros "estruturais" do HPC, tais como: módulo de deformação, resistência à tração e ao cisalhamento, fluência, relaxação, diagrama tensão-deformação, deformação específica e alongamento de ruptura, aderência concreto/armadura e outros. Para tal iniciou em 1988, um amplo programa de pesquisa, parte em convênio com a ENCOL e parte com apoio de Agências de Fomento, visando encontrar os parâmetros nacionais específicos para inclusão numa norma brasileira de projeto, construção e controle de obras de concreto armado. O trabalho já envolveu moldagem e ensaio de mais de 2500 corpos de prova com ensaios em idades de até 18 meses.

O futuro e a consolidação do concreto de alto desempenho depende não só de estudos em concreto mas também em aditivos e adições que melhorem a estrutura da pasta e sua interface com os agregados.

Não se pode raciocinar com HPC somente em relação aos materiais e sua composição estudada em condições "ideais" de laboratório. Certas adições somente conferem qualidades "extras" aos concretos convencionais na medida que também tenham uma cura adequada e úmida que assegure a continuidade das reações pozolânicas e até mesmo as de hidratação do cimento Portland, o que implica numa necessidade de mudança de práticas consagradas em obra, também. Da mesma forma, adensar e manipular um concreto de elevada coesão em substituição aos concretos plásticos convencionais, exige equipamento adequado e mão-de-obra treinada.

Cabe observar ainda que os próprios conceitos básicos de introdução da segurança no projeto estrutural precisam ser reanalisados. As estruturas de concreto submetidas a cargas de longa duração tendem a ter reduzidas as suas resistências devido ao fenômeno da relaxação, também conhecido no país por efeito Rusch. Esse efeito negativo de redução da resistência com o tempo, é normalmente compensado pela elevação da resistência à compressão do concreto com a idade, em função das reações de hidratação do cimento. No entanto está provado² que essa elevação é dependente do



ENGENHARIA E SERVIÇOS
R. Simão Brant, 945 - Uberaba - CEP 81570-340 - Curitiba - PR

Reformas e construções

**Alvenaria, pinturas, impermeabilizações,
hidráulica, elétrica e telhados.**

Fones: (041) 278-0573 / 974-3536 / 991-5225

tipo e natureza do cimento e principalmente é inversamente dependente da relação água/cimento, conforme mostrado na Tabela 2.

Relação a/c	Tipo de cimento	F _{c28 dias}	Coeficiente de Crescimento		
			3 dias	28 dias	91 dias
0,38	CP 32	42 MPa	0,54	1	1,14
	AF 32	50 MPa	0,38		1,23
0,78	CP 32	18 MPa	0,34	1	1,26
	AF 32	20 MPa	0,22		1,38
0,28*	CP 32	60 MPa	0,65	1	1,10
	AF 32	74 MPa	0,50		1,11

*valor obtido por extrapolação

TABELA 2. Coeficientes de evolução da resistência dos concretos.

Como se verifica na Tabela 2, para uma mesma resistência aos 28 dias de idade, em geral tomada como referência de projeto, há um crescimento para 91 dias de idade de 26% a 38% para concretos amassados com relação a/c de 0,78, enquanto esse crescimento cai a 14% a 23% no caso de relação a/c de 0,38, podendo chegar a bem menos de 10% no caso das faixas usuais de relação a/c utilizadas na obtenção dos HPC.

Por outro lado, considerando-se que a relaxação parece ser um pouco menor nos HPC, pode-se indagar se esse fato poderá compensar em parte esse problema, restabelecendo o mesmos níveis de segurança das estruturas com concreto convencional? Será conveniente alterar os coeficientes de ponderação γ_m (γ_c e γ_s) assim como γ_f ? Valerá a pena alterar o coeficiente 0,85 do cálculo atual de f_{cd} , que representa o efeito Rusch nos concretos convencionais? Essas e outras questões ainda não estão adequadamente respondidas, sendo objeto de estudos e pesquisas atuais na área.

Finalmente dentre os fatores conjunturais inclusive a necessidade de um parque industrial capaz de produzir cimento com resistência e características uniformes. A variabilidade da resistência do HPC é muito influenciada pela variabilidade da resistência do cimento. Pode-se expressar a variabilidade da resistência do concreto² como dependente principalmente da variabilidade da resistência do cimento e da relação água/cimento do concreto, através da equação:

$$s_c^2 = \frac{k_1 \cdot v_{cc}^2}{k^2 \cdot a/c} + \frac{K_1 \cdot \ln^2 k_2 \cdot s_{a/c}^2}{k^2 \cdot a/c} + s_e^2$$

onde; s_c = desvio padrão da resistência do concreto em MPa

v_{cc} = coeficiente de variação da resistência normal do cimento em MPa/Mpa

$s_{a/c}$ = desvio padrão da relação água/cimento no concreto em kg/kg

s_e = desvio padrão das operações de ensaio no concreto em Mpa

a/c = relação água/cimento em kg/kg

k_1 e k_2 = constantes da equação de Abrams que dependem do cimento e da idade de ensaio considerada.

Verifica-se então, conforme mostrado na Tabela 3, que enquanto o desvio padrão da resistência de um concreto de a/c=0,78 aumenta 9% quando a variabilidade do cimento passa de 5% para 10%, nos HPC, onde os concretos usualmente têm relação a/c = 0,25 a 0,30, o desvio padrão da resistência à compressão pode aumentar de 29%.

Relação a/c	F _{c28 dias}	Coeficiente de variação da resistência do concreto em função do coeficiente de variação da resistência do cimento - v_{cc}	
		$v_{cc} = 5\%$	$v_{cc} = 10\%$
0,38	50 MPa	4,46	5,34
0,78	20 MPa	3,38	3,70
0,28*	74 MPa	5,90	7,61

*valor obtido por extrapolação

TABELA 3. Desvio padrão da resistência dos concretos a 28 dias de idade.

Uma análise apressada do material concreto e do seu aglomerante cimento pode concluir que se tratam de materiais tradicionais onde tudo já está conhecido e dominado. Uma análise cuidadosa demonstrará, no entanto, que se trata de um material que por própria concepção estará em evolução permanente sendo impossível prever seus limites. Trata-se de um material de elevadíssimo potencial ecológico com capacidade de absorção de vários rejeitos industriais e ao mesmo tempo capaz de encerrar produtos tóxicos com eficiência ímpar. O **concreto de elevado desempenho - CED ou HPC ou CAD ou CAR**, é apenas uma das facetas desse "novo material" do século XXI.

¹ Ainda não há consenso nacional sobre que sigla deve ser adotada para representar os concretos de elevado desempenho - CED. Alguns preferem denominar CAR - Concretos de Alta Resistência, outros CAD - Concretos de Alto Desempenho que por confundir-se com a já conhecida sigla internacional de "Computer Aided Design" tem sido cada vez mais descartada. Talvez o ideal seja adotar a sigla internacional de HPC @ High Performance Concrete.

² HELENE, Paulo R. L. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland.** São Paulo, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP, 1987. (Tese de doutoramento)

(*) Prof^o Titular, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica PCC/USP. Caixa Postal 61.548, São Paulo, SP 05424-970. helene@usp.br

Trata-se de um material que por própria concepção estará em evolução permanente, sendo impossível prever seus limites