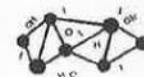


Concreto de elevado desempenho para o ano 2000



Paulo Helene

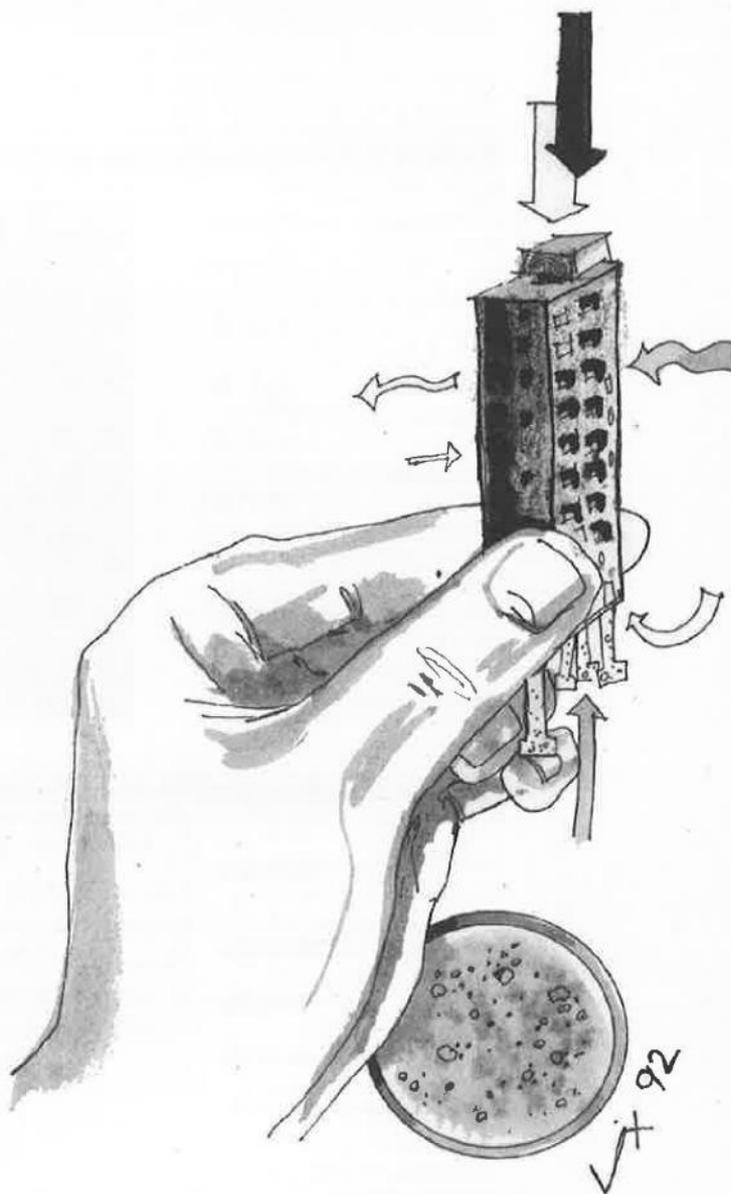
A partir do patenteamento do cimento Portland por Joseph Aspdin, em 1824 na Inglaterra, e a conseqüente difusão da fabricação mundial, o concreto tem sido o material de construção civil mais utilizado em todas as regiões do mundo. As estatísticas demonstram que o consumo de cimento médio mundial, *per 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.

Essa enorme aceitação do concreto como um dos mais nobres materiais de construção civil justifica-se 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 infraestrutura, 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 das Construções em Concreto Armado da Associação Brasileira de Concreto-ABC, publicado em 1931, a resistência máxima à compressão estava limitada em f_{cd} menor ou igual a 8 MPa ($f_{cmédio}$ menor ou igual a 26 MPa), hoje em dia é possível projetar no Brasil e no exterior estruturas com f_{cd} de 45 MPa ($f_{cmédio}$ de 65 MPa). Certamente no início do século vindouro será antieconômico projetar estruturas com concretos de f_{cd} menor ou igual 50 MPa, especialmente em edifícios altos, com mais de 50 andares e em pontes e viadutos de grande luz.

Essa evolução ocorrida nas 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 chega a ser 10 mil 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 resistência são também denominados concretos de elevado desempenho (CED), apropriados para os tempos atuais com nítida tendência 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 fazer convergir uma série de fatores conjunturais e

Tabela 1: Evolução do consumo médio mundial de cimento, per capita

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

Tabela 2: Coeficientes de evolução da resistência dos concretos

Relação a/c	Tipo de cimento	fc 28dias	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
0,25*	CP 32	60 MPa	0,65	1	1,10
	AF 32	74 MPa	0,50		1,11

*Valor obtido por extrapolação

Tabela 3: Desvio padrão da resistência dos concretos a 28 dias de idade

Relação a/c	fc28dias	Coeficiente de variação da resistência do cimento-Vcc	
		5%	10%
0,38	50 MPa	4,46	5,34
0,78	20 MPa	3,38	3,70
0,25*	74 MPa	5,90	7,61

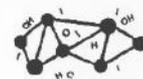
*Valor obtido por extrapolação

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 também requer, entre outros, o uso de técnicas e equipamentos atualizados do tipo microscópio

eletrônico de varredura, porosímetros de mercúrio e de gases, análise termodiferencial e conhecimento profundo da físico-química do cimento, aditivos e adições que permitam atender os fenômenos em jogo, alterando-os na direção favorável. É assim que pesquisas no setor requerem trabalhos e esforços conjuntos de equipes multidisciplinares.

O Depto de Engenharia de Construção Civil da Poli-USP, ao lado de outras instituições e grupos nacionais de pesquisa, tem procurado contribuir para o conhecimento dos parâmetros "estruturais" do CED, 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 envolveu moldagem e ensaio de mais de 2500 corpos de prova em idades de até 18 meses. O futuro e a consolidação do CED depende não só de estudos em concreto mas também de aditivos e adições que melhorem a estrutura da pasta e sua interface com os agregados.

Cabe observar também 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 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 provado em minha tese de doutorado (Poli-USP, 1987) que essa elevação é inversamente dependente da relação água/cimento, conforme mostrado na tabela 2.

Como se verifica na tabela 2, para uma mesma resistência a 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 apenas 10% a 11% no caso das faixas usuais de relação a/c para o CED.

Por outro lado, considerando que a relaxação parece ser um pouco menor no CED, pode-se indagar se esse fato poderá compensar em parte

esse problema, restabelecendo os mesmos níveis de segurança da estrutura convencional. Será conveniente alterar os coeficientes de ponderação g_m (g_c e g_s) assim como g_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 inclui-se a necessidade de um parque industrial

capaz de produzir cimento com resistência e características uniformes. A variabilidade do CED é muito influenciada pela variabilidade da resistência do cimento. Pode se expressar a variabilidade da resistência do concreto como dependente principalmente da variabilidade da resistência do cimento e da relação água/cimento do concreto.

Verifica-se então 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%, em CED, onde os concretos usualmente têm relação a/c=0,25, o desvio padrão da resistência à compressão pode aumentar de 29%.

Uma análise apresada do material concreto e do seu aglomerante cimento pode levar à conclusão de que se trata 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 CED é apenas uma das facetas desse "novo material".



O desenvolvimento tecnológico do cimento de elevado desempenho também requer o uso de técnicas e equipamentos atualizados do tipo microscópio eletrônico de varredura, porosímetros de mercúrio e de gases, análise termodiferencial e conhecimento profundo da físico-química do cimento.

Paulo Helene é professor doutor do Depto. de Engenharia de Construção Civil da Poli-USP.