

Capítulo 36

Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho

Bernardo F. Tutikian

UNISINOS

Geraldo Cechella Isaia

Universidade Federal de Santa Maria

Paulo Helene

PhD Engenharia & Consultoria

36.1 Introdução

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem, principalmente em conjunto com o aço, formando o concreto armado. Este material é amplamente dominado e bem utilizado, tanto por projetistas, construtores, operários da construção civil quanto por outros intervenientes do processo e é uma ótima opção para construções dos mais variados tipos.

Porém, cada vez exige-se mais dessa importante opção para estruturas. As notáveis evoluções do cálculo estrutural, principalmente com a disponibilização de programas computacionais, aliados ao maior conhecimento do comportamento mecânico do concreto e do aço, permitem que projetistas especifiquem estruturas cada vez mais arrojadas em concreto armado e protendido. Nessas aplicações, muitas vezes, o concreto convencional (CC ou OPC *Ordinary Portland Concrete*) não atende aos requisitos, ou há alternativas que apresentam uma relação técnica e econômica mais favorável. Por isso, foram desenvolvidas misturas especiais, com propriedades superiores aos CC, chamadas de Concretos de Alta Resistência (CAR ou HSC *High Strength Concrete*), Concretos de Alto Desempenho (CAD ou HPC *High Performance Concrete*), e até, de Ultra-Alto Desempenho (CUAD ou UHPC *Ultra-high Performance Concrete*). O desafio que se impõe à cadeia construtiva é torná-los uma opção viável economicamente para obras do cotidiano, fazendo com que o desenvolvimento que se obteve desses materiais em laboratório atravesse a barreira do mercado, tornando-se, assim, uma opção viável para as construções.

Há mais de 20 anos, a primeira menção sobre o termo Concreto de Alto Desempenho CAD foi realizada por Mehta & Aïtcin (1990). Foram estabelecidos os princípios gerais que regem esse tipo especial de concreto e as principais

características que o diferenciam do, até então, denominado CAR. É um artigo ícone, já que, até hoje, são empregados, com poucas modificações, os fundamentos nele indicados.

A incorporação de outros elementos no concreto, como aditivos, adições minerais, pigmentos e fibras e o uso de técnicas de execução diferenciadas, como a cura a altas temperaturas e pressões, permitem a obtenção de concretos de última geração, que poderiam, teoricamente, atender a qualquer solicitação de projeto, permitindo a execução de estruturas esbeltas, duráveis e seguras para o usuário final.

O uso do CAD vem suprir, também, a demanda por estruturas duráveis, e não apenas que atendam às necessidades do presente. Entende-se por estrutura durável aquela que resiste com segurança às solicitações externas na sua combinação mais desfavorável, porém com desempenho de serviço acima do mínimo. No Brasil, a ABNT NBR 6118:2007 estabelece um desempenho mínimo que deve ser seguido, representado a partir do conceito de Estado Limite de Serviço (ELS), como a especificação de limites de aberturas de fissuras, de deformações excessivas, entre outros.

Para se ter ideia de prazos, a ABNT NBR 15575:2010 preconiza, de forma pioneira no país, períodos de tempo em que a construção deve atender ao desempenho mínimo para o usuário (vida útil de projeto, com manutenção preventiva e corretiva), sugerido um mínimo de 40 anos para a estrutura¹.

Observa-se que tanto a ABNT NBR 6118:2007 quanto a ABNT NBR 15575:2010 mencionam de forma vaga a durabilidade da estrutura, tornando a questão subjetiva, a critério de interpretações dos envolvidos e tendo de recorrer-se a normas e códigos internacionais. Por essas exigências normativas e por conta das suas vantagens econômicas e sustentáveis, um concreto que garanta a durabilidade da estrutura é cada vez mais requisitado pelos profissionais envolvidos em projeto e execução.

A durabilidade do concreto vem aumentando com o passar dos anos, não apenas devido à demanda do mercado, mas, também, devido ao desenvolvimento de componentes que permitem atingir as especificações sem comprometer as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Pode-se dizer, então, que os aditivos químicos, principalmente os de terceira geração, e as adições minerais, como sílica ativa, metacaulim ou cinza de casca de arroz, são os responsáveis por esse desenvolvimento acelerado nos últimos tempos. Para atingir concretos duráveis, é necessário dosá-los com relação água/aglomerante (a/ag) inferior a 0,40, por exemplo, porém sem prejudicar a trabalhabilidade da mistura. Isso somente é possível quando se utilizam aditivos plastificantes e/ou superplastificantes

Mas é importante ressaltar que não adianta especificar um CAD de grande qualidade e durabilidade, se o projeto arquitetônico, o projeto estrutural, os controles de qualidade e a construção propriamente dita não estiverem à altura de um material potencialmente superior aos demais, mas que isoladamente não pode resolver tudo. Ressalte-se ainda a importância de corretos procedimentos de mistura, adensamento, acabamento, cura, desforma e manutenção na estrutura, pois, não basta ter uma dosagem bem realizada se a produção não o é.

¹ A ABNT NBR 15575:2010, que está em revisão e ainda não entrou em vigência, faz uma ressalva que, se os requisitos de desempenho forem atingidos sem o surgimento de manifestações patológicas significativas, decorridos 50% do prazo de vida útil de projeto (20 anos no caso da estrutura), considera-se atendido o requisito.

Por essas razões, quando se deseja projetar e construir edificações ou obras de infraestrutura de alto desempenho, devem-se planejar desde as fases iniciais do anteprojeto, projetos executivos de arquitetura, de estrutura, de instalações e outros – construção, uso e manutenção, de modo integrado para que todas essas fases estejam alinhadas no conceito de Construção de Alto Desempenho.

36.2 Definição

CAD é um material que apresenta comportamento durante a utilização da construção em patamar mais elevado que os CC, atendendo satisfatoriamente às exigências requeridas pelo proprietário ou pelo usuário em conformidade com os projetistas da estrutura de concreto. Entende-se por desempenho não apenas a resistência mecânica, mas também a trabalhabilidade, a estética, o acabamento, a integridade, e, principalmente, a durabilidade.

É comum confundir o CAD com o CAR, mas nem sempre um CAD é um CAR. Por exemplo, pode-se dosar um concreto autoadensável com relação a/ag de 0,40, cuja resistência à compressão seja de 35MPa. Este concreto, apesar de não ser um CAR, pode ser perfeitamente enquadrado como um CAD, devido a sua alta trabalhabilidade. E também pode ocorrer de um CAR não ser um CAD, por exemplo, um concreto de 80MPa de resistência à compressão, com abatimento do tronco de cone, realizado por meio do proposto pela ABNT NBR NM 67:1998, de 20mm, o qual será adensado em um pilar com grande densidade de armaduras. Por ser um concreto com alta resistência e baixa trabalhabilidade, ou seja, de grande coesão, é provável que não se consiga assentá-lo adequadamente nas fôrmas, podendo inclusive surgir falhas de concretagem. Assim, essa estrutura não será de alto desempenho, apesar de usar um CAR.

No Brasil não há uma definição consensual do CAD, apenas do CAR. A ABNT NBR 8953:2009 – *Concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência* - divide as misturas em duas classes. A classe I abrange concretos de resistência de 20 até 50MPa, com intervalos de 5MPa. Já a classe II, considerada a classe para os CAR, especifica os concretos de 55 até 80MPa (55, 60, 70 e 80MPa). É importante ressaltar que a ABNT NBR 6118:2007 utiliza essa mesma classificação. O ACI (*American Concrete Institute*) adota o mesmo limite de 55MPa para o concreto a ser um CAR.

O *fib* (CEB-FIP) *Model Code* 2010 (fib, 2010) classifica os concretos na base da sua resistência característica na série C12, C20 e daí, a cada 10MPa, até C120. Também divide os concretos em resistência normal abaixo de C50 e alta resistência acima deste valor.

Pelo exposto, a definição de CAR não contempla a de CAD, porque o primeiro enfoca a resistência mecânica como elemento básico da sua constituição, enquanto o segundo abrange todas as propriedades do concreto de modo holístico, focado no resultado final: o máximo desempenho global.

Encontra-se na bibliografia uma série de definições para CAD, algumas mais simples outras mais complexas. Segundo o ACI (1998), pode-se definir o CAD como:

um concreto que atenda uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade que não pode ser atingida rotineiramente com o uso de componentes convencionais e práticas normais de mistura, lançamento e cura.

O CAD deve apresentar, simultaneamente, alta trabalhabilidade, alta resistência e alta durabilidade. Claro que o conceito de ‘alta’ é subjetivo, mas pode ser entendido como acima do normal para determinadas aplicações. Para efeitos práticos, grande parte da literatura adota como parâmetro definidor do CAD aos concretos que apresentam relação a/c ou a/ag entre inferior a 0,4.

Mais recentemente, Aitcin (2008) definiu o CAD como um concreto “engenheirizado” no qual uma ou mais características específicas são realçadas por meio de seleção e proporcionamento adequado de seus constituintes. O autor admite que essa definição é vaga, entretanto tem a vantagem de indicar que não existe um único tipo de CAD, mas uma família de novos tipos de concreto, considerados de alta tecnologia, cujas propriedades podem ser adaptadas a condições industriais específicas.

36.3 Princípios básicos para o CAD

O CAD não é uma mistura nova, revolucionária, é apenas uma evolução dos CC, utilizando praticamente as mesmas matérias-primas, com os mesmos princípios básicos de resistência, de trabalhabilidade e de durabilidade. Porém, para superar os parâmetros anteriores, são necessários procedimentos especiais denominados de alto desempenho. Será realizada uma breve revisão sobre os procedimentos básicos a serem seguidos para se obter um CAD, mas, como esses procedimentos são basicamente os mesmos para um CC, abordar-se-ão apenas os específicos para os CAD.

Em essência, o princípio básico está fundamentado na diminuição da porosidade do concreto, por meio da modificação da estrutura dos poros (tipos, tamanhos e distribuição). Para atingir tal objetivo, as seguintes ações são necessárias:

- diminuição da relação água/aglomerante e da quantidade total de água por m^3 , através do uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes;
- otimização da granulometria dos agregados para aumentar o esqueleto inerte e obter maior compacidade, utilizando-se agregados graúdos de menor diâmetro máximo e adequada composição granulométrica dos finos;
- reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas, pelo uso de adições minerais que provocam o refinamento dos poros e dos grãos, especialmente do silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

As consequências diretas dessas ações se traduzem pela obtenção de microestrutura com poros de menor tamanho (refinamento das dimensões), diminuição da interconexão entre os poros (bloqueio dos canais), maior oposição à passagem de fluidos e, por fim, maior fixação de agentes dissolvidos pelo aumento das forças de superfície (potencial zeta). O resultado final dessas ações simultâneas se traduz em aumento da compacidade, da resistência mecânica, da durabilidade e, portanto, do desempenho.

Para densificar o concreto, é necessária a incorporação de partículas finas, às vezes menores do que o próprio cimento, o que confere ao CAD coesão e microestrutura densa. Essas partículas finas são preferencialmente as adições minerais, como a sílica ativa, o metacaulim ou a cinza de casca de arroz, também conhecidas como superpozolanas.

Por fim, ainda devem-se selecionar os agregados, principalmente os grãos, com cuidado, pois ao aumentar-se a resistência dos concretos, a fase agregado começa a ser a mais parte mais frágil da mistura, muitas vezes limitando a resistência final do compósito.

Assim, para transformar um CC em um CAD, além da incorporação de aditivos químicos, adições minerais e agregados de melhor qualidade, devem-se estudar as três fases da mistura. Academicamente, separa-se o concreto em fases, a pasta de cimento hidratada, a zona de transição e os agregados, apesar de a mistura ser um todo. Na realidade, uma fase interage com a outra, porém, para fins didáticos, desconsidera-se essa condição.

36.3.1 Fase pasta de cimento hidratada

Os poros considerados grandes, com diâmetro maior que 50nm , são os mais prejudiciais à obtenção de concretos compactos e resistentes, principalmente quando estão concentrados na interface agregado/pasta.

Para reduzir a porosidade da pasta, consequentemente aumentar sua resistência, é necessário reduzir a água e o ar aprisionado na mistura. Por exemplo, pode-se chegar a compósitos de até 800MPa de resistência à compressão, quando curados a cerca de 800°C e cerca de 50MPa de pressão (RICHARD & CHEYREZY, 1995). Esse tópico será tratado com detalhes no item 36.8 deste capítulo, mas é implícito que essas técnicas são difíceis de serem aplicadas em usos convencionais. Mas para obter pastas de cimento hidratadas para CAD de até 120MPa , pode-se atuar apenas na diminuição da relação a/ag , para valores abaixo de 0,30, em massa, mistura homogênea e seleção adequada da matéria-prima.

Deve ser lembrado que a resistência da pasta depende ainda do grau de hidratação dos compostos do cimento (C-S-H primário) e/ou do avanço das reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio para formação de silicatos de cálcio secundários. Dessa forma, a resistência mecânica da pasta depende de

relação a/c ou a/ag que controla a porosidade e, por consequência, a compacidade e, ainda, do grau de maturidade da pasta, ou seja, a quantidade de compostos hidratados no tempo, que é função da idade e do histórico da temperatura ambiente.

As características da pasta cimentícia dependem ainda da presença de adições minerais, geralmente pozolânicas como a sílica ativa, cinza volante, metacaulim e outras. Seus efeitos potenciais são: a) melhorar as propriedades reológicas da pasta, como coesão, fluidez, viscosidade plástica e resistência à segregação, em vista da alta finura que em geral apresentam; b) diminuir a exsudação pela segmentação dos canais de fluxo d'água; c) proporcionar o refinamento dos vazios devido à presença de C-S-H secundário que segmentam os poros entre as partículas; d) proporcionar o refinamento das dimensões dos cristais de hidróxido de cálcio remanescente das reações pozolânicas. Esses efeitos resultam em aumento da compacidade e da resistência mecânica em intensidade equivalente à de redução da relação a/c ou aumento do consumo de cimento.

36.3.2 Fase zona de transição

A fase zona de transição é a mais frágil nos CAD, necessitando, portanto, um cuidado extra para diminuir sua influência negativa. A zona de transição (ZT) é aquela região situada na interface pasta-agregado, tanto para o agregado graúdo quanto para o miúdo. Como a ZT depende do tamanho e da forma do agregado, certamente é mais pronunciada em agregados de maior dimensão e com forma angular. A Figura 1 mostra uma representação esquemática da ZT nos concretos.

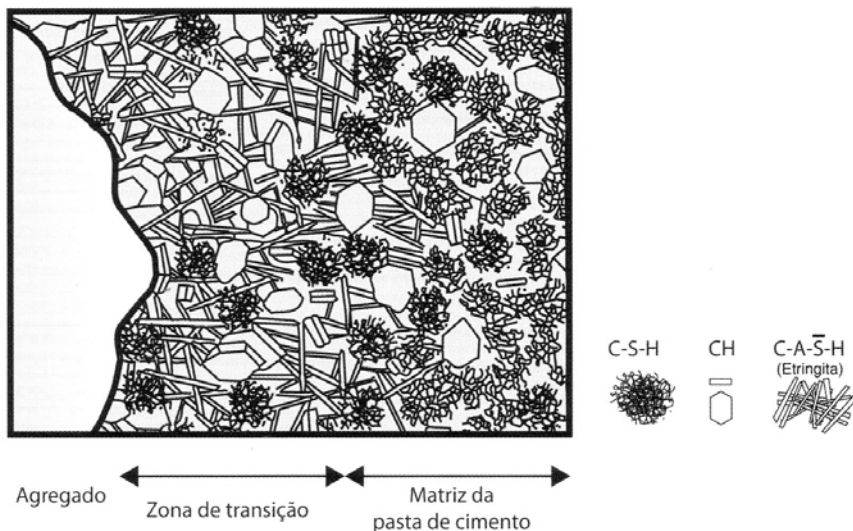


Figura 1 – Representação esquemática da zona de transição nos concretos (MEHTA & MONTEIRO 2008).

Observa-se que as características prejudiciais da interface pasta/agregado são:

- apresentação de maior porosidade devido à exsudação da água em excesso e do efeito parede;
- em função de a), maior elevação da relação a/c ou a/ag na ZT que na pasta propriamente dita;
- formação de grandes cristais de CH e etringita, de maiores dimensões e morfologicamente melhores formados pelo espaço disponível;
- orientação preferencial desses cristais em eixo perpendicular aos agregados (eixo – c) em disposição aproximadamente ordenada;
- diminuição das forças de adesão (Forças de *Van der Waals*) com os agregados, devido à maior distância entre os sólidos;
- formação de planos preferenciais de clivagem, o que aumenta a proporção de microfissuras nessa interface.

Ressalta-se então que a zona de transição ZT é mais porosa, apresenta microfissuras, limita a resistência mecânica e aumenta a deformabilidade do CAD (curva tensão-deformação parabólica).

Os fatores que mais influem na formação da ZT são:

- relação a/c ou a/ag porque quanto maior mais água disponível para exsudar e formar o efeito parede;
- dimensão máxima característica do agregado, pois estabelece a espessura da ZT porque quanto menor o tamanho do grão, maior área deverá ser molhada e, para a mesma quantidade de água, menor será a sua espessura;
- a natureza mineralógica do agregado ou ainda a sua deformabilidade, pois agregados mais resistentes apresentam curvas tensão-deformação com menor resíduo de deformação plástica (histerese) e vice-versa.

Para que o concreto atue como material composto homogêneo, em que as três fases tenham aproximadamente o mesmo comportamento resistente, é necessário que a resistência da ZT, assim como do agregado, seja da mesma ordem de grandeza. A resistência da pasta pode ser controlada pela relação a/c.

36.3.3 Fase agregados

Ao aumentar a resistência dos concretos, principalmente após melhorar a pasta de cimento hidratada e a ZT, os agregados tornam-se o elo fraco da mistura. Ao selecionar agregados com melhores propriedades mecânicas, haverá interferência não só na resistência à compressão da mistura de forma direta, mas também nas resistências à abrasão, ao módulo de elasticidade, às deformações instantâneas e de longa duração, à resistência ao impacto, entre outras propriedades.

Por isso, para o CAD, devem-se selecionar agregados de maior resistência, sendo fundamental o conhecimento das características da rocha mãe. Nada pode ser feito para aumentar a resistência do agregado natural, e consequentemente este

será usado como naturalmente é. Por isso, é necessário buscar o conhecimento da petrografia e da superfície de fratura da rocha, escolhendo as mais resistentes e sãs.

36.3.4 Interação entre as fases do CAD

Foi descrito que para, melhorar as três fases do concreto, conseqüentemente a resistência final do CAD, é necessária a diminuição da relação a/ag, da porosidade da pasta de cimento hidratada e a seleção adequada de agregados. Para alcançar essas características simultaneamente, deve-se limitar a dimensão máxima dos agregados e buscar a composição de curvas contínuas ou descontínuas de distribuição granulométrica, além da forma mais arredondada possível.

A partir disso, com aditivos superplastificantes, compatíveis com o cimento, e adições minerais pode-se reduzir a água da mistura, sem prejudicar as propriedades no estado fresco, diminuindo a exsudação, melhorando, assim, a ZT e a hidratação da pasta de cimento. As adições minerais também têm a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , eliminando este cristal frágil da mistura e produzindo mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H), composto responsável pela resistência dos concretos. Mais detalhes acerca do funcionamento das adições minerais e dos aditivos estão descritos nos Capítulos 8 e 10 deste livro.

36.4 Seleção dos materiais

A seleção adequada de todos os constituintes da mistura é essencial para o proporcionamento de um concreto resistente, durável e que apresente condições de trabalhabilidade no estado fresco, ideais para o assentamento nas formas previstas. Os componentes de um CAD são: cimento, adição mineral, aditivo químico, agregado miúdo, agregado graúdo, fibras, pigmentos e água. Dependendo das condições, um ou mais desses materiais pode ser dispensado, bem como pode-se utilizar mais de um dentro de um mesmo grupo, por exemplo, o uso de dois aditivos químicos combinados. Para CAD usuais, pigmentos e fibras não são usados, apesar de poder ser muito úteis, principalmente as microfibras para retração inicial. Mas, por não ser o foco deste capítulo, esse assunto não será tratado.

36.4.1 Cimento

Muitas vezes é obrigatório utilizar o cimento disponível comercialmente na região em que se está produzindo o concreto. Porém, em outras, é possível interferir na escolha do cimento, e, às vezes, até na composição química deste.

Para produzir-se CAD, devem-se escolher cimentos mais puros possíveis, até porque a quantidade de pozolanas a serem adicionadas na mistura será grande,

porém de qualidade superior às incorporadas nos cimentos comerciais, como a cinza volante e a escória alto-forno. Por isso, sem levar em conta o tamanho das partículas, cimentos CP I e CP V ARI são os mais recomendados. Outros cimentos também podem ser utilizados desde que previamente estudados.

No entanto, cimentos com partículas muito finas, apesar de reagirem rapidamente e formarem os compostos resistentes em maior número, demandam maior quantidade de água, por apresentarem uma superfície específica maior, o que diminui as resistências finais. Por isso, é importante balancear essa situação, porém, não há uma regra simples para alcançar esse objetivo.

Com relação aos constituintes dos cimentos, devem-se aumentar os silicatos de cálcio (C_2S e C_3S) contidos nesses cimentos, responsáveis pelas resistências finais das misturas. Para isso, reduz-se o aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Segundo Neville (1982), a presença de elevados teores de C_3A e C_4AF no cimento não é desejável, pois esses compostos pouco contribuem para as resistências finais da pasta.

Também é recomendável a diminuição, ou mesmo o consumo total do $Ca(OH)_2$, transformando este componente em C-S-H, através das reações pozolânicas.

Em resumo, Aïtcin (2000) apresenta os requisitos dos cimentos para CAD descritos a seguir:

- A finura deve ser média, nem muito alta nem baixa;
- Deve-se ter informações sobre o C_3A (tipo de célula cristalina e quantidade) e sobre os sulfatos de cálcio que influirão sobre a velocidade da formação de etringita, devendo ficar a soma desses compostos entre 14 e 16%;
- O DRX do cimento tratado com ácido salicílico, com a finalidade de exibir os compostos menores, é importante para dar ideia do tipo de C_3A e sulfatos. Para os CAD, o cimento deve ter baixo teor de C_3A e preferencialmente ser cúbico ou cúbico e ortorrômbico, dependendo do grau de sulfurização do cimento, pois este controla a hidratação do C_3A ;
- Ensaios de reologia com mini-slump e cone de Marsh entre o cimento, a água e os superplastificantes são de grande importância para verificar a compatibilidade cimento *versus* aditivo.

36.4.2 Adição Mineral

Denomina-se adição mineral os materiais com atividade pozolânica que são inseridos na mistura, tipo: pozolanas naturais, cinzas volantes, escória básica granulada de alto-forno, cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa e outras. A inserção de uma adição mineral pode dar-se por adição ao cimento (com retirada de parte dos agregados) ou por substituição ao cimento (com retirada de parte do cimento), segundo os procedimentos escolhidos durante o estudo de dosagem. Fica claro que, ao adicionar novo material, outros deverão sair da mistura para manter a mesma unidade de volume.

A utilização de adição mineral nos CAD é importante devido à ação química e física que exercem essas partículas. As adições pozolânicas mais utilizadas atualmente são a sílica ativa, o metacaulim e a cinza de casca de arroz, por apresentarem grãos de pequena dimensão, além de possuírem o potencial pozolânico para consumir o Ca(OH)_2 .

O tamanho reduzido das partículas permite que as reações ocorram rapidamente, além de quebrarem a inércia do sistema, agindo por ação de nucleação das partículas de cimento e fazendo com que estas hidratem de forma mais rápida e completa. Normalmente, as adições possuem reatividade química muito significativa, auxiliando ainda a trabalhabilidade da mistura, o que é uma vantagem considerável, pois os CAD, por apresentarem resistências elevadas, apresentam uma coesão acima do normal, dificultando a plasticidade.

As adições pozolânicas também atuam quimicamente na mistura, por meio da reação com o Ca(OH)_2 , molécula cristalina de grande dimensão que se forma após a hidratação do cimento com a formação C-S-H, elemento resistente da pasta.

36.4.3 Aditivos Químicos

A função dos aditivos químicos plastificantes é de melhorar a consistência do concreto sem aumentar a demanda de água; aumentar as propriedades mecânicas e durabilidade da mistura, mantendo a consistência e reduzir o consumo de cimento, para as mesmas resistências e consistência. Esses três pontos são favoráveis aos CAD, por normalmente serem concretos coesos, com pouca trabalhabilidade e com alto consumo de cimento. Por isso, Hartmann (2002) afirma ser praticamente obrigatória a utilização de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes nos CAD.

Os aditivos recomendados para CAD são os superplastificantes, de terceira geração. Atualmente já se encontram no mercado os chamados aditivos de quarta geração, com cadeia mais longa e ramificada que os originais. As características relevantes para os aditivos são a compatibilidade com o cimento, o tempo de ação e grau de elevação de trabalhabilidade no concreto para os materiais utilizados.

Aspecto de grande importância, já salientado em 36.4.1, é a compatibilidade química entre a composição do cimento utilizado no CAD e a do aditivo superplastificante, pois para cada tipo deste último existe um ponto de saturação para um dado cimento. O ensaio mais utilizado para essa finalidade é a determinação do tempo de fluxo da pasta de cimento que passa no cone de Marsh. O ponto de saturação é aquele em que, nas condições experimentais utilizadas, não há incremento e diminuição do tempo de fluxo da pasta pelo cone de Marsh. O ensaio é geralmente realizado após 5 e 60 min da mistura dos materiais, para levar em conta a ação do aditivo em obra real, considerando-

se o tempo de descarga do caminhão do betoneira e a respectiva perda de trabalhabilidade com o decorrer do tempo.

A Figura 2 apresenta o ensaio de dois cimentos A e B, em que se observa que o cimento A apresenta compatibilidade com o aditivo, em 5 e 60 min, com o teor desse em relação à massa de cimento de 1,0%. Acima desse período de tempo, não há ganho de fluidez, mesmo com o aumento da quantidade do aditivo. Para o cimento B, observa-se que não há compatibilidade com o aditivo empregado, porque a 60 minutos houve perda expressiva da fluidez, indicando que houve reação entre os compostos do cimento e do aditivo, diminuindo o tempo de pega.

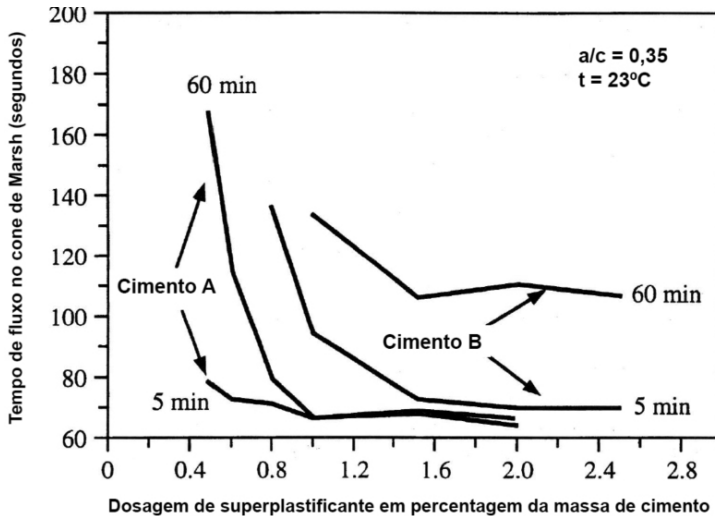


Figura 2 – Fluxo do cone de Marsh com dois tipos de cimentos (AÏTCIN, 2000).

Para aplicações correntes, recomenda-se adicionar o aditivo no momento em que o concreto for ser espalhado nas fôrmas. Em concretos misturados em caminhão betoneira, é comum que o aditivo seja adicionado e misturado no canteiro de obras, pois o trânsito da central até o canteiro pode tomar muito tempo e prejudicar os efeitos benéficos do aditivo. Porém, a consistência do concreto original, de partida, deve ser, no mínimo, de 40 mm de abatimento do tronco de cone para maximizar o efeito plastificante.

Também é recomendável limitar o volume de concreto transportado em caminhões betoneira que receberão o aditivo, por exemplo, num caminhão de capacidade nominal de 8m³, o ideal é misturar de 4m³ a 6m³, pois para a ação eficiente dessa mescla, é necessária uma mistura vigorosa de todo o conteúdo. Essa mistura raramente é obtida em caminhões betoneira cheios de material, por ser uma mistura por gravidade de concreto, o que se torna impraticável com a capacidade no limite do caminhão.

36.4.4 Agregados

O estudo dos agregados é importante nos CAD, pois estes podem ser o elo fraco da mistura, quando o concreto atingir resistências elevadas.

Os agregados, conforme já exposto, devem ter a dimensão máxima característica limitada, pois os de maior granulometria apresentam mais falhas na sua microestrutura e retêm mais água de exsudação, provocando uma ZT maior. É sabido, no entanto, que agregados de dimensão muito reduzida demandam quantidade maior de água de amassamento, devendo-se, novamente, encontrar o equilíbrio que proporcione as melhores propriedades nos estados frescos e endurecidos.

Em relação à distribuição granulométrica, deve-se buscar o empacotamento de todos os agregados, seguindo uma distribuição contínua, que apresente o menor volume de vazios possível. Para isso, pode ser usado o Método de O'Reilly, o qual será detalhado na seção 36.5.

Por causa da elevação do consumo de água, não é recomendável o uso de agregados que apresentem teor de material pulverulento maior do que 8%. São preferíveis agregados sem pó na sua composição. Pode-se, inclusive, lavar os materiais para remoção do pó, o que é eficiente tecnicamente, mas de difícil operacionalização para volumes de CAD consideráveis.

Aïtcin (2000) resume as características, a seguir elencadas, que os agregados devem apresentar para serem utilizados no CAD:

- a sua escolha deve ser criteriosa, pois é o fator limitante da resistência última de CAD para patamares acima de 100MPa;
- o agregado graúdo deve possuir, de preferência, módulo de finura entre 2,7 e 3,0, sem partículas finas, descartando-se as grãos inferiores a 5mm;
- os agregados graúdos devem apresentar a forma mais cúbica possível, podendo ser utilizadas rochas calcárias, dolomíticas, graníticas, diabásicas e, preferencialmente, pedra glacial britada;
- deve-se usar o menor diâmetro possível dos agregados graúdos para diminuir a espessura da zona de transição e torná-la mais homogênea, considerando-se, ainda, que as partículas menores são mais resistentes porque apresentam menos microfissuras, poros menores e menos inclusões de materiais frágeis;
- os diâmetros máximos característicos recomendados são os seguintes: 25 mm para CAD classes I e II, 19 mm para classe II e 12mm para Classes IV e V (sempre que possível devem ser escolhidos os menores valores disponíveis economicamente na região).

36.5 Dosagem

A produção do CAD é mais complexa e sensível do que para outros concretos, devido às propriedades superiores deste material. Por conter mais elementos e constituir peças estruturais de maior importância à concepção estrutural de uma

edificação, a produção dos CAD deve seguir um procedimento detalhado e cuidadoso para garantir a reprodução da dosagem prévia de laboratório.

A etapa inicial em uma construção em CAD é a definição em projeto dos elementos, a fim de se extrair o máximo possível desse material. Após a seleção dos constituintes, seguindo os cuidados descritos, deve-se partir para a etapa de dosagem dos concretos.

Princípios e definições sobre dosagem de concretos convencionais estão detalhadas no Capítulo 12 deste livro, mas a citada dificuldade de encontrar a melhor proporção entre todos os componentes do CC, ao menor custo possível, que atenda a todos os critérios de desempenho de projeto, são ainda maiores para os CAD. O maior número de componentes do que o CC, não raro se dosa misturas com sete constituintes (cimento, sílica ativa ou metacaulim, areia, brita 0, brita 1, aditivo plastificante e aditivo superplastificante), quando não se utilizam fibras, pigmentos, algum material fino ou outro tipo de aditivo simultaneamente.

Os métodos para dosagens de CAD mais utilizados são o Mehta-Aïtcin (1990), o de Aïtcin (2000), Nawy (1996) e o método IBRACON, que também se aplica a essas misturas, conforme descrito no Capítulo 12 deste livro. Ainda há métodos como o de De Larrard (1990), Torrales Carbonari (1996) e O'Reilly (1998). Os três últimos, assim como o método de Mehta-Aïtcin (1990), são baseados na otimização do esqueleto granular, preenchendo de cimento ou pasta os vazios restantes. Já o método de Nawy (1996) e Aïtcin (2000) é baseado no critério de volume absoluto, ou seja, determina-se a quantidade de agregado graúdo, cimento, água e, o que faltar para completar um metro cúbico, faz-se com a areia. O único método experimental, porém com fundamentos científicos, é o método IBRACON.

Há diversos autores no Brasil que realizaram trabalhos comparativos entre métodos de dosagem para CAD, entre eles citam-se Alves (2000) e Pinto (2003). Os autores normalmente chegam a conclusões divergentes e não definitivas sobre qual método é o mais econômico e possível de obter as propriedades desejadas, até por serem dependentes dos materiais locais.

O Método de Aïtcin (2000), por representar o critério do volume absoluto, o Método de O'Reilly (1998), que utiliza conceitos do esqueleto granular, e os Métodos O'Reilly e IBRACON combinados, que mais se aproximam de um método científico e experimental, serão descritos neste capítulo.

36.5.1 Método de Aïtcin

O método é uma combinação de resultados empíricos com cálculos matemáticos, o que o torna relativamente simples, apesar de não haver uma garantia de obtenção das propriedades com exatidão. O fluxograma do método está representado na Figura 3.

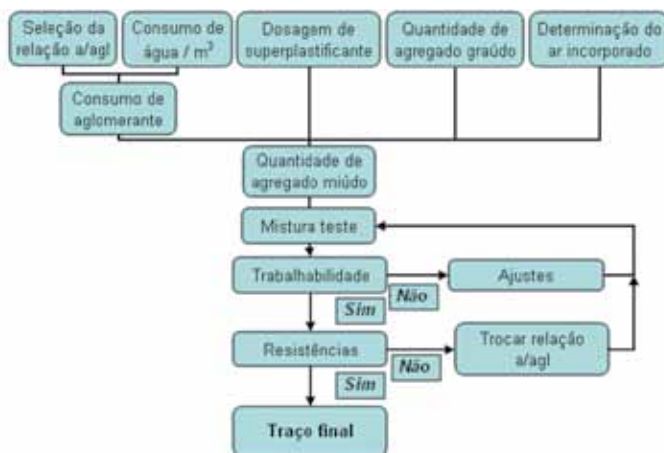


Figura 3 – Fluxograma do Método de Aïtcin (AÏTCIN, 2000).

O primeiro passo é determinar a relação a/ag necessária para alcançar a resistência à compressão especificada. O autor fornece uma curva teórica para estimar a relação a/ag, mostrada na Figura 4. Essa curva correlaciona a relação a/ag com a resistência à compressão aos 28 dias, baseada em uma série de resultados obtidos em pesquisas.

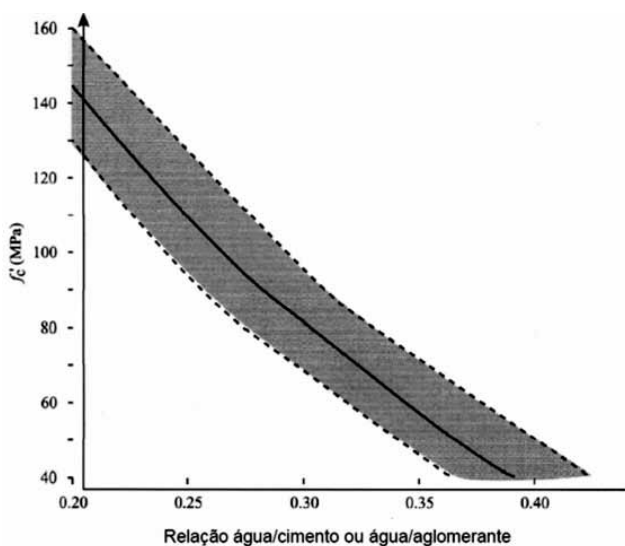


Figura 4 – Relação entre a relação a/ag e a resistência à compressão aos 28 dias (AÏTCIN, 2000).

Para determinar o consumo de água da mistura, de acordo com o passo 2 do método, pode-se usar o Quadro 1 proposto pelo autor, que correlaciona a dosagem de água com o ponto de saturação do aditivo superplastificante.

Quadro 1 – Determinação da água mínima de dosagem do CAD.

Ponto de saturação do aditivo (%)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Água (kg/m ³)	120 a 125	125 a 135	135 a 145	145 a 155	155 a 165

Sabe-se que quanto maior a quantidade de água utilizada, menor a resistência à compressão do concreto. O método apenas especifica que, quando não se conhece o ponto de saturação do aditivo, pode-se realizar uma mistura experimental partindo de 1% de aditivo, com 145kg/m³ de água, o que é bastante relativo e incerto.

O terceiro passo é determinar o teor de saturação do aditivo. Conforme relatado, deve-se iniciar com 1% em uma mistura experimental e realizar os ajustes se o resultado não for satisfatório.

O quarto passo consiste na determinação da quantidade de agregado graúdo, baseada apenas na forma das partículas. Sugere-se iniciar a mistura experimental com 1000 kg/m³, para depois realizar ajustes, se necessários.

O quinto passo é a determinação do ar incorporado da mistura. O autor sugere o valor de 1,5% como primeira aproximação.

Com todos os materiais calculados, subtrai-se de 1m³ a soma de todos, em volume, para encontrar a quantidade de agregado miúdo. Com isso, parte-se para a mistura do traço experimental, para verificar, primeiramente, a trabalhabilidade do concreto. Caso não seja satisfatória, ajustes na dosagem de aditivo e de água devem ser efetuados. Após, novamente se realiza a mistura experimental, e, com o rompimento dos corpos-de-prova nas idades previamente determinadas, analisam-se as propriedades obtidas. Se forem satisfatórias, tem-se o traço definitivo, caso contrário, regride-se para a etapa de ajustes.

Observa-se que os parâmetros do método são abrangentes e empíricos, baseados em experiências anteriores do autor, com outros materiais e condições prévias. Por isso, dificilmente se obtêm as propriedades buscadas em uma primeira tentativa, o que somente é possível perceber após 28 dias do teste, por ser a idade de controle mais utilizada. Para se chegar realmente nos valores especificados, pode-se demorar um tempo longo. Apesar disso, o método é bastante utilizado atualmente por profissionais que buscam um CAD e permite obter valores elevados de resistências.

36.5.2 Método de O'Reilly

O método de dosagem proposto por O'Reilly (1998) pode ser dividido em duas partes: a primeira que determina, experimentalmente, a proporção entre os agregados, e a segunda que calcula, por meio de tabelas e aproximações, os outros constituintes do concreto.

36.5.2.1 Primeira Parte: Determinação da relação ótima dos agregados graúdos e miúdos

A primeira parte do método apresenta uma forma experimental de determinar-se a melhor composição entre os agregados do concreto, dois em dois, do de maior granulometria para o de menor.

Apesar de muitos métodos de dosagem partirem de uma curva granulométrica ideal para os agregados, como a proposta por Fuller, o autor deste método ressalta que o fator de forma dos agregados é decisiva e mais preponderante que a granulometria, por isso, não é necessário determinar a relação ótima entre os agregados baseados na granulometria teórica ideal. O método mais preciso é o experimental, o qual se baseia na determinação da porcentagem de vazios da mistura entre os agregados. A porcentagem de vazios e a superfície específica mínima da mistura de agregados indicarão a composição ótima, para a qual, teoricamente, o consumo de pasta será mínimo.

Para encontrar esses valores, primeiro ensaiam-se diversas porcentagens entre dois componentes, por exemplo, 20% de brita e 80% de areia regular (20-80). Após, seguem-se com outras proporções, como 30-70, 40-60 e 50-50. Esse intervalo de 10% é o mais usual; porém, dependendo da aplicação e da necessidade de exatidão, pode-se aumentar ou diminuir esse valor. Então, calcula-se, para cada uma das misturas, a massa unitária compactada (ρ_{ap}), no Brasil, por meio da ABNT NBR NM 45:2006. Observa-se que a massa unitária é, simplesmente, a massa da mistura compactada, com vazios, dividida pelo volume do recipiente. É importante que os materiais estejam secos e bem misturados.

Após, determina-se a massa específica dos componentes, por meio da ABNT NBR NM 52:2009, para os agregados miúdos, e da ABNT NBR NM 53:2009, para os agregados graúdos. Com isso, calcula-se a massa específica da mistura dos agregados (d_{AB}) de cada uma das proporções, segundo a Equação 1. Esse cálculo é necessário para a determinação dos vazios da mistura e independe da massa unitária.

$$d_{AB} = \frac{(d_A \cdot xA) + (d_B \cdot xB)}{100} \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

d_{AB} - massa específica da mistura dos agregados;

d_A - massa específica da areia;

A - porcentagem de areia na mistura;

d_B - massa específica do agregado graúdo (brita);

B - porcentagem de brita na mistura.

Com as massas específicas de cada material e a massa unitária da mistura compactada já calculadas, pode-se determinar a porcentagem de volume dos vazios, para cada uma das composições, por meio da Equação 2. Observa-se

que, nem sempre, a mistura com a maior massa específica será a que apresenta o menor índice de vazios.

$$E_v = \frac{d_{AB} - \rho_{AB}}{d_{AB}} * 100 \quad (\text{Equação 0})$$

em que:

E_v – porcentagem de vazios na mistura;

d_{AB} – massa específica da mistura;

ρ_{AP} – massa unitária da mistura.

Com isso, pode-se, facilmente, determinar a mistura ótima entre os agregados, dois a dois, em ordem decrescente de dimensão máxima.

36.5.2.2 Segunda Parte: Determinação dos outros componentes do CAD

O consumo de água e cimento do traço se determina com base na experiência anterior do executante do traço. Com isso, se mistura um traço experimental, e com os valores de resistência à compressão média do concreto, do cimento utilizado e de constantes tabeladas pelo autor, se encontra a característica ‘A’ do agregado. A partir daqui, a etapa do método passa a ser empírica, como se observa.

36.5.3 Métodos de O’Reilly e IBRACON em conjunto

Utilizando a primeira parte do Método de O’Reilly (1998), empacotamento dos agregados, com a elaboração dos traços e diagramas de dosagem do Método IBRACON (ver Capítulo 12), pode-se chegar a um método combinado com vantagens técnicas e econômicas, conforme propôs Tutikian (2007). O objetivo de Tutikian (2007) foi propor um método para concretos autoadensáveis, mas, pode-se utilizar o mesmo método para concretos de trabalhabilidade convencionais de alto desempenho.

O primeiro passo é a determinação do esqueleto granular, por meio do empacotamento de dois em dois componentes, daqueles de maior dimensão até os de menor dimensão, definindo a mistura entre todos os agregados que apresente o menor percentual de vazios.

Com o esqueleto definido, parte-se para a execução de, no mínimo, três traços, o rico, o intermediário e o pobre. É importante ressaltar que, nesse momento, o teor de argamassa não é mais constante, e sim, a proporção entre os agregados, determinada na etapa anterior.

Assim, moldam-se os corpos-de-prova para a realização dos ensaios determinados nas idades especificadas, para calcular as equações de comportamento, os coeficientes de correlação e a definição dos Diagramas de Dosagem e Desempenho. Um exemplo de Diagrama de Dosagem está representado na Figura 5.

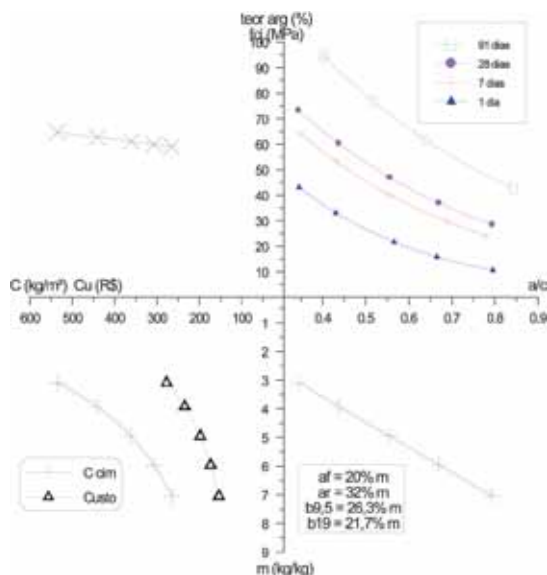


Figura 5 – Exemplo de diagrama de dosagem com o teor de argamassa variando (TUTIKIAN, 2007).

Observa-se na Figura 5 que o teor de argamassa, representada no quarto quadrante, é variável. Porém, o que torna todos os traços pertencentes à mesma família, e, portanto, susceptíveis de serem plotados no mesmo diagrama, é a proporção fixa entre os agregados. No caso, o total dos agregados de todos os traços foi dividido em 21,7% de brita 1, 26,3% de brita 0, 32% de areia média e 20% de areia fina, após a realização dos empacotamentos. Por exemplo, o traço 1:3 seria calculado com 1:0,6:0,96:0,79:0,65 (c:af:am:b0:b1).

Com isso, foi possível obter concretos com resistência à compressão de até 75MPa para os 28 dias e 94MPa para os 91 dias, para estes materiais e estes traços. Obviamente seria possível a mistura de traços mais ricos para alcançar resistências superiores, se fosse necessário.

36.6 Propriedades do CAD

Como a microestrutura do CAD é diferente do CC, é incorreto intuir que as propriedades no estado endurecido do CAD são apenas uma extensão das dos concretos usuais. De acordo com AİTCIN (2000), os concretos usuais se comportam como materiais homogêneos e isotrópicos, nos quais o elo mais fraco é a pasta de cimento hidratado ou a zona de transição. Isso se deve à elevada relação a/ag que traduz uma microestrutura porosa, principalmente em torno do agregado. Por outro lado, os CAD atuam, essencialmente, como materiais compostos não isotrópicos, constituídos de pasta de cimento hidratado

e agregados que podem ter propriedades mecânicas muito diferentes. Sua microestrutura é compacta, incluindo a zona de transição com o agregado graúdo, que é delgada ou mesmo inexistente. Assim, as propriedades mecânicas do agregado graúdo exercem grande influência nas propriedades finais do CAD.

As propriedades dos CAD que mais se diferenciam dos CC são: calor de hidratação, retração autógena, cura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e efeito das altas temperaturas.

36.6.1 Calor de hidratação

Para o concreto convencional, o calor de hidratação é proporcional ao consumo de cimento, visto que o aumento da temperatura se deve às reações de hidratação exotérmicas, que são mais intensas nas idades iniciais. Entretanto, para o CAD esse comportamento nem sempre é válido, apesar de o consumo de cimento ser mais elevado que nos CC.

Deve-se considerar que o calor de hidratação é diretamente proporcional à quantidade de cimento em hidratação e não ao conteúdo total de cimento, pois nem todo cimento se hidrata ao mesmo tempo. O emprego de aditivos retardadores, teores mais altos de superplastificantes ou menor quantidade de água no concreto, como costuma acontecer usualmente nos CAD, pode afetar a emissão do calor de hidratação, distribuindo-o por um tempo maior, de modo que os picos de temperatura não sejam mais elevados que nos CC.

Aïtcin (2008) declara que não é absolutamente verdade que o CAD desenvolve maior calor de hidratação que o CC. Em alguns casos, isso pode ser totalmente falso em uma estrutura em particular ou em condições específicas. O autor relata o caso de três colunas de 1x1x2,4m moldadas com três concretos com resistências características de 30, 90 e 120MPa, com consumo de cimento variando de um mínimo de 355 kg/m³ a um máximo de 540kg/m³. As colunas foram monitoradas em diversos locais, tendo sido constatado que, no centro de cada uma as temperaturas, foram as mais altas e praticamente iguais, apesar de os consumos de cimentos serem bastante distintos. A Figura 5 ilustra o aumento da temperatura nas colunas

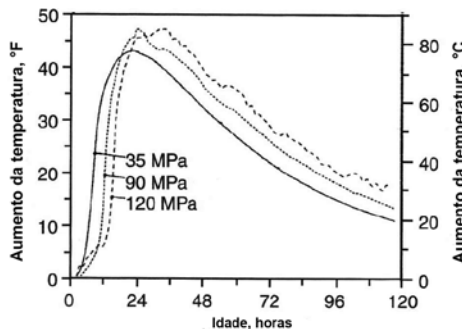


Figura 6 – Aumento da temperatura no centro de colunas com f_{ck} de 35MPa, 90MPa e 120MPa (AÏTCIN, 2008).

O autor afirma que a coluna com 120MPa apresentou o menor ascenso da temperatura porque tinha menos cimento hidratado nas primeiras 30h, pelas seguintes razões: a) menor teor de água no concreto; b) maior teor de superplastificante à base de naftaleno, que atua também como retardador; c) uso de um retardador e d) os hidratos formados nas idades iniciais no CAD são tão compactos, que a cinética da hidratação é controlada mais pela difusão da água através dos hidratos do que os processos de dissolução e precipitação, os quais preponderam quando existe bastante água no concreto (como no CC).

36.6.2 Retração autógena

Nos Capítulos 9 e 19 deste livro, é abordado o tema da retração hidráulica e da autógena. Esta última decorre do fato de que a rede de poros existente no concreto tem sua água drenada para o exterior ou para poros menores durante a hidratação e, se não houver reposição mediante cura com água externa, ou se o concreto é muito compacto que retarda a entrada de água na mesma velocidade de seu consumo interno, inicia-se o processo de autosecagem que provoca a retração autógena.

Entende-se por secagem aquela que ocorre quando a água contida no concreto evapora para a atmosfera, enquanto que, na autosecagem, a água permanece dentro do concreto, porém, ao reagir com os cristais de cimento, provoca um dessecamento dos poros internos.

A tensão superficial, que a água exerce nos poros capilares, forma meniscos cada vez mais altos à medida que o diâmetro do poro diminui. No CC existe mais água disponível do que a necessária para a hidratação do cimento, ou seja, os poros estão sempre saturados de água.

Apesar da retração autógena nos CAD ser potencialmente superior à retração autógena nos CC, a retração hidráulica total dos CAD é sempre, significativamente, menor que nos CC. Portanto o importante é curar, preferencialmente com água, tanto os CAD quanto os CC até que estes desenvolvam resistências suficientes para contrapor os esforços de retração sem fissurar.

36.6.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos CAD normalmente é maior do que nos CC. Quando fixam-se relações a/ag baixas, melhora a ZT e seleciona agregados adequados, invariavelmente a resistência à compressão é afetada positivamente. Não é raro obter resistências superiores a 50MPa, mesmo sem ser esse o objetivo principal de um estudo de dosagem particular.

Para os CC é válida a lei de Abrams que relaciona o acréscimo da resistência à compressão com o decréscimo da relação a/c ou a/ag, em proporção exponencial. Entretanto, sua validade existe somente quando a pasta apresenta resistência

inferior ao do agregado graúdo, porque quando este torna-se a fase mais fraca da microestrutura, a resistência do CAD não aumenta significativamente à medida que a relação a/ag diminui. Em alguns casos, esse item pode representar custos mais elevados para o CAD desde que a procura por agregado mais resistente pode resultar em distâncias de transporte mais longas.

Quando o agregado graúdo apresenta resistência adequada em relação à pasta, nem sempre é possível estabelecer uma regra geral entre a resistência desejada e a relação a/ag , visto que esse mesmo nível de resistência pode ser atingido de vários modos, em especial pelo uso de adições pozolânicas, que podem modificar significativamente a relação $f_c \times a/ag$.

Quando são empregadas adições minerais no CAD, as relações $f_c \times a/ag$ se modificam e as equações de Abrams valem para cada caso específico, dependendo do tipo e do teor de adição mineral empregada. Este fato decorre das alterações que as reações pozolânicas provocam no refinamento dos poros dos grãos de CH, conforme visto em 36.3, que, em decorrência da maior proximidade das paredes dos poros, resultam no aumento do efeito físico devido às forças de superfície de *van der Waals*, em função do potencial zeta. Essas atrações físicas, relacionadas às ligações secundárias, colaboram com o aumento da resistência à compressão e de outras propriedades do concreto, sendo tão maiores quanto mais próximas estiverem as superfícies, ou seja, quanto menores as dimensões dos poros, o que corresponde a menores relações a/ag .

Assim, a resistência mecânica e outras propriedades relacionadas com a durabilidade do CAD com adições minerais são governadas não só pelas reações de hidratação, como também pelas reações pozolânicas e, ainda, pelos efeitos físicos de superfície, que interagem sinergicamente entre si, potencializando o efeito do parâmetro que está sendo medido, em relação a um concreto de referência sem adições minerais. Isaia *et al.* (2003) mostram que o efeito devido às reações pozolânicas cresce com o teor da adição mineral utilizada e decresce com o aumento da resistência. À medida que o teor de finos cresce, os poros maiores são obturados e, em concretos de resistências mais baixas. Assim cria-se espaço para a formação de C-S-H secundário para obturar os vazios de maiores dimensões. Quando a resistência cresce e a relação a/ag decresce, o espaço disponível diminui para a formação de CH e, também C-S-H secundário. Logo a participação das reações pozolânicas diminui e a maior proximidade entre as paredes das superfícies dos vazios aumenta o efeito físico.

Os Quadros 3 e 4 ilustram essas conclusões, observando-se que, em termos de acréscimo percentual, o aumento do teor de pozolana apresenta maior efeito do que o do nível de resistência. Os maiores valores foram observados com incrementos simultâneos do teor de pozolanas (50%) com o da resistência (65MPa), ocasião em que os efeitos físicos superaram os pozolânicos em vista da saturação dos poros com material mais finos e maior proximidade entre as paredes do material sólido nos vazios.

Quadro 3 – Efeitos do teor de pozolana.
(ISAIA et al., 2003)

Adição Mineral	12.5 %	50 %
Efeito total	+ 22 %	+ 79 %
Efeito pozolânico	+ 20 %	+ 45 %
Efeito físico	+ 2 %	+ 34 %

Quadro 4 – Efeitos do nível de resistência.
(ISAIA et al., 2003)

Nível de resistência	35 MPa	65 MPa
Efeito total	+ 42 %	+ 55 %
Efeito pozolânico	+ 36 %	+ 30 %
Efeito físico	+ 6 %	+ 25 %

Esse comportamento se reflete nas propriedades relacionadas com a durabilidade, tendo em vista que cada tipo ou teor de pozolana confere estrutura dos poros específica, resultando em efeitos peculiares nos mecanismos de transporte para cada mistura experimental. A Figura 7 ilustra pesquisa realizada por Isaia et al. (2001) sobre carbonatação acelerada e natural com 11 misturas pozolânicas de cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, em misturas binárias e ternárias com teores entre 10% e 50%. Observa-se que, para o patamar de 60MPa, os coeficientes de carbonatação variaram 50 vezes entre o valor mínimo e máximo para a carbonatação acelerada e de 10 vezes para a natural.

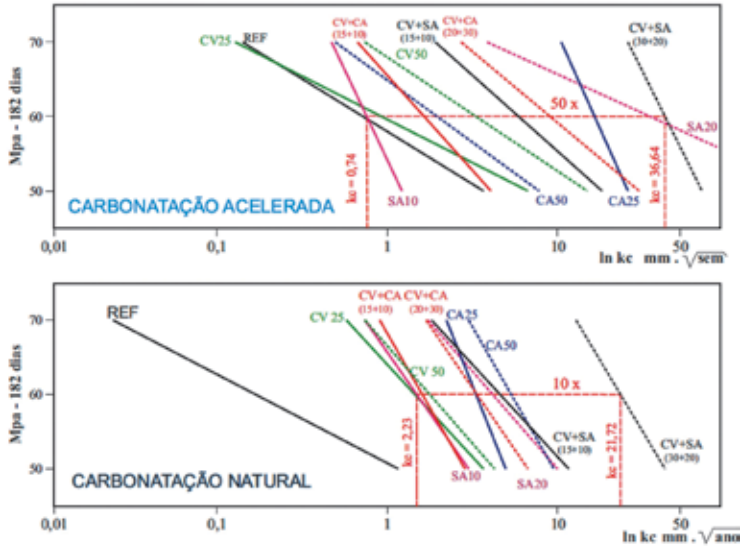


Figura 7 – Relações entre a resistência à compressão e os coeficientes de carbonatação para as diversas misturas pozolânicas (ISAIA et al., 2001).

Nessa pesquisa para que o nível de resistência de 60MPa fosse atingido, as relações a/ag variaram de 0,30 a 0,61, mostrando que as diferentes estruturas de poros formadas pelos tipos e teores de pozolanas empregadas, foram as responsáveis não só pela variação da difusão do CO₂, como também o teor de CH remanescente em cada mistura. Estudos similares

realizados por Isaia (1995) mostram que esse comportamento se estende para outras propriedades da durabilidade, em escalas distintas, de acordo com os mecanismos de transporte envolvidos no sistema de percolação de fluidos pelos poros.

Para execução de estruturas mais duráveis em ambientes agressivos, é preciso produzir CAD dosado para fim específico, sob medida (*tailored concrete*), em que são pesquisados em laboratório as relações únicas entre as propriedades requeridas pela estrutura e seu efetivo desempenho em obra (ISAIA, 1995).

36.6.4 Módulo de elasticidade

É importante o conhecimento do módulo de elasticidade em CAD, porque é uma propriedade que influi diretamente nas deformações dos elementos estruturais. Geralmente, a sua predição é realizada por intermédio da resistência à compressão, desde que exista uma relação proporcional entre essas propriedades, visto que os parâmetros que influem são os mesmos, embora em graus distintos. Como visto em 36.4, o principal parâmetro influente, depois da relação a/c ou a/ag , é a resistência do agregado gráudo, pois esta pode diminuir ou aumentar o valor de E_c , para uma mesma resistência à compressão do concreto. Aitcin (2000) diz que o CAD comporta-se quase como material compósito real e que, em termos de deformação, comporta-se mais como uma rocha artificial do que com o concreto propriamente dito.

No Capítulo 18 são mostradas as diversas relações que normas e códigos apresentam para relacionar f_c x E_c dos CC. Para CAD, o **fib** (CEB-FIP) Model Code 2010 apresenta a Equação 3:

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot (f_{cm} / 10)^{1/3} \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

E_{ci} : módulo de elasticidade tangente do concreto, a 28 dias, em MPa;

E_{c0} : 21,5.10³ MPa;

α_E : coeficiente função do tipo de agregado, variando de 1,2 para basalto a 0,7 para arenito;

f_c : resistência à compressão média, a 28 dias, determinada em corpos-de-prova.

Quando se deseja somente a análise elástica do concreto na estrutura, pode ser utilizado o módulo de elasticidade reduzido para levar em conta deformações plásticas iniciais que ocasionam deformações irreversíveis:

$$E_c = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (\text{Equação 4})$$

em que:

E_c : módulo de elasticidade reduzido;

$\alpha_i = 0,8 + 0,2 (f_{cm} / 88)$;

E_{ci} : módulo de elasticidade do concreto a 28 dias

O Quadro 5 mostra os valores do módulo de elasticidade tangente E_{ci} e os módulos reduzidos E_c para CAD entre C50 e C120. Observa-se que, para classes iguais ou superiores a C80, os dois módulos são iguais, ou seja, para análises elásticas utiliza-se o mesmo valor do módulo de elasticidade tangente.

Quadro 5 – Módulos de elasticidade tangente e reduzido (fib, 2010).

Classes	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
E_{ci} (GPa)	38,6	40,7	42,6	44,4	46,0	47,5	48,9	50,3
E_c (GPa)	36,0	38,9	41,7	44,4	46,0	47,5	48,9	50,
α_i	0,909	0,955	0,977	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

A Figura 8 apresenta a evolução das curvas tensão-deformação padronizadas pela norma norueguesa com o aumento da resistência característica de 45 até 115MPa. À medida que o f_{ck} aumenta, o concreto apresenta deformação na ruptura cada vez menor, passando de 3,5‰ ($f_{ck} = 45\text{MPa}$) a 2,5‰ ($f_{ck} = 115\text{MPa}$), tornando-se mais frágil à medida que o patamar da resistência sobe. É uma característica inerente ao CAD que deve ser compensada pela armadura para que as peças estruturais tenham ductilidade.

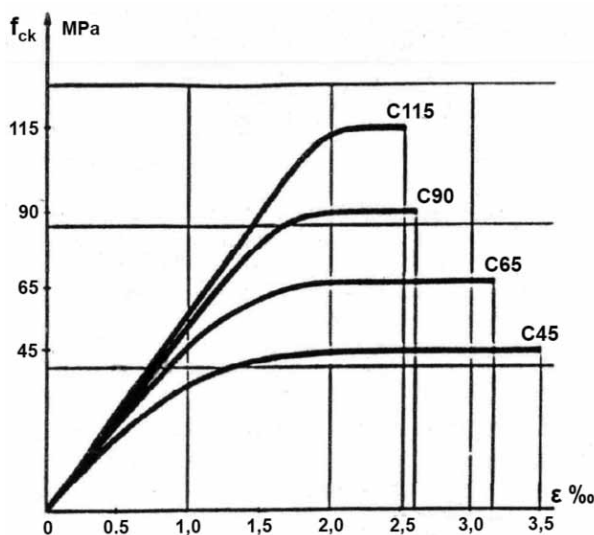


Figura 8 – Curvas tensão-deformação de CAD conforme norma norueguesa (HELLAND, 1988).

36.6.5 Efeitos das altas temperaturas

O efeito de altas temperaturas em CAD ainda é um ponto conflitante entre pesquisadores. No meio técnico, prevalece a teoria de que as altas temperaturas são mais perigosas em CAD do que em CC, devido a, principalmente, o

deslocamento que ocorre entre as camadas externas, aquecidas, e as internas, ainda resfriadas, por causa da eficiência térmica dos concretos. Em CAD esse fenômeno seria mais pronunciado, devido à evaporação das moléculas de água sob altas temperaturas, as quais passariam a ocupar mais espaço, o que não é possível pela densificação da estrutura dos CAD. Por isso, o deslocamento passaria a ser explosivo, também conhecido como *efeito spalling*. Porém, ao seguir essa linha, desconsidera-se a resistência à tração dos concretos, como se faz nos cálculos estruturais modernos, por normalmente ser desprezível em relação às resistências conferidas pela armadura de aço. Porém, em CAD, essas resistências podem chegar a mais de 8 MPa, passando a ser importantes para absorver tensões de tração que surgem nos concretos, tanto a partir de retrações no estado fresco, por exemplo, como após uma pressão exercida pelo vapor de água sob o efeito de altas temperaturas, no estado endurecido.

Britez (2011) considera que pesquisas para avaliar essa questão desconsideram aspectos que influenciam o efeito de altas temperaturas nos concretos, como as dimensões reais da estrutura e a presença de armaduras de aço ou outros elementos construtivos e ação de carregamentos externos. Pesquisas feitas com corpos-de-prova de laboratório, de pequenas dimensões, ainda são executadas em idades prematuras, em que boa parte da água não foi consumida pelas reações do cimento, permanecendo livres no elemento, podendo mascarar os resultados finais (ver Capítulo 29).

Cita-se o incêndio que ocorreu no Canal da Mancha, em 1996, como emblemático (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Houve um dano extenso na estrutura, que liga sob o mar a França e a Inglaterra. No trecho onde ocorreu o incêndio (AÏTCIN, 2008), o CAD original apresentava resistência a compressão entre 70 e 80MPa, módulo de ruptura entre 7 e 8MPa e módulo de elasticidade de 37 a 44GPa. Realmente ocorreu um deslocamento de grandes proporções, com alguns trechos de CAD, tendo sua espessura reduzida de 40cm para 17cm, mas deve-se considerar que qualquer elemento estrutural cederia sob a ação do incêndio daquela magnitude, sob temperaturas máximas da ordem de 1.000°C, a não ser materiais refratários.

Projeto de pesquisa financiado pela Comunidade Européia e realizado nos laboratórios VTT na Finlândia estudou os efeitos de incêndio em dois concretos: um com 60MPa sem sílica ativa e outro com 90MPa, com sílica ativa, cujos resultados foram muito satisfatórios. Considerando que nas estruturas reais as colunas são mais robustas que as testadas e que a carga é de serviço e não a máxima, os efeitos de altas temperaturas em estruturas reais seriam mais favoráveis do que no experimento e o comportamento dos CAD ainda melhores (AÏTCIN, 2008).

Entende-se, portanto, que o efeito de altas temperaturas em concretos de um modo geral é prejudicial, principalmente a partir dos 300°C, mas não é possível afirmar que em CAD comporte-se diferente de CC sob incêndio.

36.7 Obras emblemáticas em CAD

A utilização do CAD é realizada cada vez mais em obras no Brasil e no mundo, apesar de que o volume deste concreto ainda é pequeno, se comparado com as aplicações do CCV. As cidades brasileiras que mais se destacam nessa tecnologia são São Paulo, Goiás, Curitiba e Salvador, mas encontram-se aplicações isoladas em outras regiões do país. As principais obras que utilizaram o CAD em parte ou no total da estrutura de concreto armado e protendido estão descritas no Quadro 6 (BEZERRA, 2005; CHRISTOFOLLI, 2007; BIANCHINI, 2010).

Quadro 6 – Principais obras em CAD (BEZERRA, 2005; CHRISTOFOLLI, 2007; BIANCHINI, 2010).

Obras	Local	Ano	f_{ck} (MPa)
Obras no Exterior			
Edifício Lake Point Tower	Chicago – EUA	1965	50
Edifício Water Tower Place	Chicago – EUA	1970	60
Plataforma Gullfaks	Noruega	1981	70*
Arco da Defense	Paris – França	1988	65*
Ponte da Ilê de Ré	França	1988	68
Edifício Scotia Plaza Building	Toronto – Canadá	1988	70
Ponte Joigny	França	1989	60
Edifício Two Union Square	Seattle – EUA	1988	130**
One Peachtree	Atlanta – EUA	1991	83***
Ponte Montée St-Rémi	Canadá	1993	80*
Ponte da Confederação	Canadá	1997	72**
Petronas Tower	Kuala Lumpur - Malásia	1999	80*
Burg Khalifa	Dubai	2009	80*
Obras no Brasil			
CNEC	São Paulo	1989	65
Ponte sobre o Rio Maranhão	Goiás	-	50
Edifício Banco de Tóquio	Salvador	1990	60
Supremo Tribunal de Justiça	Brasília	1993	72
Edifício Suarez Trade Center	Salvador	1993	60
Edifício Golden Park	Santa Maria	1994	60*
Torre das Nações Unidas	São Paulo	1997	50
Pavimento da Ponte Rio Niterói	Rio de Janeiro	2000	65
Museu Oscar Niemeyer	Curitiba	2000	35****
Edifício Evolution Towers	Curitiba	2000	60
Edifício e-Tower	São Paulo	2002	115***
Museu Iberê Camargo	Porto Alegre	2005	45
Edifício Buenos Aires	Curitiba	2007	50
Centro Empresarial Antártica	Ponta Grossa – PR	2007	70
Edifício Palazzo Lumini	Curitiba	2010	50
* Resistências medidas em cubos. O resultado deve ser multiplicado por 0,80 para se ter correlação com cp's cilíndricos. ** Resistências médias. Estas sempre são mais altas que o f_{ck}. *** $f_{ck,est}$. Normalmente o $f_{ck,est}$ é maior do que o f_{ck}. **** f_{ck} estimado aos três dias. * Resistência característica de pilares. Concreto com 50% de cinza volante e 3% de sílica ativa.			

Observa-se que, no Brasil, o recorde de maior f_{ck} obtido em 2002, que perdura até hoje é do edifício *e-Tower*, em São Paulo (HELENE & HARTMANN, 2003), com 125MPa de resistência média e 115MPa de resistência característica de projeto estimada ($f_{ck,est}$) e $f_{ck} = 80$ MPa de resistência de projeto. Resultados individuais obtidos a idades superiores a 1 ano alcançaram os 155,5MPa.

36.7.1 Edifícios em CAD

Os edifícios habitacionais e/ou comerciais foram os pioneiros no emprego de CAD (inicialmente CAR) pela maior facilidade em absorver a sua tecnologia mais avançada e, também, pela corrida contra o céu em busca de recordes de alturas cada vez maiores. Entre a década de 1960 e 1980, nos EUA e Canadá, houve uma grande corrida de prédios altos executados em CAD, tendo em vista suas vantagens em relação às estruturas de aço, até então predominantes nesse tipo de edificações altas. Os projetistas elegeram o CAD como material preferencial para esse tipo de estruturas pelas suas vantagens: maior massa e rigidez contra deflexões laterais; menor frequência de deflexões nos pavimentos elevados; liberdade de formas e dimensões, simplicidade de execução em relação ao aço, menor retração e fluência, maior rapidez de execução.

A partir do fim da década de 1980, intensificaram-se as estruturas mistas em CAD, especialmente nos elementos comprimidos e perfis de aço nos tracionados, para aproveitar o melhor desempenho de cada um desses materiais no conjunto estrutural. Exemplo marcante desse modelo estrutural foi a construção das Torres Gêmeas Petronas, em Kuala Lumpur, Malásia (ver Figura 44, Capítulo 1), concluída em 1988, cada uma com 218.000m² de construção, 88 pavimentos e 452 m de altura, o edifício mais alto do mundo em sua época. A estrutura é composta de pilares circulares periféricos com $f_{ck} = 80\text{MPa}$ até o 23º pavimento (também utilizado no núcleo central e vigas periféricas), diminuindo para 60MPa até o 61º pavimento e daí para cima com 40MPa (vide Figura 9a). A elevada rigidez da estrutura é decorrente de seu núcleo composto de paredes diafragma em CAD em que estão alojadas as caixas das escadas e os elevadores (Figura 9b), os quais se interligam com as colunas cilíndricas periféricas por meio de vigas metálicas e *steel deck* como formas.

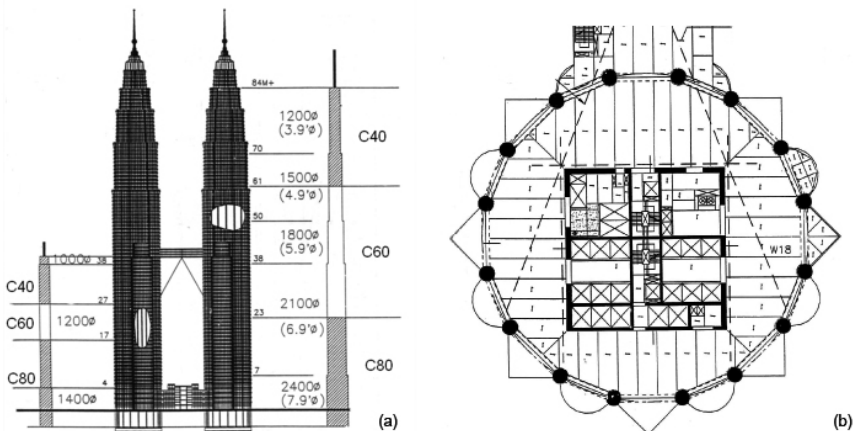


Figura 9 (a) – Dimensões das colunas e classes do concreto; b) Planta baixa do esquema estrutural do pavimento típico (THORTON *et al.*, 1997).

O CAD com $f_{ck} = 80\text{MPa}$, medida em cubos (68MPa em cilindros), foi dosado com relação $a/\text{agl} = 0,27$ com 260kg/m^3 de cimento Portland normal mais 260kg/m^3 de cimento com 20% de cinza volante, 30kg/m^3 de sílica ativa; 101m^3 de aditivo superplastificante base naftaleno sulfonado e de $0,8$ a $1,51\text{m}^3$ de retardador. O concreto de 60MPa não continha sílica ativa e o de 40MPa somente cimento Portland normal. A resistência média para $f_{ck} = 80\text{MPa}$, em cubos, foi de 105MPa (84MPa em cilindro) aos 56 dias, e o módulo de elasticidade alcançou a 39,2GPa, nessa mesma idade.

O edifício ícone atual, o mais alto do mundo até este momento, é o *Burj Khalifa*, em Dubai, com 828m de altura e 160 pavimentos, com estrutura em CAD até 601m e uma área utilizável de 465.000m^2 , construída com 230.000m^3 de concreto autoadensável. O prédio foi projetado em seção transversal em forma de “Y” para reduzir a ação do vento e propiciar estrutura de formas mais simples e mais rápida de ser construída (Figura 10a).

Esse edifício não possui somente estrutura em CAD, pois, em todas as etapas, desde a concepção geral do prédio, projetos, planejamento, métodos construtivos, controle de qualidade, todos os detalhes levam ao conceito de Construção de Alto Desempenho e não somente a sua estrutura. As fundações são compostas por estacas com $\phi 1,50\text{m}$ com 45m de profundidade média, capeadas por um radier com 3,70m de altura em CAD C60 (cubos) com $a/c = 0,30$, 25% de cinza volante e 7% de sílica ativa, com inibidores de corrosão. Foi executada proteção catódica, já que o solo contém 4,5% de cloretos e 0,6% de sulfatos (Figura 10b). A superestrutura é composta de paredes diafragmas, constituindo-se no núcleo resistente do prédio (Figura 10c), com espessuras de 1,30m na base a 0,50m no topo, interligadas com as colunas externas com 0,60m de diâmetro por meio de vigas de concreto ou aço. Todas as lajes do prédio são planas com 20 cm de altura nas áreas de trânsito público e 30 cm nas áreas de serviço.

As dosagens de concreto foram realizadas para propiciar a construção de um pavimento a cada três dias; as formas dos pilares e paredes eram autodeslizantes, a armadura foi pré-fabricada, assim como o sistema de formas, com montagem e desmontagem rápida, com a retirada dos painéis sem necessidade de remover as escoras. Os painéis das formas eram compostas de duas lâminas externas de plástico sobre duas lâminas de alumínio rígido e o miolo de polipropileno expandido.

O concreto autoadensável foi projetado para os elementos verticais nas classes C80 até o piso 126 e C60 deste até o nível 156, a 56 dias de idade. Nas lajes foi usada a classe C50 a 28 dias, todos valores relativos à resistência em cubos. Para classe C80, usou-se a/c entre 0,30 e 0,32, para a C60, 0,36 e para C50, 0,38. Em todos esses concretos, foi empregado o aditivo superplastificante, para obtenção de 10MPa em 10h, e o módulo de elasticidade de 44GPa a 56 dias.

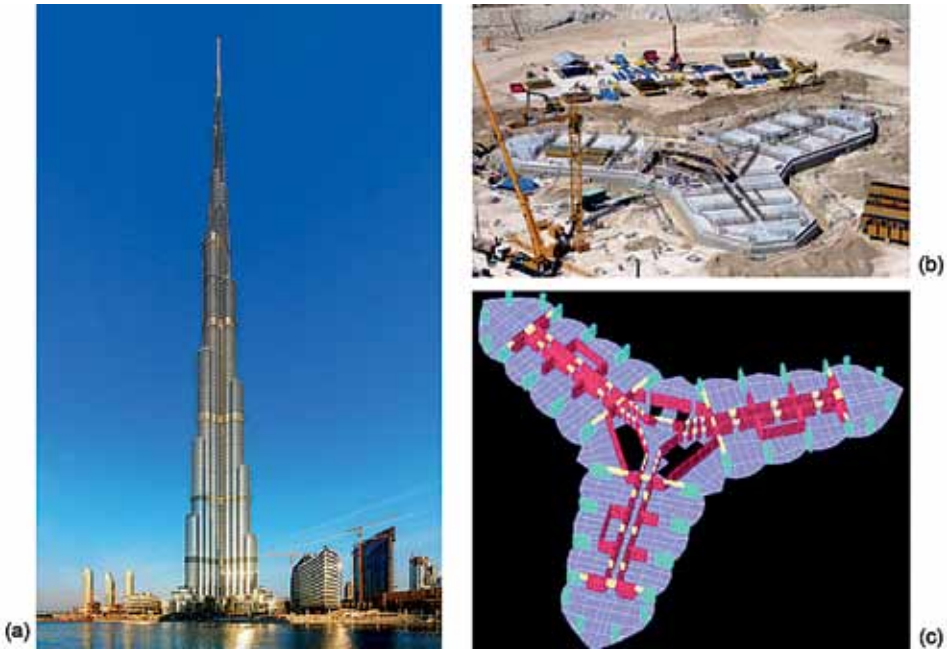


Figura 10 – a) Edifício Burj Khalifa (WIKIPÉDIA, 2011a); b) Fundação em radier (ABDELRAZAQ et al., 2008); c) estrutura com paredes diafragmas internas e pilares circulares externos (BAKER et al., 2007).

36.7.2 Obras de infraestrutura

Em vista do melhor desempenho e maior vida útil, principalmente por questões de sustentabilidade, as obras de infraestrutura são as que melhor se enquadram no conceito de alto desempenho e, logo, melhor se adéquam o uso de CAD. Como apresentado na seção 1.6.3 no Capítulo 1 deste livro, a tendência atual é o uso da industrialização de elementos e componentes estruturais no próprio canteiro ou não, com o intuito de melhorar a qualidade do concreto e reduzir o tempo de construção. Também o uso de estruturas mistas, em que as peças comprimidas são em CAD e as tracionadas ou fletidas em aço, fazem com que essa hibridização traga vantagens sensíveis na economia de materiais e na aplicação de vãos maiores como no caso de pontes estaiadas. Exemplos de construções desta natureza estão descritas nos itens 1.6.3.1 a 1.6.3.3, Figuras 47 a 61, do Capítulo 1 deste livro.

Um exemplo marcante das vantagens do uso de CAD foi o projeto e construção da Ponte *Stichtse*, perto de Amsterdam, Holanda, com vão principal de 160m, projetada inicialmente para concreto da classe C45 (concreto leve) após para C65 (concreto normal e, finalmente, recalculada para CAD C85 (resistência em cubos) (Figura 11). O uso do C85 reduziu em 30% o volume de concreto, o peso próprio e o custo, uma vez que o agregado na Holanda é muito

caro, além de melhorar substancialmente a sustentabilidade da obra. As paredes da viga caixão foram reduzidas de 50cm para 32cm. O menor peso das vigas caixão reduziu o esforço e a protensão em 26% em relação ao concreto C65. O menor peso possibilitou o aumento dos balanços da viga-caixão de 3,5m para 5,0m, durante a construção por balanços sucessivos.

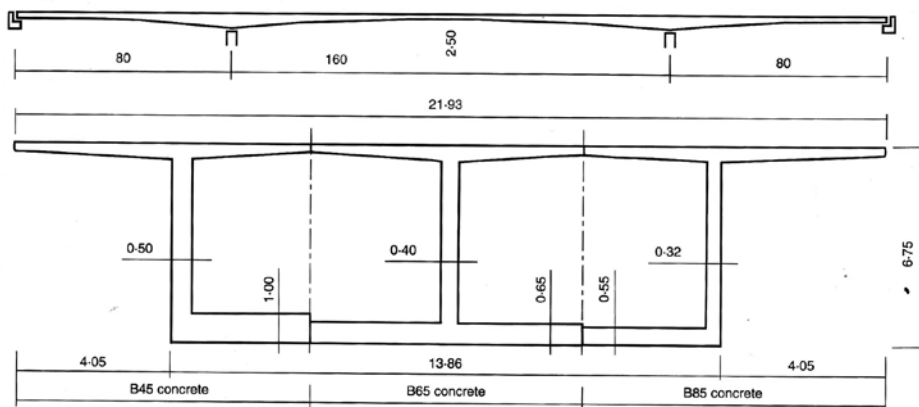


Figura 11 – Alternativas de projeto da Ponte Stichte, Holanda, utilizando concreto leve C45, concreto normal C65 e CAD C85 (WALRAVEN, 2000).

36.8 Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD)

Busca-se aumentar a resistência à compressão dos concretos, para obter um produto tão resistente e durável quanto uma rocha, porém fácil de moldar-se em qualquer forma e dimensão. Assim como os CAD são uma evolução frente aos CC, a evolução dos CAD é o concreto de pós reativos (CPR) – *Reactive Powder Concrete* (RPC), também conhecido como Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD).

O CPR é o material que tem sido mais estudado e utilizado entre os CUAD. Os primeiros que surgiram foram o DSP (*Densified with Small Particles* ou Densificado com Partículas Pequenas) e o MDF (*Macro Defect Free* ou Livre de Macros Defeitos). Segundo Aïtcin (2000), nos anos de 1972-73, Brunauer descobriu novo tipo de concreto que poderia atingir resistências à compressão de até 200 MPa, chamado de DSP por H. H. Bache, que a patenteou. Após, Birchall *et al.* desenvolveram concreto similar que atingiria resistências um pouco superiores, denominado MDF. É importante salientar que o procedimento para obtenção do DSP, do MDF e do CPR é similar, devendo-se utilizar partículas finas, consumo elevado de adições minerais e de aditivos superplastificantes, para trabalhar-se com a menor relação a/ag possível, da ordem de 0,10 a 0,20, em massa. Porém, o concreto dessa categoria que se está desenvolvendo no

momento é o CPR, por apresentar conceitos inovadores frente aos DSP e MDF.

O CPR é derivado de pesquisas realizadas na França por Pierre Richards, ex- diretor científico da empresa francesa Bouygues, considerado o inventor desse tipo de concreto, em 1990, a partir do estudo de CAD desde 1982. Continuando suas pesquisas em conjunto com as empresas Lafarge e Rhodia, o conceito CPR se expandiu com o uso de fibras e aditivos especiais para o de concreto com fibras de ultra-alto desempenho (sigla em francês BFUP – *Béton Fibrés à ultrahautes performances*). Atualmente, esse concreto é patenteado com o nome de Ductal®.

O princípio do CPR é a ausência de agregado gráúdo, com tamanho médio das partículas de 0,2 mm, daí o seu nome Concreto de Pós Reativos, sendo, sob o ponto de vista granulométrico, uma argamassa e não um concreto, ao qual podem ser adicionadas fibras. Como as propriedades apresentadas são as mesmas do concreto em grau muito mais elevado, o termo concreto prevaleceu em função do desempenho deste material. Em termos de escala o CPR está para o CAD na proporção de 1:100, conforme mostra o Quadro 7 (AİTCIN, 2008) e a Figura 12.

Quadro 7 – Fator de escala entre CAD e CPR (AİTCIN, 2008).

	Agregados – Dmáx. mm	Fibra / Armadura ϕ – mm	Fibra / Armadura L – mm
RPC	0,2	0,2	12
CAD	20	20	1200

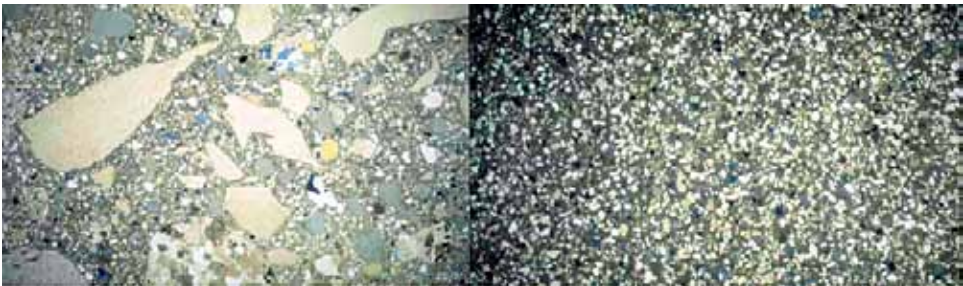


Figura 12– Comparação de texturas entre CAD (esquerda) e CPR (direita) (RESPLENDINO, 2011).

A ideia básica desse novo tipo de concreto foi eliminar os inconvenientes dos agregados gráudos enunciados em 36.4.4 como as possíveis oclusões ou vazios internos, eliminação da zona de transição e aumento da superfície do esqueleto granular. Pelo efeito da maior superfície específica, a distribuição das cargas incidentes sobre os grãos é mais homogênea, diminuindo a concentração de tensões em eventual falha da microestrutura, assim, aumentando a resistência última do material. Sabe-se que, quanto menor a dimensão dos grãos, maior é a superfície específica, maior a reatividade química e ligações secundárias pelas forças de van der Waals (ligações de superfície) e mais elevada é a

homogeneidade do material. Dessa forma, os grãos de agregados finos não ficam em contato um com os outros, evitando as tensões de contato e possíveis falhas nesses locais.

Segundo Aïtcin (2008), o conceito de CPR se baseia em três princípios básicos:

- aumento da homogeneidade do material pela eliminação das partículas grossas, limitação da areia para prevenir que entrem em contato entre si na pasta endurecida, melhoria nas propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratada e eliminação da zona de transição nas interfaces pasta/agregados;
- aumento da compactidade pela otimização das dimensões dos grãos dos pós da mistura e, quando possível, pela compressão exercida durante o endurecimento;
- refinamento da microestrutura da pasta hidratada por tratamento de calor.

Parece ser importante limitar o teor de areia para que os grãos não se toquem e formem esqueleto rígido, porque, ao ocorrer a retração, a matriz fica livre para se movimentar sem as restrições do agregado (Figura 13).

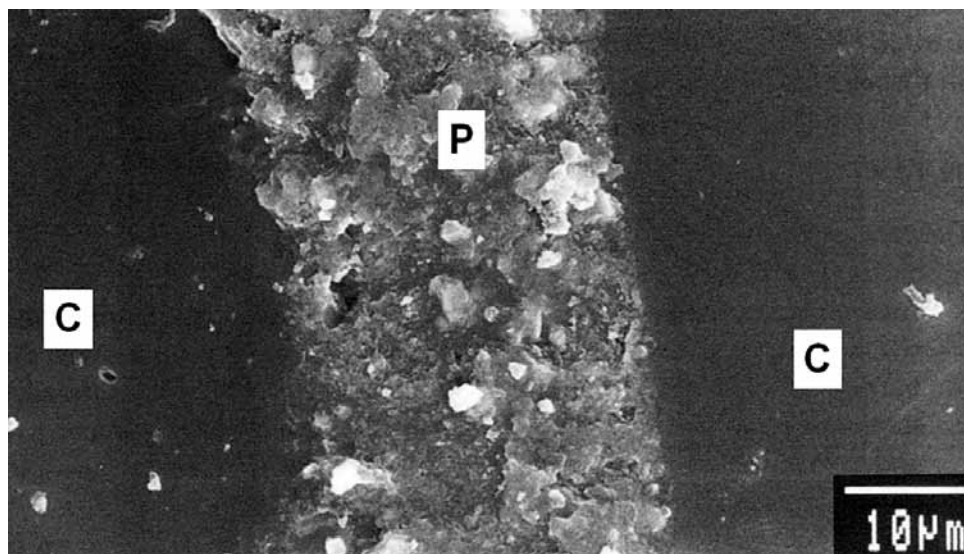


Figura 13 – Microestrutura de um CPR: C: grãos de cimento separados por faixa de pasta de cimento (P). Nota-se ausência de ZT e extrema compactidade da pasta (AÏTCIN, 2008)

A Figura 14 apresenta um diagrama do ensaio de porosimetria de um CC, um CAD classe C105 e um CPR classe C200. Observa-se que a maior quantidade de poros no CC está ao redor de 70nm , no CAD de 15nm e o CPR em 2nm . Para este último, praticamente todos os poros são inferiores a 10nm . Observa-se então que o CAD é um matéria muito compacto não deixando-se penetrar por praticamente nenhum agente agressivo, o que lhe confere extrema durabilidade.

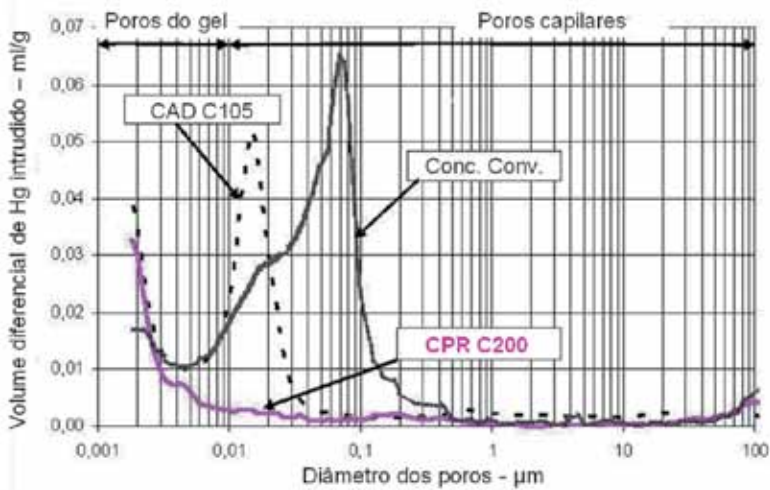


Figura 14 – Porosimetria de Hg comparativa entre CC, CAD e CPR (ULTRA HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 2011).

O CPR ainda é uma tecnologia inacessível à grande maioria das empresas brasileiras, devido às técnicas de execução, que envolvem cura do material com grande pressão e altas temperaturas. Além disso, as fibras metálicas específicas para esse fim não são comercialmente disponíveis no país, agregando o custo de importação das matérias-primas. Por isso, para que a tecnologia seja empregada em um maior número de obras, são necessários estudos que comprovem a viabilidade econômica do material.

36.8.1 Materiais Constituintes

A seleção dos materiais exerce grande influência em qualquer mistura, mas quando se propõe a buscar um CUAD, essa questão se torna primordial.

Para a seleção do cimento, buscam-se tipos mais puros possíveis, como o CP I no Brasil, porém este não é mais disponível comercialmente. A alternativa mais próxima seria o CP V ARI, apesar de ser um material de finura elevada, o que demanda água em excesso. Por isso deve ser feita uma análise mais ampla das vantagens e desvantagens de cada tipo de cimento. Pode-se também considerar cimentos não tão puros nem tão finos, como os CP II. Ainda é preferível a utilização de cimentos com baixa quantidade de aluminato tricálcico hidratado (C_3A), componente que libera calor de hidratação de forma rápida, podendo prejudicar as propriedades de um concreto com alto consumo de cimento por m^3 . Valores menores que 3% são considerados ideais.

Também é importante determinar o ponto de saturação do aditivo superplastificante, ou seja, o ponto em que a partir daquele valor o aditivo não exerce função plastificante na mistura, atuando simplesmente como a água.

Com a colocação do máximo de aditivo, a relação a/ag pode ser reduzida até o limite mínimo, melhorando as propriedades mecânicas do CPR. O que deve ser considerado, no entanto, é o teor de sólidos e a natureza da cadeia de polímeros do aditivo, sendo atualmente os mais eficientes são aqueles a base de policarboxilatos com cerca de 40 a 45% de teor de sólidos. Ainda a compatibilidade entre o cimento e o aditivo é de suma importância, por isso, testes iniciais devem ser realizados para a averiguação desses pontos.

A sílica ativa é a adição mineral recomendada para os CPR devido à forma de suas partículas, bem arredondadas, e o tamanho delas, cerca de 100 vezes menor do que o cimento. Recomenda-se a utilização de grandes quantidades do material, com percentuais chegando a 25% de substituição do cimento pela sílica ativa. Sabe-se que nessas quantidades não há mais hidróxido de cálcio para ser consumido, porém a sílica atuaria com a função de micro fíler para preencher os pequenos vazios na zona de transição e entre os agregados.

O agregado de quartzo é recomendado devido às propriedades superiores da rocha mãe. O quartzo é uma rocha de elevada dureza e resistência à compressão, superior a maioria dos materiais disponíveis para britagem. Deve-se apenas atentar que a britagem do quartzo, por ser um cristal resistente, produz fragmentos lamelares e pontiagudos, o que pode prejudicar a trabalhabilidade da mistura e provocar vazios entre os grãos. O quartzo é utilizado tanto como areia quanto como pó, para conferir uma boa compacidade à mistura. Richard & Cheyrezy (1995) também ressaltam que o pó de quartzo apresenta uma reatividade quando submetido a altas temperatura, o que ocorre durante a cura do CPR, elevando as resistências finais da mistura.

Os agregados para CPR devem ter, além de reduzida dimensão máxima para aumentar a homogeneidade e eliminar a ZT, um ótimo empacotamento entre as partículas pelo uso de materiais muito finos, como acima descrito, com o objetivo de otimizar a densificação do esqueleto inerte. A Figura 15 mostra as curvas granulométricas para concreto normal (Curvas A, B e C) e para RPC 200 e 800MPa, as quais são descontínuas para maior empacotamento. A Figura 15b mostra a máxima densificação teórica das partículas que é obtida quando os diâmetros diferem de fator 7 (sete).

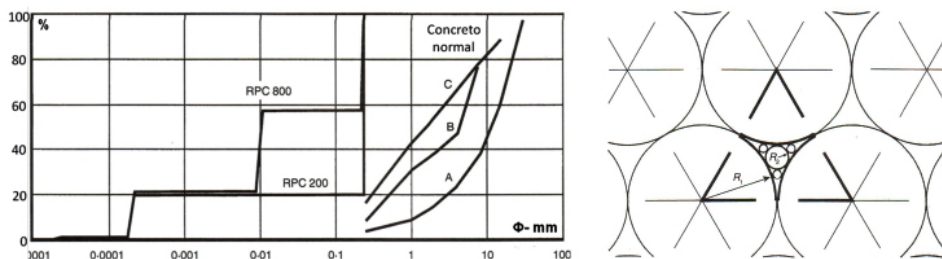


Figura 1- 5 a) Curvas granulométricas para CPR e concreto normal; b) empacotamento teórico máximo das partículas (WALRAVEN, 2000).

Já as fibras de aço são adicionadas à mistura para conferir ductilidade e resistência à tração e flexão, o que permite eliminar a armadura passiva. Essa é a grande diferenciação do CPR para outros tipos de concretos, colocando o material em outro patamar. Como as peças de CPR são de pequena espessura, deve-se limitar as dimensões das fibras, com comprimentos da ordem de 13mm e diâmetro de 0,15mm, conferindo um índice de forma próximo de 87. Utiliza-se uma elevada quantidade de fibra, da ordem de 155kg/m^3 , ou 2% de volume em relação à totalidade dos materiais.

Segundo Aïtcin (2008), as matrizes de CPR apresentam comportamento puramente elástico e ruptura frágil. A ductilidade é melhorada com o uso de fibras de aço com relação diâmetro/comprimento de acordo com o efeito de escala desejada. A Figura 15 mostra ensaios desenvolvidos na Universidade de Sherbooke de CPR com 1,8% de fibras de 12mm de comprimento (140kg/m^3) que dotam ao concreto comportamento pseudodúctil. Se o CPR for confinado em tubos de aço, a resistência à compressão e ductilidade aumentam, tendo sido obtidos patamares de 375MPa com deformação aproximada de 1%.

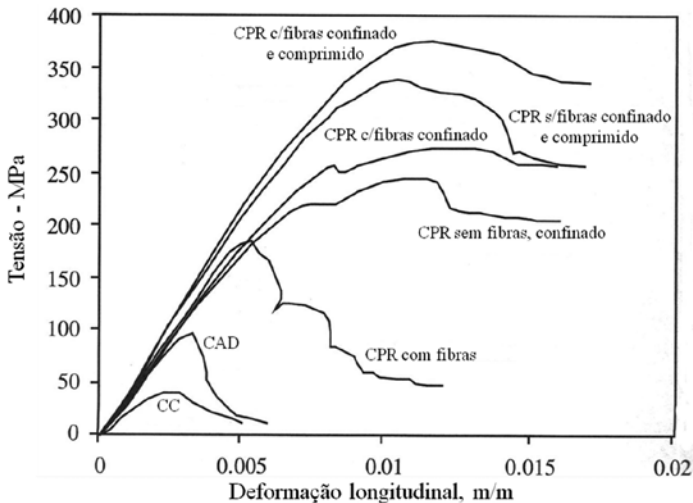


Figura 16 – Curvas tensão-deformação de diversos tipos de concretos: convencional, de alto desempenho, de pós-reativos sem e com fibras, com e sem confinamento e/ou pressão (AÏTCIN, 2000).

36.8.2 Dosagem

O conceito básico para a produção do CPR é a homogeneidade e a compacidade granular. A homogeneidade é obtida eliminando o agregado graúdo, restando o agregado miúdo, filer, cimento, adição mineral, aditivo químico e água. E, através da compacidade entre todos os sólidos do material, obtém-se a compacidade granular. Nesse caso, é aconselhável que se realize o empacotamento entre todos os componentes, inclusive o cimento.

Após os processos de execução do CPR, que incluem curas a altas temperaturas e pressões, adiciona-se a fibra metálica para conferir ao material a ductilidade e resistências à tração e à flexão necessárias para eliminar as armaduras na estrutura final. Sem armaduras e com as altas propriedades mecânicas, pode-se diminuir a espessura dos elementos por não necessitar de cobrimento e por absorver as solicitações com pouca quantidade de material. Richard & Cheyrezy (1995) mostram dosagens típicas do CPR no Quadro 8.

Quadro 8 – Dosagens típicas do CPR (em massa).

Materiais	CPR 200 MPa				CPR 800 MPa	
	Sem fibras		Com fibras		Agregados de sílica	Agregados metálicos
Cimento Portland	1	1	1	1	1	1
Sílica ativa	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Areia (150-600µm)	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Quartzo (d50 = 10 µm)	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Aditivo superplastificante	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Fibra metálica (L=12 mm)	-	-	0,175	-	-	-
Fibra metálica (L=3 mm)	-	-	-	-	0,630	0,630
Agregados metálicos <800 µm	-	-	-	-	-	1,49
Água	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Pressão de compactação	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Temperatura de tratamento térmico	20°C	90°C	20°C	90°C	250 - 400°C	250 - 400°C

Observa-se que o consumo de cimento e sílica ativa por metro cúbico de concreto seria por volta de, respectivamente, de 960kg e 240kg.

36.8.3 Métodos de Execução

Todos os materiais cimentícios requerem cuidados para que as potencialidades da mistura sejam exploradas. Porém, com o CPR, a importância de uma execução cuidadosa se torna essencial, devido a maior sensibilidade e importância desse material para a estrutura, pois não há armaduras de aço para reforço ou outros componentes de complementação.

A primeira etapa, que é a mistura das matérias-primas, é fundamental para a garantia das propriedades finais do compósito. O tempo de mistura para o CPR é maior do que para CC, pela ausência de agregado graúdo, que auxilia na mescla e dispersão dos componentes menores, quando presentes. Até por isso, a produção de CPR em caminhões betoneira, ou betoneiras comuns de construção, torna-se difícil, já que a forma de homogeneização desse tipo de misturador é por gravidade, com o agregado graúdo desempenhando um papel chave no processo. Além disso, as condições necessárias de curas à alta temperatura e pressão são difíceis de operacionalizar em canteiros de obras convencionais. Assim, atualmente, a produção do CPR está limitada a indústrias de pré-fabricados, que utilizam centrais dosadoras de concreto e há a

possibilidade de se criar áreas de cura com altas temperaturas e, em situações específicas, alta pressão.

Segundo Vanderlei (2004), deve-se homogeneizar todos os materiais secos, fluidificar a pasta com aditivos químicos e água e colocar as fibras metálicas. Após a mistura de todos os componentes, moldam-se as peças projetadas e parte-se para a etapa pós-mistura.

Para atingir as propriedades elevadas, deve-se aplicar pressão nas peças de CPR, para diminuir, ou até eliminar, os vazios na mistura. As pressões podem ser aplicadas por, no mínimo, 6h após a moldagem, com valores de 20 até 50MPa. Um exemplo de forma de aplicação de pressão está ilustrada na Figura 17, em que se observa o aparato produzido por Christ (2011) no Laboratório de Materiais da UNISINOS.



Figura 17 – Aparato para aplicação de pressão no CPR no estado fresco (CHRIST, 2011).

Há exemplos de situações similares em indústrias de pré-fabricados, que desenvolveram sistemas para aplicação de pressão em peças moldadas com CPR.

Após essa etapa, segue-se para a cura térmica, em que, inclusive, são formados cristais que conferem maiores resistências aos compostos. Segundo Vanderlei (2004), até 200°C surgem cristais conhecidos como ‘torbemorite’, e após os 200°C ‘truscottite’, ‘gyrolite’, ‘xonotlite’ e ‘hillebrandite’.

36.8.4 Exemplo de obras

As características do CPR, comparadas ao aço, permite que se projetem estruturas de geometria e espessura jamais vistas com outros elementos, em se

tratando de concreto (BIZ, 2001). Para ter-se uma ideia da potencialidade desse material, apresenta-se o Quadro 9, que compara as possibilidades e propriedades de estruturas de aço, CCV e CAR, para a execução de edificações verticais. Os CUAD certamente ilustrariam valores mais interessantes que esses.

Quadro 9 – Potencialidades teóricas da utilização de materiais estruturais (DE LARRARD apud DAL MOLIN, 1995).

MATERIAL	AÇO	CC	CAR
Resistência (MPa)	360	35	90
Custo (franco francês/kg)	330	26	14
Altura (m)	3090	710	1730
Vão (m)	371	48	123

Nota-se que, apesar de a estrutura de aço permitir vãos e alturas de edificações maiores, o custo pode ser elevado, em comparação ao CAR. Extrapolando-se as propriedades, pode-se supor que as estruturas com CPR cheguem a alturas, resistências e vãos similares à estrutura de aço, porém com custo inferior e durabilidade e esbeltez maiores. Na Figura 18, são representadas as seções de quatro tipos de materiais, CPR, aço, concreto protendido e concreto armado, com mesma capacidade portante, para fins de comparação.

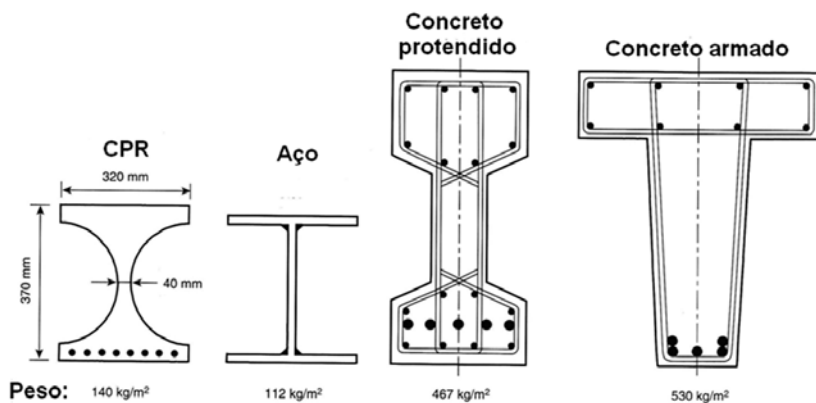


Figura 18 – Seções de peças de CPR, aço, concreto protendido e concreto armado com mesma capacidade portante (WALRAVEN, 2000).

A primeira estrutura de porte construída com o CPR, de resistência à compressão de 200 MPa, foi a passarela de Sherbrooke em Quebec, no Canadá, em 1997 (BLAIS & COUTURE, 1999). A utilização do CPR deveu-se, basicamente, à viabilização de uma estrutura com grande esbeltez, com a relação comprimento/largura de 20 (60 metros de comprimento por 3 metros de largura), possibilitando a construção de passarela relativamente leve, pré-fabricada e montada no local.

A estrutura é composta por seis (6) peças pré-fabricadas de CPR com 10 m de comprimento, compondo um arco de 60 m de vão. Cada segmento possui 3 m de altura, como se observa na Figura 19, que representa a seção transversal da viga inferior da passarela. Nota-se que as peças produzidas podem ser transportadas e montadas por caminhões e guindastes disponíveis nos maiores centros urbanos. O Quadro 10 mostra o traço típico empregado na passarela dessa obra.

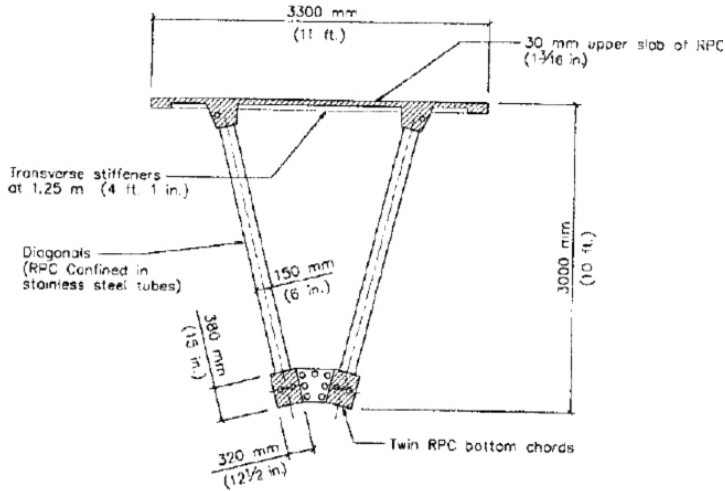


Figura 19 – Seção transversal da viga inferior da passarela de Sherbrooke (Blais & Couture, 1999).

Quadro 10 – Traço do CPR utilizado na passarela de Sherbrooke (BLAIS & COUTURE, 1999).

Material	Consumo (kg/m³)
Cimento – Tipo 2	710
Sílica ativa	230
Agregado de quartzo	210
Areia de sílica	1010
Fibra metálica	190
Aditivo superplastificante	19
Água	200

Observa-se que o consumo de aglomerantes foi de 940 kg/m³, com relação a/ag de 0,21 e 2,04% de aditivo em relação aos aglomerantes. Certamente se poderia aumentar o teor de aditivo, até o ponto de saturação, para reduzir a relação a/ag e aumentar as resistências. A Figura 20 ilustra a montagem de uma das peças de CPR no local de aplicação. Apesar das grandes dimensões, o elemento é leve, devido às reduzidas espessuras, o que permite uma montagem relativamente simples



Figura 20 – Seção transversal da viga inferior da passarela de Sherbrooke (BLAIS & Couture, 1999).

Outra obra realizada em CPR foi a passarela para pedestres em Seoul, Coréia do Sul, Figura 20 (ver também seção transversal na Figura 66 do Capítulo 1) inaugurada em 2002, com 120m de vão livre e tabuleiro de apenas 3cm. Também em 2005 entreou em atividade o Posto de Pedágio do Viaduto de Millau, na França (Figura 20), executado totalmente em CPR com 98 m de comprimento e 28 m de largura.



Figura 20 – Passarela Seonyu, Coréia do Sul.



Figura 21 – Posto de Pedágio do Viaduto Millau, França.

Ultimamente muitas obras têm sido realizadas com esse material na França, Japão, Alemanha, Suíça, Canadá, Estados Unidos e muitos outros países em função das inúmeras possibilidades que apresenta, especialmente versatilidade de formas e dimensões, além de sua extrema leveza. No trabalho de Resplendino (2006), *Les Bétons Fibrés Ultra Performants*, apresentado no Colóquio sobre Obras de Arte em Toulouse, 2006, são apresentadas várias obras, exemplos de aplicação em várias áreas da construção civil, além de detalhes sobre pesquisas e características do CPR.

36.9 Considerações Finais

Parece claro que o CAD tem um potencial latente a ser explorado, mesmo já existindo exemplos de aplicação de destaque no cenário atual. Apesar de já haver um domínio do meio acadêmico e produtivo das técnicas a respeito dessa tecnologia, o uso do CAD ainda está restrito a situações especiais, em que não é possível a utilização do CC. Paralelamente a isso, vem surgindo o CPR, o mais representativo dos CUAD, o qual ainda carece de mais estudos e aplicações práticas, ao menos em âmbito brasileiro, para ter-se um domínio completo do material. Espera-se, em breve, poder relatar a primeira aplicação prática desse no Brasil, após as técnicas de execução serem dominada pela indústria. Na Europa, nos Estados Unidos, no Japão, esse material já está sendo utilizado em várias obras em que características específicas são requeridas, como durabilidade, leveza, estética e elevada resistência. Tem-se utilizado esse material não somente na construção civil, como também em decoração, monumentos, mobiliário, dentre outros usos.

36.10 Referências Bibliográficas

- ABDELRAZAQ, A. S. E., KIM, K. J., KIM, J. H. Brief on the Construction of the Burj Dubai Project, Dubai, UAE. In: World Congress of Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 8th, 2008, Dubai. **Proceedings...** Chicago: CTBUH, 2008, p. 1-9.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363R-92 (Reapproved 1997). **State of the art report on high strength concrete. ACI Manual of Concrete Practice**, part 1. Farmington Hills: ACI, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- _____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais. Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR 10900: Água para amassamento de concreto**. Partes de 1 a 11. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho**. Partes de 1 a 6. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- _____. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- _____. **NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000.
- _____. **Binders for durable and sustainable concrete**. Abingdon: Taylor & Francis, 2008 (Modern Concrete Technology, 16)
- ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. Porto Alegre: UFRGS, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2000.
- BAKER, W. F.; KORISTA, D. S.; NOVAK, L. C. Engineering the world's tallest Burj Dubai. *In: WORLD CONGRESS OF COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT*, 8th, 2008, Dubai. **Proceedings...** Chicago: CTBUH, 2008. p. 1-10.
- BEZERRA, S. A. **Influência do tipo e da duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em períodos quentes ($t > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($h < 50\%$)**. Goiânia: UFG, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005.
- BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. Curitiba: UFP, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. Campinas: UEC, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. Precast, prestressed pedestrian bridge — world's first reactive powder concrete structure. **PCI Journal**, p. 60-71, 1999.
- BRITEZ, C. N. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. São Paulo: USP, 2011. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CHRIST, R. **Desenvolvimento do concreto de pós reativos com materiais do estado do Rio Grande do Sul**. São Leopoldo: UNISINOS, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.
- CHRISTOFOLLI, J. L.; ENOUE, M. H.; FREITAS, J. A. **Recorde nacional de concreto de alto desempenho em pilares, Centro Empresarial Antarctica**. *In: Congresso Brasileiro do Concreto*, 49, 2007. Anais... Bento Gonçalves: IBRACON, 2007.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. São Paulo: USP, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- DE LARRARD, F. A method for proportioning high-strength concrete mixtures. **Cement, Concrete and Aggregates**, v.12, p. 47-52, 1990.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Model Code 2010. First complete draft**. Lausanne: fib, v.1, 2010.
- HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. São Paulo: UFSP, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- HARTMANN, C.; HELENE, P. HPCC in Brazilian Office Tower. **Concrete International. ACI**, American Concrete Institute, v. 25, n. 12, p. 64-68, 2003.
- HELLAND, S. Design and utilization of HSC: Case studies. *In: REUNIÃO ANNUAL DO IBRACON*, 30, 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1988. v. 1, p. I-XII.
- ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura**. São Paulo: USP, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- ISAIA, G. C.; VAGHETTI, M.; GASTALDINI, A. L. G. Carbonatação acelerada e natural de concreto com alto teor de pozolana: um estudo preliminar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO IBRACON*, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001. Trabalho III-023.
- ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MORAES, R. Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. **Cement & Concrete Research**, v. 25, p. 69-76, 2003.
- MEHTA, P. K.; AÏTCIN, J.-C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement & Concrete Aggregates**, Philadelphia: American Society for Testing Materials, p. 70-78, winter 1990.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.
- NAWY, E. G. **Fundamentals of high strength high performance concrete**. London: Longman Group Limited, 1996. 340 p.
- NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.
- O'REILLY, V. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: PINI, 1998.
- PINTO, R. O. **Contribuição ao estudo de métodos de dosagem para concreto de alto desempenho (CAD) empregando materiais da região de Goiânia**. Goiânia: UFG, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.
- RESPLENDINO, J. **Les bétons fibrés ultra performants (BFUP). Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages**. *In: Colloques sur les Ouvrages d'Art*, Toulouse, 2006. Disponível em: <http://www.le-pont.com/Histo/programme/interventions/lcpc/J%20Resplendino-2.pdf>. Acesso em: maio 2011.
- RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n.7, p. 1501-1511, 1995.

- TÉCHNE, REVISTA DE ENGENHARIA. **Inovações ultrafinas**. Disponível em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/160/inovacoes-ultrafinas-conheca-os-concretos-mais-inovadores-em-experiencia-179233-1.asp>. Acesso em: 23 abr. 2011.
- THORTON, C. H.; MOHAMAD, H.; HUNGSPRUKE, U.; JOSEPH, L. M.; HASHIM, H. The Petronas Twin Towers and High-Performance Concrete. In: MALHOTRA, V. M. (Ed.). CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 3rd, 1997, Kuala Lumpur. **Proceedings**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1997. p. 329-350 (SP-172).
- TORRALES CARBONARI, B. M. **Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones**. Barcelona, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1996. 174 p.
- TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- ULTRA HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. **What is ...?**. Disponível em: http://www.uni-kassel.de/hrz/db4/extern/wd-bube/index_was_ist_uhpc_en.php. Acesso em: maio 2011.
- VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. São Carlos: USP, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.
- WALRAVEN, J. The evolution of concrete. **Structural Concrete**. Lausanne: Fédération Internationale du Béton, v. P1, n. 1, p. 3-12, 1999.
- WIKIPÉDIA. **Burj Khalifa**. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa. Acesso em: maio 2011a.
- _____. **Pierre Richard**. Disponível em: <http://www.industrie.com/it/actualites/pierre-richard.7743>. Acesso em: maio 2011b.

