

## 2 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Inicialmente, é apresentado um breve histórico sobre a utilização do concreto, assim como da evolução do incremento em sua resistência. A partir desta abordagem, poderá ser feita uma análise de todos os materiais constituintes e dos critérios dispensados para sua mistura através dos procedimentos de dosagem.

### 2.1 Histórico

Data de 1824 a obtenção da patente do cimento, na Inglaterra, por Joseph Aspdin. A partir daí, a utilização de concreto tem sido cada vez mais difundida em todo o mundo, incrementada por estudos que resultaram no surgimento da Lei de Abrams, em 1918, que relacionou a resistência do concreto com o seu fator água/cimento.

Através de dados fornecidos pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) [1], tem-se conhecimento de que a primeira regulamentação de obras com estrutura em concreto foi elaborada pela ABC (Associação Brasileira de Concreto), em 1931, intitulada “Regulamento para Construções em Concreto Armado”. Tal regulamento contemplava concretos com  $f_{ck} < 12$  MPa, sendo que a máxima resistência permitida para  $f_{c28}$  era de 26 MPa.

Historicamente, percebe-se uma evolução nos incrementos de resistências, em função das necessidades, sendo a partir daí adotada a denominação de *concreto de alta resistência*, referindo-se àqueles que possuem resistências muito mais elevadas em relação aos outros mais regularmente utilizados, denominados concretos comuns.

Mundialmente, há registros de que em meados da década de 50, resistências de 34MPa eram consideradas altas. Nos anos 60, já eram produzidos comercialmente concretos com resistências entre 41 MPa e 52 MPa.

No entanto, quando as resistências à compressão chegaram perto dos 60 MPa, houve um obstáculo técnico que impediu a continuação de seu incremento. Tal barreira só foi transposta com a disponibilidade de novos materiais, que tornaram viável reduzir ainda mais o fator água/aglomerante, uma vez que os redutores de água disponíveis, elaborados à base de lignossulfonatos, haviam chegado ao seu limite.

No final dos anos 60, os superplastificantes foram utilizados pela primeira vez em concretos quase simultaneamente no Japão e na Alemanha. Cabe esclarecer que já havia um conhecimento prévio e até uma patente americana do desempenho de redutores de água à base de policondensados de naftaleno sulfonado desde 1938, mas seu custo era considerado muito alto e os redutores à base de lignossulfonatos atendiam bem às expectativas até então.

Nos anos 80, com o desenvolvimento tecnológico dos superplastificantes e com o aumento de sua dosagem aliados à utilização de subprodutos com propriedades pozolânicas, foi efetivamente possível a obtenção de concretos com resistências próximas e superiores a 100 MPa, com significativa redução de seu fator água/cimento, sem detrimento da trabalhabilidade.

Segundo Shah[2], a realidade do século XXI será de resistências em torno de 200 MPa.

## **2.2** **Características do Concreto de Alto Desempenho**

A princípio cabe diferenciar a terminologia entre as expressões Concreto de Alto Desempenho e Concreto de Alta Resistência. Com intuito de esclarecer a adoção da denominação Concreto de Alto Desempenho ao longo de todo este trabalho, será citado a seguir um trecho transcrito de Pierre-Claude Aïtcin [3] que nos diz:

“... A despeito do fato de que até agora concreto de alto desempenho tem sido utilizado principalmente em aplicações de alta resistência, é inevitável que num futuro muito próximo o concreto de alto desempenho seja mais especificado e usado pela sua durabilidade do que especificamente, pela sua alta resistência à compressão. Quando a comunidade da engenharia vier a entender isto, e modificar sua percepção do concreto de alto desempenho, a indústria da construção dará definitivamente um grande passo adiante.”

Em concordância com esta forma de abordagem, encontramos diversos autores, como Kumar Mehta[4], que nos ratifica a utilização do termo Concreto de Alto Desempenho como aquele que é normalmente utilizado na literatura para descrever misturas que possuem alta trabalhabilidade, alta resistência e baixa permeabilidade, que faz com que seu uso seja especificado visando uma longa durabilidade, principalmente em estruturas sujeitas a meios agressivos.

Sem dúvida, pode haver casos onde o concreto de alto desempenho comporta-se como um concreto simplesmente mais resistente. No entanto, cabe ressaltar uma diferença significativa de que os concretos usuais se comportam como se fossem homogêneos e de forma isotrópica, tendo a pasta de cimento hidratada ou zona de transição como o elo mais fraco. No caso do CAD, pode-se considerar seu comportamento como não isotrópico, sendo o material constituído, distintamente, de pasta de cimento hidratada e agregados.

Desta forma, as propriedades do CAD resultante serão diretamente influenciadas pelos seus materiais constituintes, assim como pela relação água/aglomerante. Mais adiante, será feito um relato sobre a importância da determinação destes materiais constituintes e das propriedades mais importantes do CAD, que esta dissertação visa contemplar.

Com o conhecimento desta diferença, constata-se que o campo de tensões desenvolvido por uma carga aplicada a uma estrutura em CAD, em geral, não se comporta da mesma forma que um campo de tensões em um concreto usual.

As principais características do concreto de alto desempenho estão, em geral, associadas diretamente a benefícios propiciados com o seu emprego. As principais propriedades são :

- Alta resistência à compressão, que se traduz no aumento de capacidade portante e/ou diminuição da seção transversal do elemento estrutural;
- Alto Módulo de Elasticidade;
- Fator água/ cimento baixo, com o valor máximo limitado a 0,40;

- Baixa permeabilidade, o que representa um aumento significativo na vida útil da estrutura, principalmente no que tange a ataques de fatores corrosivos em meios agressivos, sendo fator preponderante para a durabilidade;

- Melhor trabalhabilidade, que é traduzida pela excelente fluidez e maior facilidade de lançamento e adensamento do concreto fresco em relação ao concreto convencional, devido à utilização de aditivos superplastificantes e aditivos minerais;

- A resistência à abrasão é cerca de 10 vezes maior que a do concreto convencional, pois a aderência entre a matriz e o agregado impede o desgaste da superfície;

- A fluência registrada em estruturas de concreto de alto desempenho é bem reduzida em relação ao concreto convencional. Segundo dados da ABCP[1] este valor representa cerca de 20% da fluência registrada no concreto convencional. Esta diferença pode ser atribuída à maior rigidez e à baixa porosidade da pasta de cimento;

- A aderência entre concreto e armadura é beneficiada, principalmente, quando é acrescentado um filler (aditivo mineral) na matriz da argamassa;

- O processo de cura exige cuidados mais rigorosos, com hidratação constante, devido a baixa relação água/ cimento, evitando-se, assim, quaisquer efeitos de retração indesejados, seja por perda de água através da superfície (retração plástica) ou por redução do volume devido à hidratação contínua do cimento ao longo de sua massa (retração autógena);

- A ruptura do concreto de alto desempenho é frágil, e por isso é imperativa a consideração do Efeito Escala da Mecânica da Fratura em peças estruturais utilizadas para vencer grandes vãos;

- A microfissuração se manifesta no concreto de alto desempenho a 75% de  $f_c$ , enquanto no concreto convencional ela se manifesta a 35% de  $f_c$ ;

- O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) para este tipo de concreto, assim como seu módulo de elasticidade, são de difícil determinação. Para o primeiro, são encontrados valores na literatura com pequena faixa de variação, a saber: Ahmad e Shah[2] registraram valores de 0.18 a 0.24, quando Kaplan já havia registrado valores entre 0.23 e 0.32. Quanto ao módulo de elasticidade, como será extensivamente abordado adiante, os valores teóricos encontrados na literatura

variam de acordo com o código adotado e seu valor apresenta um patamar máximo de 50 GPa.

### 2.3

#### Utilização e Funcionamento do Concreto de Alto Desempenho

O concreto de alto desempenho tem tido uma larga aceitação na indústria de construção, principalmente no que visa à obtenção de obras com maior durabilidade, dispensando os gastos com manutenção de estruturas. Segundo Tikalsky [5], a utilização de concretos de maior durabilidade deverá fazer com que obras de arte como pontes, viadutos, pavimentos e respectivas estruturas portantes possam ter, pelo menos, o dobro da durabilidade, sendo este o maior desafio: a implementação de todos os conhecimentos para a disponibilização de recursos para novos projetos, em vez de gastos com manutenção das estruturas já existentes.

Para um projeto onde se adota uma solução em concreto de alto desempenho, são impostas condições de qualidade que representam etapas bem distintas, a saber:

- *Condições Arquitetônicas*: aquelas que determinam por vezes as dimensões dos elementos estruturais;
- *Condições Funcionais*: aquelas que compatibilizam cargas, gabaritos, rigidez e deformabilidade das peças, estanqueidade, alocação de juntas de dilatação, ou seja, os parâmetros que são determinantes no projeto estrutural;
- *Condições Estruturais*: aquelas que adequam as condições de funcionamento à solução estrutural adotada;
- *Condições Construtivas*: trata-se da adequação das etapas construtivas às necessidades do projeto;
- *Condições de Integração*: aquelas que tratam de todas as interfaces de soluções estruturais adotadas em função de interferência com outros serviços;
- *Condições Econômicas*: aquelas que tratam da otimização de custos, visando sempre obter a melhor relação custo x benefício possível.

A compreensão da importância de tais demandas é fundamental para se entender que o objetivo deste trabalho, isto é, o estudo das propriedades do concreto de alto desempenho especificado no Brasil, contribuindo também para elucidar dúvidas ainda persistentes em relação à dosagem e às propriedades deste material.

Desde o processo de sua elaboração, sabe-se que o concreto de alto desempenho apresenta uma baixa relação água/ cimento, obtendo ganhos de compacidade e fluidez devido à adição de aditivos superplastificantes e aditivos minerais, em geral, microssílica. Entretanto, a contrapartida de tal baixa relação, com ausência de exsudação, torna necessária uma cautela excessiva no processo de cura .

Com relação ao funcionamento do concreto de alto desempenho, sabe-se que o Efeito Rüsç só se manifesta com tensões atuantes com valor de 85%  $f_c$ , enquanto, no concreto convencional, tal manifestação ocorre com valores em torno de 75%  $f_c$ . Tal comportamento deve-se à compensação através do aumento de resistência à compressão com a idade em função das constantes reações de hidratação do cimento. No caso específico do concreto de alto desempenho, tais incrementos tendem a ser bem maiores do que as perdas por relaxação. Ainda com relação ao fenômeno da relaxação, Irvani e MacGregor[6] sugerem os seguintes dados para resistência:

- 70 a 75% para cargas de curta duração para concretos de 65 MPa;
- 75 a 80% para concretos sem adição de micro sílica de 95 MPa;
- 85 a 90% para concretos com adição de micro sílica de 105 MPa;
- 85 a 90% para concretos com adição de micro sílica de 120 MPa.

## 2.4

### **Materiais Constituintes**

Considerando todas as particularidades do CAD, que pode ser considerado como um material constituído de pasta de cimento hidratada, zonas de transição entre pasta e agregados e os agregados miúdo e graúdo, torna-se importante o completo entendimento da função de cada material constituinte na qualidade final do concreto.

### 2.4.1 Cimento

Definições sucintas e elementares de cimento são facilmente encontradas na literatura como o material obtido através da moagem do clínquer, que se trata de uma mistura de argila e calcáreo submetida a altas temperaturas.

Na verdade, sabe-se que a descoberta da utilização do cimento marca uma nova história no desenvolvimento de estruturas. Pode-se afirmar que é, sem dúvida, o material mais importante na composição dos concretos.

O cimento é constituído de partículas entre 1 e 50  $\mu\text{m}$ , cuja composição química é basicamente :

- $\text{C}_2\text{S}$  ( Silicato bicálcico ) - 15 a 30 %;
- $\text{C}_3\text{S}$  ( Silicato tricálcico) – 45 a 60 %;
- $\text{C}_3\text{A}$  ( Aluminato tricálcico) – 6 a 12%;
- $\text{C}_4\text{AF}$  ( Fluoraluminato tetra cálcico) – 6 a 8%.

Os diferentes tipos de cimento são regidos no Brasil pelas normas da ABNT como, por exemplo, NBR 5732/91[7], que abrange o cimento Portland comum (antiga EB-1).

Sabe-se que vários tipos de cimentos produzem diferentes tipos de concreto, em função da diferente proporção que eles ocupam na mistura e da quantidade de cada componente na mistura. É conhecido que o teor de  $\text{C}_3\text{S}$  contribui na resistência tanto para as primeiras idades, quanto para a resistência final. Em contrapartida, o  $\text{C}_2\text{S}$  tem uma velocidade de hidratação menor, daí contribuir somente para a resistência final do cimento.

No caso do concreto de alto desempenho, o papel do cimento é fundamental. Apesar de não haver um só tipo de cimento que produza o CAD, não existem dados na literatura que citem que sua obtenção só é viável através de um tipo específico de cimento, ou que há um tipo mais adequado em detrimento de outros.

Dependendo dos diferentes tipos de cimento, existem variações significativas na quantidade de água de amassamento para obtenção do

abatimento desejado, diferenças no consumo de material necessário, aumento ou diminuição do calor de hidratação e sobretudo, situações anti econômicas.

Segundo Paulo Monteiro[8], qualquer tipo de cimento regulamentado pela ASTM pode ser utilizado para produzir concretos com reologia adequada e resistências à compressão superiores a 60 MPa. No entanto, para obter maiores resistências nas misturas, com boa trabalhabilidade, torna-se necessário o estudo de sua composição química, finura dos grãos e principalmente da compatibilidade entre suas partículas e o aditivo superplastificante utilizado. Mesmo assim, experiências mostram que cimentos com baixo teor de  $C_3A$  geralmente produzem concretos com melhor reologia, devido a sua forte influência nas primeiras idades.

Dentro da microestrutura do CAD, devido à baixa relação água/material cimentante, as partículas de cimento ficam muito próximas umas das outras, com menor distância para percorrer para gerar uma ligação inicial. Daí haver uma maior resistência inicial e menos espaços livres, ou seja, menos porosidade.

## 2.4.2

### Aditivos

Os aditivos, conforme já relatado anteriormente, foram introduzidos na mistura de concreto com a finalidade de ajustar as características reológicas às necessidades do projeto, com objetivos de aumentar a plasticidade, reduzir a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, retardar a taxa de evolução de calor, aumentar a durabilidade em condições específicas.

Os aditivos disponíveis no Brasil têm sua classificação estabelecida pela NBR-11768/92[9], da seguinte forma:

- Tipo P – Plastificantes
- Tipo R – Retardadores
- Tipo A – Aceleradores
- Tipo PR – Plastificantes retardadores
- Tipo PA – Plastificantes aceleradores
- Tipo IAR – Incorporadores de ar
- Tipo SP – Superplastificantes



- Tipo SPR – Superplastificantes retardadores
- Tipo SPA – Superplastificantes aceleradores

Os aditivos são classificados em produtos químicos derivados de sais solúveis e polímeros ou aditivos minerais. Os de base mineral são em geral pozolonas ou subprodutos de fornos de usinas termelétricas ou de fornos de indústria metalúrgica.

No caso de produção de concreto de alto desempenho, são utilizados basicamente os dois tipos de aditivos: líquidos superplastificantes e minerais. Deve ser citado que, em alguns casos, são combinados dois tipos de aditivos minerais.

#### **2.4.2.a** **Aditivos Superplastificantes:**

Os superplastificantes são polímeros orgânicos hidrossolúveis, obtidos sinteticamente através de um processo de polimerização. São aniônicos com grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarboneto, formando longas moléculas que tendem a envolver as partículas de cimento com carga negativa e que devido as forças de Van der Waals, geram uma dispersão. Desta forma, partículas de cimento com cargas opostas, que tenderiam a atrair-se, repelem-se. Com isso, há uma hidratação melhor e mais rápida do cimento tendo como resultado final deste processo, um concreto com alta trabalhabilidade e alta resistência.

Dentre as categorias de superplastificantes, podemos citar os seguintes materiais:

- Condensados sulfonados de melamina-formaldeídos;
- Condensados sulfonados de naftaleno-formaldeídos;
- Condensados de lignosulfonados modificados;
- Ésteres de ácido sulfônico(sendo utilizados em menor escala).

Apesar de inúmeras pesquisas sobre a reação de hidratação de cimento Portland em presença de superplastificantes, ora abordando aspectos físicos da mistura Foissy e Pierre[10], ora químicos Andersen[11], Diamond e Struble[12], ou ainda uma abordagem mais orientada para o cimento, estudando o efeito dos superplastificantes nas diferentes partes constituintes  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  segundo Masazza e Costa, não existe ainda uma teoria clara e bem aceita explicando os pormenores de toda a ação dos superplastificantes sobre as partículas do cimento durante a mistura e hidratação inicial. Sabe-se também que a interação entre cimento e plastificante torna-se ainda mais complexa devido às interações simultâneas entre cimento e sulfatos e destes com o superplastificante,

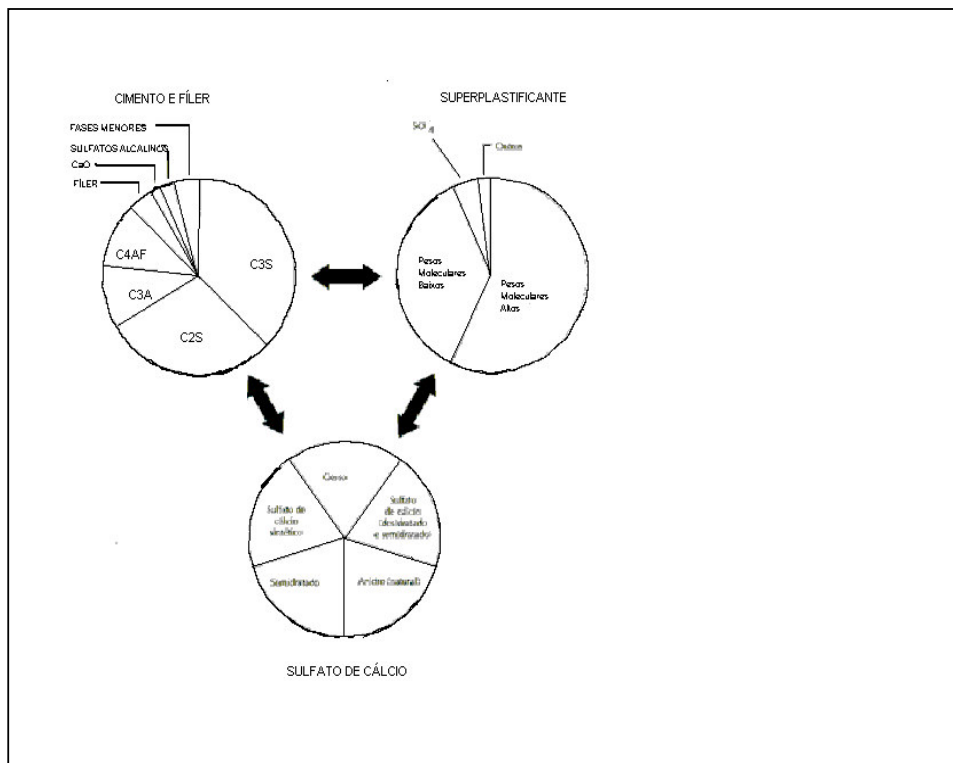


FIGURA 2.1 - Complexidade das interações entre cimento Portland, sulfato de cálcio e aditivos segundo C. Jolicoeur e P.C. Aïtcin. Fonte : Aïtcin

No entanto, sabe-se que o superplastificante aumenta a trabalhabilidade do concreto, aumentando seu abatimento e sendo sua mistura fresca passível de lançamento com pouco ou nenhum adensamento, não sofrendo com isso efeitos excessivos de segregação ou exsudação.

### 2.4.2.b Aditivos Minerais

Os aditivos minerais são compostos por pozolanas em estado natural ou artificial, que são os subprodutos de fornos de usinas termelétricas ou de indústrias metalúrgicas. Dentre a variedade de materiais cimentícios disponíveis, cita-se como os mais utilizados a sílica fume ou microsilica e as cinzas volantes. O emprego destes produtos em uma dosagem de concreto visa uma melhoria das propriedades do concreto em geral, a saber:

- Melhoria na trabalhabilidade: os aditivos, que são partículas muito finas, diminuem o tamanho e o volume de vazios;

- Resistência à fissuração térmica: sabendo-se que o calor máximo de hidratação de um concreto ocorre cerca de uma semana após seu lançamento, essas partículas contribuem na estabilização da temperatura, diminuindo a elevação térmica;

- Aumento da resistência mecânica;

- Maior impermeabilidade do concreto: Estas finas partículas que têm seu tamanho cerca de 100 vezes menor que as partículas de cimento, preenchem os vazios da pasta, diminuindo muito a porosidade do concreto. Em estudos realizados por R.E. Davis, foi constatado que em tubos de concreto contendo 30% de cinza volante, com baixo teor de cálcio na composição do concreto, a permeabilidade era muito menor aos 28 dias.

Dentre os aditivos minerais citados, o material empregado neste estudo será a *Sílica Ativa*, também conhecida como Microsilica ou Sílica Fume. Trata-se de um subproduto com comportamento pozolânico, obtido a partir da fabricação do ferro silício ou silício metálico, ou outros tipos de liga com silício em sua composição.

A sílica ativa ( $\text{SiO}_2$ ) trata-se de um material de alta finura, ou seja, minúsculas partículas de  $0,1\mu\text{m}$  a  $0,2\mu\text{m}$ , composto basicamente de sílica amorfa. No concreto, a sua atuação é de um microfiller, densificando a microestrutura da mistura pelo preenchimento de vazios. As partículas de sílica, em presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio, formando, então, o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), que é um produto com características extremamente cimentantes, atuando não só na interface pasta/ agregado, como

também nos vazios entre os grãos de cimento. Como efeito final deste processo, teremos a obtenção de um concreto com maior resistência nas primeiras idades, menor interferência dos efeitos indesejados de exsudação.

Sua utilização é muito bem aceita para maior parte das combinações cimentícias que podem produzir o CAD, principalmente quando há a necessidade de obtenção de resistências maiores que 80 MPa.

### **2.4.3 Agregados**

O papel dos agregados na obtenção de concretos de qualidade é indiscutível. Nas empresas fornecedoras de concreto é usual a constante aferição da qualidade dos agregados, sendo ainda mais importante no concreto de alto desempenho devido ao resultado final desejado. No caso do agregado graúdo utilizado em uma mistura que visa produzir um CAD, cabe uma consideração de grande importância: nos concretos convencionais, o agregado supera a resistência da matriz, enquanto que no CAD, a matriz fica extremamente fortalecida. Daí, como será estudado posteriormente, há a necessidade de se adotar um agregado graúdo de altíssima qualidade, evitando que este se transforme no elo mais fraco do concreto.

Mundialmente existem diversas regulamentações fazendo menção à qualidade dos agregados que devem ser utilizados para produção do CAD. A norma brasileira que regulamenta o comportamento dos agregados é a NBR 7211/83[14] da ABNT.

Para os agregados graúdos, é imprescindível a observação de alguns fatores que são extremamente relevantes na escolha, pois suas propriedades mecânicas influenciam diretamente as propriedades do CAD.

No entanto, é sempre cabível a consideração de que, para qualquer que seja o agregado graúdo, existirá um valor crítico da relação água/ aglomerante, abaixo do qual, qualquer redução adicional deste fator não resultará em aumento significativo da resistência à compressão. A partir deste ponto, o agregado graúdo passa a constituir o elo mais vulnerável do concreto. Dentre os pontos mais relevantes, serão destacados:

- *Origem mineralógica da rocha-mãe*: Dependendo da origem do agregado, há influência direta na resistência. Algumas rochas apresentam desempenho superior, como granito, basalto e outras, inferior como o gnaiss;

- *Tamanho Máximo do Agregado*: Este fator influencia diretamente na trabalhabilidade do concreto fresco pela redução ou acréscimo na sua quantidade de água devido ao aumento ou diminuição do tamanho do agregado respectivamente. No entanto, deve-se considerar sempre o efeito conflitante se o aumento do tamanho do agregado pode ou não ser suficiente para o aumento da resistência, compensando as modificações na zona de transição. Segundo Aïtcin [3], a experiência mostra que é muito difícil obter concretos com classe III, ou seja, resistências entre 100 –125 MPa, com agregados maiores que 25 mm.

- *Alta resistência à compressão*: É fundamental que a resistência à compressão do agregado seja alta já que no caso de concreto de alto desempenho há uma melhoria na qualidade da matriz e na interface de pasta agregado;

- *Forma e textura superficial*: Como no caso de concreto de alto desempenho é fundamental a boa aderência entre a interface pasta agregado, é necessário considerar formas que propiciem este fator, assim como uma textura que minimize o consumo de água;

- *Módulo de Deformação*: Para que exista uma adequada distribuição de tensões entre matriz e agregados e para que a fissuração da interface pasta agregado seja reduzida quando houver contração na pasta devido ao endurecimento, é necessário que o módulo de deformação seja semelhante ao da pasta de cimento;

- *Limpeza e isenção de materiais pulverulentos* : Trata-se de uma melhoria na aderência pasta agregado;

- *Processo de britamento da rocha*: É preciso considerar que a forma como o agregado foi extraído e a sua rocha mãe também são relevantes no seu desempenho. De um modo geral, os fragmentos menores são mais resistentes, pois eles contêm menos defeitos que os grandes.

Para os agregados miúdos, devem ser observadas, ao menos, as seguintes condições básicas, conforme orientação do ACI 363R[15]:

- *Forma e angulosidade* : agregados constituídos por partículas arredondadas e lisas tendem a necessitar de menos água para alcançar boa

trabalhabilidade, daí serem mais recomendados para o concreto de alto desempenho;

- *Granulometria e Módulo de finura*: É recomendado que a granulometria seja uniforme e contínua para atingir-se uma boa trabalhabilidade com pouca água. Entretanto, também é aconselhável que seja um pouco grossa, pois as misturas usadas em CAD já apresentam alto teor de partículas finas. Desta forma, o módulo de finura mínimo recomendado é de 2,8.

## 2.5 Procedimentos de Dosagem Aplicados ao CAD

Muitas são as abordagens na literatura sobre metodologias de misturas elaboradas para o CAD, compreendendo-se, então, que a escolha dos melhores materiais disponíveis trata-se apenas de uma etapa em todo o processo de sua elaboração.

Segundo Mindess[2], muito trabalho ainda há de ser realizado antes que algum método de dosagem seja adotado e aceito de forma geral. Ratificando tal entendimento, Aitcin[3] cita que a composição e otimização de mistura para o CAD com seleção de todos os materiais é uma ciência.

De fato, tem-se conhecimento de que os ajustes de materiais ainda dependem de muito estudo e adaptações, principalmente visando utilizar os materiais disponíveis em cada região, de forma a adequá-los às necessidades. Não há sentido em imaginar-se a realização de uma grande obra no interior do Brasil utilizando CAD, tendo em sua composição um agregado graúdo de excelente qualidade com origem flúvio-glacial.

A tabela 2.1 apresenta composições com resistências aproximadas e com quantidades divergentes na composição da mistura, ilustrando bem a situação de que cada material apresenta uma particularidade referente ao local de sua procedência, processo de elaboração e cura.

Tabela 2.1 - Comparação entre diferentes procedimentos de dosagem para resistências próximas.

	<b>Dosagem segundo Aïtcin, Shirlaw e Fines</b>	<b>Dosagem na área de Chicago (adaptado de Burg e Ost)</b>
Água ( kg/ m <sup>3</sup> )	165	158
Cimento ( kg/ m <sup>3</sup> )	451	564
Sílica ativa ( kg/ m <sup>3</sup> )	-	
Agregado Graúdo ( kg/ m <sup>3</sup> )	1030	1068
Agregado Miúdo ( kg/ m <sup>3</sup> )	745	647
Superplastificante (l /m <sup>3</sup> )	11.25	11.61
Retardador (l/ m <sup>3</sup> )	-	1.12
Fator água/ aglomerante	0.37	0.281
Resistência (fc) 28 dias (MPa)	79.80	78.6
Resistência (fc) 91 dias (MPa)	87.0	86.5

Vários estudos foram apresentados, conforme ilustra a figura 2.2 e em todos percebe-se um consenso com relação aos seguintes pontos : quanto maior o fator água/material cimentício menor a resistência, o uso de sílica ativa como material cimentício suplementar contribui muito no acréscimo de resistência, o CAD utiliza um teor de cimento maior que o concreto convencional e o uso de superplastificante facilita as características de trabalhabilidade para fatores água/ material cimentício baixos.

Os estudos a seguir apresentados partem de um mesmo ponto para o procedimento de dosagem, relacionando o fator água/ material cimentício à resistência desejada. As diferentes curvas demonstram os valores obtidos em pesquisas, cada qual para o seu autor.

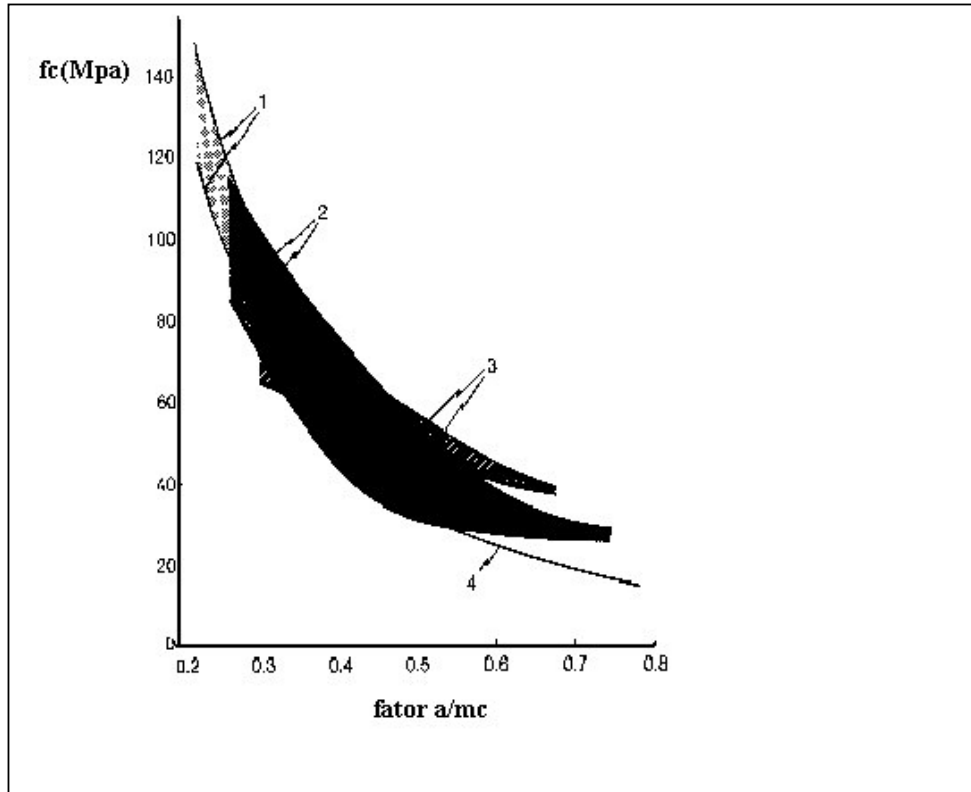


Figura 2.2 - Resistência à compressão x fator água/ aglomerante: (1) Aitcin; (2) Fiorato; (3) Cook; (4) concreto convencional segundo CPCA. Fonte: S. Mindess

A curva (1) representa as relações obtidas por Aitcin[3], a curva (2) os resultados de Fiorato[16] e a curva (3) os de Cook[17].

A partir da obtenção do fator água/ aglomerante, é determinada a combinação dos materiais cimentícios, em seguida as quantidades de agregados até a determinação completa de todos os elementos componentes da mistura, visando a produzir um concreto que obtenha um bom equilíbrio de todas as propriedades desejadas, com menor custo possível.

Infelizmente, não existe para o CAD um único método de dosagem de ampla e geral aceitação. Para o concreto convencional, na América do Norte e em diversos outros lugares do mundo é adotado o ACI 221-1[18]. Este método fornece um procedimento completo para dosagens de concretos com resistências de até 40 MPa e abatimento de 18 cm, não contemplando a utilização de materiais



cimentícios suplementares e superplastificantes. No ACI 211-1, o conceito de volume absoluto é usado para transformar proporções de massas para proporções de volumes considerando que o volume absoluto é a razão entre massa e massa específica do material .

Apesar do ACI 211-1 ser um método de dosagem para concretos convencionais, cabe ressaltar sua importância, pois diversos métodos experimentais para o CAD baseiam-se em seus parâmetros de trabalhabilidade e no volume absoluto, como é o caso de Aïtcin [3], Bharatkumar et al [19] e outros.

O método de dosagem utilizado neste trabalho também é baseado no conceito de volume absoluto, não contemplando a incorporação de ar ao sistema, exceto pela pequena consideração devido à mistura. O procedimento foi elaborado por Aïtcin [3] e é baseado em resultados experimentais e cálculos matemáticos. Tal qual o ACI 211-1[18], o método prevê uma mistura com abatimento entre 18 e 20 cm e a partir de uma resistência desejada é determinado o fator água cimento. A quantidade de água é determinada em função da saturação de superplastificante e assim procede-se a determinação da quantidade de aglomerante destinado à mistura, podendo-se utilizar a combinação de dois ou mais materiais cimentícios.

A quantidade de agregado graúdo é determinada em função de variação de sua forma. Uma vez determinados os teores de água, aglomerante, superplastificante e agregado graúdo, parte-se para determinação do agregado miúdo e devidas correções no traço. A metodologia de dosagem será abordada no capítulo 3, quando será feita a descrição da elaboração dos corpos de prova.

Contudo, quando há necessidade de proceder-se à otimização de uma mistura, visando compatibilizar os custos com as propriedades adequadas a uma determinada situação, não existe uma abordagem teórica específica que permita padronizar o procedimento. Desta forma, Aïtcin [3] sugere a utilização por projeto fatorial, que consiste em elaborar traços experimentais bem planejados de modo a poder explorar uma boa faixa de possibilidades, buscando-se uma solução que atenda aos requisitos desejados. Aliando-se a um ferramental computacional adequado, com a correta análise dos parâmetros de limite, os resultados obtidos podem ser de grande valia.